



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales

Laboratorio de la División de Ciencia e Ingeniería de los Materiales

TESIS DOCTORAL

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



Autor: Isidro Alfonso Carrascal Vaquero

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

Santander, Mayo 2006

CAPÍTULO 9

CONCLUSIONES

Esta Tesis recoge dos aspectos relacionados con el sistema de sujeción de las vías de ferrocarril de las líneas de alta velocidad española: la optimización de todos y cada uno de los componentes que formarán parte del sistema de sujeción y el análisis del comportamiento, tanto de los componentes individuales, como del sistema de sujeción en conjunto.

Se recapitula aquí el trabajo desarrollado y las conclusiones más destacadas de este estudio. También, se describen las aportaciones más relevantes, así como, las líneas de investigación abiertas que, por su interés, se proponen para trabajos futuros.

1. RESUMEN DEL TRABAJO REALIZADO

Siguiendo los objetivos propuestos en el alcance de la presente Tesis marcados en el capítulo 1, se ha profundizado en las líneas de actuación que se describen brevemente a continuación.

Inicialmente, se define el sistema de sujeción y se destacan sus funciones, características, clasificaciones y componentes individuales. Se revisan los principales sistemas de sujeción empleados en la actualidad, conociendo las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos, para, de esta forma, facilitar la tarea de la elección del sistema más adecuado.

A continuación, se estudia la naturaleza de los diferentes esfuerzos aplicados sobre la sujeción y la influencia que el incremento de la velocidad de circulación tiene sobre los mismos. Se analizan, también, los valores que estos esfuerzos pueden llegar a alcanzar y qué factores pueden llegar a modificarlos.

Se dedica uno de los capítulos de la Tesis a describir la totalidad de los ensayos incluidos en la sistemática experimental empleada para el análisis del conjunto de sujeción, basados, fundamentalmente, en las prescripciones indicadas en la especificación técnica para el suministro de sujeciones [7]. Esta descripción comprende, desde su justificación, hasta la metodología, equipamiento necesario, resultados obtenidos y valores límites estipulados. Un aspecto importante de este apartado es la metodología experimental desarrollada, que incluye la interpretación particular de la normativa vigente y la puesta en práctica de la solución adoptada para la realización de cada uno de los ensayos que forma parte de esta sistemática para el análisis del conjunto de sujeción.

Partiendo del empleo de una sujeción de características similares a la empleada en la línea Madrid-Sevilla (sujeción del tipo HM), se analizan posibles modificaciones que permitan adaptar esta sujeción a la circulación de vehículos a mayor velocidad.

Se contemplan diversas opciones para los diferentes elementos del sistema de sujeción: anclaje, placa de asiento, placa tope y clip elástico, con el fin de encontrar la solución más adecuada. La combinación de todos los componentes propuestos originaba 156 conjuntos diferentes, por lo que se ha minimizado el número de configuraciones analizando conjunto por conjunto y utilizando los resultados obtenidos en la configuración del conjunto siguiente, probando, además, todos los componentes disponibles. El análisis de los resultados obtenidos en los ensayos con las diferentes configuraciones junto con otros ensayos de apoyo, realizados específicamente para precisar aspectos ambiguos tras los ensayos previos, da como resultado la optimización del sistema de sujeción.

Conocidos los diferentes componentes del sistema de sujeción, se realizó un estudio de su comportamiento individualmente para conocer las condiciones límites de funcionamiento de cada uno de ellos.

Por último, se analizó el comportamiento del sistema de sujeción en conjunto a partir de los resultados obtenidos de ensayos realizados sobre configuraciones en las que se emplearon los componentes optimizados anteriormente. También se estudió, en este apartado, la interrelación entre diferentes elementos del sistema a partir de ensayos realizados sobre montajes parciales que simulan el sistema completo.

2. CONCLUSIONES DE LA INVESTIGACIÓN DESARROLLADA

2.1. CONCLUSIONES RELATIVAS A LA ESPECIFICACIÓN TÉCNICA

Las consideraciones realizadas en este apartado, basadas en la práctica adquirida a lo largo de la parte experimental de la presente tesis, van destinadas a la mejora de la especificación técnica para el suministro de sujeciones [7] si se llega a realizar una revisión de la misma.

Para el ensayo de fuerza de apriete, se recomienda incluir la configuración de ensayo empleada en la Tesis. Además, esta disposición ha sido incluida en la norma UNE-EN 13146-7:2003 [65] como método de referencia, relegando al método de la especificación a procedimiento alternativo.

La caracterización de la rigidez estática de la placa de asiento, así como la pérdida de propiedades de la misma tras el ensayo dinámico, se realiza, según la especificación técnica, por medio de dos ensayos que aportan, prácticamente, la misma información. Se recomienda, por tanto, eliminar uno de ellos, para no duplicar resultados y reducir los tiempos de ensayo. De los dos ensayos, se sugiere eliminar el P_0/P_{0+75} , ya que se trata de una prueba pensada para caracterizar la placa fuera de la sujeción y además los valores de carga en cada ensayo son diferentes, dependiendo de la fuerza de apriete del sistema. En cuanto al ensayo de rigidez 5/80, sería recomendable adaptarlo a las prescripciones indicadas en la norma UNE-EN 13146-4:2003 [59].

