



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

CAPITULO 6

OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE SUJECIÓN: ANÁLISIS DE RESULTADOS

1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos buscando la combinación de elementos, de entre todos los propuestos, que conduzca a la solución más adecuada para el sistema de sujeción.

Para alcanzar dicha optimización, se utilizarán los resultados obtenidos en el capítulo anterior a partir de las 9 configuraciones diferentes ensayadas, así como otros obtenidos de pruebas complementarias realizadas para la comprobación de alguna propiedad concreta que no haya quedado suficientemente contrastada con los ensayos efectuados inicialmente.

El análisis se realizó, inicialmente, por ensayos, analizándolos uno por uno, para conocer cuales son los componentes de la sujeción que influyen sobre el

parámetro evaluado en el ensayo. En aquellos ensayos en los que no se extrajo ninguna conclusión, el análisis se completó con la realización de ensayos complementarios, encaminados a mejorar la información suministrada en un principio.

Posteriormente, se estudiaron los diferentes componentes de la sujeción, en base al análisis de aquellos parámetros sobre los que el elemento en cuestión tiene cierta influencia. En este nuevo análisis, también se recurrió a la realización de pruebas específicas en aquellos casos en los que la decisión no era evidente, ayudando, de esta forma, a la selección final de la solución óptima del sistema de sujeción.

2. ANÁLISIS POR ENSAYO

2.1. FUERZA DE APRIETE

A priori, los cuatro componentes de la sujeción parecen tener cierta influencia sobre el par de apriete. El anclaje es el encargado de deformar el clip. La placa acodada sirve como límite físico de la deformación del clip. La placa de asiento, en función de su rigidez, se deformará más o menos, pudiendo descargar el muelle con la correspondiente pérdida de apriete. Y por último el clip, que será el que determine el valor final de la fuerza de apriete en función de su constitución, geometría y deformación.

2.1.1. Anclaje

El análisis realizado sobre la influencia del anclaje en la fuerza de apriete, se plasma en la Figura 6.1. En la misma, se comprueba que el tipo de anclaje no parece afectar a este parámetro, ya que tanto VAPE y Sdü PA presentan valores similares en torno a 17 kN, mientras que el anclaje GS toma, indistintamente, valores entre 15 y 18 kN.

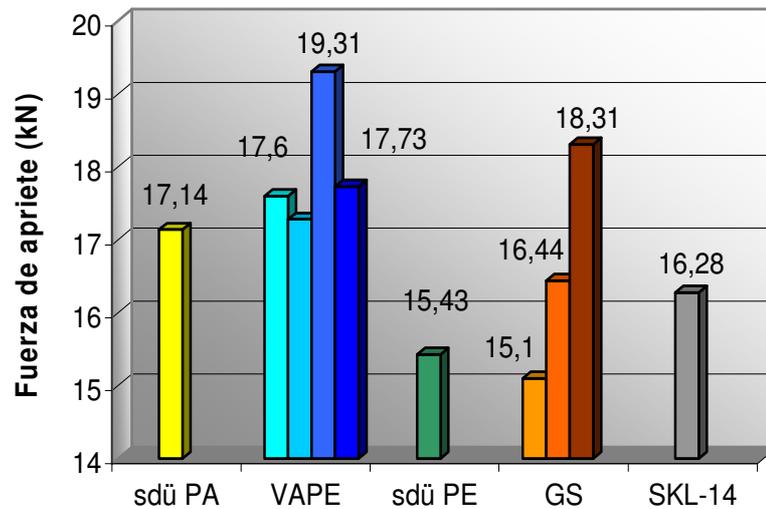


Figura 6.1. Influencia del anclaje en la fuerza de apriete

2.1.2. Placa acodada

En cuanto a la influencia que la placa acodada puede tener sobre el parámetro fuerza de apriete, de la observación de la Figura 6.2, se saca la conclusión de que la placa puede tener cierta influencia. Lo primero que se observa es que la placa maciza Pag-0 presenta algún problema, ya que los tres resultados obtenidos oscilan entre 15 y 16.44 kN, sin llegar, en ningún caso, al mínimo exigido de 17 kN. De la misma forma, la placa de la sujeción SKL-14 tampoco alcanza el valor mínimo, como ya se había indicado en el capítulo anterior. La placa maciza de PA 6.6 se queda muy justa, superando solamente en 0.14 kN el valor mínimo exigido. Por el contrario, tanto la placa A2, como la híbrida, superan el valor mínimo sin problema.

Debido a los valores tan bajos obtenidos de fuerza de apriete se decide analizar la geometría de la pieza maciza comparándola con la de la placa ligera A2. En la Figura 6.3, se puede observar la diferencia existente entre la altura del alojamiento del clip en la placa A2, 20 mm, y el correspondiente en la placa Pag-0, que es de 20 ± 0.5 mm, es decir que en teoría puede oscilar entre los 20.5 y los 19.5 mm.

2.1.3. Placa de asiento

Al representar el valor de la fuerza de apriete en función del tipo de placa de asiento (Figura 6.4), no aparece existir relación alguna, existiendo para una misma placa diferencias apreciables en la fuerza de apriete registrada. Por ejemplo, la placa Modelo C1 con la que se pueden obtener fuerzas de apriete que oscilan entre los 15.1 y 17.73 kN, o la placa Modelo B con la que se consiguen valores comprendidos entre 19.3 y 16.28 kN.

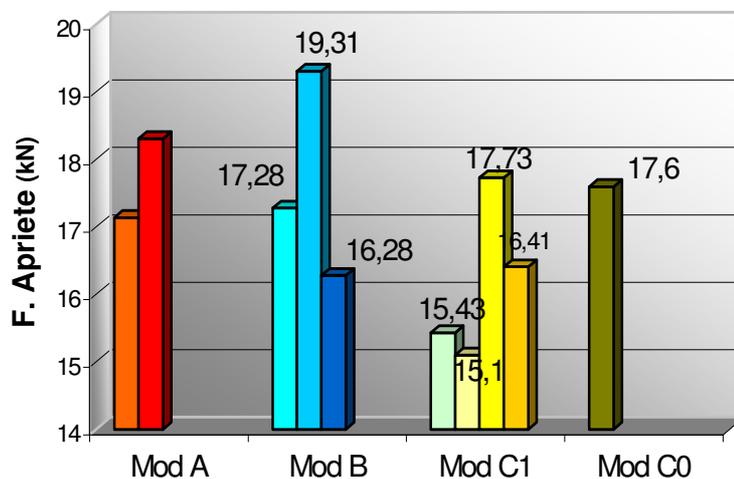


Figura 6.4. Influencia de la placa de asiento en la fuerza de apriete

Se puede hacer una comprobación teórica aproximada para comprobar la escasa influencia que la placa de asiento puede tener sobre el parámetro fuerza de apriete. Si se consideran dos placas de diferentes rigideces, con valores iguales a los extremos permitidos, es decir, 80 y 125 kN/mm, y suponemos que el apriete introducido por la sujeción está en torno a los 20 kN, el acortamiento sufrido por la placa más blanda se sitúa en 0,25 mm y en 0.16 mm la más dura. Por tanto, entre las dos habría una diferencia de 0.09 mm de acortamiento, lo que supone una descarga muy pequeña del muelle (clip), o lo que es lo mismo una variación en la fuerza de apriete muy pequeña.

2.1.4. Clips

En la Figura 6.5, se representa el valor de la fuerza de apriete en función del clip elástico y se puede comprobar que, aunque el clip es el causante directo de la fuerza de apriete, el valor de ésta es independiente del clip empleado. Por ejemplo para la propuesta Clip C, se obtuvieron cinco valores muy diferentes que oscilaron entre los 15.1 y los 19.31 kN.

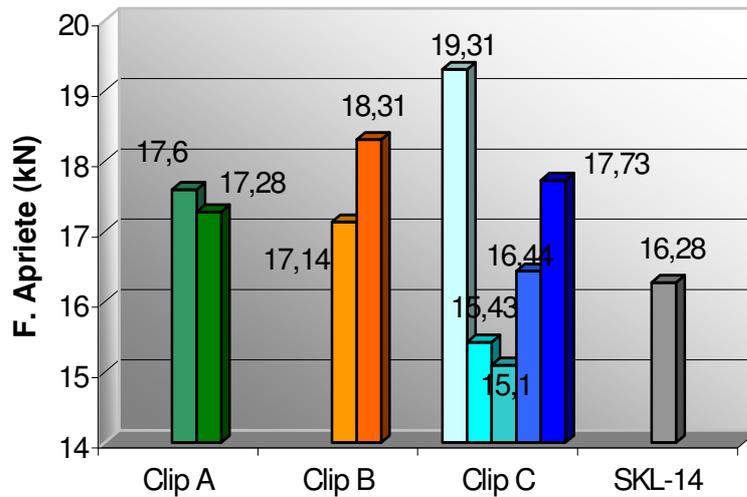


Figura 6.5. Influencia del clip elástico en la fuerza de apriete

Los tres modelos de clip SKL-1 (A, B y C) presentan un comportamiento mecánico similar, por tanto, las variaciones obtenidas en la fuerza de apriete son ocasionadas por un componente diferente. Después de haber analizado los cuatro que componen el conjunto, parece claro que este componente es la placa acodada. El clip SKL-14 presenta una geometría diferente al SKL-1, y por tanto un comportamiento mecánico diferente, que además no alcanza el límite permitido, como ya se vio en el capítulo 5.

2.2. RIGIDECES

En la Figura 6.6, se representa el valor de la rigidez vertical secante P_0/P_{0+75} en función de la placa de asiento empleada y se puede comprobar que, salvo la placa Modelo C0, que se queda con una rigidez inferior a 70 kN/mm, el resto supera el límite indicado en la especificación.

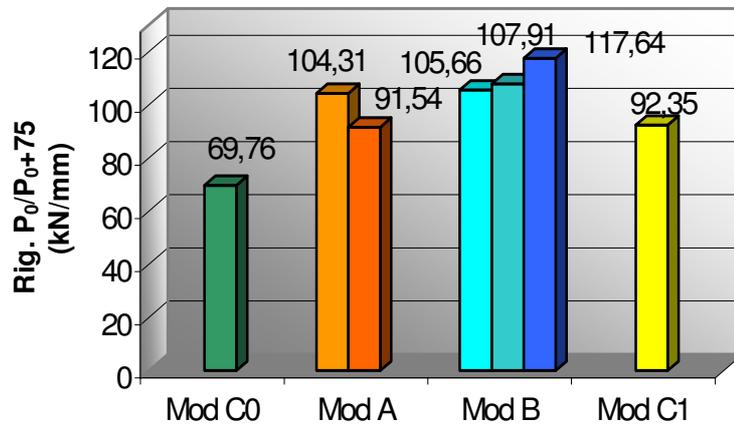


Figura 6.6. Influencia de la placa de asiento en la rigidez P_0/P_{0+75}

También se puede comprobar que las placas de elastómero termoplástico de poliéster (TPE) superan la barrera de los 100 kN/mm excepto una placa Modelo A, que se queda por debajo de 92 kN/mm.

En cuanto al ensayo de rigidez 5/80, los resultados mantienen la misma tónica que en el caso anterior, como puede observarse en la Figura 6.7.

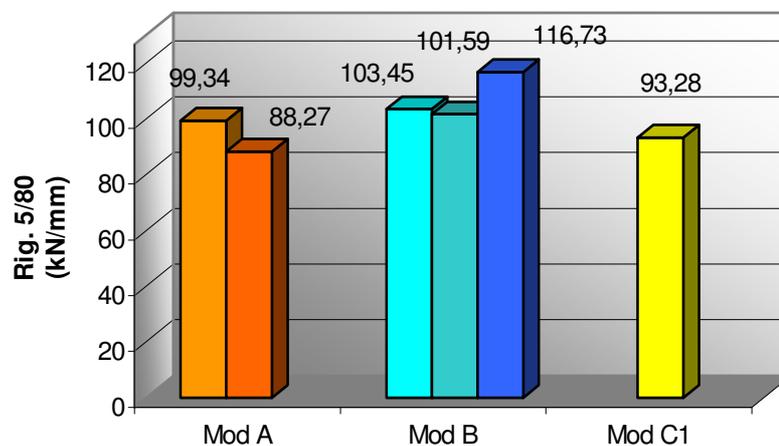


Figura 6.7. Influencia de la placa de asiento en la rigidez 5/80

La rigidez 100/200 es superada por todas las placas, aunque se ve una clara diferencia entre las placas de TPE con valores superiores a 228 kN/mm y la placa Modelo C1 que solamente alcanza el valor de 122.67 kN/mm (Figura 6.8). La placa Modelo C1 mantiene su rigidez incluso a cargas altas debido a su diseño de resaltes en una sola cara, ya que éstos tienen una mayor esbeltez que los que

presentan los diseños con resaltes por ambas caras, que se agotan mecánicamente antes debido a su menor altura, incrementando la rigidez de la placa a cargas altas.

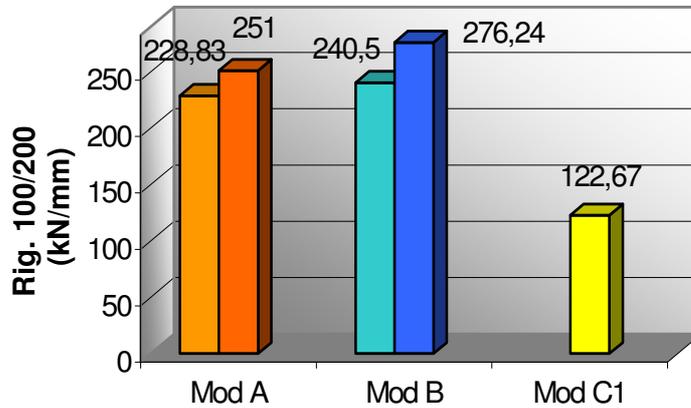


Figura 6.8. Influencia de la placa de asiento en la rigidez 100/200

Por último, en la rigidez dinámica a baja frecuencia, también se muestra la diferencia existente entre los dos grupos, por un lado las placas de TPE alcanzan valores entre 140 y 160 kN/mm, mientras que la placa Modelo C1 supera los 180 kN/mm (Figura 6.9).

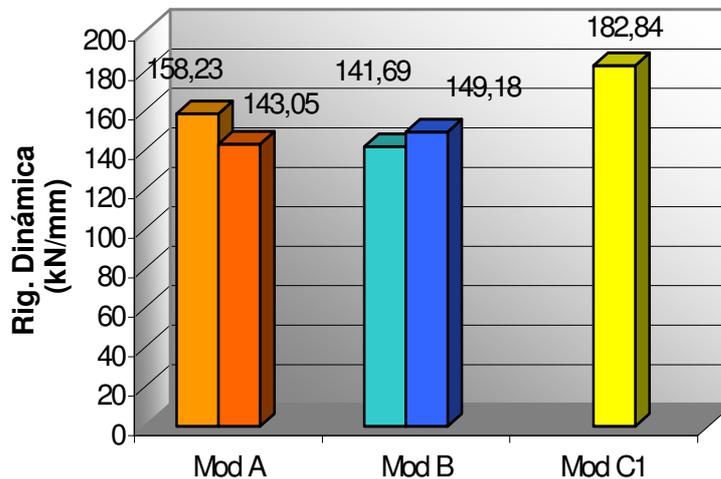


Figura 6.9. Influencia de la placa de asiento en la rigidez dinámica

La única conclusión extraída de los cuatro ensayos de rigidez es que la placa Modelo C0 se queda fuera de tolerancias, mientras que los otros tres modelos, en principio, y a falta del estudio del resto de pruebas, son válidos.

2.3. RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO LONGITUDINAL

Al intentar relacionar la resistencia al deslizamiento longitudinal (RDL) con los diferentes componentes de la sujeción, ninguno de ellos parecen influir significativamente en este parámetro al haberse obtenido diferencias muy pequeñas de unas configuraciones a otras.

El hecho de que el parámetro resistencia el deslizamiento longitudinal no sea representativo puede deberse a tres razones fundamentales:

- ❑ Por la aplicación de carga en valores discretos muy elevados (2.5 kN, que supone en muchos de los casos hasta el 25 % del resultado obtenido).
- ❑ Por no haber tenido en cuenta el factor rugosidad superficial de la parte superior del patín en contacto con el clip.
- ❑ Por el efecto de clavado del clip sobre el patín.

A pesar de estos resultados, parece evidente que al incrementarse la fuerza normal, deberían incrementarse las fuerzas de rozamiento, o lo que es lo mismo la resistencia al deslizamiento. En este caso, la fuerza normal equivaldría a la fuerza de apriete, por lo que debería existir una correlación lineal entre los dos parámetros, de forma que la pendiente de la misma indicaría el valor del coeficiente de rozamiento del conjunto. En la Figura 6.10 se representa esta relación, comprobando que la RDL tiende a incrementarse al aumentar la fuerza de apriete

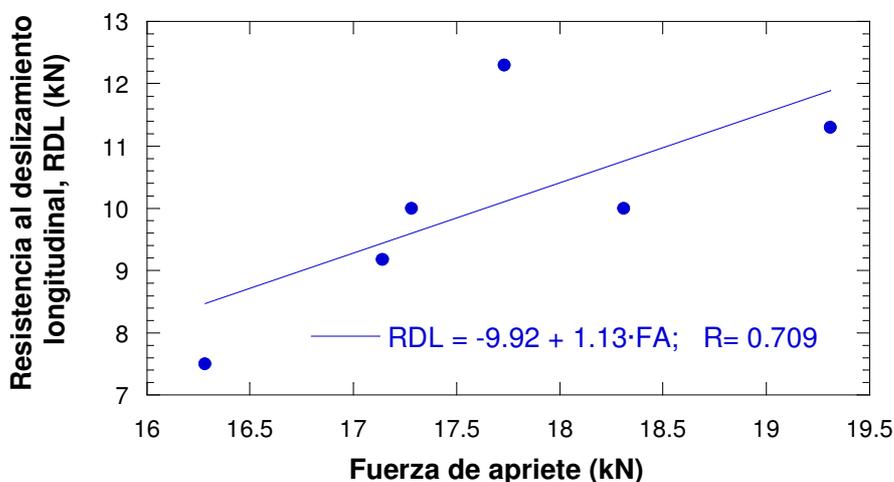


Figura 6.10. Relación entre la RDL y la fuerza de apriete

Por lo tanto, será la placa acodada, componente que más influía sobre el parámetro fuerza de apriete, el que, de la misma forma, tenga una mayor influencia sobre la RDL, teniendo en cuenta, además, que los resultados pueden depender además de fenómenos locales como son el estado superficial del carril en el contacto con la placa de asiento o el efecto de clavado del clip sobre el ala del carril.

2.4. ENSAYO DINÁMICO DE CARGA INCLINADA

El ensayo de carga inclinada, además de facilitar información de la sujeción directamente, proporciona información indirecta por medio de otros cuatro ensayos que son evaluados previa y posteriormente a la realización del mismo. Estos cuatro ensayos son los de fuerza de apriete, resistencia al deslizamiento longitudinal y rigideces P_0/P_{0+75} y $5/80$.

2.4.1. Fuerza de apriete

En la Figura 6.11 se recoge el porcentaje de pérdida de fuerza de apriete tras el ensayo dinámico. Se puede observar que la propuesta VAPE permanece en los tres casos estudiados por debajo del 8.4 % de pérdida, mientras que las otras dos, Sdü PA y GS se van a valores de 13.3 y 11.1 %, respectivamente.

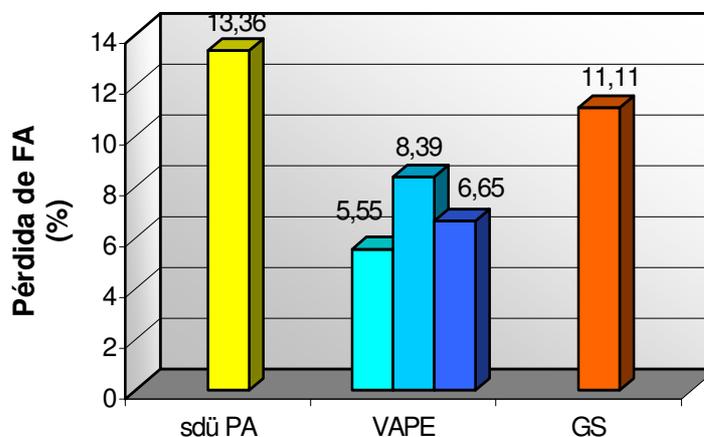


Figura 6.11. Influencia del anclaje en la pérdida de fuerza de apriete tras el ensayo dinámico

Una posible explicación a este comportamiento se puede encontrar en la distinta geometría de las soluciones aportadas. Mientras el tornillo VAPE presenta un paso de 4 mm, el paso de los tirafondos de los otros anclajes se sitúa en 12 mm y a igualdad de giro de desapriete, por efecto de cargas cíclicas, por ejemplo, la pérdida de fuerza de apriete será mayor en los tirafondos que en el tornillo VAPE.

Al representar la pérdida de Fuerza de Apriete tras el ensayo dinámico en función de la placa de asiento empleada (Figura 6.12) se puede comprobar que es la placa A2 la que mejor mantiene la fuerza de apriete, estableciéndose una pérdida inferior al 7 %.

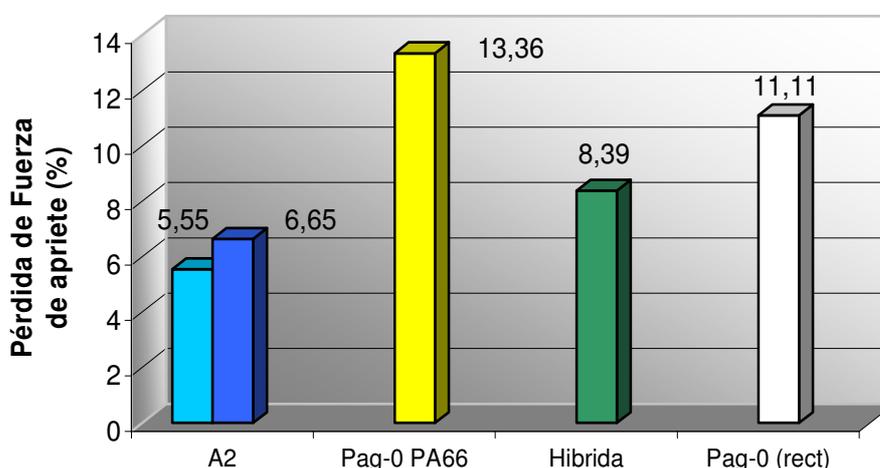


Figura 6.12. Influencia de la placa acodada en la pérdida de fuerza de apriete tras el ensayo dinámico

No se encuentra una justificación a que sea la placa acodada la que influya en este parámetro, y se mantiene que es el anclaje empleado el componente que más influye en la pérdida de fuerza de apriete.

2.4.2. Resistencia al deslizamiento longitudinal

Tras el ensayo dinámico se acentúa la escasa relación entre la pérdida de resistencias al deslizamiento con ninguno de los componentes de la sujeción. En gran medida debido el efecto de clavado del clip sobre el patín del carril, intensificado por las acciones dinámicas. Este parámetro, por tanto, no ha permitido extraer ninguna conclusión válida para el análisis.

