

EFFECTO DE LA VISCOSIDAD EN EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE PIEZAS ESTRUCTURALES DE PA 6.6 REFORZADA CON FIBRA DE VIDRIO CORTA

J. A. Casado, I. Carrascal, J. A. Polanco y F. Gutiérrez-Solana

Laboratorio de la División de Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Universidad de Cantabria, Dpto. de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales, Avda. Los Castros, s/n, 39005-Santander, España

Resumen. La superestructura de la alta velocidad española (AVE) se apoya en la tecnología de materiales para el desarrollo de los elementos que posibilitan la sujeción de los carriles a las traviesas. Los requisitos establecidos para el conjunto de piezas que constituye el sistema de sujeción son los de garantía de aislamiento eléctrico y los de resistencia mecánica suficiente. Estas premisas crean la necesidad de utilizar para el aseguramiento del ancho de vía unas placas de un material compuesto de una matriz polimérica termoplástica de PA 6.6 reforzada con un 35% en peso de fibra de vidrio corta. La viscosidad de la materia prima con la que se inyectan las placas es un parámetro que debe de ser controlado, ya que sus efectos en el comportamiento mecánico de las placas es significativo. Este trabajo determina la viscosidad óptima de las placas de sujeción que garantiza su correcto funcionamiento ante las acciones mecánicas aplicadas sobre ellas, tanto en procesos de control en producción, como en condiciones reales de servicio. Se ha llevado a cabo una caracterización viscoelástica del material inyectado en pieza estructural, a la temperatura del laboratorio en relación con los esfuerzos ejercidos sobre las placas objeto de estudio en la vía. Estas solicitaciones reales han sido simuladas utilizando utillajes que reflejan fielmente la instalación del conjunto de la sujeción en la línea del ferrocarril.

Abstract. The Spanish High Speed Railway Lines use the latest technologies to secure the rails. The material requirements established for the fastening systems are electric insulation and enough mechanic resistance. These premises force to use pads material compounded by a thermoplastic polymeric matrix of PA 6.6 reinforced with a 35% w of short glass fibre. Viscosity of the raw material with which pads are injected is an essential parameter because of their sensible effects on pad mechanical behaviour. This paper determines the fastening pads optimal viscosity that guarantees a right working during the mechanical actions applied on them, in production control or in service conditions. A viscoelastic characterization of the injected material has been made, at lab temperature, in relation with the forces exerted by the rails on the pads. The equipment that has been used simulates the real forces on the railway line.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO

Las vías de ferrocarril incorporan elementos de sujeción que anclan los carriles, mantienen el ancho de vía y los aíslan eléctricamente. Un esquema de un sistema de sujeción estándar para alta velocidad, denominado HM, es el que se muestra en la Figura 1, en la que se presentan sus componentes. De entre ellos, destaca la presencia de dos placas poliméricas (placas acodadas A2), una a cada lado del carril, empleadas como elementos aislantes y resistentes. Un detalle de la placa aislante se muestra en la Fig. 2. La viscosidad de la poliamida 6.6 utilizada para conformar las placas, comercialmente disponible dentro de un amplio rango de valores, es un parámetro que debe de ser totalmente controlado, ya que sus efectos en el comportamiento mecánico global es significativo. Además, su valor condiciona los parámetros de presión y temperatura empleados para inyectar el producto durante la etapa industrial y, paralelamente, el tiempo de ciclo requerido para llevar a cabo su fabricación.

En este artículo se presenta el trabajo desarrollado para establecer la viscosidad óptima del material con que se

conforman las placas de sujeción que garantiza su adecuado funcionamiento en respuesta a las acciones mecánicas, de carácter estático y dinámico, aplicadas sobre ellas, tanto en procesos de control en producción, como en condiciones reales de servicio [1-4].