Para el ensayo de resistencia al deslizamiento, se recomienda adoptar directamente la norma UNE-EN 13146-1:2003 [57]. Se produciría una reducción importante en el tiempo de ensayo, ya que, se pasa de 2 minutos por escalón de carga en la especificación a 30 segundos en la norma. También, sería muy importante definir el momento del deslizamiento, ya que se trata de un parámetro fundamental puesto que en función de que se considere que el deslizamiento ocurre en un punto u otro, el desplazamiento residual medido presentará diferentes valores. Una forma cómoda de definir el momento del deslizamiento podría ser estableciendo un valor absoluto de desplazamiento del carril, método empleado en la presente Tesis.

En el ensayo dinámico, la forma en la que en la especificación técnica se establecen los parámetros de ensayo resulta muy poco precisa, variando, además, de un ensayo a otro. Este aspecto lo ha resuelto la norma UNE-EN 13146-4:2003 [59] definiendo unos intervalos dentro de los cuales los parámetros de ensayo son constantes y, por tanto, las sujeciones con placas similares se ensayarán bajo los mismos esfuerzos. Por esta razón se aconseja

adoptar las prescripciones indicadas en la norma para la realización de este ensayo.

Además de los parámetros que se exige verificar, existen otros dos que pueden aportar mucha información en este ensayo y que no están recogidos ni en la especificación técnica ni en la norma. Se trata del desplazamiento horizontal del patín del carril y de la pérdida de espesor sufrida por la placa de asiento tras el sometimiento a cargas cíclicas. El primero de ellos estaría relacionado con la variación del ancho de vía, mientras que el segundo reflejaría el grado de deterioro de la placa tras el ensayo dinámico. Se recomienda, por tanto, la inclusión en la especificación de la medición de ambos parámetros.

Se ha comprobado que el ensayo de atenuación al impacto, tanto realizado según la metodología descrita en la especificación como siguiendo la desarrollada en la presente Tesis, arroja resultados irregulares frente a la respuesta de la placa de asiento bajo este tipo de acciones. Por la disposición del ensayo, no solamente es ella 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. La solución al problema, se puede plantear en base al conocimiento de la excitación de entrada, que en los ensayos realizados hasta la fecha, tanto por un método como por el otro, es un parámetro desconocido. Esta metodología implicaría el empleo de equipos especiales, como un martillo instrumentado o un excitador electrodinámico, para la resolución del problema.

Se ha constatado que el sistema de sujeción no es crítico en el ensayo de resistencia eléctrica, ya que sistemas similares ofrecen resultados muy diferentes, siendo la única diferencia entre ellos la traviesa sobre la que estaban montados. Análisis específicos sobre este aspecto demostraron la influencia de la traviesa, concretamente del material y de la disposición geométrica de la armadura de la misma, sobre el valor de la resistencia eléctrica. La influencia del material se manifestó en las propiedades físicas del hormigón, concretamente en su porosidad, a la que se asocia la penetración de agua bajo presión y el coeficiente de permeabilidad (K). El valor de la resistencia eléctrica decrece con

el incremento de los tres parámetros analizados, pudiéndose establecer un valor crítico, tanto de porosidad, $P_{\max} = 9.7 \%$, como de permeabilidad, $K_{\max} = 7.5 \cdot 10^{-12}$ m/s, por debajo de los cuales la resistencia del sistema supera el valor de 5 k Ω , valor mínimo exigido por la especificación técnica de sujeciones. La influencia de la geometría de la traviesa, se analizó a partir de la mínima distancia entre el anclaje de la sujeción y las armaduras de la traviesa, comprobando que, a medida que éstas se separaban, la resistencia eléctrica aumentaba.

Debido a la influencia que la traviesa tiene sobre la resistencia eléctrica del conjunto se recomienda incluir este ensayo, tanto en la especificación técnica para traviesas de hormigón, como en la norma UNE-EN 13230-2:2003 [125], manteniéndolo, también, en la especificación técnica de sujeciones. De la misma forma, también se sugiere incluir en estos documentos la medida del coeficiente de permeabilidad, ya que ha sido el parámetro físico del hormigón que mejor se ha correlacionado con el valor de la resistencia eléctrica del conjunto.

Por último, en cuanto al ensayo de condiciones ambientales adversas, debido a que el resultado requerido, tanto en la norma UNE-EN 13146-6:2003 [63], como en la especificación técnica de sujeciones, resulta un tanto subjetivo ya que lo único que se exige es que los efectos producidos tras la exposición no afecten a la funcionalidad del sistema, se propone la inclusión en la especificación, además del ensayo conjunto, de ensayos específicos de corrosión acelerada sobre los componentes metálicos por separado, mediante métodos que permitan la realización de un análisis cuantitativo. La metodología a seguir podría ser del tipo de la empleada en esta Tesis, factor de corrosión, o similar.