2.4.3. Rigideces

En la Figura 6.13 se comprueba que para las placas de TPE, incluso la placa Modelo A con rigidez 92 kN/mm, el incremento de rigidez P_0/P_{0+75} no supera el 8%. Sin embargo la placa de Modelo C1 se va hasta el 23.86 % de incremento rozando el 25 % permitido por la especificación técnica.

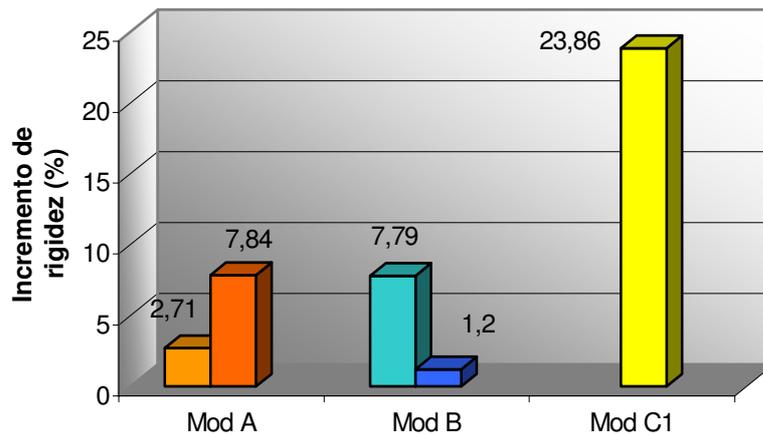


Figura 6.13. Influencia de la placa de asiento en el incremento de rigidez P_0/P_{0+75} tras el ensayo dinámico

Con el ensayo de rigidez 5/80 se obtienen resultados similares, siendo la placa Modelo C1 la que vuelve a manifestar una mayor pérdida de propiedades tras el ensayo dinámico. Los resultados obtenidos para las placas de TPE son algo irregulares, ya que, en dos de las placas ensayadas, aparece un descenso en la rigidez, como puede verse en la Figura 6.14.

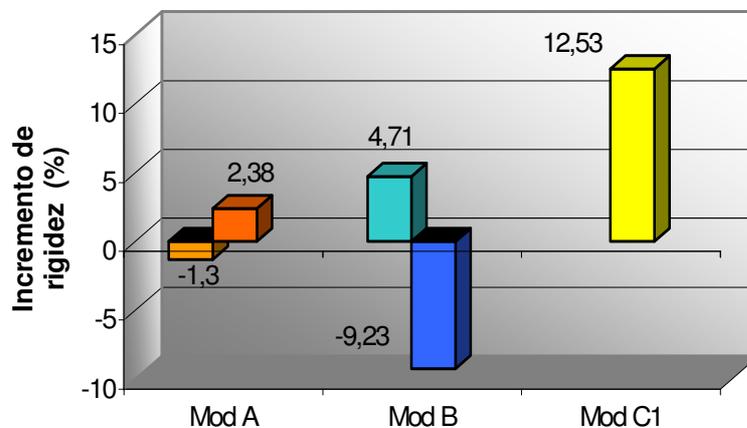


Figura 6.14. Influencia de la placa de asiento en el incremento de rigidez 5/80 tras el ensayo dinámico

2.4.4. Medidas directas del ensayo dinámico

Tras comprobar que el ensayo dinámico afecta a la pérdida de fuerza de apriete en función del anclaje empleado, se realizó, inicialmente, un análisis para tratar de comprobar la influencia que pudiera tener el tipo de anclaje en las medidas directas obtenidas del ensayo dinámico, es decir, desplazamientos remanentes y pérdida de espesor. A la vista de los gráficos de la Figura 6.15 a Figura 6.18, no se puede concluir nada definitivo, ya que los valores extremos, máximo y mínimo, en casi todos los parámetros medidos corresponden al mismo tipo de anclaje, el VAPE, lo cual hace poco probable que el anclaje sea el componente crítico en este análisis.

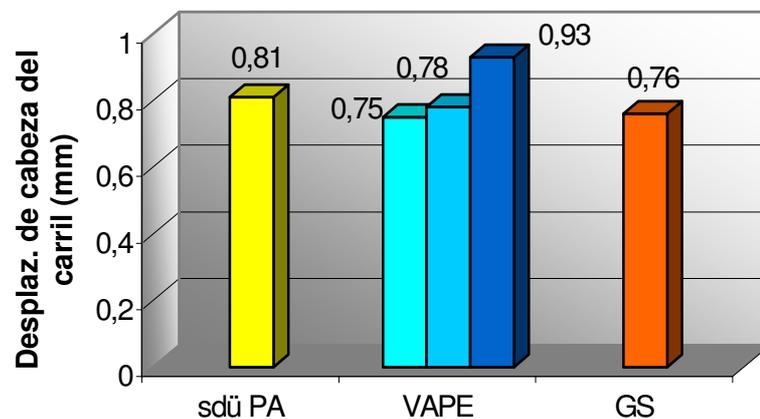


Figura 6.15. Influencia del anclaje en el desplazamiento de la cabeza del carril en el ensayo dinámico

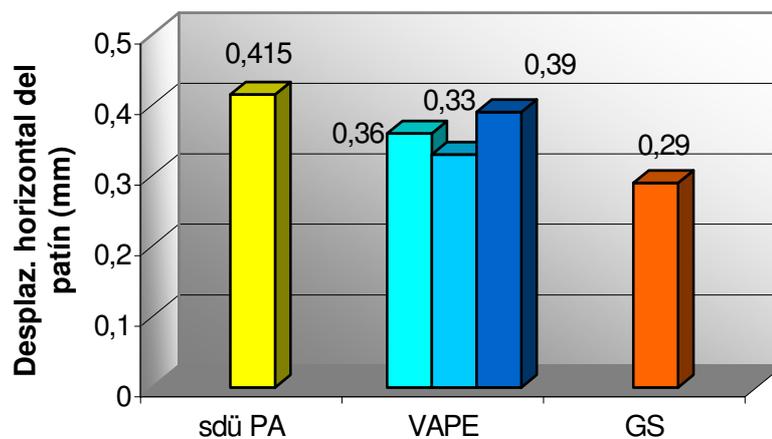


Figura 6.16. Influencia del anclaje en el desplazamiento horizontal del patín del carril en el ensayo dinámico

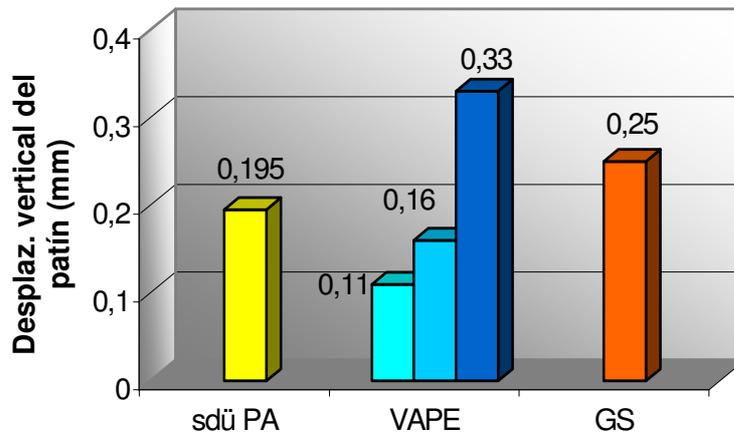


Figura 6.17. Influencia del anclaje en el desplazamiento vertical del patín del carril en el ensayo dinámico

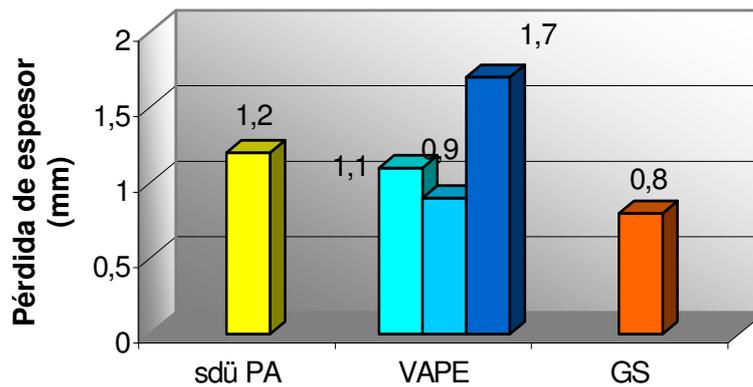


Figura 6.18. Influencia del anclaje en la pérdida de espesor de la placa de asiento tras el ensayo dinámico

El siguiente estudio trata de comprobar la influencia del tipo de placa de asiento sobre las medidas directas del ensayo dinámico, tras comprobar que el tipo de anclaje no parece influir y habiendo corroborado, además, que la placa de asiento influye en el incremento de su propia rigidez, o lo que es lo mismo, en la pérdida de sus propiedades mecánicas.

En el desplazamiento de la cabeza del carril (Figura 6.19) se comprueba que es la placa Modelo C1 con casi 0.93 mm de desplazamiento, la que está más cerca del límite máximo impuesto por la especificación, manteniéndose las placas de TPE por debajo de los 0.78 mm de desplazamiento.

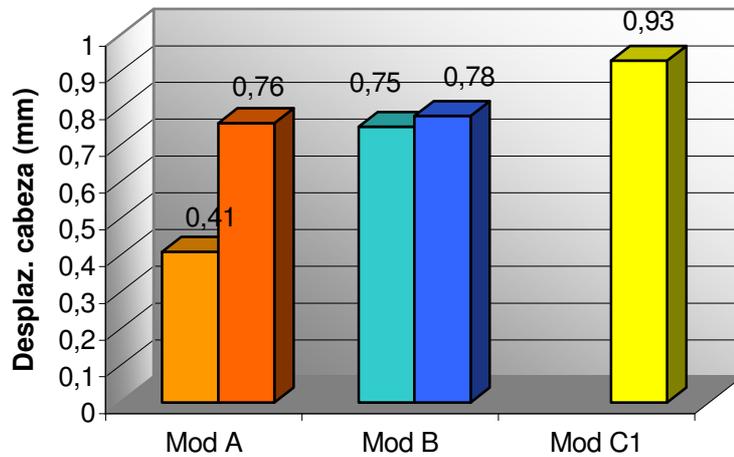


Figura 6.19. Influencia de la placa de asiento en el desplazamiento de la cabeza del carril en el ensayo dinámico

En el desplazamiento horizontal del patín del carril la placa de asiento no parece tener una gran importancia, ya que, como se puede observar en el gráfico de la Figura 6.20, se mantiene prácticamente constante, independientemente de la placa empleada.

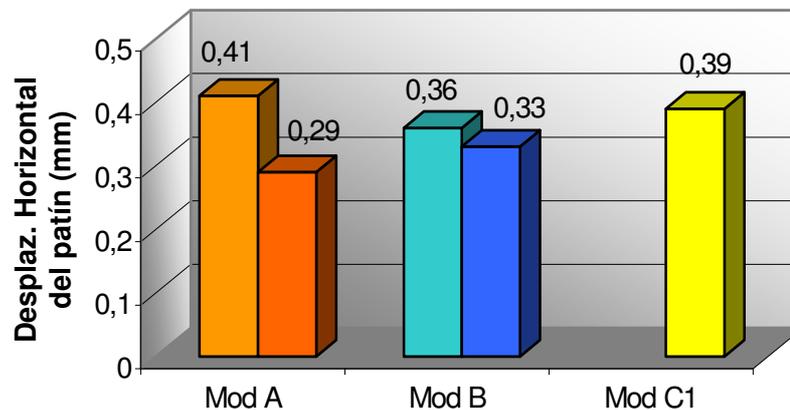


Figura 6.20. Influencia de la placa de asiento en el desplazamiento horizontal del patín del carril en el ensayo dinámico

Donde si se muestra influyente la placa de asiento es en el desplazamiento vertical del patín del carril (Figura 6.21) y en la pérdida de espesor tras el ensayo dinámico (Figura 6.22).

Se comprueba que, para la placa Modelo C1, el desplazamiento vertical alcanza el valor de 0.33 mm, seguido de la placa de TPE de menor rigidez ($k=91.54$ kN/mm, Modelo A) con 0.25 mm, manteniéndose el resto de placas (con $k>100$ kN/mm) por debajo de 0.20 mm.

En cuanto al espesor también es la placa Modelo C1 la que presenta un mayor desgaste, llegando en algunas zonas hasta 1.7 mm, manteniéndose las placas de TPE con desgastes inferiores a 1.2 mm.

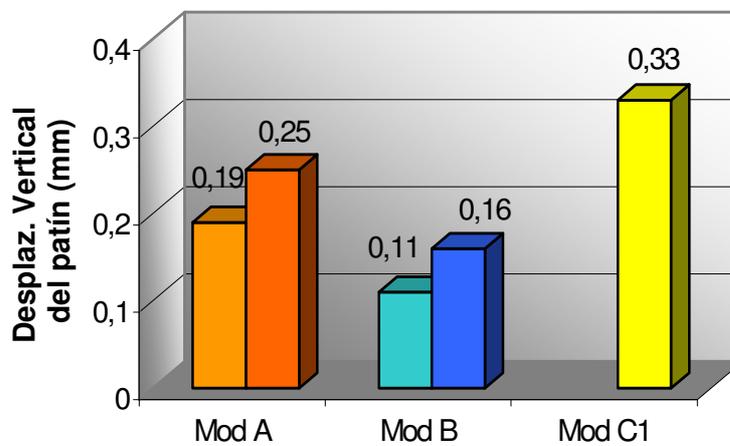


Figura 6.21. Influencia de la placa de asiento en el desplazamiento vertical del patín del carril en el ensayo dinámico

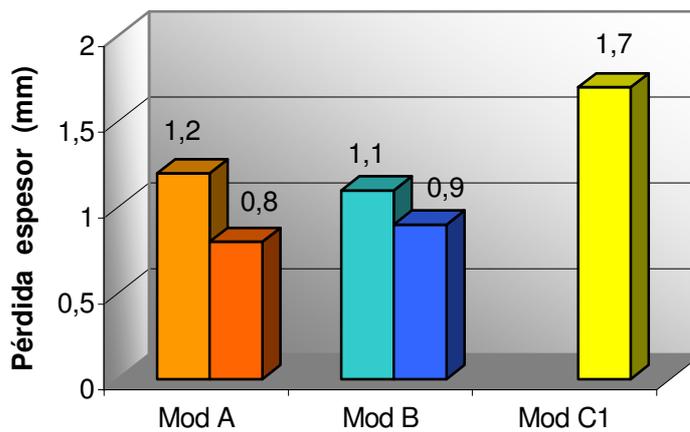


Figura 6.22. Influencia de la placa de asiento en su desgaste tras el ensayo dinámico

Por último, el desplazamiento horizontal del carril, en principio, parece tener una relación directa con la placa acodada, equivaliendo este desplazamiento al espacio cedido por la placa debido a la deformación sufrida por la misma bajo los efectos de la carga dinámica. Pero, a la vista de los resultados obtenidos con las configuraciones ensayadas, Figura 6.23, no parece existir tal influencia, ya que ante dos placas de la misma geometría, la Pag-0, y de diferentes materiales se desplaza un 45 % más la de PA 6.6 con mayor refuerzo de fibra de vidrio, cuando la PA 6 es más deformable.

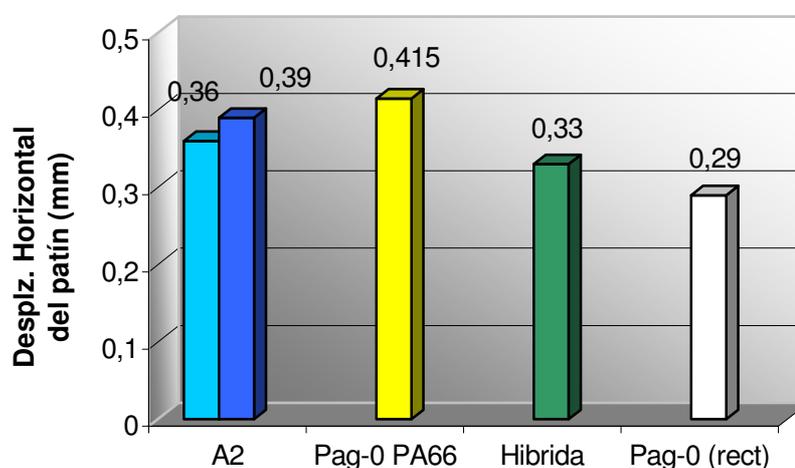


Figura 6.23. Influencia de la placa acodada en el desplazamiento horizontal del patín tras el ensayo dinámico

2.5. ATENUACIÓN DE IMPACTOS

El ensayo de atenuación al impacto arroja resultados irregulares frente al comportamiento de la placa bajo este tipo de acciones. Al observar el gráfico de la Figura 6.24 se observa una diferencia enorme entre dos placas semejantes, la placa Modelo A oscila entre atenuaciones del 16 y del 35,67 %. Este hecho deja claro que, por la disposición del ensayo, no solamente es la placa de asiento la encargada de atenuar el impacto, sino que el acabado de la traviesa, sobremanera en su superficie inferior, juega un papel de gran importancia en el valor medido en este ensayo.

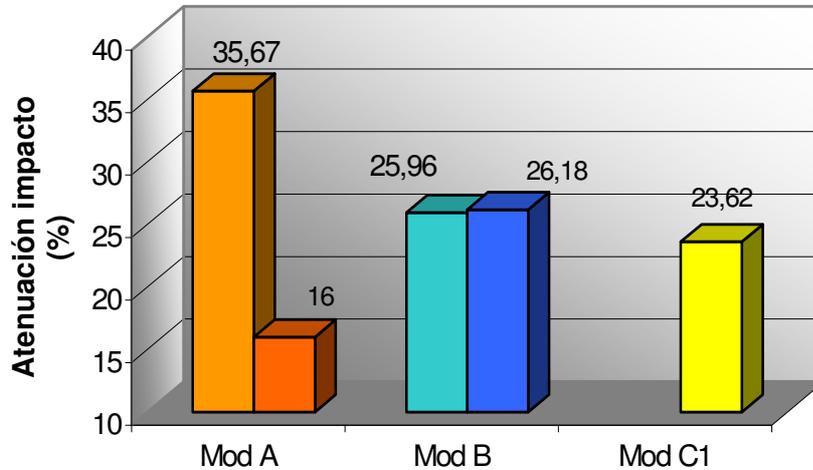


Figura 6.24. *Influencia de la placa de asiento en la atenuación de impactos*

Debido a los resultados irregulares obtenidos, el ensayo de atenuación no se empleará para la optimización del sistema de sujeción.

En la actualidad, el departamento de Ciencia e Ingeniería de los Materiales de la Universidad de Cantabria está trabajando en el desarrollo de un nuevo dispositivo de ensayo en base a la normativa vigente [57] y a la utilización de un péndulo que golpea sobre el carril [97], pero los resultados obtenidos hasta la fecha no son muy optimistas, encontrándose, de nuevo, dependencia de la traviesa empleada. En la bibliografía consultada [36-39] se ha solucionado al problema en base al conocimiento de la excitación de entrada, que en los ensayos realizados hasta la fecha, de acuerdo a la normativa vigente, es un parámetro desconocido. Este método implicaría el empleo de equipos especiales, como el martillo instrumentado o el excitador electrodinámico, para la resolución del problema. Pero este aspecto se queda fuera del objetivo de la tesis y será incluido entre las posibles investigaciones futuras.

2.6. CARGA VERTICAL

El ensayo de carga vertical, tal como está configurado en la especificación técnica, afecta única y exclusivamente al anclaje, ya que el resto de componentes de la sujeción ni siquiera se montan para el ensayo.

En la Figura 6.25, se aprecia como el anclaje SDÜ PE se desmarca claramente del resto (51.3 kN), no superando el valor exigido en la especificación. En cuanto al resto, es el VAPE el que se queda más corto con valores entre 75.5 y 92.5 kN y le siguen, en orden creciente, el GS (105 kN) y el SDÜ PA (131.8 kN). La mayor resistencia a la extracción del casquillo SDÜ PA puede deberse a la mayor sección neta de éste, al ser inferior la sección triangular del filete del tirafondo nº 9 que la sección trapezoidal del filete del tirafondo GS.

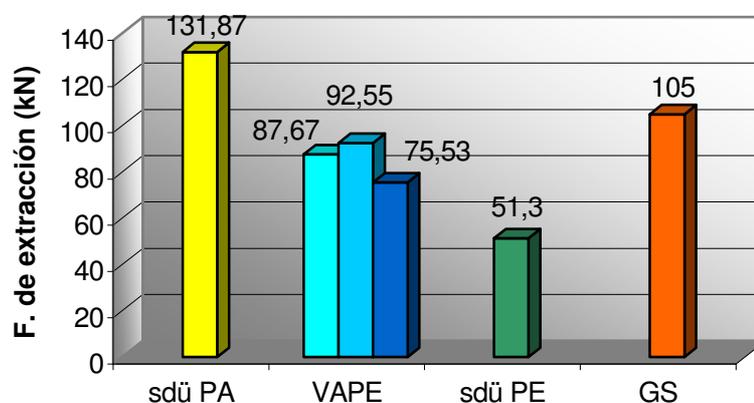


Figura 6.25. Influencia del anclaje en la Fuerza de Extracción

La tipología de la extracción de cada uno de los anclajes es distinta y se representa en las Figuras 6.26 a 6.29.

El anclaje SDÜ PA presenta un comportamiento que ofrece dos tramos diferenciados en las curvas carga-desplazamiento (Figura 6.26). En el primer tramo de la curva es el conjunto espiga-tirafondo el que responde, se supera el límite elástico del tirafondo y alcanza el valor máximo de carga, momento en el que se produce la rotura de la espiga, pasando en ese momento a actuar la carga sólo sobre el tirafondo, ya parcialmente plastificado, con su correspondiente endurecimiento y aparición de cuello de estricción, que, como se puede observar en la gráfica correspondiente, muestra una resistencia inferior a la que presenta el conjunto.

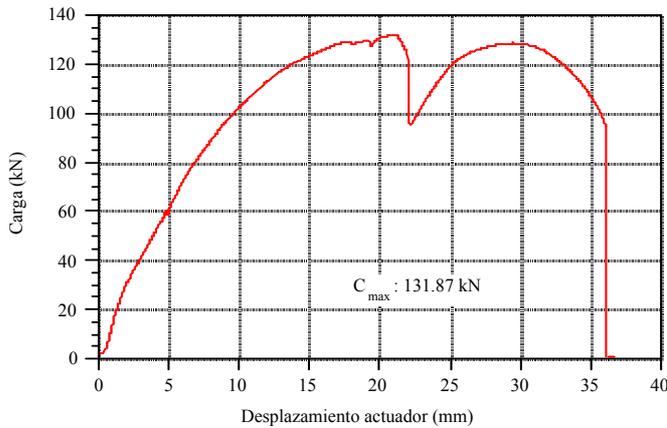


Figura 6.26. Comportamiento del anclaje SDÜ PA en extracción y rotura

El anclaje VAPE (Figura 6.27) presenta una fractura totalmente diferente a la anterior. La curva representa el ensayo del conjunto poliamida-metal, pero sin llegar a plastificar el tornillo. La rotura se produce por los filetes internos de la espiga, que son arrancandos por completo a todo lo largo de la rosca del tornillo.