2.2. CONCLUSIONES ACERCA DE LA OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE SUJECIÓN

En este apartado, se detalla la solución óptima propuesta para el sistema de sujeción de líneas de alta velocidad, así como las principales razones que contribuyeron a su selección:

Para el anclaje se recomienda el sistema VAPE/PLASTIRAIL, modelo 22-115, compuesto de una vaina inyectada en poliamida 6.6 con 30 % en peso de fibra corta de vidrio, engastada entre dos medias conchas metálicas y un tirafondo de acero forjado con un filete conformado en frío con rosca trapezoidal TR 22x4, dado que:

- ❑ Presenta el mayor par de desapriete de los anclajes analizados.
- ❑ La fuerza de extracción llega a ser hasta de un 50 % superior a la exigida por la especificación en el caso más desfavorable. Para la humedad de equilibrio, alrededor del 1.5 %, la vaina VAPE alcanzó un valor de 140 kN, valor para el cual los tirafondos empleados en los otros anclajes ya habían fallado (115 para el anclaje GS y 130 kN para el Sdū de PA).
- ❑ El tornillo VAPE no daña la espiga en cada acción de desmontaje y montaje, convirtiéndolo en una acción reversible.
- ❑ La pérdida de fuerza de apriete tras la aplicación de cargas dinámicas es la menor de las soluciones analizadas, lo que repercutirá en una ampliación de los tiempos de mantenimiento de vía para reapriete.
- ❑ El fallo del anclaje se produce solamente por la vaina, ya que la carga de rotura del tornillo es superior a la del conjunto.
- ❑ Por último, en lo que se refiere al aislamiento eléctrico entre hilos, ensayos específicos han demostrado que el hecho de la existencia de la chapa metálica no implica un descenso en el valor de la resistencia eléctrica.

En cuanto a la placa acodada ó tope aislante, se opta por la placa ligera A2, inyectada en poliamida 6.6 con un refuerzo del 35 % en peso de fibra corta de vidrio, en base a las siguientes consideraciones:

- ❑ Desde el punto de vista resistente, la placa ligera superó en un 80 % la exigencia mínima establecida por UIC y en un 430 % la máxima fuerza medida en vía.
- ❑ La placa ligera presenta los valores de resistencia específica (kN/g) más elevados superando a la híbrida en un 7.7 % en comportamiento estático, en un 1.8 % en impacto y en un 12.6 % en fatiga y, por otro lado, a la maciza en un 23.3 %, 19.7 % y 25.8 %, respectivamente.
- ❑ La placa maciza Pag-0 se desechó 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 constató demasiado amplio para garantizar el correcto apriete de la sujeción.
- ❑ El menor peso de la placa ligera A2, 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.
- ❑ Esta última consideración no está directamente ligada al desarrollo de la Tesis, es decir a la optimización del sistema de sujeción, pero si a la puesta es servicio del mismo. Solamente dos de ellas, la placa ligera 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 necesitarían 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.

Para la placa de asiento se eligen dos soluciones igualmente válidas: las fabricadas con elastómero termoplástico de poliéster, TPEE, modelos A y B. Las

principales razones que contribuyeron a la selección de estas placas de asiento, se resumen a continuación:

- ❑ Las placas de TPE presentaron 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 dicho ensayo. El comportamiento exhibido en el ensayo de rigidez 5/80 fue similar.
- ❑ 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.
- ❑ 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.

Por último, el clip seleccionado fue el SKL-1, siendo aceptados cualquiera de las tres soluciones propuestas, A, B y C. El motivo de ésta decisión ha sido la igualdad exhibida por los tres clips en todos los campos analizados, composición, dureza y comportamiento mecánico. Solamente ha existido una pequeña diferencia al analizar la durabilidad frente a condiciones adversas, propiciado por la diferencia en la naturaleza de los recubrimientos, siendo el modelo C el que destacaba ligeramente frente al resto. Tampoco hubo diferencia entre los comportamientos mecánicos de los tres clips tras ser sometidos a condiciones adversas.

2.3. CONCLUSIONES RELATIVAS AL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE SUJECIÓN

En este apartado se exponen las conclusiones extraídas del análisis del comportamiento del sistema de sujeción, tanto desde el punto de vista de los componentes individuales, como del sistema en conjunto.

2.3.1. Conclusiones respecto al comportamiento de los componentes individuales del sistema de sujeción

2.3.1.1. Placa Acodada A2

- Influencia del contenido de humedad en el comportamiento mecánico:
 - Al estudiar el comportamiento estático se comprueba que al disminuir el contenido de humedad la placa se vuelve más rígida, presentando una rotura de tipo frágil en el caso de placa seca. A medida que se incrementa el contenido de humedad de la placa el tipo de rotura se vuelve más dúctil. No hubo posibilidad de medir la carga de rotura en función del contenido de humedad ya que debido a la geometría de los componentes para un desplazamiento del patín del carril cercano a 4.4 mm se produce el contacto de la placa acodada con el tornillo, pero a pesar de ello y por la tendencia de las curvas antes del contacto, se puede extrapolar que las piezas secas resisten mayor carga que las húmedas antes de rotura, superando la fuerza en el momento del contacto de la placa con el tornillo en un 38 % al pasar de una humedad del 0.5 al 3.6 %.
 - El comportamiento al impacto presenta la misma tendencia, salvo que en este caso se produce la rotura de las placas en todos los casos antes de contactar con el tornillo. La carga de rotura de las placas secas supera en un 32 % a la de la placa con un 3.6 % de humedad. Por otro lado, la deformación en rotura de ésta última, supera en un 90 % a la de la placa seca. La rotura presenta un aspecto frágil tanto en las placas secas como en las húmedas.
 - La caracterización en fatiga arrojó como resultado una disminución del 28.5 % en el límite de fatiga y de un 24 % en la temperatura crítica de funcionamiento al incrementar la humedad de la placa un 3.6 % respecto a la placa seca. El aspecto que presentan las fracturas es dúctil, tanto para las placas húmedas como para las secas.

- Influencia del par de apriete en el comportamiento mecánico:
 - En el comportamiento estático, se produce un incremento de la fuerza en el contacto de la placa con el tornillo de un 12.7 % al elevar el par de apriete de 100 a 350 N·m. De la misma forma, este aumento del par de apriete se traduce en un comportamiento más rígido de la placa.
 - Frente al impacto se produce un incremento del 16 % de la carga de rotura al elevar 250 N·m el par de apriete desde un par inicial de 100 N·m. En el mismo, sentido este aumento en el par de apriete produce una disminución de la deformación en la rotura de la placa en torno al 20 %.
 - En cuanto a fatiga, se consigue aumentar la resistencia a fatiga de la placa de asiento un 18 %, subiendo el par de apriete hasta 350 N·m desde 100 N·m. De la misma forma, la temperatura crítica también aumenta un 13.6 %, demostrando que la temperatura crítica de funcionamiento no depende sólo del material, sino de las condiciones de confinamiento y de sollicitación.

- Influencia del deterioro por fatiga en el comportamiento mecánico:
 - Las placas ensayadas, tras someterlas a un proceso de fatiga durante 500.000 ciclos, apenas muestran diferencias de comportamiento con respecto a placas nuevas. La variación representa un comportamiento ligeramente más rígido, tanto en estático, como en impacto.

2.3.1.2. Placa de asiento

- Un incremento de 90 °C en la temperatura de ensayo, desde -10 a 80 °C, genera un decremento del 44% en la rigidez estática de la placa. Los valores de la rigidez en todo el rango de temperatura se encuentra entre los límites establecidos en la especificación (80-125 kN/mm), salvo para

el valor inferior de temperatura, 128.0 kN/mm para -10 °C. A 80 °C la rigidez es de 80.6 kN/mm, próximo al límite establecido.

- ❑ Existe una relación directa, y prácticamente lineal, entre dureza y rigidez, por lo que el parámetro dureza, fácilmente medible, se puede convertir en un índice a partir del cual obtener el valor de la rigidez de la placa, parámetro que requiere llevar a cabo un ensayo más complicado. El ensayo de dureza podría introducirse en la especificación técnica de sujeciones para una evaluación complementaria del deterioro de la placa tras el ensayo dinámico
- ❑ En régimen dinámico, tanto las deformaciones como las energías disipadas por ciclo son prácticamente la mitad de las registradas en estático para todo el rango de temperaturas analizado.
- ❑ La rigidez dinámica y la energía disipada muestran un cambio importante para las placas ensayadas en el rango de temperaturas comprendido entre 40 y 60 °C, lo que hace suponer que en dicho intervalo se encuentra la temperatura de transición vítrea del material de la placa.
- ❑ La aplicación de un proceso de fatiga continuado origina un incremento en la rigidez de la placa y un decremento en la energía disipada, tanto en dinámico, a lo largo de los ciclos, como en la medida estática previa y posteriormente al ensayo de fatiga. La variación de ambos parámetros tuvo resultados similares en dinámico y estático, situándose la ganancia de rigidez en torno al 18 % y la pérdida de energía disipada en el 40 % tras $2 \cdot 10^6$ ciclos.
- ❑ La reducción de la rigidez inicial de la placa de asiento de 110 a 84 kN/mm, suprimiendo un 25 % de su superficie de apoyo inferior, supone un incremento de la rigidez estática del 21 % y de la energía disipada del 35 % tras someterla a 200.000 ciclos de fatiga, frente al 1.2 y 21 %, respectivamente, obtenidos para la placa original.

- ❑ Frente a un proceso de envejecimiento ambiental, la placa con mayor contenido de humedad, mostró una variación en la rigidez estática tras el proceso de fatiga del 12 %.
- ❑ Las placas con valores de rigidez inicial inferiores, presentan un riesgo mayor de deterioro, evidenciado por un incremento de las variaciones de rigidez y energía disipada, tanto en estático como en dinámico.

2.3.1.3. Anclaje

2.3.1.3.1. Vaina

- ❑ En el comportamiento mecánico de una vaina, tanto estático como a impacto, la ganancia de humedad implica una flexibilización de la misma, acompañada de una disminución en la fuerza máxima soportada. Para una humedad en la rosca del 4.8 % la pérdida alcanza el 35 % en estático y el 28 % en impacto respecto a la vaina seca. Este efecto no se manifiesta de forma tan clara en las deformaciones.
- ❑ En las vainas secas, debido a su fragilidad, se produce la rotura transversal de las mismas a la altura donde deja de coger rosca el tornillo antes de producirse la rotura final de la rosca interna.
- ❑ La resistencia a fatiga disminuye a medida que el componente absorbe agua, alcanzando esta pérdida el 29 % para vainas con un 4.8 % de humedad respecto a las secas.
- ❑ Los valores de rotura oscilan entre los 101 y 156 kN en estático y los 126 y 175 kN en impacto, mientras que el límite de fatiga oscila entre 54 y 76 kN en función del contenido de humedad. Esta variación hace recomendable la necesidad de establecer que las vainas salgan de fábrica con un contenido de humedad próximo al de equilibrio, para evitar que se puedan provocar estas diferencias de comportamiento a medida que el componente absorbe agua en su puesto de trabajo.