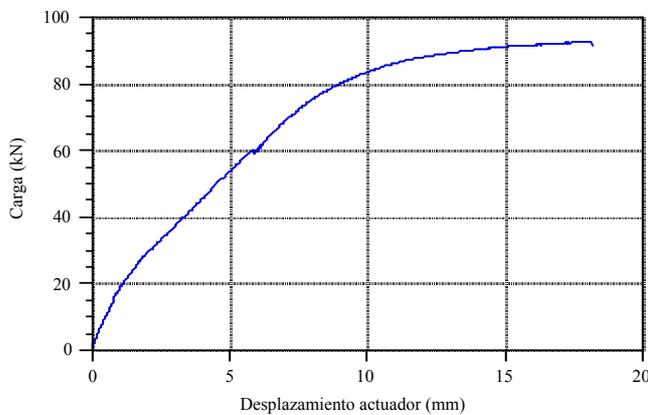


Figura 6.27. Comportamiento del anclaje VAPE en extracción y rotura

La espiga SDÜ PE (Figura 6.28) es la que presenta menor resistencia a su extracción. En la gráfica de comportamiento se puede comprobar cómo resiste el conjunto PE-metal hasta que se produce la rotura de la espiga a la altura del inicio del tirafondo, momento éste a partir del que se comienza a extraer la parte de la vaina rota, desgarrando sus filetes exteriores contra el muelle metálico embebido en el hormigón de la traviesa.

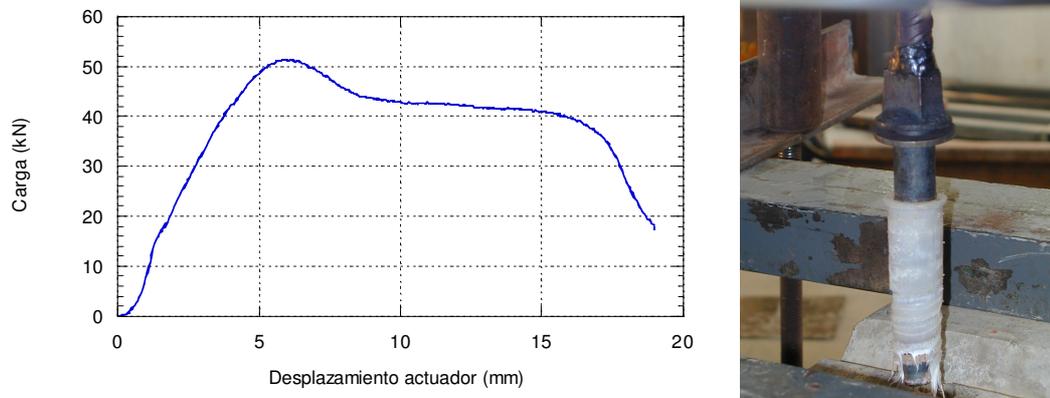


Figura 6.28. Comportamiento del anclaje SDÜ PE en extracción y rotura

Por último, la espiga GS (Figura 6.29) presenta un comportamiento similar a la primera, con las únicas diferencias que, al romper la espiga, el tirafondo se mantiene en campo elástico y que el tirafondo soporta mayor carga el sólo que el conjunto espiga-tirafondo antes de la rotura de la vaina.

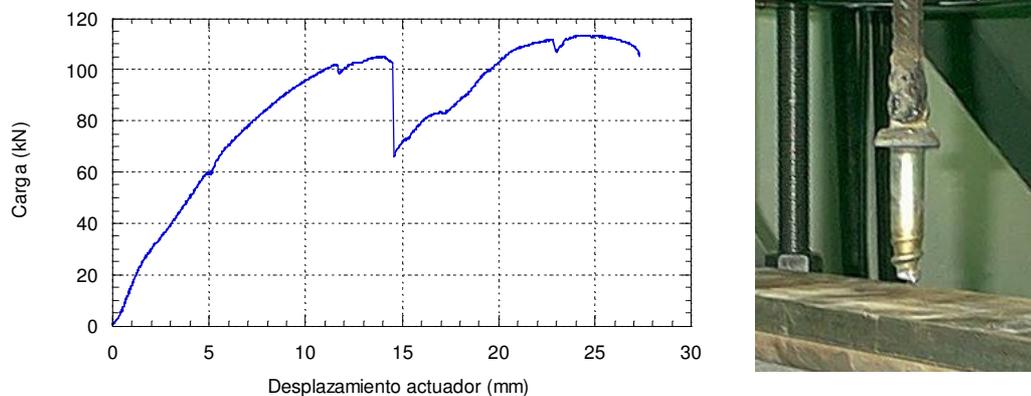


Figura 6.29. Comportamiento del anclaje GS en extracción y rotura

2.7. RESISTENCIA A LA TORSIÓN

El esfuerzo aplicado sobre la sujeción en el ensayo de torsión lo recibe directamente la placa acodada. El carril, en su intento de giro, pivota sobre uno de

los vértices de la placa, que será la encargada de evitar esa rotación. En el gráfico de la Figura 6.30 se muestra el momento aplicado para conseguir girar el carril 1º y, a la vista de los resultados, parece no ser muy influyente el tipo de placa acodada elegida. El valor más pequeño del momento se obtiene con una de las placas ligeras, 1 N·m, pero con una placa idéntica se obtiene en otra batería de ensayos prácticamente el doble. De la misma forma, la placa Pag-0 de PA 6 presenta una resistencia a torsión un 40 % superior a la placa Pag-0 de PA 6.6, cuando intuitivamente debería ser lo contrario, ya que la PA 6 es más deformable que la PA 66, siendo, además, menor el refuerzo de vidrio.

Por esta razón se deshecha esta prueba como criterio para la optimización de la placa acodada. En todos los casos, incluso el valor más pequeño, supera ampliamente la cota inferior establecida en la especificación, 0.75 N·m.

Como la placa acodada parece no ser un elemento influyente en este parámetro, se podría achacar la variabilidad de estos resultados a la geometría de la traviesa en concreto, a cómo de separados se encuentran los anclajes insertados en la misma. Mientras más espaciados se encuentren, mayor holgura existirá entre el carril y las placas acodadas y, por tanto, menor esfuerzo se precisará para girarlos.

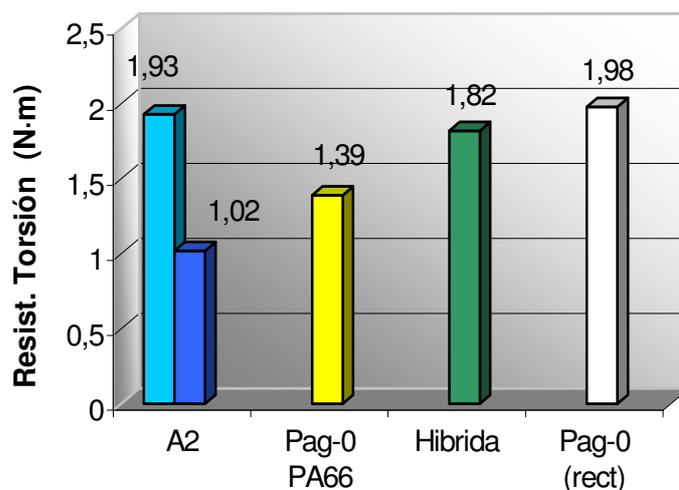


Figura 6.30. Influencia de la placa acodada en la resistencia a torsión

2.8. RESISTENCIA ELÉCTRICA

A priori, los componentes que pueden influir sobre el comportamiento eléctrico del conjunto de sujeción son el anclaje y el clip, esencialmente por estar constituidos por materiales metálicos. La placa acodada y de asiento no originan variaciones en este comportamiento, ya que se trata, en todos los casos, de materiales con gran capacidad de aislamiento.

2.8.1. Anclaje

La influencia que el anclaje pudiera tener en la resistencia eléctrica entre los dos hilos, a la vista del gráfico de la Figura 6.31, se comprueba que no está muy clara. Por un lado, el anclaje SDÜ PA inyectada con poliamida reforzada y dotado de muelle metálico tiene un buen aislamiento (10 M Ω). Por otro lado el anclaje GS, con muelle metálico también, presenta un peor aislamiento, superando ligeramente el límite de 5 M Ω . Por último al caso del anclaje VAPE, forrado con chapa metálica también, le ocurre algo muy irregular apareciendo resistencias entre valores de 1.34 y 22.48 M Ω , lo cual hace pensar que el anclaje en sí no parece ser el principal causante de estos resultados.

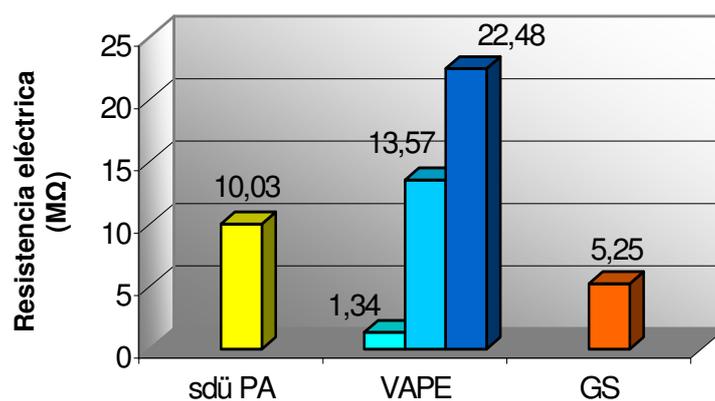


Figura 6.31. Influencia del anclaje en la resistencia eléctrica

2.8.2. Clip

La prueba de resistencia eléctrica se pensó en principio que podía ayudar a seleccionar o desechar alguno de los clips en estudio en función de la naturaleza más o menos aislante del recubrimiento anticorrosión. Pero, a la vista del gráfico de la Figura 6.32, se comprueba que no ha servido de gran ayuda, ya que el clip Modelo C, con recubrimiento metálico, debería ser a priori el que mayores problemas tuviese de aislamiento, y, por el contrario, es el que mejores resultados ha obtenido, lo cual hace pensar, al igual que en el caso del anclaje, que este componente tampoco parece ser el causante de los resultados obtenidos de resistencia eléctrica.

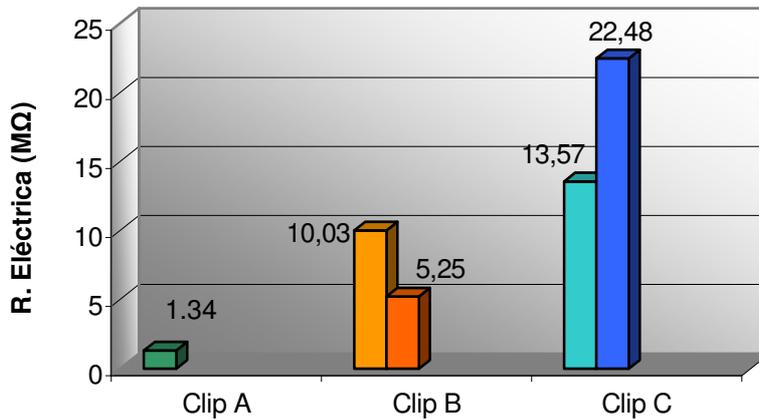


Figura 6.32. Influencia del clip elástico en la resistencia eléctrica

2.8.3. Ensayos específicos

Al realizar los ensayos previos para la optimización de la sujeción, los relativos a la determinación de la resistencia eléctrica de la sujeción, apenas aportaron información alguna de cómo podrían influir los componentes individuales de la misma en este parámetro, que, como ya se ha comentado anteriormente, se trata de una variable muy a tener en cuenta debido a la influencia que sobre la señalización viaria podría tener.

Los resultados obtenidos en los ensayos previos fueron muy aleatorios, variando, por ejemplo, para dos sistemas que emplean el mismo tipo de anclaje y de placa acodada, entre valores de 1.34 y 22.48 MΩ. Esta disparidad obliga a la realización

de un estudio más profundo que ayude al conocimiento de comportamiento eléctrico del conjunto de la superestructura de vía [98].

Los ensayos se llevaron a cabo de acuerdo a lo indicado en el apartado 5.4 del capítulo 4. El ensayo consistió, básicamente, en la medición de la resistencia eléctrica entre los dos hilos de una traviesa, en la que se habían montado previamente los dos sistemas de sujeción completos sobre sendos cupones de carril, mientras se pulverizaba agua durante dos minutos con unas ciertas propiedades de presión, caudal y disposición geométrica. La medición de la resistencia se prolonga durante los 8 minutos posteriores a la finalización del riego, para completar un total de 10 minutos de ensayo. La operación se repite tres veces sobre el mismo sistema, dejando transcurrir 24 horas entre cada uno de los ensayos para conseguir el secado exterior de los componentes que intervienen.

En el gráfico de la Figura 6.33, se muestra la evolución de la resistencia eléctrica entre los dos hilos, en escala logarítmica, en función del tiempo en un ensayo tipo. Se puede comprobar que la resistencia, antes de comenzar el ensayo es muy alta y decae rápidamente durante el periodo de regado, alcanzando, generalmente, el valor mínimo al cabo de los dos minutos de regado. A partir de este momento, la resistencia comienza a recuperarse, para terminar prácticamente con un valor residual asintótico al cabo de los 10 minutos de ensayo.

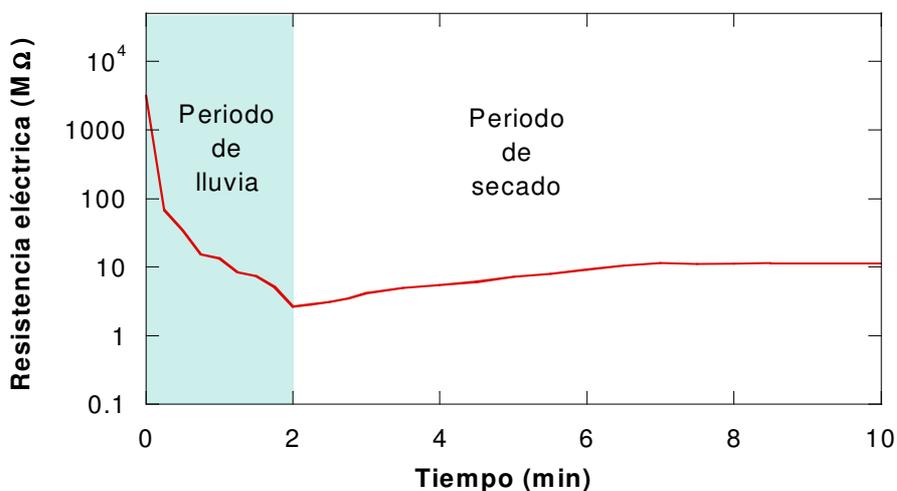


Figura 6.33. Evolución de la resistencia eléctrica a lo largo del ensayo tipo

En este ensayo, al igual que en el resto a los que se somete la sujeción, el número de variables que interviene es bastante amplio, con lo que se dificulta la obtención de alguna conclusión. Por ello, se trató de fijar el máximo número de parámetros posibles y comprobar si la variación en los resultados obtenidos podría atribuirse a alguno de los considerados como variables.

Como primera variable, se eligió la traviesa, fijándose todos los componentes de la sujeción, placa de asiento, placa acodada, anclaje y clip. Se seleccionó una traviesa de cada una de las fábricas suministradoras, es decir, que se contó con siete diseños diferentes de traviesa, pero con el mismo tipo de anclaje.

Las traviesas fueron identificadas por los códigos F1 a F7. Los componentes del conjunto de sujeción, que se repitieron en la totalidad de los ensayos fueron:

- Anclaje tipo VAPE
- Placa de asiento Modelo A
- Placa acodada A2 (ligera)
- Clip elástico tipo A

Los resultados alcanzados en los distintos ensayos se muestran en las Figuras 6.34, 6.35 y 6.36, correspondiendo al primer, segundo y tercer regado, respectivamente.

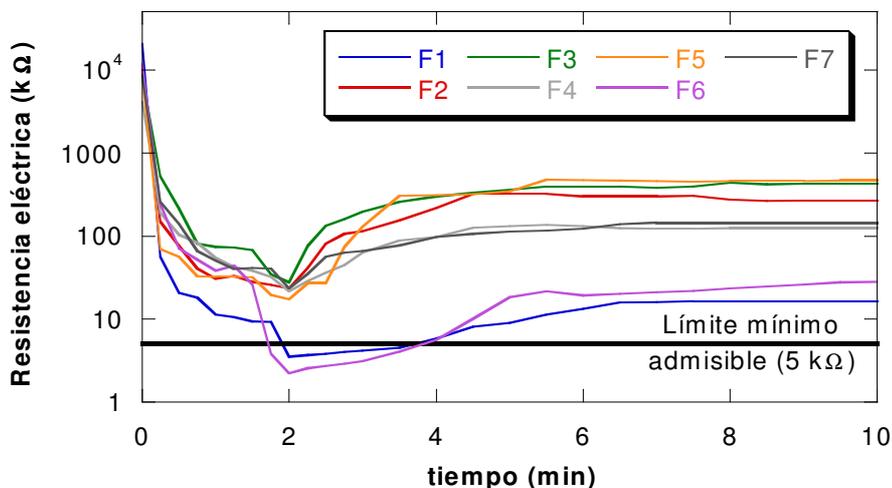


Figura 6.34. Evolución de la resistencia eléctrica en el primer riego

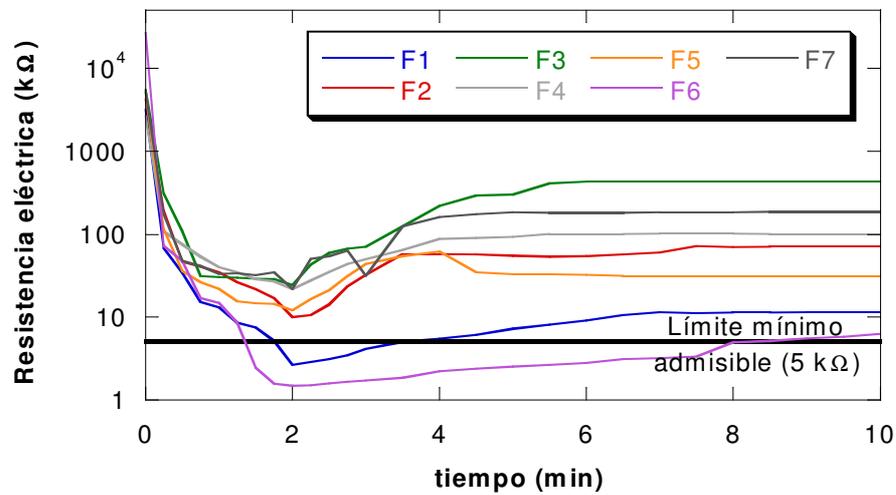


Figura 6.35. Evolución de la resistencia eléctrica en el segundo riego

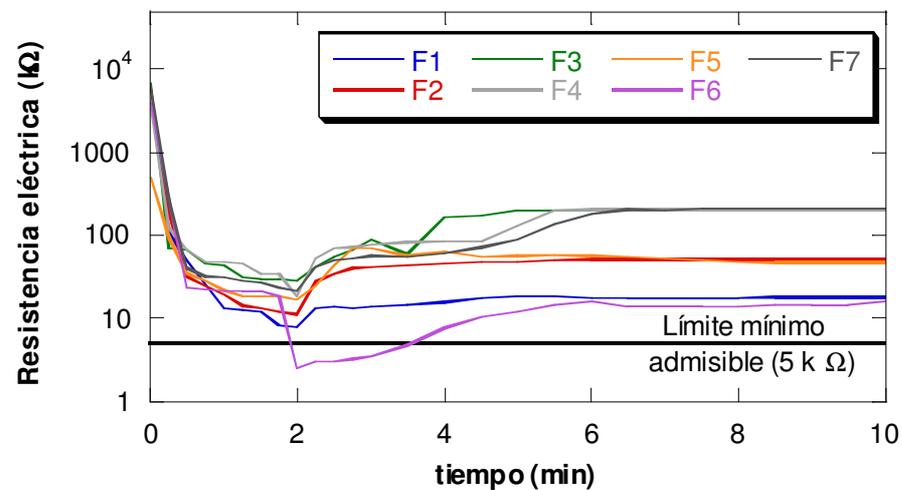


Figura 6.36. Evolución de la resistencia eléctrica en el tercer riego

Un resumen de los resultados obtenidos se refleja en la Tabla 6.1, donde se han calculado los valores de la resistencia inicial (R_0), la resistencia residual al cabo de los 10 min de ensayo (R_R) y la resistencia mínima (R_{\min}), así como sus valores corregidos ($R_{\text{corregido}} = k_a \cdot R$)

Tabla 6.1. Resultados de los ensayos de resistencia eléctrica

Parámetro	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
R_0^1 (k Ω)	20738	10242	8390.6	4148.4	8629.0	11847	8612.9
R_0^2 (k Ω)	3142.4	4222.2	5541.7	2633.7	5037.0	3673.3	5209.8
R_0^3 (k Ω)	5933.0	5977.8	6974.4	3412.5	2489.3	4014.9	6325.6
R_0 (k Ω)	9937.8	6814.0	6968.9	3398.2	5385.1	6511.7	6716.1
R_0 corregida(k Ω)	10882	7461.3	7630.9	3721.0	5896.7	7130.3	7354.1
R_R^1 (k Ω)	16.62	271.73	433.06	125.83	467.65	28.16	145.11
R_R^2 (k Ω)	11.46	70.557	426.28	101.53	31.59	6.41	187.11
R_R^3 (k Ω)	18.04	51.631	212.5	208.40	46.75	14.46	212.50
R_R^{med} (k Ω)	15.37	131.30	357.28	145.25	182.0	16.34	181.57
R_R corregida(k Ω)	16.83	143.78	391.22	159.05	199.28	17.89	198.82
R_{min}^1 (k Ω)	3.53	23.56	27.97	21.45	17.48	2.24	23.44
R_{min}^2 (k Ω)	2.65	8.47	24.40	21.45	12.09	1.47	21.88
R_{min}^3 (k Ω)	7.85	11.09	28.54	18.88	17.06	2.45	21.48
R_{min} (k Ω)	4.67	14.37	26.97	20.59	15.54	2.05	22.27
R_{min} corregida(k Ω)	5.12	15.74	29.53	22.55	17.01	2.24	24.38

El análisis de los resultados conduce a la observación de valores totalmente anárquicos, oscilando entre valores que superan en un 500 % el valor mínimo indicado en la especificación técnica y valores que en alguno de los casos no llegan a alcanzar ese valor mínimo exigido de 5 k Ω .

También se ha comprobado que la resistencia inicial del conjunto apenas influye en la resistencia mínima tras el riego, como puede verse en el ajuste lineal realizado en la Figura 6.37, en el que sólo se consiguió una correlación entre las dos variables de 0.433. Sin embargo, entre la resistencia mínima y remanente el coeficiente de correlación alcanzó el valor de 0.914, lo que indica un buen ajuste entre los dos parámetros.