- ❑ La chapa metálica que envuelve al núcleo de naturaleza polimérica presenta corrosión generalizada tras 48 horas sometida a la cámara de nieblas salinas.

2.3.1.3.2. **Tornillo**

- ❑ Se comprobó la escasa influencia que sobre la resistencia a tracción del tornillo tiene la exposición a ambientes corrosivos, obteniendo resultados similares con tornillos nuevos y con expuestos 300 horas en cámara de nieblas salinas.
- ❑ La fuerza máxima medida se situó, en todos los casos, por encima de los 190 kN, mayor que la carga de rotura de la vaina, independientemente de la humedad, lo que asegura que el fallo del anclaje tendrá siempre lugar por la vaina.
- ❑ También se evaluó frente a doblado la influencia de la exposición a ambientes corrosivos, no apreciándose influencia al obtener resultados similares que con tornillos nuevos.
- ❑ La temperatura de transición dúctil-frágil a partir de probetas Charpy obtenidas de la zona de la rosca de los tornillos se sitúa en el intervalo [2-10° C].

2.3.1.4. *Clip*

- ❑ El comportamiento elástico de los clips sometidos a 300 horas en cámara de nieblas salinas apenas difiere con el que presentaban antes de entrar, independientemente del recubrimiento empleado.
- ❑ El clip que mejor comportamiento ha exhibido frente a la corrosión ha sido el galvanizado, seguido del pintado a pistola epoxi, siendo el que ha mostrado un comportamiento mas pobre el pintado por inmersión.

- ❑ El clip que se introdujo en la cámara sin recubrimiento presentó una mayor flexibilidad que el resto debido a la pérdida de sección neta como consecuencia del proceso corrosivo.
- ❑ La rigidez del clip se incrementa levemente con el uso, consiguiéndose mayores fuerzas de apriete con un clip usado que con uno nuevo para un desplazamiento constante del bucle del clip.

2.3.2. Conclusiones respecto al comportamiento del sistema de sujeción

Del análisis del comportamiento del sistema de sujeción completo seleccionado como óptimo, así como de la interrelación existente entre los diversos componentes y sus comportamientos respectivos, se obtienen las siguientes conclusiones:

- ❑ Ante la igualdad de comportamiento mecánico de los diferentes clips, la fuerza de apriete del sistema está condicionada por la geometría de la placa acodada. Se encontró una dimensión, cota F, que presenta una buena correlación lineal con el valor de la fuerza de apriete del conjunto, de forma que ésta aumenta a medida que disminuye la cota F. Esta cota relaciona la altura del alojamiento del codo del clip con la altura del alojamiento del bucle del mismo. A partir de esta correlación se puede establecer un valor límite de esta cota que asegure una fuerza de apriete de 17 kN, valor mínimo establecido en la especificación técnica de sujeciones. Esta cota F máxima se establece en torno a 17.2 mm y debido a su importancia, se recomienda su inclusión como cota crítica en el control geométrico que se realiza sobre la placa acodada según su especificación técnica correspondiente.
- ❑ A pesar de la anarquía exhibida por los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia al deslizamiento longitudinal se ha comprobado la existencia de una pequeña correlación con la fuerza de apriete de forma que la primera se incrementa al aumentar la segunda.

- ❑ La reducción de la fuerza de apriete tras el ensayo dinámico es directamente proporcional al valor inicial de aquélla e inversamente proporcional a la rigidez de la placa de asiento. Para el límite impuesto por la especificación técnica de pérdida de fuerza de apriete inferior al 20 %, se deben emplear placas de asiento con rigidez inicial superior a 90 kN/mm y no pasar de los 21 kN como fuerza de apriete inicial del sistema.
- ❑ El incremento de la rigidez de la placa de asiento tras el ensayo dinámico es inversamente proporcional a la rigidez inicial de la placa de asiento y al valor de la fuerza de apriete. Teniendo en cuenta que la limitación impuesta por la especificación técnica para el incremento de rigidez es del 25 %, no conviene que la fuerza de apriete descienda de 17 kN, valor mínimo exigido en la especificación, ni que la rigidez inicial de la placa lo haga de 90 kN/mm, valor que coincide con el recomendado en la conclusión.
- ❑ La pérdida de espesor de la placa de asiento es inversamente proporcional a la rigidez inicial de la placa y proporcional a la rigidización de la placa de asiento. Para el límite anteriormente señalado, se permite una pérdida de espesor de 1.4 mm.
- ❑ La amplitud de todos los desplazamientos medidos en el ensayo dinámico, así como todos los desplazamientos remanentes, disminuyen al aumentar la rigidez de la placa.
- ❑ El valor de fuerza introducido en el tornillo como consecuencia de la aplicación del par nominal de 250 N·m equivale a, aproximadamente, 40 kN.
- ❑ Los esfuerzos más elevados en el anclaje se producen para un impacto hasta rotura con un par de apriete elevado (350 N·m), no alcanzando bajo estas condiciones los 80 kN, valor inferior a los límites de funcionamiento de la vaina, incluso para las condiciones más desfavorables de humedad y, por supuesto, los del tornillo.

- ❑ Ante un ensayo de fatiga los filetes interiores de la vaina sufren una fluencia que se traduce en una relajación de la tensión soportada por el tornillo. Esta relajación puede reducir la fuerza de apriete del conjunto, siempre y cuando la pérdida de fuerza sea suficiente para destensar el clip.
- ❑ Se comprobó, sobre un diagrama de Goodman, que las combinaciones de fuerza media y amplitud medidas en el anclaje ocasionado por el desplazamiento del patín del carril, no llegan a poner en peligro, independientemente del par aplicado, la integridad del anclaje.
- ❑ La relajación de tensiones sufrida por el anclaje por efecto de una acción cíclica depende, en gran medida, de la naturaleza de la vaina, ya que se alcanza una variación de la relajación cercana al 40 % entre una vaina húmeda y otra seca.

2.4. CONCLUSIONES ADICIONALES

2.4.1. Respecto a la influencia del contenido de humedad en el comportamiento de la Poliamida 6.

Cabe reseñar los siguientes aspectos:

- ❑ En los compuestos PA-fibra de vidrio, tanto la interfase como la matriz se comporta de forma higroscópica, siendo la primera un camino preferencial de avance de la humedad.
- ❑ El agua en su difusión a través de la PA presenta un comportamiento acorde con la 2ª ley de Fick en el que, además, el coeficiente de difusión sigue una ley tipo Arrhenius, según un modelo clásico de difusión. La difusividad crece al aumentar la cantidad de refuerzo.
- ❑ Se propone una metodología que permite predecir la humedad que presentará una poliamida reforzada tras someterse a un

acondicionamiento acelerado (combinación de tiempo sumergido y temperatura del baño).

- ❑ Su carácter higroscópico provoca variaciones en sus dimensiones y en sus propiedades mecánicas y eléctricas.
- ❑ El aumento de humedad provoca que su resistencia a la tracción y al impacto disminuyan, al igual que su rigidez, incrementando su deformación en rotura.
- ❑ La presencia de humedad reduce su tiempo de vida en fatiga, de tal modo que su límite de endurancia disminuye exponencialmente con el aumento de dicho parámetro.
- ❑ El aumento en el contenido de humedad induce variaciones geométricas en los componentes de poliamida reforzada, incrementando, de forma lineal, sus dimensiones hasta alcanzar un valor cercano al 5 % en saturación.
- ❑ La resistencia eléctrica de los componentes de poliamida disminuye a medida que el componente absorbe agua, siendo esta reducción más drástica con el aumento del refuerzo.
- ❑ Los diagramas de fallo en fluencia siguen una ley logarítmica que relaciona entre sí la tensión aplicada, el tiempo de rotura y el contenido de humedad.
- ❑ La metodología de las redes neuronales artificiales se ha mostrado como un buen método para modelizar el comportamiento en fluencia ante la presencia de una nueva variable (la humedad).
- ❑ Por último, como resumen de todas estas conclusiones se recomienda que los componentes fabricados en poliamida se coloquen en servicio estabilizados, es decir con un contenido en humedad similar al de equilibrio, con el objeto de minimizar la variabilidad en sus características.

2.4.2. Respecto a la determinación del fallo por fatiga en base a consideraciones energéticas

En la presenta Tesis se ha desarrollado una metodología para la determinación del fallo por fatiga de materiales poliméricos o compuestos de matriz polimérica analizando el parámetro que relaciona a las energías disipadas y almacenadas por ciclo ($E_{d/a}$) a partir de los resultados obtenidos en el ensayo de caracterización acelerada empleando el método LOCATI.

Al alcanzar un cierto nivel de carga, aparece un escalón crítico a partir del cual los valores de la deformación pierden su estabilidad y crecen de forma acelerada, situación que precede a la rotura de la placa. De este modo, es posible determinar un nivel de variación de tensiones crítico, $\Delta\sigma_c$, a partir del que se puede establecer el valor de la resistencia a la fatiga de la placa.

Al realizar un ensayo de fatiga sobre un componente de naturaleza polimérica, se produce un incremento de su temperatura. Analizando la evolución del ángulo de desfase existente entre la respuesta en deformación y el impulso de carga de sollicitación frente a la temperatura, al igual que ocurre en un análisis DMA, presentará un máximo al alcanzarse internamente la T_g del material. Para una fatiga con nivel medio diferente de cero se encontró la siguiente expresión que relaciona el ángulo de desfase con la relación entre energía disipada y almacenada, $E_{d/a}$, a través del nivel medio y de la amplitud del esfuerzo, F_m y F_0 , respectivamente.