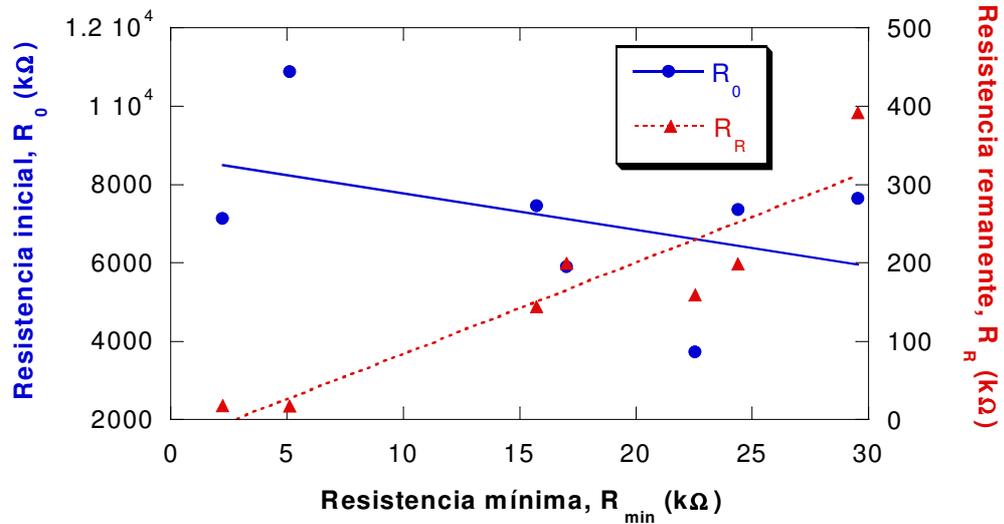


Figura 6.37. Relación entre las resistencias mínima, inicial y remanente

El ensayo de resistencia eléctrica está englobado dentro de la especificación técnica referida al suministro de sujeciones, y debería servir para cuantificar la influencia de una determinada sujeción en la conducción de la electricidad, pero a tenor de los resultados mostrados y teniendo en cuenta que el sistema de sujeción implementado tiene los mismos componentes en todos los casos se puede asegurar que el papel que juega la traviesa es fundamental.

Para corroborar esta última aseveración, será necesario tener en cuenta las características físicas y geométricas de la traviesa que puedan influir en su comportamiento eléctrico.

La traviesa está fabricada en base a un hormigón, pretensado en unos casos y postensado en otros. El hormigón es un material poroso y permeable, es decir, en estado seco, sus huecos están vacíos y solo contienen aire, que no es conductor, pero cuando aquél se humedece, ya sea por la lluvia u otro procedimiento, sus poros empiezan a saturarse favoreciéndose, de este modo, el paso de la corriente eléctrica a través de su masa.

En base a esta idea, se pensó que la naturaleza porosa y permeable del hormigón podría estar relacionada con la resistencia eléctrica del conjunto por lo que se trató de hallar alguna relación entre propiedades físicas del hormigón de la

traviesa, porosidad (P) y permeabilidad (K), y las propiedades conductoras del conjunto de sujeción.

La determinación de la porosidad se realizó siguiendo las especificaciones indicadas en la Especificación Técnica para el suministro de traviesas [87]. El estudio comenzó con la extracción de sendos testigos de cada una de la traviesas ensayadas de acuerdo a UNE EN 12504-1: 2001 “Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 1: Testigos. Extracción, examen y ensayos a compresión” [99]. La extracción se realizó por medio de una sonda sacatestigos provista de una broca de 80 mm de diámetro. En la Figura 6.38, se muestra la zona de la traviesa de la que se extraen los testigos, así como los dos testigos conseguidos.



Figura 6.38. *Aspecto de la traviesa y los testigos tras su extracción*

Para la obtención de la porosidad los testigos son secados a una temperatura de 105 ± 2 °C justo hasta obtener una masa constante M_1 (se considera masa constante cuando la diferencia relativa entre dos medidas de peso sucesivas es inferior o igual a $M/1000$).

Las muestras secas se colocaron horizontalmente y sumergidas hasta la mitad en un recipiente parcialmente lleno de agua corriente a una temperatura comprendida entre 15 y 20 °C. Transcurridas 24 horas, las muestras se sumergen en agua hasta 5 mm por encima de la generatriz superior de las mismas, no durando la operación menos de 15 minutos. Tras 48 horas, las muestras se

retiran y se determina, primero, su peso hidrostático, M_2 , para, a continuación, obtener el peso saturado, M_3 , habiéndose limpiado previamente el testigo para eliminar toda el agua superficial.

La porosidad expresa la relación entre el volumen total de huecos y el volumen aparente. Por tanto, considerando que a la temperatura de ensayo la densidad del agua se puede considerar igual a la unidad, la porosidad podría expresarse por:

$$P = \frac{M_3 - M_1}{M_3 - M_2} \cdot 100 \quad (6.15)$$

donde: $M_3 - M_1$ representa el volumen de poros accesibles y
 $M_3 - M_2$ es el volumen aparente de la probeta

Los resultados obtenidos de porosidad se reflejan en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2. Resultados de porosidad

Testigo	M_1 (g)	M_2 (g)	M_3 (g)	P (%)
1.A	1543.0	988.97	1607.2	10.38
1.B	1469.8	944.68	1529.4	10.19
2.A	1138.1	719.08	1186.6	10.37
2.B	1481.5	938.13	1546.3	10.66
3.A	1226.0	766.83	1272.6	9.22
3.B	1775.2	1140.6	1839.2	9.16
4.A	1924.8	1207.9	1994.7	8.89
4.B	1553.2	974.78	1608.2	8.68
5.A	1713.0	1102.7	1776.0	9.36
5.B	1573.0	989.21	1636.7	9.84
6.A	1436.7	925.13	1492.0	9.76
6.B	1522.9	987.09	1584.5	10.31
7.A	2134.6	1320.7	2212.5	8.73
7.B	2133.0	1324.5	2212.6	8.96

En el gráfico de la Figura 6.39 se representa la relación existente entre la resistencia eléctrica mínima del conjunto de la sujeción frente a la porosidad del hormigón de la traviesa, así como un ajuste lineal de los datos.

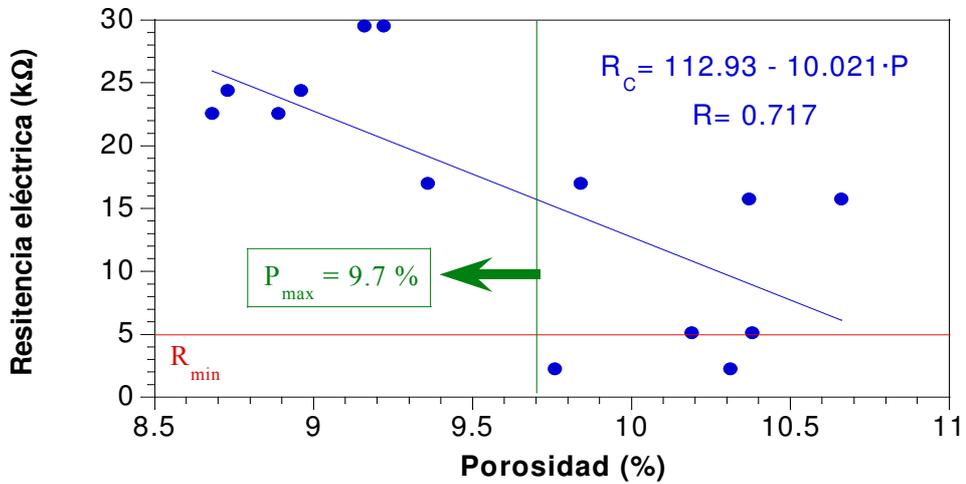


Figura 6.39. Relación entre la porosidad del hormigón de la traviesa y la resistencia eléctrica del sistema de sujeción

Se observa una tendencia a incrementarse la resistencia eléctrica a medida que decrece la porosidad y asegurándose una resistencia superior a 5 kΩ para una porosidad inferior al 9.7 % (P_{max}).

La determinación de la permeabilidad frente al agua se hizo siguiendo las indicaciones de la UNE 83309:1990 EX "Determinación de la profundidad de penetración de agua bajo presión" [100].

De los testigos empleados en la determinación de la porosidad se cortaron probetas de 100 mm de altura, resultando una relación altura/diámetro superior a 0.5, requisito mínimo establecido en la norma.

Se procedió a un secado en estufa a $50\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ de todas las muestras hasta peso constante. Posteriormente, se dejaron enfriar a temperatura ambiente y se sellaron lateralmente, mediante la aplicación de silicona en caliente, asegurando la no pérdida de agua. Se colocó la probeta en un dispositivo similar al representado en la Figura 6.40, consistente, básicamente, en un bastidor formado por dos placas unidas por cuatro varillas roscadas de acero inoxidable.

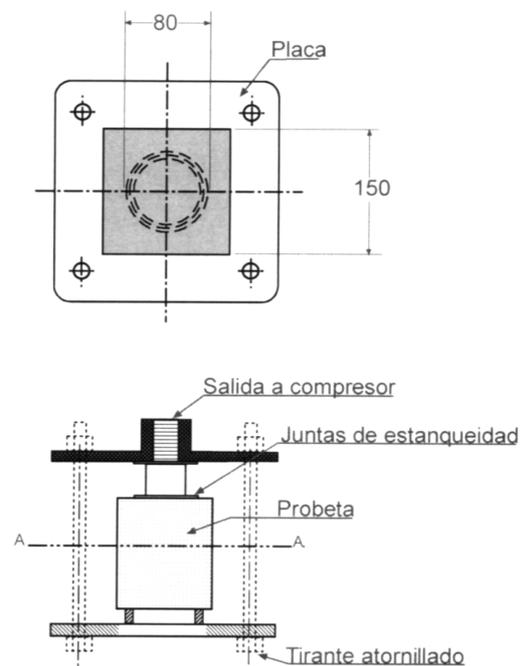


Figura 6.40. *Dispositivo empleado para la obtención de la profundidad de penetración [100]*

Entre una de las bases de la probeta y una de las placas se interpone una celda cilíndrica, provista de juntas de caucho en sus extremos que aseguran una total estanqueidad. A través de un orificio practicado en la placa en contacto con la celda, esta última se rellena parcialmente con agua, aprovechándose la salida del orificio para conectar un compresor que permite la aplicación de distintos escalones de carga de agua.

Se aplicó a cada probeta una presión inicial de 300 kPa seguida de otra de 700 kPa durante 24 horas cada una de ellas. Mediante la utilización de un manómetro estas presiones se mantuvieron con una incertidumbre de $\pm 10\%$ del valor especificado. En la Figura 6.41 se muestra un detalle del equipo empleado para determinar la profundidad de penetración.



Figura 6.41. *Equipo empleado para obtener la profundidad de penetración*

Tras las 48 horas de ensayo se sacaron las probetas del dispositivo de ensayo, eliminándose el exceso de agua de la cara sometida a la presión y se procedió a la rotura longitudinal de la probeta, para lo cual se siguieron las especificaciones indicadas en la norma UNE 83-306-85 “Ensayo de hormigón. Rotura por tracción indirecta (Ensayo brasileño)” [101] Se colocó la probeta en la máquina de ensayo apoyada sobre una de sus generatrices y se aplicó una carga creciente en compresión sobre la arista diametralmente opuesta al apoyo hasta conseguir la rotura de la probeta. La rotura de la probeta presenta el aspecto que se refleja en la Figura 6.42.



Figura 6.42. *Aspecto de la rotura de la probeta tras el ensayo brasileño*

Inmediatamente después de la rotura, se marca con un rotulador el perfil definido por el frente de penetración, calculándose las profundidades media y máxima de penetración, definidas de acuerdo a la Figura 6.43.

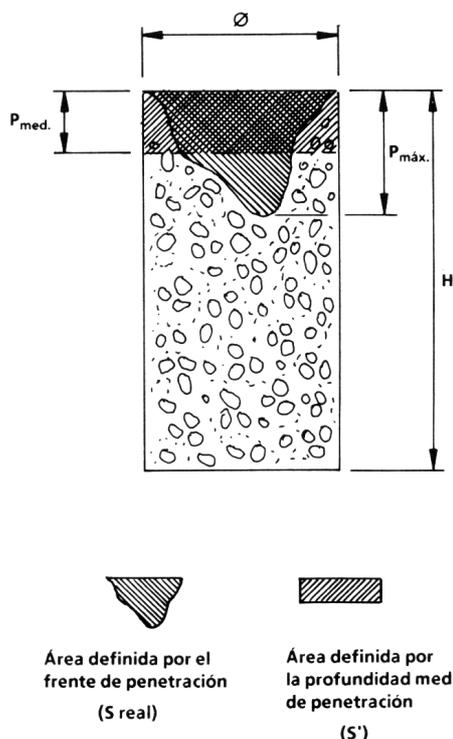


Figura 6.43. Definición de profundidad máxima y media de penetración [100]

A partir del valor de la profundidad media de penetración se puede obtener el coeficiente de permeabilidad, K, por medio de la expresión de Valenta [102]:

$$K = \frac{x^2 \cdot P}{2 \cdot \sum_1^i t_i \cdot h_{ri}} \quad (6.17)$$

- donde:
- K es el coeficiente de permeabilidad expresado en m/s
 - x es la profundidad media de penetración de agua expresada en m
 - P es la porosidad de la probeta en tanto por uno
 - h_r es la carga hidráulica de cada ciclo en m de columna de agua
 - t es el tiempo de cada ciclo de presión expresado en s

En la Tabla 6.3 se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de permeabilidad.

Tabla 6.3. Resultados de profundidad de penetración

Testigo	P _{med} (mm)	P _{máx} (mm)	P (%)	h _{r1} /h _{r2} (m)	t (s)	K (m/s)
1.A	36	38	10.38	30/70	86400	7.78·10 ⁻¹²
1.B	37	37	10.19	30/70	86400	8.07·10 ⁻¹²
2.A	40	42	10.37	30/70	86400	9.60·10 ⁻¹²
2.B	35	37	10.66	30/70	86400	7.55·10 ⁻¹²
3.A	30	31	9.22	30/70	86400	4.18·10 ⁻¹²
3.B	28	28	9.16	30/70	86400	4.77·10 ⁻¹²
4.A	25	27	8.89	30/70	86400	3.21·10 ⁻¹²
4.B	27	29	8.68	30/70	86400	3.66·10 ⁻¹²
5.A	32	32	9.36	30/70	86400	5.54·10 ⁻¹²
5.B	35	37	9.84	30/70	86400	6.97·10 ⁻¹²
6.A	38	31	9.76	30/70	86400	8.43·10 ⁻¹²
6.B	36	32	10.31	30/70	86400	8.11·10 ⁻¹²
7.A	30	30	8.73	30/70	86400	4.54·10 ⁻¹²
7.B	32	33	8.96	30/70	86400	5.31·10 ⁻¹²

En la Figura 6.44 se representa la relación existente entre las profundidades de penetración media y máxima y la resistencia eléctrica mínima del sistema de sujeción para los diferentes tipos de traviesa. Con los datos representados en dicha figura se ha realizado un ajuste de tipo lineal. De la misma forma, en la Figura 6.45 se muestra la evolución de la resistencia eléctrica mínima frente al coeficiente de permeabilidad K así como un ajuste lineal de los datos.

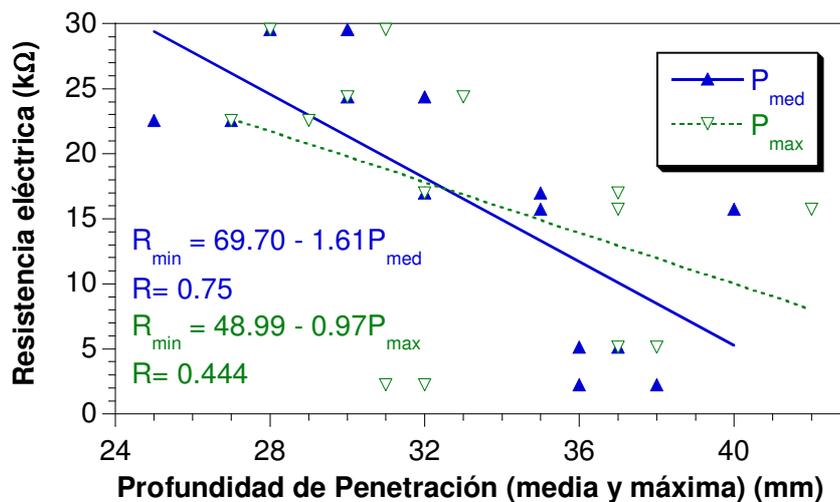


Figura 6.44. Relación entre la resistencia eléctrica del conjunto de sujeción y la profundidad de penetración

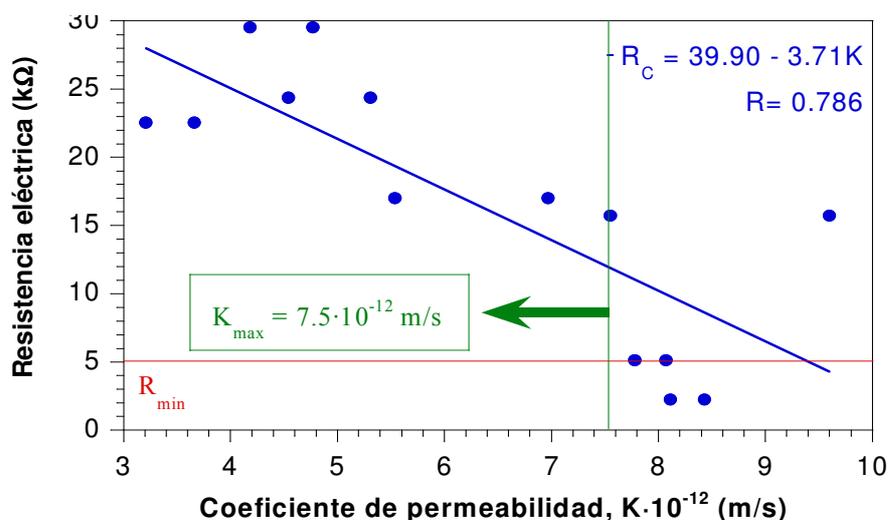


Figura 6.45. Relación entre la resistencia eléctrica del conjunto de sujeción y el coeficiente de permeabilidad

En el caso de la penetración máxima se muestra una ligera tendencia a disminuir para conseguir un aumento en la resistencia eléctrica, pero el ajuste lineal realizado presenta una correlación muy baja, no superando el valor de 0.45. Para la penetración media, la correlación entre las dos variables mejora sustancialmente, manteniendo la misma tendencia y alcanzando el valor de 0.75 y todavía mejora más para el caso del coeficiente de permeabilidad, en el que se consigue una correlación cercana al 0.79, convirtiéndose en el parámetro físico del hormigón que mejor se relaciona con la resistencia eléctrica del conjunto de la sujeción, disminuyendo la resistencia a medida que se incrementa el valor del coeficiente de permeabilidad del hormigón de la traviesa. Al igual que se estableció un valor límite en el parámetro porosidad, para el coeficiente de permeabilidad también se puede establecer un valor umbral que asegure una resistencia eléctrica del conjunto de la sujeción superior a 5 kΩ. Este valor, K_{max} , como puede verse en la Figura 6.45, se establece en torno a $7.5 \cdot 10^{-12}$ m/s.

Por último, se comprobó la posible influencia que, sobre la resistencia eléctrica, pudiera tener aspectos constructivos o geométricos de las traviesas. En todos los casos, las traviesas van reforzadas por armaduras activas, o lo que es lo mismo, acero que, llegado el momento, se puede convertir en un camino preferencial para el paso de la corriente eléctrica. En la peor de las situaciones, si una de las

chapas externa del anclaje VAPE de cada uno de los hilos entrase en contacto con la armadura, el agua podría filtrarse por capilaridad hasta llegar a la chapa y, en ese momento se cerraría el circuito, es decir, que la resistencia eléctrica sería despreciable.

Esta idea hizo pensar que, aunque las chapas del anclajes no entren en contacto con la armadura, si la distancia no es suficiente, al igual que el agua llega desde la superficie de la traviesa hasta la chapa por capilaridad, podría llegar también desde la chapa hasta la armadura, por lo que se decidió estudiar cómo podría influir la distancia mínima entre la armadura y el anclaje en la resistencia eléctrica del conjunto.

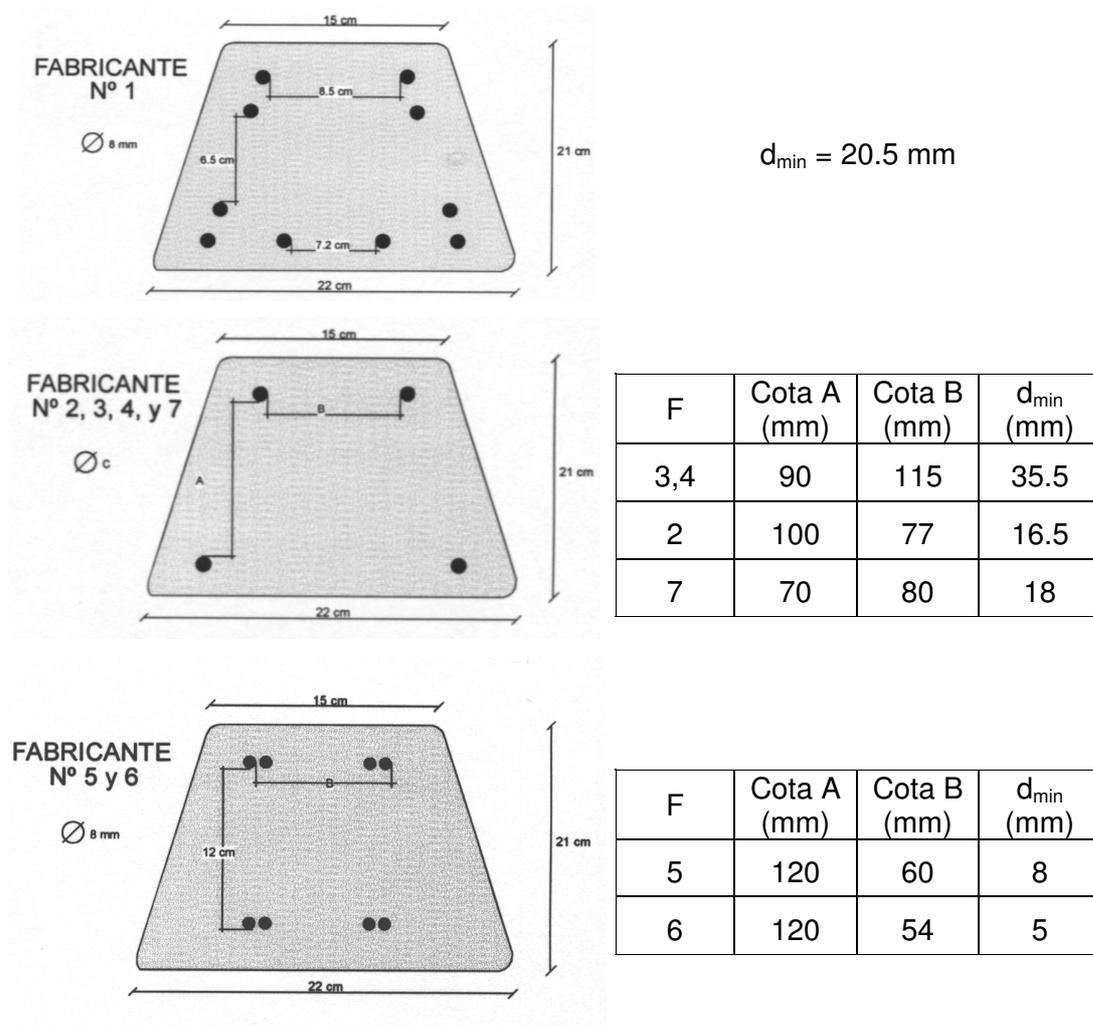


Figura 6.46. Disposición de las armaduras de las traviesas en sección central

Partiendo de la hipótesis de que una traviesa con una armadura más cercana a la zona de la fijación puede presentar peores características aislantes que otra con una geometría en la que se encuentren más distanciadas, se realizó un estudio de la disposición de las armaduras en la sección central de cada una de las traviesas, resultando el esquema que se muestra en la Figura 6.46. Para comprobar la posible relación entre los parámetros en estudio, se representaron los valores de resistencia eléctrica del conjunto frente a la distancia mínima entre el anclaje y la armadura, tal como se muestra en el gráfico de la Figura 6.47.