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{4F_m \frac{E_d}{E_a}}{\pi F_0 \left(2 + \frac{E_d}{E_a}\right)} = \frac{4F_m E_{d/a}}{\pi F_0 (2 + E_{d/a})} \quad (9.1)$$

Al representar el cociente entre la energía disipada y la almacenada ($E_{d/a}$) frente a la temperatura (Figura 9.1), se comprobó, que además de la existencia de una correlación entre este parámetro y el ángulo de desfase, también se puede intuir que, para una determinada temperatura, los dos parámetros reflejados en el diagrama presentan un primer pico significativo. Este valor de temperatura se identificó como temperatura crítica, T_c .

A diferencia de la T_g , la temperatura crítica no es una propiedad del material únicamente, sino que dependerá también de las condiciones de contorno exteriores, como puede ser el par de apriete del sistema al analizar una placa acodada. Para ensayos de fatiga sobre placas con idéntico contenido de humedad, es decir, mismo material, los valores obtenidos para la temperatura crítica varían en función del par de apriete empleado en el montaje del sistema. Mientras, la T_g debería ser constante, independiente de las condiciones exteriores, por tratarse del mismo material en todos los casos.

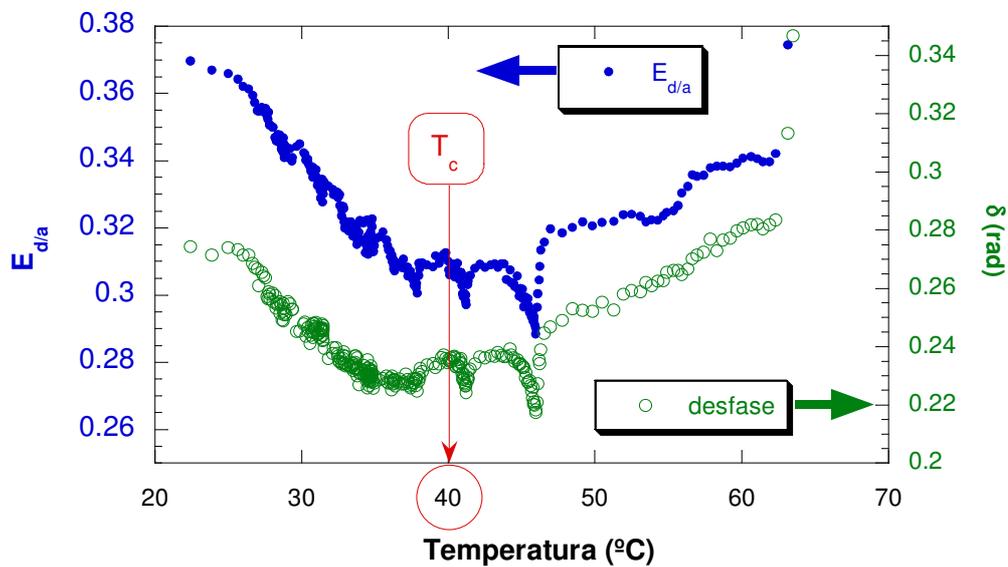


Figura 9.1.- Desfase y relación de energías frente a temperatura.
Definición de la temperatura crítica (T_c)

Una vez confirmada la temperatura crítica, se obtiene el nivel de carga crítico como el nivel en el que se alcanza dicha temperatura, recurriendo al gráfico que representa la temperatura frente al número de ciclos (Figura 9.2).

A partir de los resultados obtenidos en ensayos de comprobación se puede concluir que el límite de fatiga queda definido en un ensayo LOCATI como el escalón inmediatamente inferior a aquél en el que se alcanza la temperatura crítica, ya que si el material consigue dicha temperatura sufre una transición que conduce a su fallo por fatiga.

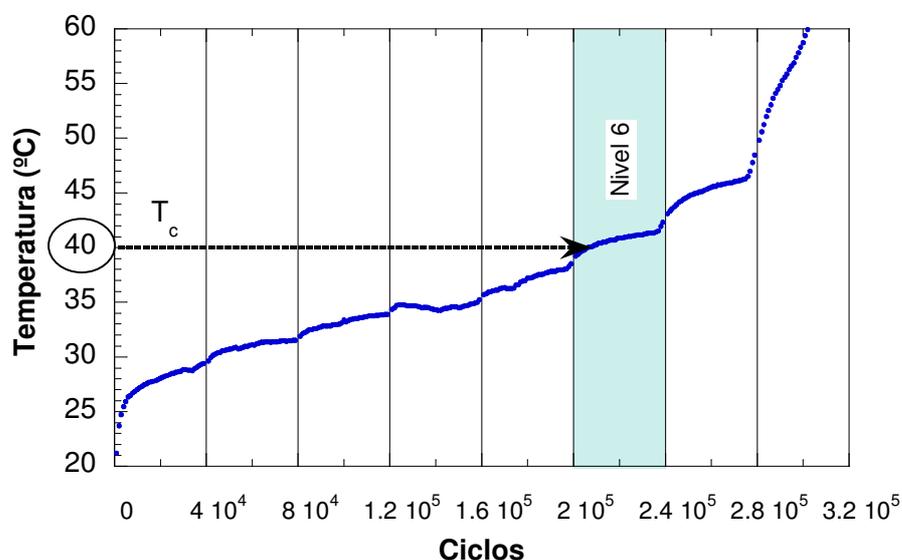


Figura 9.2.- Definición del nivel crítico

3. LINEAS DE INVESTIGACION Y TRABAJO APLICADO PROPUESTOS

Como ya se ha comentado a lo largo de la tesis, aunque se intentó realizar un análisis completo de cada uno de los componentes, los estudios se centraron en los componentes de naturaleza polimérica. Queda por tanto pendiente una investigación más exhaustiva de los componentes metálicos del sistema de sujeción y sobre todo del elemento que dota de elasticidad al sistema, es decir, del clip.