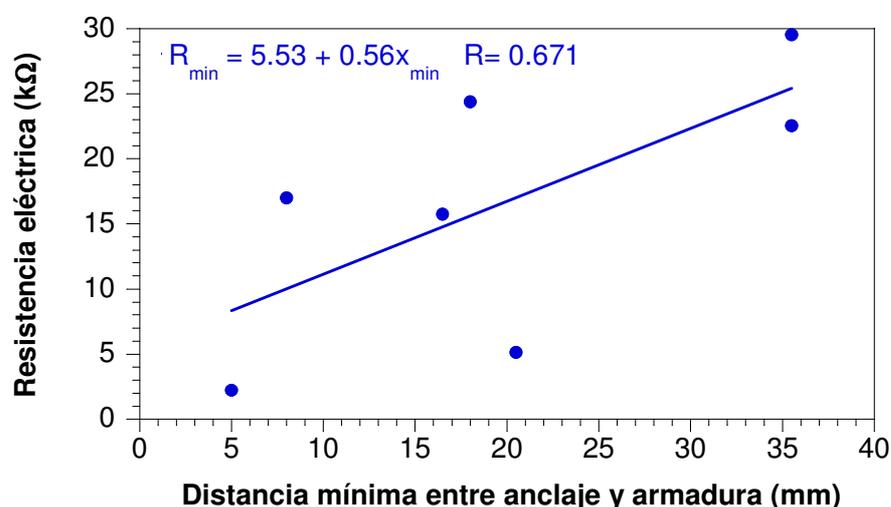


Figura 6.47. Relación entre la resistencia eléctrica del conjunto de sujeción y la distancia mínima entre el anclaje y la armadura

Se vuelve a constatar, al igual que ocurría en el caso de las propiedades físicas del hormigón, una cierta tendencia, que de alguna forma confirma un aumento de la resistencia eléctrica mínima del conjunto con el aumento de la distancia entre anclaje y armadura.

Por tanto se confirma que la traviesa, tanto desde el punto de vista de las propiedades físicas del hormigón, como de la disposición geométrica de sus armaduras puede influir sobre el comportamiento eléctrico del conjunto, por lo que se hace necesaria la inclusión de esta prueba, tanto en la Especificación Técnica del producto, como en la normativa correspondiente.

2.9. CONDICIONES AMBIENTALES ADVERSAS

Para la evaluación del deterioro de los materiales metálicos que componen el sistema de sujeción está establecido un ensayo en la especificación técnica para el suministro de sujeciones, ya descrito en el apartado 5.5 del capítulo 4. Pero esta prueba presenta una serie de deficiencias si se pretende emplearla para poder decidir qué componentes presentan un mejor comportamiento ante la corrosión, entre las que destacan:

- ❑ Imposibilidad de análisis cuantitativo de los resultados obtenidos tras el ensayo
- ❑ Al introducir en la cámara de ensayos la totalidad del conjunto de sujeción, se hace muy complicado el estudio del proceso corrosivo individual al no poder discernir de cuál de los elementos provienen los productos de la corrosión
- ❑ El resultado requerido por la normativa específica resulta un tanto subjetivo, ya que lo único que se exige es que los efectos producidos por el ensayo no deben afectar a la funcionalidad del sistema tras su desmontaje y posterior montaje
- ❑ No se pueden realizar comparaciones entre diferentes sistemas de sujeción al no disponer de una evaluación cuantitativa del daño establecido por el proceso corrosivo

Por todo ello, se decide realizar un ensayo adicional en el que se intenta conseguir la cuantificación del proceso de corrosión, teniendo en cuenta que se debe considerar, necesariamente, dos aspectos fundamentales del fenómeno:

- ❑ La evaluación del grado de deterioro que ha sufrido el material como consecuencia del proceso corrosivo
- ❑ La estimación del tiempo que ha tardado el material en alcanzar un determinado estado de deterioro

Con el fin de relacionar estos dos factores y para lograr, de alguna manera, dar un carácter dinámico al proceso corrosivo, se realizó un ensayo de corrosión

acelerada que intenta simular el comportamiento del material mediante un test rápido que reproduce la forma del ataque en el medio de utilización en servicio.

El ensayo es similar al descrito para el conjunto de sujeción: se realizará en cámara de niebla salina, con una concentración del 5 % en NaCl, 35 °C de temperatura y un tiempo de exposición de 300 horas, con la salvedad de que las muestras se introducirán en la cámara por separado y que se establecerán una serie de períodos de inspección para realizar un seguimiento continuo del proceso corrosivo.

Como muestras seleccionadas para el ensayo, se eligió una representación de los distintos componentes de la sujeción y en distintas condiciones de uso. Aunque se trataba de valorar el comportamiento de los componentes metálicos a corrosión, también se introdujeron muestras de materiales no metálicos.

Los elementos seleccionados para ser ensayados son los que se enumeran en la Tabla 6.4 y que se describen en la Figura 6.48.

Tabla 6.4. Descripción de las muestras ensayadas

Cód.	Muestra	Descripción/estado antes del ensayo
A	Vaina SV 2-115-5	Nueva
B	Vaina SV 2-115-5	Nueva
C	Tornillo SV 2-115-5	Nuevo, sin defecto visible en recubrimiento
D	Tornillo SV 2-115-5	Nuevo, sin defecto visible en recubrimiento y con entalla en rosca que traspasa la capa galvanizada
E	Tornillo SV 2-115-5	Nuevo, sin defecto visible en recubrimiento y con entalla en rosca que traspasa la capa galvanizada
F	Tornillo SV 2-115-5	Nuevo, con defecto en recubrimiento
G	Tornillo SV 2-115-5	Usado, con rozaduras de contacto con clip
H	Tornillo SV 2-115-5	Usado, con rozaduras de contacto con clip
I	Clip C	Nuevo
J	Clip C	Usado, con rozaduras de contacto con tornillo
K	Clip B	Nuevo
L	Clip B	Usado, con rozaduras de contacto con tornillo

Cód.	Muestra	Descripción/estado antes del ensayo
M	Clip A	Nuevo
N	Clip A	Usado, con rozaduras de contacto con tornillo
O	Clip A	Nuevo, sin esmalte
P	Placa de asiento	Nueva. Seca, recién inyectada
Q	Placa de asiento	Nueva. Seca, recién inyectada
R	Placa acodada A2	Nueva. Seca, recién inyectada
S	Placa acodada A2	Nueva. Seca, recién inyectada

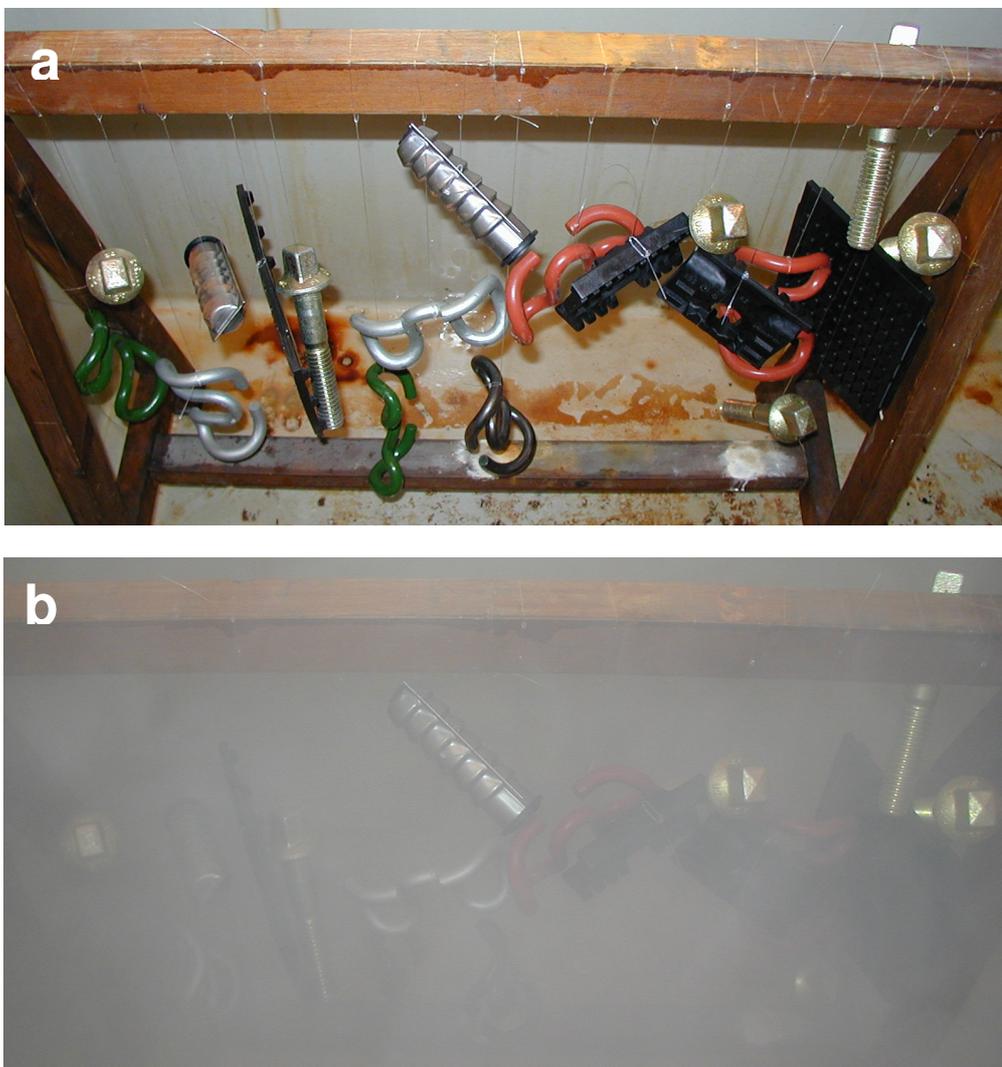


Figura 6.48. *Disposición de las muestras dentro de la cámara de niebla salina antes (a) y después (b) de comenzar el ensayo*

El inconveniente de este tipo de pruebas, es que, generalmente, la normativa no prescribe ninguna recomendación acerca de cuál debe ser el método de interpretación de los resultados obtenidos en el ensayo.

Para la evaluación de los resultados obtenidos en este ensayo se empleó el método del *factor de corrosión* [103]. Posteriormente, se realizó un estudio de la variación en las propiedades mecánicas, ya que una reducción en la sección neta del material como consecuencia del ataque corrosivo, se podría traducir en una aparente pérdida de propiedades resistentes. Se rechazó, desde un principio, la evaluación a través de la pérdida de masa, ya que al tratarse de materiales recubiertos de capas protectoras de diferentes naturalezas, el hecho de eliminar los productos superficiales de corrosión puede resultar una tarea complicada y añadir demasiada incertidumbre al resultado.

El método del *factor de corrosión* se basa en el conocido procedimiento de referir el grado de deterioro como un porcentaje (S) de superficie de material corroída frente a la superficie total del elemento ensayado. En función de cómo sea este porcentaje, se definen seis grados de corrosión a cada uno de los cuales se le asigna un valor numérico arbitrario y correlativo de tal forma que cuanto mayor sea el deterioro más alto será este número. Los seis grados de corrosión, con su valor numérico asociado, se recogen en la Tabla 6.5.

Tabla 6.5. Grados de corrosión

Grado de deterioro	Límites	Valor
Corrosión nula	$S = 0\%$	$g = 0$
Corrosión incipiente	$0\% < S \leq 20\%$	$g = 2$
Corrosión leve	$20\% < S \leq 40\%$	$g = 4$
Corrosión moderada	$40\% < S \leq 60\%$	$g = 6$
Corrosión fuerte	$60\% < S \leq 80\%$	$g = 8$
Corrosión generalizada	$S > 80\%$	$g = 10$

De este modo se puede cuantificar en cierto modo el grado de deterioro a través de un dígito que, intuitivamente, permite deducir de forma rápida el aspecto de la superficie afectada por el proceso corrosivo.

Para tratar de dar un carácter dinámico al método de evaluación se fijan unos intervalos de inspección y se evalúa el grado de corrosión en cada uno de ellos. El factor de corrosión (f) se define según la expresión:

$$f = \sum_i g_i \cdot 10^{-i} \quad (6.18)$$

Donde el sumatorio está extendido a todos los intervalos de inspección considerados siendo los g_i los grados de corrosión asociados a cada uno de ellos.

El factor de corrosión puede variar entre 0, si el material no ha sufrido corrosión alguna al final del tiempo de ensayo, y 1, si el material ha sufrido una corrosión generalizada en la primera de las inspecciones efectuadas. La resolución del método vendrá dado por un número de decimales igual al número de inspecciones efectuadas.

Un inconveniente que puede plantear el método es el uso de un factor de corrosión con un elevado número de cifras decimales si se pretende dotar a este parámetro de un cierto carácter intuitivo, es decir, si se eligen un alto número de inspecciones. Este inconveniente se puede de alguna forma eliminar si los intervalos de inspección se eligen con cierta coherencia. En este caso, al tratarse de un ensayo a 300 horas, no se realizarán inspecciones diarias, lo que originaría un factor de corrosión de 12 cifras decimales, sino que se eligió una cifra más razonable, incrementando los periodos de inspección hasta dejarlos únicamente en 5 intervalos no uniformes distribuidos de la siguiente manera: 24, 48, 72, 168 y 300 horas. Esta distribución da lugar a un factor de corrosión de 5 dígitos decimales, que no resulta demasiado incomodo de manejar.

Los componentes no metálicos no sufrieron deterioro visible alguno, solamente se pudo apreciar un incremento en el contenido de humedad del 1.4 % en las placas acodadas de Poliamida 6.6 reforzadas con 35 % de fibra de vidrio y del 1.3 % en las placas de asiento de HYTREL.

Los resultados obtenidos en los componentes metálicos se reflejan en la Tabla 6.6 y en las figuras 6.49 a 6.58.

Tabla 6.6. Factor de corrosión

Cód.	Muestra	Grado de corrosión (g)					f
		24 h	48 h	72 h	168 h	300h	
A	Vaina nueva	8	10	-----	-----	-----	0.90000
B	Vaina nueva	8	10	-----	-----	-----	0.90000
C	Tor. nuevo	0	2	2	6	8	0.02268
D	Tor. nuevo con entalla	0	2	2	6	8	0.02268
E	Tor. nuevo con entalla	0	2	2	6	10	0.02270
F	Tor. nuevo (recubrimiento defectuoso)	0	2	2	6	10	0.02270
G	Tor. usado	0	2	4	8	10	0.02490
H	Tor. usado	0	2	4	8	10	0.02490
I	Clip C nuevo	0	0	0	0	0	0.00000
J	Clip C usado	0	0	0	0	2	0.00002
K	Clip B nuevo	0	0	0	2	2	0.00022
L	Clip B usado	0	0	2	2	4	0.00224
M	Clip A nuevo	0	0	0	0	2	0.00002
N	Clip A usado	0	0	2	2	2	0.00222
O	Clip A sin recubrir	0	0	2	10	-----	0.00300

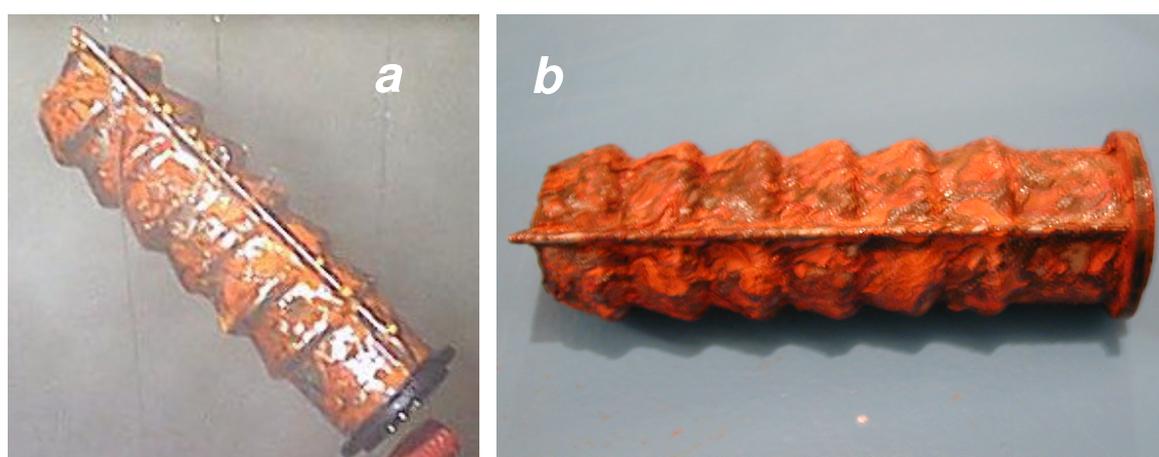


Figura 6.49. Aspecto de la vaina tras 24 horas (a) y tras 48 horas (b)

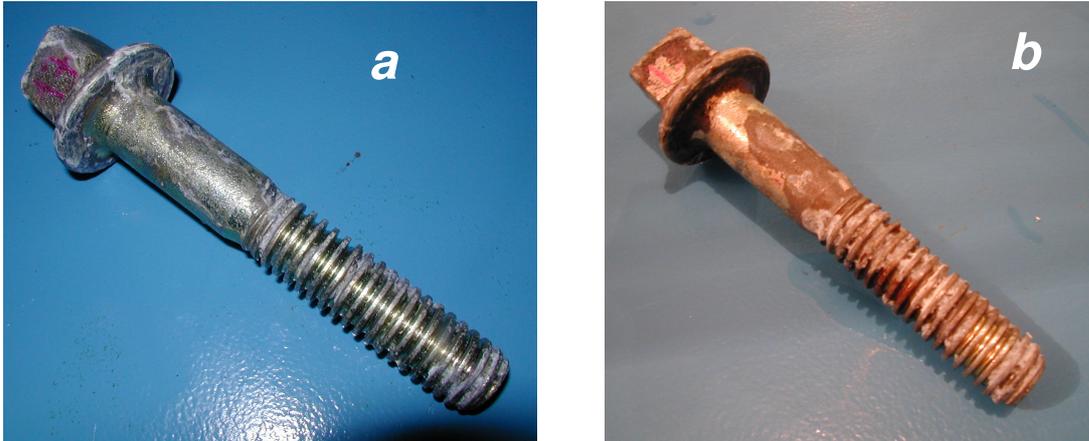


Figura 6.50. Aspecto de un tornillo tras 72 horas (a) y tras 168 horas (b)



Figura 6.51. Aspecto de dos tornillos tras 300 horas de ensayo con corrosión generalizada (a) y fuerte (b)



Figura 6.52. Aspecto del clip A sin esmalte tras 168 horas de ensayo



Figura 6.53. Aspecto del clip C usado tras 168 horas (a) y tras 300 horas (b)



Figura 6.54. Aspecto del clip A usado tras 168 horas (a) y tras 300 horas (b)



Figura 6.55. Aspecto del clip B usado tras 168 horas (a) y tras 300 horas (b)

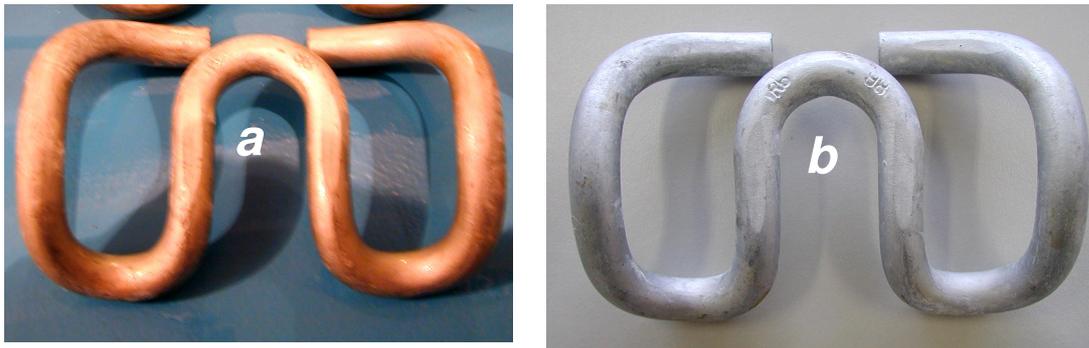


Figura 6.56. Aspecto del clip C nuevo tras 168 horas (a) y tras 300 horas (b)



Figura 6.57. Aspecto del clip A nuevo tras 168 horas (a) y tras 300 horas (b)



Figura 6.58. Aspecto del clip B nuevo tras 168 horas (a) y tras 300 horas (b)

De los componentes metálicos analizados se comprueba que el más vulnerable ha sido la chapa metálica de la vaina ($f = 0.9$), si bien se trata de un elemento que no tiene una misión claramente resistente, además de que se ha expuesto en unas condiciones que poco tienen que ver con las reales de trabajo, ya que este

componente en realidad se encuentra embebido en el hormigón de la traviesa y protegido, por tanto, de un ataque directo del ambiente. En la Figura 6.49, se muestra el aspecto de la vaina a lo largo del ensayo.

Los tornillos son rápidamente atacados en las aristas y vértices, zonas donde el recubrimiento presenta un menor espesor. A las 48 horas aparecen los primeros síntomas de ataque en las zonas angulosas de la cabeza. También se aprecia un deterioro, en estas primeras horas, en las zonas desgastadas por el uso, es decir, la parte inferior de la cabeza en la que se ha eliminando la capa del galvanizado por rozamiento con el clip, así como en la zona de la rosca en la que se provocó una ranura. La mayoría de los tornillos presentaban corrosión generalizada al cabo de las 300 horas de ensayo, solamente dos de los tornillos, el que no presentaba defecto alguno, y uno en el que se había generado una ranura no llegaron a este estado, deteniéndose en corrosión fuerte. Los factores de corrosión para los tornillos oscilan entre 0.02268, para los menos atacados, y 0.0249 para los más deteriorados. En la Figura 6.50 se muestra la evolución de uno de los tornillos a lo largo del ensayo y en la Figura 6.51 se compara el aspecto tras finalizar el ensayo de dos tornillos con diferentes grados de corrosión.