También está pendiente la realización de un estudio similar con otro tipo de sujeciones en funcionamiento como es la J-2 o la DSA.

Otro aspecto importante a tratar en futuras investigaciones será el comportamiento dinámico del sistema de sujeción a altas frecuencias. La caracterización dinámica desarrollada en la presente tesis ha consistido en ensayos de impacto y ensayos de fatiga empleando en todos ellos una frecuencia de 5 Hz. Pero en el capítulo 3 se comprobó que la influencia que las acciones dinámicas a frecuencias más altas sobre estructuras de la vía, como es

el caso de los puentes, y por tanto a los sistemas de sujeción empleados en dichas estructuras, puede ser muy importantes por los efectos resonantes. Este aspecto ya se recoge en la Norma UNE-ENV 13481-6 de Mayo de 2003 [126] Aplicaciones ferroviarias. Vía. Requisitos de funcionamiento de los sistemas de sujeción. Parte 6: Sistemas de sujeción especiales para atenuación de las vibraciones, donde la medida de rigidez de transferencia del sistema se realiza a partir de la aplicación de frecuencias comprendidas en el rango 25 a 400Hz.

Sería conveniente la realización de un estudio de la evolución de las propiedades de los diferentes componentes de la sujeción con el paso del tiempo. Se analizaría el envejecimiento por efecto de las acciones mecánicas y medioambientales de aquellos componentes más expuestos a las mismas.

Se trabajará en la simulación numérica del comportamiento de la sujeción en régimen, tanto estático, como dinámico. A partir de la información experimental desarrollada en la presenta tesis, se podría calibrar un modelo de elementos finitos que, además de proporcionar una elevada versatilidad de cara al estudio de la influencia de las diferentes acciones externas que pueden actuar sobre el sistema, pueda analizar también los cambios sufridos por el comportamiento del sistema en función del ajuste de los parámetros de funcionamiento del mismo.

La aplicación de ensayos de fatiga acelerada (Método Locati) se ha revelado como un método muy válido para la comparación de parámetros externos que pueden influir en el comportamiento dinámico de los componentes de naturaleza polimérica, sin tener que recurrir a largos ensayos que alargarían enormemente el tiempo de investigación. El empleo de técnicas energéticas para la determinación del valor crítico en este tipo de ensayos también ha resultado adecuado, por lo que se podría trabajar en el desarrollo de una metodología sólida que trate este aspecto con el empleo de probetas normalizadas, mejorando la precisión del método, a base de perfeccionar los sistemas de adquisición de datos experimentales, así como el software empleado en el tratamiento e interpretación de esos resultados.

El trabajo con redes neuronales ha permitido la modelización de comportamientos mecánicos en aquellos casos en los que, debido al gran

número de variables que intervienen, resulta complicado por métodos tradicionales. Por ejemplo, la influencia del contenido de humedad en el comportamiento en fluencia de la poliamida reforzada, donde intervenían como variables, la tensión, la deformación, el tiempo y el contenido de humedad. Por tanto, se intentará acoplar esta potente herramienta a la modelización de comportamientos complejos en los que participen un gran número de variables. En este sentido, ya se ha realizado una primera aproximación en el campo de la dosificación de hormigones. [167]

Por último, la Dirección del LADICIM (Laboratorio de la División de Ciencia e Ingeniería de los Materiales de la Universidad de Cantabria), laboratorio donde se ha realizado esta Tesis doctoral, decidió conseguir la acreditación de ENAC para ensayos de todo tipo de material de vía, debido a la gran experiencia adquirida en los últimos años por el Laboratorio tanto en el campo de la acreditación, ya que lleva más de ocho años acreditado por ENAC en otras disciplinas, como en el campo de la tecnología ferroviaria con más de diez años, siendo laboratorio de referencia en la homologación de todo tipo de productos, desde traviesas, hasta sujeciones, pasando por los carriles, sus uniones y todo tipo de pequeño material de vía. Para ellos se solicitó una Ayuda para la realización de Proyectos de Investigación Científica y Desarrollo e Innovación Tecnológica, en el marco de las acciones estratégicas del área sectorial de Construcción Civil y Conservación del Patrimonio Histórico Cultural del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2000-2003 convocado por Orden/FOM/624/2003 de 25 de Febrero (BOE nº 69 de 21-03-2003). Esta ayuda fue concedida con Resolución de 12 de Diciembre de 2003, en base al proyecto titulado: "Acreditación de un laboratorio para realización de ensayos sobre traviesas, carriles y sujeciones de vías de ferrocarril de alta velocidad", proyecto que se ha desarrollado a lo largo de dos años y que tendrá continuidad en el futuro con la ampliación de la acreditación en aquellos aspectos que no han sido considerados en esta primera fase.