Los clips elásticos son los componentes metálicos que presentan un mejor comportamiento ante corrosión de todos los elementos metálicos que forman el sistema de sujeción. Hasta que no transcurren 72 horas de ensayo no aparecen los primeros síntomas de deterioro en los clips usados A y B, es decir, con falta de capa protectora en la zona de contacto con la cabeza del tornillo. En el clip C usado no se aprecian estos primeros síntomas hasta el intervalo de 168 horas. Este estado de corrosión incipiente se mantiene hasta el final del ensayo en los clip usados C ($f = 0.00002$) y A ($f = 0.00222$), incrementándose hasta corrosión leve en el caso del clip B usado ($f = 0.00224$). En cuanto a los clip nuevos, destaca el comportamiento del clip C, que permanece inalterado al cabo de las 300 horas de ensayo ($f = 0$), seguido del clip A, en el cual solo se aprecia una zona de deterioro en la última inspección que coincide con el punto de amarre del clip en el proceso de esmaltado ($f = 0.00002$), siendo el que peor comportamiento exhibe ante la corrosión el clip B, ya que surgen los primeros síntomas de

deterioro en el intervalo de 168 horas ($f = 0.00022$). Por último, comentar el comportamiento mostrado por el clip A desprovisto de esmalte que alcanzó el estado de corrosión generalizada en el intervalo de 168 horas, habiéndose detectado el comienzo en el intervalo anterior ($f = 0.003$). En las Figuras 6.52 a 6.58 se muestra la evolución de los clips a lo largo del ensayo

3. OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE SUJECIÓN

A partir del análisis realizado por ensayo en el apartado anterior, se seleccionó el componente óptimo, empleando en algún caso ensayos de apoyo que ayudaron a tomar la decisión final.

3.1. OPTIMIZACIÓN DEL ANCLAJE

Las posibles soluciones estudiadas para el sistema de anclaje han sido:

- Sistema Sdü con espiga en Poliamida 6.6 reforzada con fibra de vidrio en un 35 % en peso y tirafondo nº 9 pavonado (SDÜ PA)
- Sistema VAPE con espiga en Poliamida 6.6 reforzada con fibra de vidrio en un 30 % y forrada de chapa metálica y tornillo galvanizado (VAPE)
- Sistema Sdü con espiga de polietileno de baja densidad y tirafondo nº 9 galvanizado (SDÜ PE)
- Sistema GS con espiga en Poliamida 6.6 reforzada con fibra de vidrio en un 35 % y recubierta por espiral metálica y tirafondo GS galvanizado (GS)

El primero de los parámetros empleados para la optimización del anclaje es la pérdida de fuerza de apriete sufrido por la sujeción tras el ensayo dinámico. En este aspecto el anclaje VAPE se manifestó como el que mantenía mejor la fuerza de apriete, permaneciendo por debajo del 8.4 % de pérdida, alcanzando el 11.1 y 13.3 % el Sdü PA y GS, respectivamente.

Esta influencia en la pérdida de fuerza de apriete puede explicarse al estudiar el par de desapriete necesario para aflojar la sujeción apretada inicialmente a 250 N·m. Al observar la Figura 6.59, se comprueba que es el VAPE el que necesita mayor par de desapriete, un 80 % del nominal aplicado, aproximadamente, mientras que el resto se desaprieta con pares más pequeños, cercanos al 60 % del nominal.

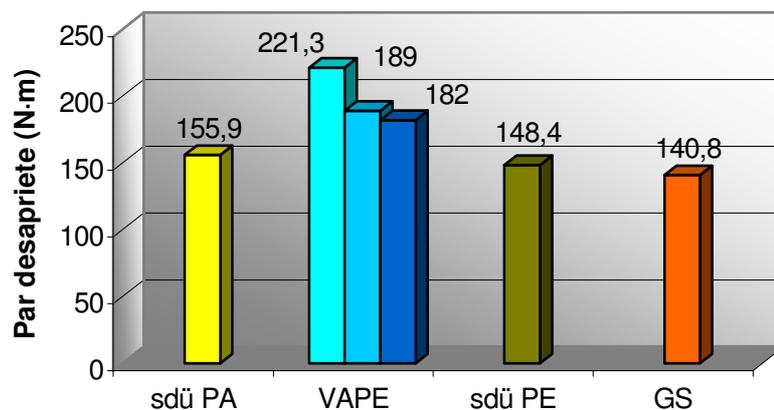


Figura 6.59. Influencia del anclaje en el par de desapriete

En la Figura 6.60 se representa la variación del par de desapriete respecto al de apriete nominal, oscilando para el VAPE entre el 11.5 y el 27 % y alcanzando una variación del 40 %, aproximadamente, en el resto de anclajes.

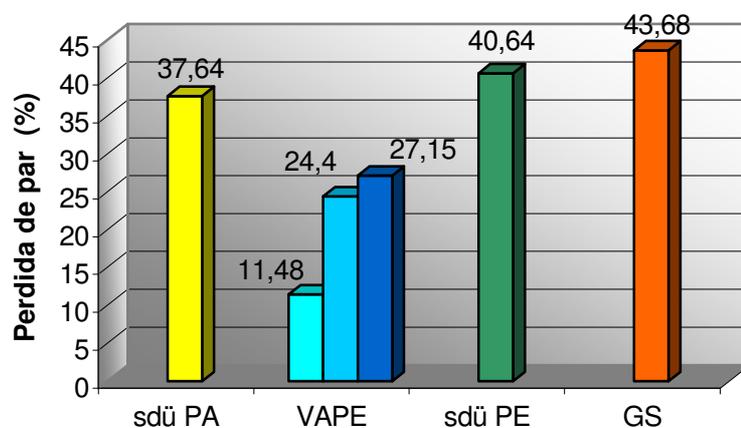


Figura 6.60. Variación del par de desapriete respecto al de apriete nominal

El filo de sección triangular y afilado del tirafondo nº 9 del anclaje Sdü aumenta el par de desapriete al clavarse en la espiga frente a la sección trapezoidal del paso del tirafondo GS. Pero, como aspecto negativo, el tirafondo nº 9 genera un daño permanente en la espiga en cada roscado por efecto de la hélice afilada, disminuyendo las prestaciones de la espiga en montajes posteriores, mientras que en el tirafondo GS, al igual que en el tornillo VAPE, esta circunstancia no ocurre.

El segundo de los ensayos que se puede emplear para la optimización del anclaje es el de extracción. En función de los resultados obtenidos, la primera de las conclusiones es el mal resultado obtenido por el anclaje Sdü PE, que no alcanza el mínimo exigido de 60 kN, mientras que el resto de anclajes lo superan sin problemas.

En cuanto a la carga soportada en rotura, el mejor resultado es el obtenido con Sdü PA con 131.8 kN seguido del GS con 105 kN y por último el VAPE que obtuvo resultados entre 75.5 y 92.5 kN.

Esta dispersión en los valores obtenidos con el anclaje VAPE posiblemente es debido a la fuerte dependencia del comportamiento mecánico de la PA con su contenido de humedad unido a la naturaleza higroscópica de la misma. En el Anexo II se realiza un estudio pormenorizado de la influencia que el contenido de humedad puede tener sobre la PA. Además, en el siguiente capítulo también se analiza la influencia que la humedad tiene en el comportamiento de diferentes componentes de la sujeción.

Se desconoce la humedad que pudieran tener las vainas VAPE en el momento del ensayo y, por tanto, su influencia sobre la resistencia mecánica, pero sí se sabía que el anclaje Sdü PA estaba recién fabricado, es decir, seco de inyección, por lo que su resistencia fue cercana a la máxima que podía tener.

Se han realizado ensayos de rotura sobre una vaina VAPE seca de inyección comprobando que su resistencia supera los 150 kN, como puede verse en la Figura 6.61.

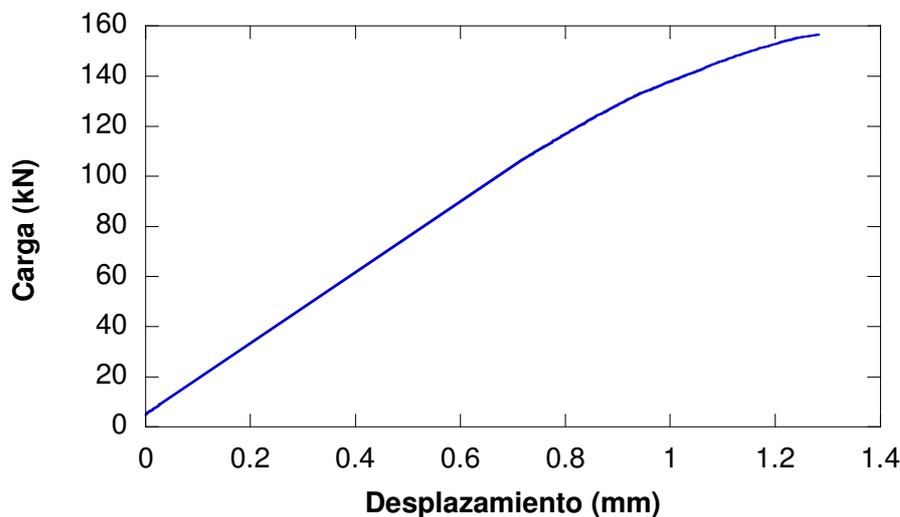


Figura 6.61. *Ensayo de rotura sobre una vaina VAPE seca*

En cuanto al tornillo o tirafondo del anclaje, se comprobó que el de la solución GS era el que menos carga soportó rompiéndose con 110 kN, pero después de haber roto la vaina, el tirafondo del nº 9 de la solución Sdü PA alcanzó los 130 kN, también después de rota la vaina y, por último, el tornillo VAPE, de mayor sección neta, no se rompe porque su rotura está en torno a los 200 kN, muy superior a la carga de rotura de la vaina.

3.1.1. Conclusiones sobre el anclaje

A la vista de los resultados obtenidos, se propone como solución óptima el anclaje VAPE por las razones que se resumen a continuación:

- ❑ Presenta el mayor par de desapriete de los anclajes estudiados
- ❑ La pérdida de fuerza de apriete tras la aplicación de cargas dinámicas es la menor de las soluciones adoptadas, lo que repercutirá en una

ampliación de los tiempos de mantenimiento de vía para reapriete, con el correspondiente ahorro económico.

- ❑ La solución de la chapa metálica como fusible mecánico para evitar solicitaciones extras sobre el hormigón de la traviesa es muy adecuada.
- ❑ El tornillo VAPE no daña la espiga en cada acción de desmontaje y montaje, convirtiéndolo en una acción reversible.
- ❑ La forma de extracción, es decir, con arranque de la rosca interior, manteniendo el resto de la vaina íntegra, facilita la labor de sustitución de vainas rotas en vía por vainas nuevas empleando un kit específico de reparación basado en la sustitución de la rosca interior arrancada por una nueva.
- ❑ La fuerza de extracción es inferior a la obtenida con varias de las soluciones propuestas, pero esta fuerza llega a ser hasta de un 50 % la exigida por la especificación. Aunque en estos ensayos previos la fuerza de extracción no superó los 93 kN, en ensayos posteriores sobre el producto definitivo y seco de inyección se consiguieron valores de extracción en torno a los 150 kN.
- ❑ Por último, en cuanto al aislamiento eléctrico entre hilos, ensayos específicos demostraron que el hecho de la existencia de la chapa metálica no implicaba un descenso en el valor de la resistencia eléctrica.

3.2. OPTIMIZACIÓN DE LA PLACA ACODADA

Las posibles soluciones presentadas para la placa acodada han sido:

- ❑ Placa acodada maciza en Poliamida 6 reforzada con fibra de vidrio en un 30 % en peso (Pag0)
- ❑ Placa acodada maciza en Poliamida 6.6 reforzada con fibra de vidrio en un 35 % en peso (Pag0 PA 6.6)

- ❑ Placa acodada maciza en Poliamida 6 reforzada con fibra de vidrio en un 30 % en peso y rectificada 0.5 mm en la zona de apoyo del bucle del clip (Pag0 rect.)
- ❑ Placa acodada ligera A2 en Poliamida 6.6 reforzada con fibra de vidrio en un 35 % en peso (A2)
- ❑ Placa acodada híbrida en Poliamida 6.6 reforzada con fibra de vidrio en un 35 % en peso (Híbrida)
- ❑ Placa acodada Vossloh para sujeción SKL-14 en Poliamida 6.6 reforzada con fibra de vidrio en un 35 % en peso (SKL-14)

De los primeros ensayos realizados para la optimización de la placa acodada, se sacan una serie de conclusiones. La primera es que la placa de la solución SKL-14 no sirve ya que el sistema no cumple con el valor mínimo especificado para la fuerza de apriete. La segunda es que se intuye una cierta influencia entre la geometría de la placa acodada sobre la fuerza de apriete del sistema. Se ha comprobado que los sistemas montados con la placa Pag-0 tienen problemas para conseguir la fuerza de apriete mínimo, debido a que la altura del apoyo del bucle del clip es más alto que en el resto de placas. En uno de los ensayos en los que la placa Pag-0 se rectificó, disminuyendo la altura del apoyo del bucle se consiguió incrementar significativamente el valor de la fuerza de apriete, desde 16.4 a 18.3 kN. Esta posible influencia será estudiada con más detalle en el siguiente capítulo.

Para ayudar a la decisión final y ante la falta de elementos de juicio para llegar a la misma, se decidió realizar una serie de ensayos comparativos entre los diferentes tipos de placas para ayudar a tomar una determinación.

3.2.1. Ensayos comparativos sobre pieza acodada aislada

Dado que los resultados obtenidos hasta el momento no marcaban diferencias claras atribuibles al efecto de la placa acodada entre soluciones analizadas se procedió a una caracterización mecánica individual y comparativa para así facilitar

el proceso de optimización de este componente. Las placas estudiadas fueron la ligera (A2), la híbrida y la maciza Pag-0 de PA 6.6.

La caracterización consistió en la aplicación de esfuerzos laterales sobre la placa acodada de diferente naturaleza:

- ❑ Carga estática
- ❑ Carga dinámica de impacto
- ❑ Carga dinámica cíclica

Para su aplicación, se empleó un útil metálico que simulaba la cavidad de la traviesa donde se apoya la placa acodada, junto con un aplicador de carga con la forma del patín del carril UIC-60 [78], tal como puede verse en la Figura 6.62.

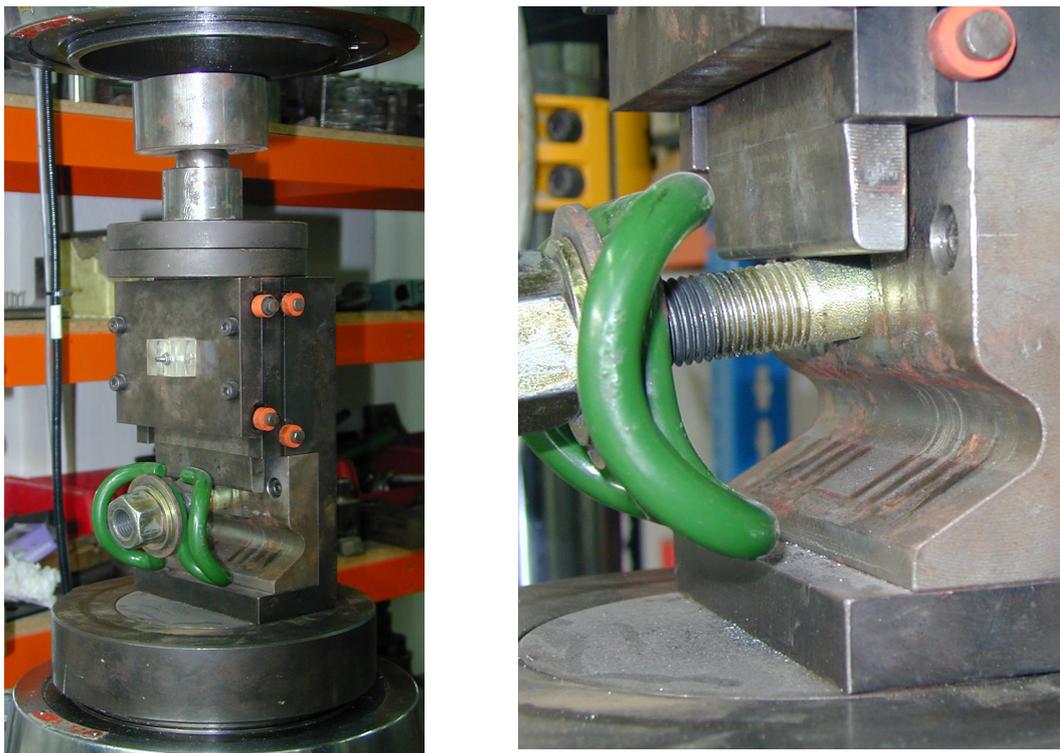


Figura 6.62. *Útil empleado para la caracterización mecánica de la placa acodada*

Conocida la higroscopicidad de las poliamidas y su influencia en las propiedades mecánicas, para obtener resultados comparativos, las placas se secaron en

estufa durante 7 días a 100 °C a fin de eliminar su contenido de humedad. A continuación, se procedió a realizar un control ponderal sobre 10 placas de cada modelo para fijar la referencia que establece la diferencia de masas entre los tres modelos en estudio.

Para la ejecución del ensayo bajo carga estática se colocó la placa con su correspondiente tornillo, clip y arandela en el útil de ensayo y se aplicó un par de apriete por medio de una llave dinamométrica hasta alcanzar los 120 N·m. Tras una precarga inicial de compresión de 5 kN para ajustar las holguras existentes entre todos los útiles que interviene en el ensayo, se aplicó una carga creciente a una velocidad de 1 kN/s hasta provocar la rotura de la placa acodada. A lo largo de todo el ensayo, se determinó el desplazamiento relativo entre el aplicador de la fuerza y la placa acodada, pudiéndose considerar como un índice de la deformación sufrida por la pieza.

Para el ensayo de impacto a rotura bajo carga lateral, se empleó el mismo montaje, aplicándose, también, una precarga inicial de 5 kN de compresión para asegurar un contacto homogéneo del aplicador de carga con la superficie de la placa acodada que hace tope con el carril. A continuación, se programó un desplazamiento instantáneo del actuador de la máquina de ensayo sobre la placa acodada, por medio de la generación de una onda cuadrada de 6 mm de amplitud que conduce a su rotura por impacto.

Para la caracterización frente a carga cíclica, se empleó el método LOCATI [104 y 105]. Con este ensayo, se pretende determinar la resistencia a fatiga de las diferentes configuraciones propuestas. El método consiste en aplicar una fuerza máxima escalonada y creciente, a partir de un valor inferior al límite de fatiga, durante un número constante de ciclos [106]. En este caso, se aplicaron bloques de 20.000 ciclos de onda cuadrada a una frecuencia de 5 Hz, entre valores de carga de compresión iniciales de 5 y 54 kN. El valor mínimo se conservó en todos los bloques, mientras que el valor máximo, se incrementaba 2 kN en cada bloque. Los parámetros empleados se resumen en la Tabla 6.1.

Tabla 6.7. *Parámetros empleados en el ensayo Locati*

N (ciclos)	$F_{m\acute{a}x}$ (kN)	$F_{m\acute{i}n}$ (kN)	N. medio (kN)	Amplitud (kN)
[1 - 20.000]	54	5	29.5	24.5
[20.000 - 40.000]	56	5	30.5	25.5
[40.000 - 60.000]	58	5	31.5	26.5
[60.000 - 80.000]	60	5	32.5	27.5
[80.000 - 100.000]	62	5	33.5	28.5
[100.000 - 120.000]	64	5	34.5	29.5
[120.000 - 140.000]	66	5	35.5	30.5
[140.000 - 160.000]	68	5	36.5	31.5
[160.000 - 180.000]	70	5	37.5	32.5
[180.000 - 200.000]	72	5	38.5	33.5

El control ponderal sobre los diferentes modelos ofreció los resultados que se resumen en la Tabla 6.8.

Tabla 6.8. *Resultados del control ponderal de las placas acodadas*

	LIGERA A2	HÍBRIDA	MACIZA
Media	125.83	155.81	177.85
Máximo	126.25	155.96	177.99
Mínimo	125.53	155.34	177.77
Desv. típica	0.270	0.166	0.099

Como puede observarse la placa maciza es 52.02 g (41.34 %) más pesada que la placa ligera y 22.04 g (14,14 %) más que la placa híbrida. A su vez, la placa híbrida es 29.98 g (23.82 %) más pesada que la placa ligera.

En el gráfico de la Figura 6.63 se representa el registro de la fuerza aplicada frente al recorrido del captador de desplazamiento durante el ensayo estático. En la Tabla 6.9 se indican los valores de carga y desplazamiento del simulador del patín del carril en rotura de cada placa ensayada.

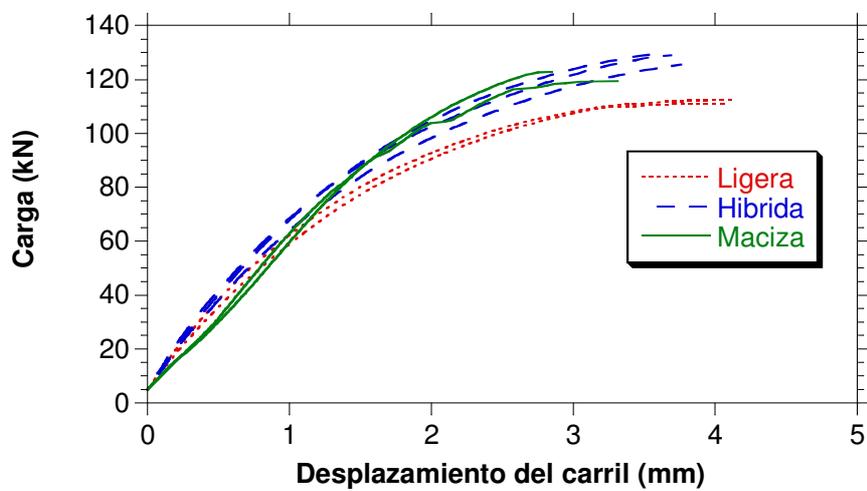


Figura 6.63. Ensayo estático sobre placas acodadas

Tabla 6.9. Resumen de los resultados obtenidos en el ensayo estático

Pieza		Carga rotura (kN)	Desp. rotura (mm)
Ligera	A5	111.08	4.08
	A6	112.46	4.11
	Media	111.77	4.09
Híbrida	H10	125.54	3.76
	H11	129.15	3.53
	H12	128.88	3.69
	Media	127.85	3.66
Maciza	M34	119.42	3.31
	M37	122.78	2.85
	Media	121.10	3.08

Se constata que la placa que más se deforma en rotura es la A2, seguida por la híbrida y la maciza, y la que soporta mayor carga en rotura es la híbrida, seguida de la maciza y por último la placa ligera.

Los resultados obtenidos en el ensayo de impacto se muestran en el gráfico de la Figura 6.64, donde aparece la evolución de la fuerza aplicada en función del recorrido del captador de desplazamientos, LVDT. En la Tabla 6.10 se muestra un resumen de los resultados alcanzados en los ensayos de rotura al impacto bajo carga lateral.

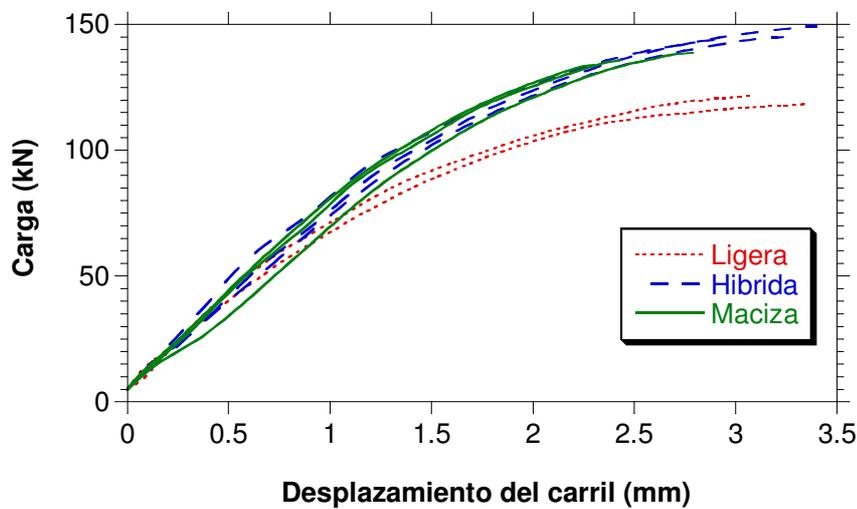


Figura 6.64. Ensayo de impacto sobre placas acodadas

Tabla 6.10. Resumen de los resultados obtenidos en el ensayo de impacto

Pieza		Carga rotura (kN)	Desp. rotura (mm)
Ligera	A1	121.70	3.08
	A3	118.40	3.34
	Media	120.05	3.21
Híbrida	H7	144.07	2.92
	H8	149.11	3.39
	H9	144.98	3.23
	Media	146.05	3.18
Maciza	M16	135.80	2.43
	M32	134.03	2.30
	M35	138.81	2.79
	Media	136.21	2.50

Como se puede observar en la última tabla, los resultados obtenidos en impacto coinciden con los estáticos, la placa ligera es la que más se deforma y la maciza la que menos, siendo la híbrida la que soporta mayor carga antes de romper y la ligera la que menos.

En los ensayos Locati realizados, se registraron datos de ondas completas cada 1000 ciclos, almacenándose 50 puntos por onda de carga y de deformación, permitiendo representar la evolución de estos parámetros a lo largo del ensayo.

En la Figura 6.65 se muestra el progreso de la deformación con el número de ciclos aplicado para cada una de las placas estudiadas.

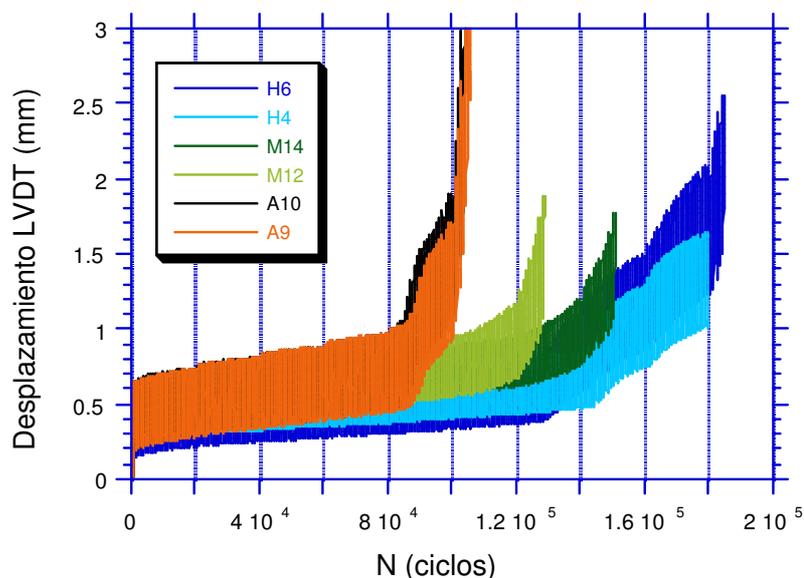


Figura 6.65. *Ensayo LOCATI*

Según se puede observar, existe un escalón de carga crítica para cada una de las placas a partir del cual los valores de la deformación pierden su estabilidad y crecen con una velocidad acelerada que precede a la rotura de la muestra.

De este modo, es posible establecer un nivel de variación de tensiones crítico, $\Delta\sigma_c$, que determina el valor de la resistencia a la fatiga del material.

Para la búsqueda de este escalón crítico, se recurre al estudio de la variación de las deformaciones frente al n° de ciclos, es decir, al estudio de la derivada de la deformación [107]. Para observarse con mayor claridad se empleará la derivada de la deformación máxima ($\epsilon_{m\acute{a}x}$). El escalón crítico será el último en el que la derivada de la deformación mantiene el valor nulo, como puede observarse en la Figura 6.66. En la Tabla 6.11 y Tabla 6.12, se presentan a modo de resumen, los resultados obtenidos.

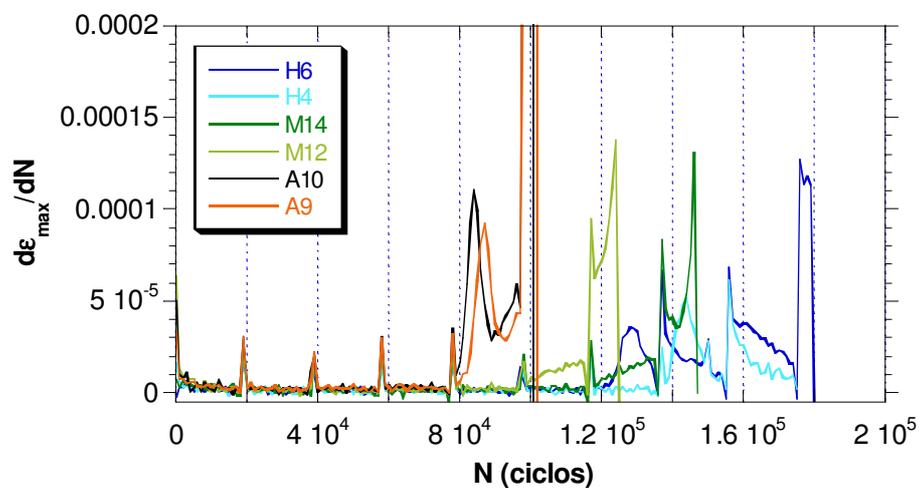


Figura 6.66. Evolución de la derivada de la deformación (desplazamiento)

Tabla 6.11. Resumen de los resultados obtenidos en el ensayo LOCATI

Pieza		Escalón crítico (ciclos)	Ciclo de rotura (ciclo)	Carga máx. quiebro (kN)	Desplaz. máx. quiebro (mm)
Ligera	A9	[60.000-80.000]	105.379	60	1.046
	A10	[60.000-80.000]	104.059	60	0.973
Híbrida	H4	[100.000-120.000]	186.121	64	0.845
	H6	[120.000-140.000]	184.363	66	0.774
Maciza	M12	[80.000-100.000]	128.587	62	0.928
	M14	[100.000-120.000]	150.632	64	0.943

Tabla 6.12. Resistencia a la fatiga de las placas estudiadas

Placa	Carga max. quiebro (kN)
Ligera A2	60
Híbrida	65
Maciza	63

El mejor comportamiento en fatiga lo presenta la placa híbrida, siendo la placa A2 la que tiene el menor límite de fatiga (8 % inferior a la híbrida).

3.2.2. Conclusiones sobre la placa acodada

Como se comentó en el capítulo 3 de la presente Tesis la máxima fuerza lateral medida en un vehículo en marcha tenía lugar en el primero de los ejes a 340 km/h y su valor era de 21 kN, siendo además el límite establecido por UIC de 62 kN. Comparando estos valores con los resultados obtenidos, las tres soluciones propuestas superan, con un amplio margen de seguridad, las exigencias a las que van a estar sometidas. Por tanto, en la elección de una u otra alternativa, se tendrán en cuenta, además de las particularidades técnicas, aspectos de otra índole diferentes a los propiamente mecánicos, como por ejemplo, el económico y la experiencia previa sobre la placa, entre otras.

- ❑ La placa maciza Pag-0 es cuestionable por el problema geométrico detectado, al permitir una variación en la altura del alojamiento del bucle del clip de 1 mm, y tratarse de una cota crítica para dotar al conjunto de sujeción de la fuerza de apriete correcta. Este intervalo de 1 mm se antoja demasiado amplio para garantizar el correcto apretado de la sujeción.
- ❑ El menor peso de la placa ligera, un 41.3 % menos de material que la placa maciza y un 28.8 % que la híbrida, debe conducir, en principio, a un ahorro paralelo en el coste de fabricación con respecto a sus competidoras.
- ❑ Desde el punto de vista resistente, la placa híbrida presenta el mejor de los comportamientos: en estático supera en un 5% a la maciza y en un 13 % a la ligera; en impacto supera en un 7 % a la maciza y en un 18 % a la ligera; en fatiga supera en un 3% a la maciza y en un 8 % a la ligera. A pesar de estos valores, y como ya se comentó, incluso la placa ligera supera en un 80 % la exigencia mínima establecida por UIC y en un 430 % la máxima fuerza medida en vía.

Debido a la gran diferencia existente entre las masas de las diferentes placas se realizó una comparativa de los valores específicos de resistencia, es decir, normalizando el valor de resistencia mecánica

respecto a la masa de cada una de las placas [kN/g]. En la Tabla 6.13 se reflejan los valores de resistencia específica de las diferentes placas.

Tabla 6.13. Resistencias específicas de las diferentes placas A2

Ensayo	Resistencia específica [kN/g]		
	Ligera A2	Hibrida	Maciza
Estático	0.888	0.820	0.681
Impacto	0.954	0.937	0.766
Fatiga	0.477	0.417	0.354

Se puede observar, que en el análisis de resistencias específicas, la placa ligera alcanzó los mayores valores ante todo tipo de esfuerzos. La placa ligera superó a la híbrida en un 7.7 % en estático, en un 1.8 % en impacto y en un 12.4 % en fatiga y, por otro lado, la maciza fue superada en un 23.3 %, 19.7 % y 25.6 %, respectivamente. Esta superioridad en las resistencias específicas es un índice que indica la mejor optimización de las placas ligeras, tanto en geometría como en material, respecto al resto.

- ❑ La placa A2 es la que presenta una mayor deformabilidad, tanto en estático como en impacto, siendo la maciza la que menos se deforma antes de rotura.
- ❑ De las soluciones propuestas, solamente las placas A2 y Pag-0 se encontraban instaladas en vía antes de realizar este estudio. Esto supone una ventaja muy importante ya que se dispone de datos históricos de comportamiento y de durabilidad de las mismas. Por el contrario, de las placas prototipo falta todo tipo de experiencia, tanto desde el punto de vista de instalación como del funcionamiento de las mismas.
- ❑ De la misma forma, solamente dos de ellas, la placa A2 y la placa maciza Pag-0, tienen su propia Especificación Técnica. Ello indica que las placas empleadas han tenido que superar, previamente, unas pruebas de control que, de alguna manera aseguran la calidad del producto. Las otras

opciones carecen de este control previo, por lo que de resultar elegidas requerirían la tarea adicional de definir un protocolo para la realización de ese control, con la consiguiente base empírica que lo respaldase, lo cual se traduce en tiempo dedicado a su concreción y contraste.

- ❑ Los menores y más uniformes espesores de la solución aligerada, permiten una absorción rápida y equilibrada de la humedad necesaria para el correcto funcionamiento de estas piezas, lo que propicia una estructura global de la poliamida más homogénea junto con una respuesta mecánica más fiable y controlada.

En función de estos aspectos comentados se propone la placa acodada ligera A2 como solución óptima.

3.3. OPTIMIZACIÓN DE LA PLACA DE ASIENTO

Las posibles soluciones presentadas para la placa de asiento han sido:

- ❑ Placa Modelo A (ARNITEL con resaltes rectangulares)
- ❑ Placa Modelo B (HYTREL con resaltes ovalados)
- ❑ Placa Modelo C (Elastómero + EVA con resaltes circulares) con dos durezas diferentes, (C0) y (C1)

Como ya se indicó en el capítulo anterior la placa Modelo C0 fue descartada directamente por no alcanzar la rigidez mínima exigida por la especificación. Los otros tres modelos superaron las seis pruebas de rigidez, tanto las previas como las posteriores al dinámico, por lo que a partir de estos ensayos no se ha podido extraer ninguna otra conclusión.

El ensayo que ha proporcionado mayor información para la selección de la placa de asiento óptima ha sido el dinámico. Estudiando los parámetros de variación de rigidez, así como de los desplazamientos remanentes, la placa que peor parada sale es la Modelo C1. La variación de rigidez P_0/P_{0+75} alcanzó el 24 %, cercano a

la máxima exigida de 25 %, manteniéndose las de TPE por debajo del 8 % de incremento en la rigidez. Esta tendencia se pudo ver también en el ensayo de rigidez 5/80, donde la placa modelo C1 alcanzó una variación del 12.5 %, manteniéndose las de TPE por debajo del 5 %. En cuanto a los desplazamientos remanentes será la placa Modelo C1 la que presenta los valores más altos en el desplazamiento de cabeza y en el desplazamiento vertical del patín 0.93 frente a 0.78 y 0.33 frente a 0.25, respectivamente, mientras que en los desplazamientos horizontales no se aprecia diferencia alguna entre los diferentes modelos. Por último, otro de los parámetros que perjudica las opciones del Modelo C1 es el desgaste, llegando a alcanzar pérdidas de espesor de 1.7 mm en la zona más solicitada, mientras que en los modelos de TPE no se superan pérdidas de espesor de 1.2 mm.

La placa Modelo C1 presenta la rigidez dinámica más elevada, casi 183 kN/mm, mientras que las placas de TPE no superan los 158 kN/mm, lo que indica una menor capacidad de amortiguamiento frente a las acciones dinámicas.

3.3.1. Conclusiones sobre la placa de asiento

A la vista de los resultados estudiados, se propone como solución óptima, las placas fabricadas con elastómero termoplástico (TPE) por las razones que se resumen a continuación:

- ❑ Las placas de TPE presentan una merma mínima en sus propiedades mecánicas tras el ensayo de fatiga, reflejado en un incremento pequeño de la rigidez vertical secante P_0/P_{0+75} . Por el contrario, la placa Modelo C1 se rigidiza hasta casi un 24 % tras el ensayo de fatiga. El comportamiento exhibido en el ensayo de rigidez 5/80 es similar.
- ❑ Los desplazamientos residuales en el ensayo de fatiga, tanto los de la cabeza del carril como los verticales del patín son menores en las placas fabricadas con TPE que en la placa Modelo C1.

- ❑ Las placas de TPE se desgastan menos en el ensayo de fatiga, manteniéndose su desgaste por debajo de 1.2 mm, mientras que la placa Modelo C1 llega en algunas zonas a perder hasta 1.7 mm de espesor.
- ❑ Por último, las placas de TPE, a pesar de tener una mayor rigidez estática que la Modelo C1, presentan una menor rigidez dinámica, lo que supone una mayor amortiguación de las acciones dinámicas.

3.3.2. Comparación de las placas de asiento de TPE con otras placas en servicio

En este apartado se ha llevado a cabo una comparativa del comportamiento de la placa de TPE con una serie de placas de diferentes materiales, geometrías y espesores en funcionamiento en la actualidad:

- ❑ Placa de TPE de 7 mm (**TPE**)
- ❑ Placa Zw 700 de TPU de 7 mm (**TPU**)
- ❑ Placa NVR de caucho de 4 mm (**Caucho**)
- ❑ Placa de EVA de 5 mm (**EVA5**)
- ❑ Placa de EVA de 6 mm maciza, empleada en el AVE Madrid-Sevilla (**EVA6**)

La comparativa se realizó evaluando la pérdida de propiedades de la placa sometida a un deterioro acelerado por fatiga. El deterioro se realizó por medio de una prueba de fatiga monótona a temperatura ambiente de 200.000 ciclos de naturaleza senoidal a 4 Hz entre valores de fuerza de 18 y 93 kN. La posible pérdida de funcionalidad, se evaluó por medio de la rigidez estática y la energía disipada obtenida a partir de ensayos de rigidez estática P_0/P_{0+75} ($P_0 = 18$ kN) realizados previa y posteriormente a la prueba dinámica.

Los ensayos de rigidez realizados sobre las diferentes placas se muestran en los gráficos de las Figuras 6.67 a 6.71.

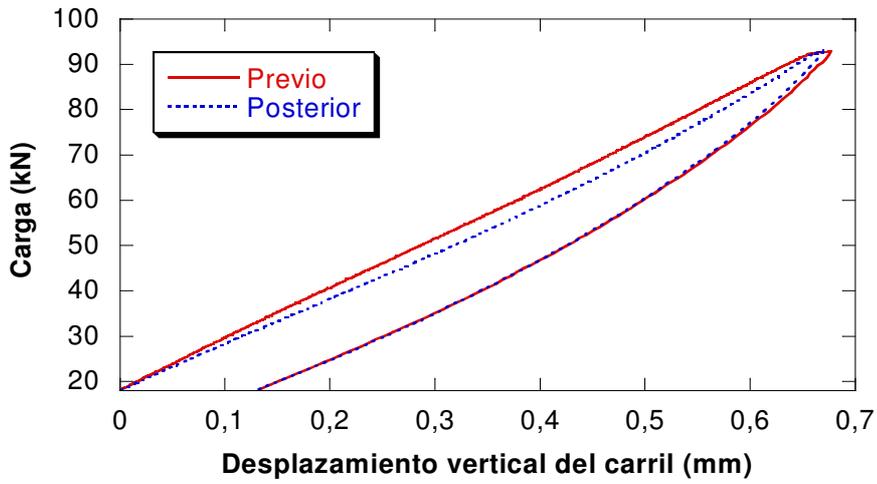


Figura 6.67. Ensayos de rigidez, previo y posterior, sobre placa TPE

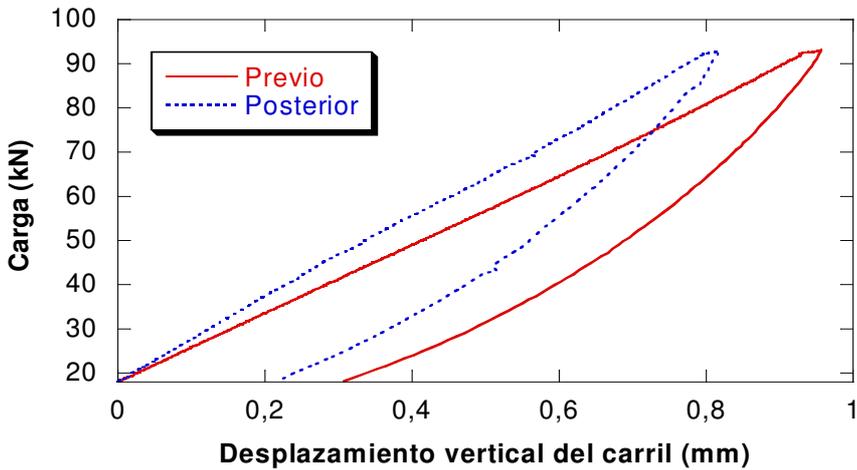


Figura 6.68. Ensayos de rigidez, previo y posterior, sobre placa TPU

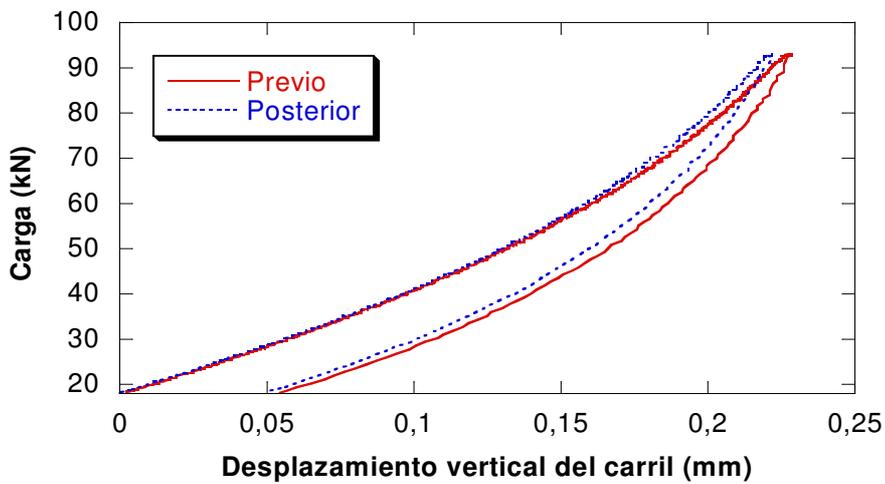


Figura 6.69. Ensayos de rigidez, previo y posterior, sobre placa de caucho

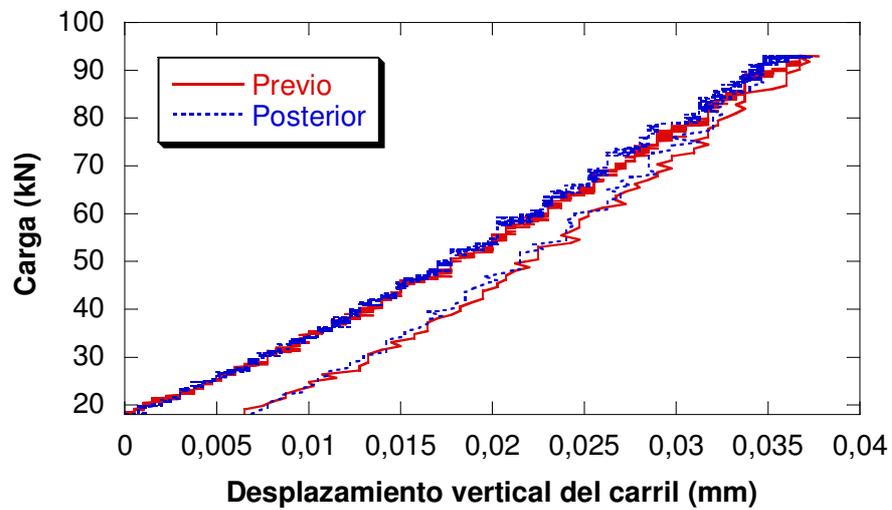


Figura 6.70. Ensayos de rigidez, previo y posterior, sobre placa de EVA de 5 mm

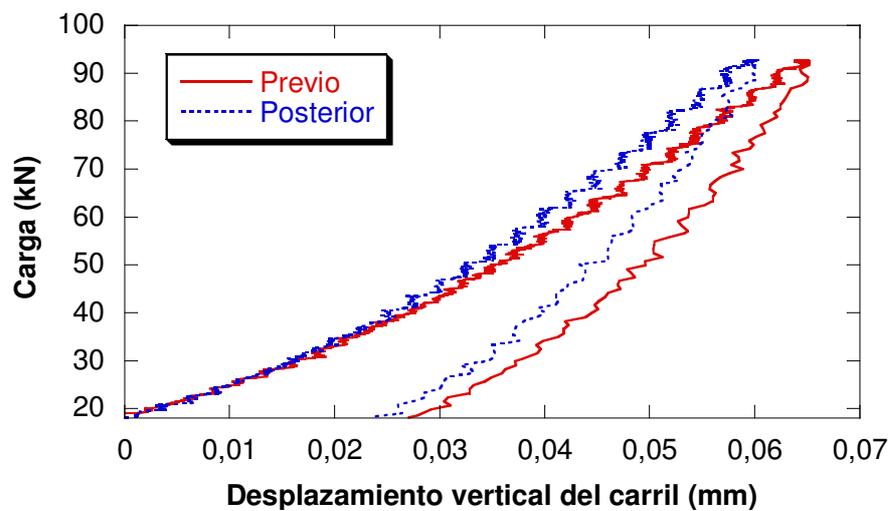


Figura 6.71. Ensayos de rigidez, previo y posterior, sobre placa de EVA de 6 mm

En la Tabla 6.14, a modo de resumen, se muestran los resultados de rigidez y energía disipada obtenidos tras los ensayos estáticos.

Tabla 6.14. Resultados obtenidos en los ensayos de rigidez estática

Placa	Rigidez estática			Energía disipada estática		
	inicial (kN/mm)	final (kN/mm)	Variación (%)	inicial (J)	final (J)	Variación (%)
TPEE	110.7	111.9	1.2	8.4	6.7	21.1
TPU	78.5	91.6	16.7	16.7	12.9	22.7
Caucho	329.7	338.2	2.6	2.2	1.9	11.4
EVA (5 mm)	2027.0	2112.7	4.2	0.27	0.25	7.4
EVA (6 mm)	1152.0	1245.0	8.1	0.95	0.80	15.9

A la vista de los resultados obtenidos, se pueden destacar las siguientes conclusiones:

- ❑ La placa de TPU disipa, inicialmente, el doble de energía que la de TPE, 7 veces más que la de caucho, 17 veces más que la de EVA de 6 mm y 50 veces más que la de EVA de 5 mm.
- ❑ La placa de TPU, de menor rigidez y mayor amortiguamiento inicial, sufre un mayor deterioro que el resto de placas, ya que presenta las mayores variaciones en los parámetros controlados.
- ❑ Las placas de EVA, a pesar de la elevada rigidez inicial, no consiguen una pérdida inferior en rigidez a la obtenida por la de TPE o la de caucho, aunque esta variación es menor a la hora de contemplar la energía disipada. Es decir, se rigidizan más, pero pierden menos capacidad de amortiguamiento tras el ensayo dinámico.
- ❑ El incremento de 1 mm en el espesor de una de las placas de EVA, reduce la rigidez inicial prácticamente a la mitad, aumentando la energía disipada en un 250 %. En el mismo sentido, este aumento de espesor de la placa acelera su deterioro ya que se incrementan las pérdidas tras la fatiga al doble, tanto de la rigidez, como de la energía disipada.
- ❑ La placa de TPU proporcionará un mayor amortiguamiento, pero, también, exigirá un mayor mantenimiento. Las placas de caucho y de EVA gozarán de plazos de reposición más amplios, pero el amortiguamiento conseguido será inferior. Y, por último, se podría decir

que la placa de TPE presenta el mejor balance entre mantenimiento y amortiguamiento de las placas estudiadas.

En las Figuras 6.72 y 6.73 se representa la evolución de la rigidez dinámica, en escala logarítmica, y de la energía disipada en cada uno de los ciclos a lo largo del ensayo de fatiga para todas las placas ensayadas.

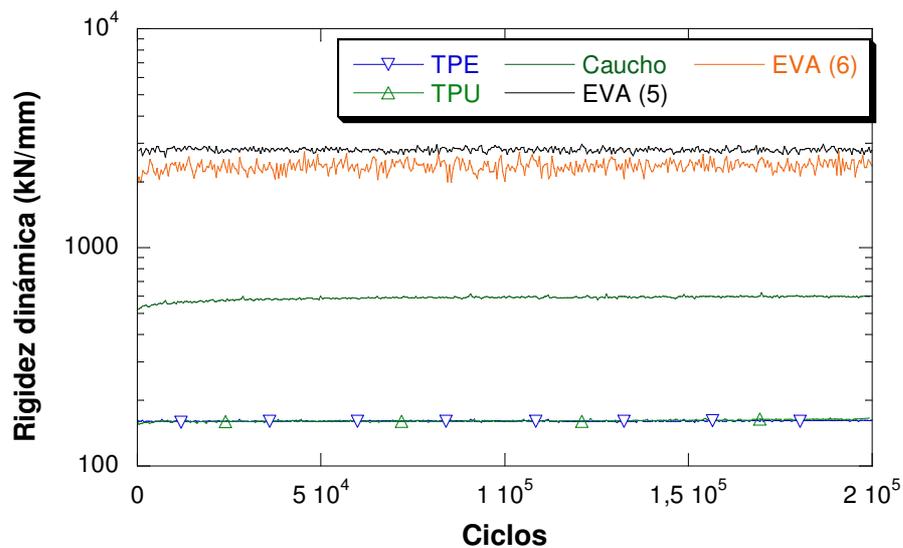


Figura 6.72. Evolución de la rigidez dinámica a lo largo del ensayo de fatiga

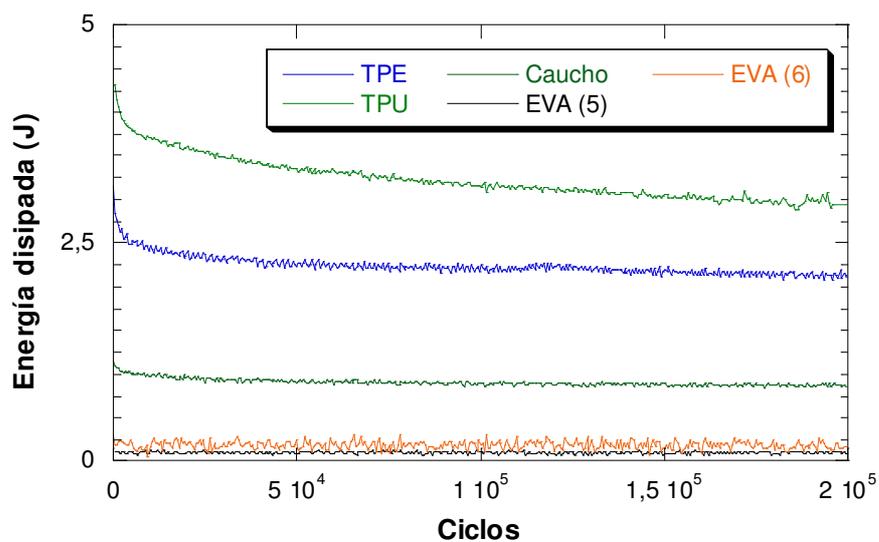


Figura 6.73. Evolución de la energía disipada a lo largo del ensayo de fatiga

En la Tabla 6.15, a modo de resumen, se muestran los resultados obtenidos con las placas ensayadas, tanto en rigidez como en energía.

Tabla 6.15. *Resumen de los resultados dinámicos de rigidez y energía disipada*

Placa	Rigidez dinámica			Energía disipada dinámica		
	inicial (kN/mm)	final (kN/mm)	Variación (%)	inicial (J)	final (J)	Variación (%)
TPE	160.0	162.0	1.3	2.8	2.1	25.0
TPU	155.8	166.2	6.7	4.3	2.9	30.9
Caucho	524.0	598.0	14.1	1.1	0.87	19.4
EVA (5 mm)	2750.0	2781.0	1.1	0.10	0.10	0.0
EVA (6 mm)	2100.0	2421.0	15.3	0.19	0.16	15.8

Las rigideces dinámicas de la placa de TPE y TPU son muy similares a lo largo de todo el ensayo, permaneciendo en un nivel superior las placas de EVA y en uno intermedio la de caucho. Se confirma, a la vista de los resultados, que la placa TPU es la que disipa más energía, aunque la tendencia con el número de ciclos es a alcanzar a la placa de TPE, ya que decrece con mayor pendiente, síntoma de acusar un mayor deterioro. Por el contrario, la placa de caucho y sobre todo las de EVA se mantienen en un nivel muy inferior.

3.4. OPTIMIZACIÓN DEL CLIP ELÁSTICO

Las posibles soluciones analizadas para el clip elástico han sido:

- Clip A (color verde)
- Clip B (color granate)
- Clip C (galvanizado)
- Clip SKL-14 (color negro)

Como ya se indicó en el capítulo anterior la sujeción SKL-14 se descartó por no alcanzar el apriete necesario. Para el resto de clips, ninguno de los ensayos que en principio parecía ser importantes para su selección, la fuerza de apriete, la resistencia eléctrica y las condiciones ambientales adversas, han aportado

información que ayuden a decantarse por uno u otro. Únicamente se ha conseguido cuantificar una ligera diferencia de comportamientos en los ensayos específicos de corrosión. En estos ensayos el clip C (galvanizado) ha mostrado un comportamiento ligeramente superior a los otros dos, siendo el clip B el que ha exhibido el peor comportamiento.

La escasa información obtenida hasta el momento, a partir de los ensayos realizados sobre configuraciones completas, no ayuda a decantarse por ninguno de los modelos por lo que se decidió realizar ensayos comparativos entre ellos.

3.4.1. Ensayos comparativos sobre clip

Primero se realizaron ensayos de comportamiento mecánico, tratando de evaluar la pérdida de elasticidad, para lo que se diseñó un dispositivo similar al mostrado en la especificación del producto [68]. El dispositivo de ensayo se muestra en la Figura 6.74 y un detalle del proceso de carga y descarga del clip aparece en la Figura 6.75.



Figura 6.74. *Dispositivo empleado para los ensayos mecánicos de los clips*

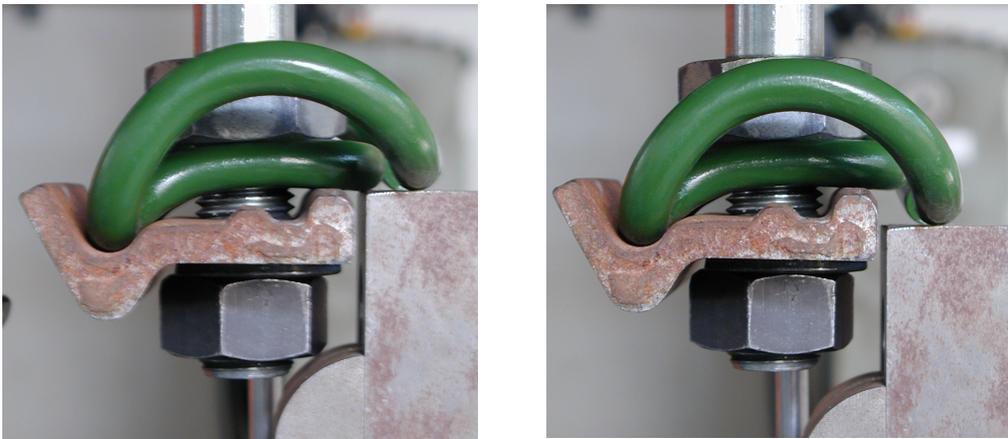


Figura 6.75. Detalle del proceso de carga y descarga del clip

El ensayo consistió en la aplicación de una carga de 15 kN en compresión, mantenida durante 10 s y posterior descarga hasta 0.5 kN, secuencia ésta, que se repitió durante 9 veces más. La evolución de las curvas carga-desplazamiento, se puede observar en la Figura 6.76.

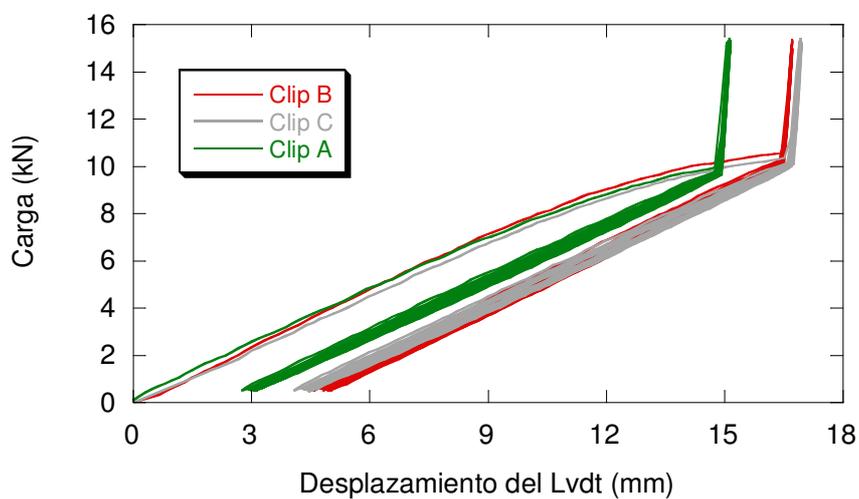


Figura 6.76. Gráfico carga-desplazamiento en el ensayo de elasticidad

Como puede observarse, el primer ciclo de carga es el único diferente al resto de los otros 9 ciclos, que son prácticamente idénticos. En este ciclo inicial se produce un endurecimiento asociado a una deformación plástica de entre 3 y 5 mm

dependiendo de la geometría inicial del clip. En los siguientes ciclos el comportamiento es anelástico presentando la existencia de una cierta histéresis en todos los ciclos, pero sin dejar en ningún momento, deformación permanente. Se determinó, por un lado, la carga correspondiente a una descarga de 4 mm desde el punto de contacto en la primera y última descarga. También, se calculó la rigidez, o pendiente de curva fuerza-desplazamiento media de los últimos 9 ciclos, así cómo se incrementaba esta rigidez con el número de ciclos. Estos resultados se muestran en la Tabla 6.16 y en la Figura 6.77.

Tabla 6.16. Resultados mecánicos de los clips

Parámetros	Clip A	Clip B	Clip C
F. en la primera descarga de 4 mm (kN)	6.50	6.75	6.88
F. en la décima descarga de 4 mm (kN)	6.25	6.55	6.72
Rigidez media de los 10 ciclos (kN/mm)	0.772	0.825	0.776

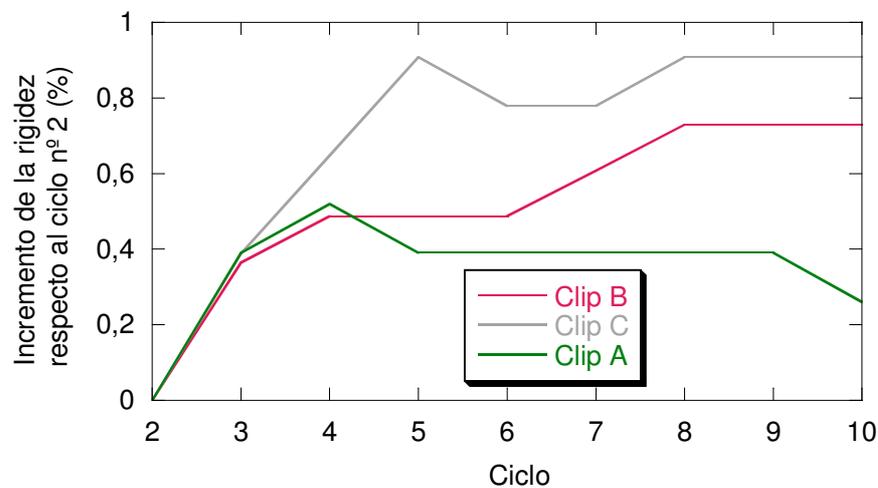


Figura 6.77. Aumento de la rigidez del clip con el nº de ciclos de carga-descarga

A la vista de los resultados, se comprueba que todos los clips superan ampliamente la limitación impuesta en la especificación respecto al valor de la fuerza en una descarga de 4 mm cifrado en 5.1 kN, siendo, en los tres casos, muy similares entre sí, tanto en valor absoluto como en la pérdida relativa entre el primer y último ciclo.

En cuanto a la rigidez media también se comprueba una cierta igualdad siendo la máxima diferencia entre ellos inferior al 7 %. Por último, en los tres casos se observó un pequeño incremento de rigidez en los primeros ciclos de carga-descarga, estabilizándose prácticamente en todos los casos a partir de ciclo número 4, y manteniéndose en todos los casos el aumento de rigidez por debajo del 1 %.

Se realizó un ensayo de dureza Rockwell C sobre una probeta obtenida del extremo de una de las patillas del clip, de acuerdo a lo establecido en la Norma UNE-EN ISO 6508-1 [108]. Se realizaron medidas sobre la zona central y la periferia de la sección. Los resultados se muestran en la Tabla 6.17.

Tabla 6.17. *Resultados mecánicos de dureza Rocwell C*

Clip	Zona	1ª medida	2ª medida	3ª medida	Media
Clip A	Centro	42.0	43.0	44.0	43.0
	Periferia	43.0	44.0	44.5	43.8
Clip B	Centro	42.5	44.0	41.0	42.5
	Periferia	39.5	42.5	44.0	42.0
Clip C	Centro	42.5	43.5	43.0	43.0
	Periferia	44.5	39.0	43.5	42.3

Como se puede observar en dicha tabla, también la dureza es muy similar entre los tres clips estudiados y tampoco existe deferencia entre las durezas medidas en el centro y la periferia.

Se procedió, posteriormente, a la realización de un análisis químico del acero de los clips empleando la técnica del Análisis Elemental por Infrarrojos por Combustión de muestra para la determinación del carbono y el azufre y la de Espectroscopia de Emisión Óptica por Chispa para el resto de componentes, obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 6.18.

Tabla 6.18. *Composición química de los clips*

Elemento	Composición (%)		
	Clip A	Clip B	Clip C
Carbono	0.37	0.38	0.39
Manganeso	0.80	0.67	0.73
Silicio	1.90	1.62	1.63
Fósforo	0.013	0.012	0.013
Azufre	0.001	0.001	0.002
Cromo	0.086	0.102	0.096
Níquel	0.048	0.073	0.079
Molibdeno	0.009	0.014	0.014
Cobre	0.199	0.142	0.175
Estaño	0.018	0.011	0.014
Aluminio	0.012	0.012	0.014

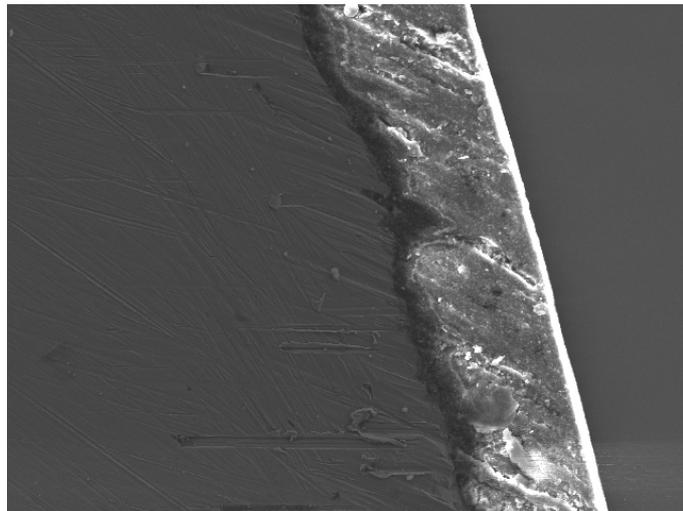
La similitud de los resultados obtenidos en la composición química corrobora la igualdad de comportamiento mecánico observada anteriormente.

También se analizó empleando Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) el aspecto del recubrimiento anticorrosión de los clips. Los resultados obtenidos de este análisis se muestran en la Figura 6.78 y Tabla 6.19.

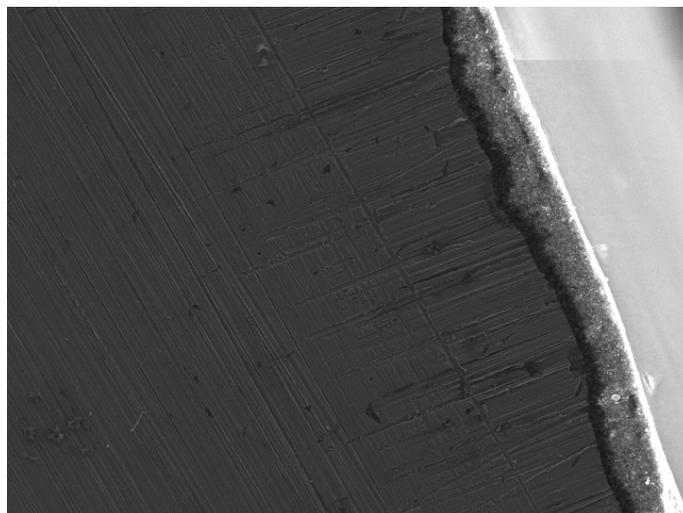
Tabla 6.19. *Espesor del recubrimiento de los clips.*

Clip	Espesor (μm)
A	75
B	30
C	20

Clip A



Clip B



Clip C

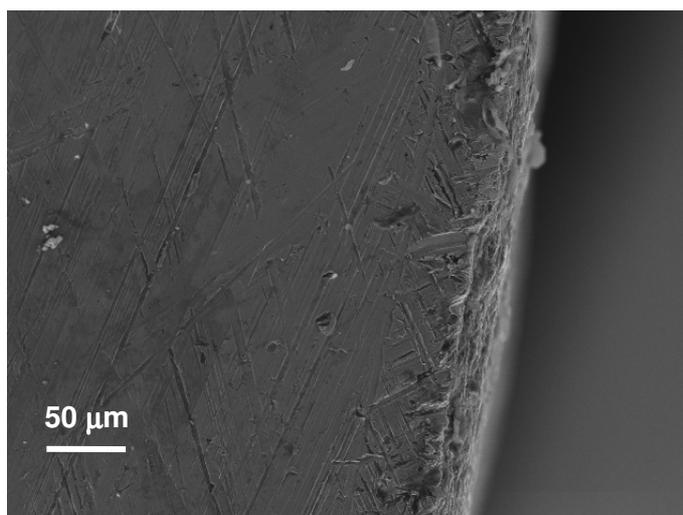


Figura 6.78. *Aspecto del recubrimiento de los Clips*

3.4.2. Conclusiones sobre el clip

A la vista de los resultados obtenidos y ante la igualdad mostrada por todos los clips estudiados tanto a nivel de comportamiento mecánico, como de composición química y de comportamiento ante la corrosión, se propone como solución óptima la de los tres clips estudiados indistintamente.

4. SISTEMA DE SUJECIÓN ÓPTIMO

Una vez finalizado el análisis, a modo de resumen, en este punto se describe la solución óptima adoptada para el sistema de sujeción de la línea de alta velocidad.

Para el anclaje se eligió el sistema VAPE/PLASTIRAIL, modelo 22-115, compuesto de una vaina moldeada en compuesto termoplástico, engastada entre dos medias conchas metálicas y un tirafondo de acero forjado con un filete conformado en frío.

En cuanto a la placa acodada ó tope aislante, se optó por la placa aligerada A2, inyectada en poliamida 6.6 con un refuerzo del 35 % en peso de fibra corta de vidrio

La placa de asiento adoptó dos soluciones igualmente válidas, las placas de TPE modelos A y B

Por último, el clip seleccionado fue el SKL-1, siendo aceptados cualquiera de las tres soluciones propuestas, A, B ó C.