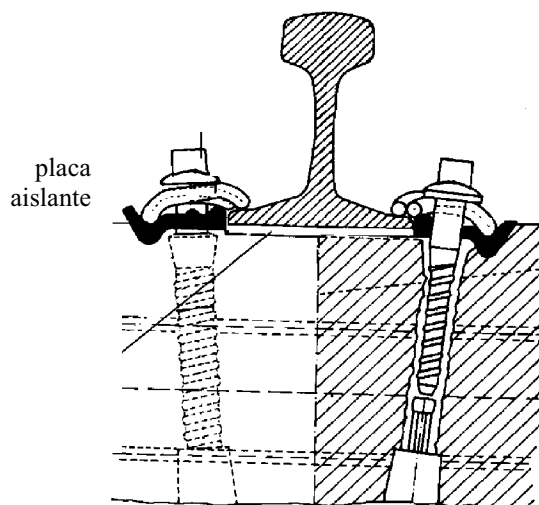


Fig. 1. Esquema del sistema de sujeción HM

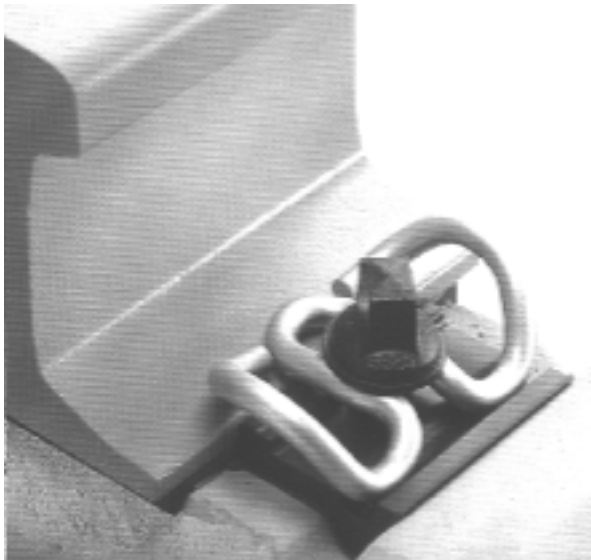


Fig. 2.- Detalle de la placa acodada aislante, A2, integrante de la sujeción del tipo HM.

3. MATERIAL ENSAYADO

La empresa transformadora de materias primas poliméricas CEBUTOR, S.L. proporcionó para el estudio, 15 placas acodadas A2 inyectadas con grana suministrada por la compañía BASF de diferente valor de viscosidad. El valor de viscosidad fue determinado a partir del polímero disuelto en ácido fórmico y evaluando el parámetro denominado “Número de Viscosidad” (VN), calculado a partir de la norma UNE-EN ISO 307 [5]:

- 5 placas A2 con VN = 138 ml/g
- 5 placas A2 con VN = 140 ml/g
- 5 placas A2 con VN = 142 ml/g

El número de viscosidad, VN, se puede definir, también, como la viscosidad reducida [6], equivalente a la viscosidad específica por unidad de concentración del polímero, C (en g/cm³) de acuerdo con la expresión (1):

$$VN = \eta_{red} = \left(\frac{\eta - \eta_0}{\eta_0} \right) \cdot \frac{1}{C} \quad (1)$$

siendo

η_0 la viscosidad del disolvente (ácido fórmico)
 η la viscosidad de la disolución
 C la concentración del polímero

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El trabajo experimental consistió en determinar a temperatura ambiente el comportamiento viscoelástico del material que conforma los componentes aislantes por medio de ensayos de fluencia bajo una carga de 70 kN de compresión, equivalente aproximadamente al 60% de

la carga de rotura de la placa en condiciones dinámicas de impacto [7].

A continuación se determinó el comportamiento de las placas acodadas aislantes, A2, bajo las condiciones de esfuerzo estático y dinámico exigidas por la especificación técnica de Renfe que regula su control de fabricación y el proceso de homologación requerido para su empleo.

En el primer caso, se aplicó un esfuerzo lineal y creciente hasta alcanzar los 85 kN de compresión a una velocidad de carga de 1 kN/s y se mantiene constante durante 30 segundos, instante en el que se retira la carga y se miden las deformaciones remanentes en la placa una vez transcurridos 400 segundos desde que se inició la prueba. En el segundo caso, se aplicó un esfuerzo dinámico sobre la placa a través de un desplazamiento instantáneo de 6 mm del simulador del patín del carril que produce la rotura de aquélla.

Los ensayos se llevaron a cabo en una máquina universal de ensayos mecánicos dotada de una célula de carga de 250 kN de capacidad. El apriete de las placas acodadas se efectuó a través de una llave dinamométrica con medidor de par. Para determinar el acortamiento de las placas acodadas y la deformación correspondiente se empleó un captador de desplazamientos Lvdv dotado de un recorrido de ± 10 mm.

El esquema del dispositivo empleado para realizar los ensayos se representa en la Fig. 3. Esta unidad de carga reproduce exactamente el perfil geométrico del patín del carril y de la traviesa en la que se instala la placa acodada para ensamblarse con el resto de los elementos del conjunto de la sujeción en la vía. Una vez que la placa acodada se coloca en su posición correcta se atornilla con el par de apriete necesario para producir el contacto entre el bucle del clip metálico elástico y la placa acodada, de la misma forma como se produce en las condiciones reales de instalación en servicio.

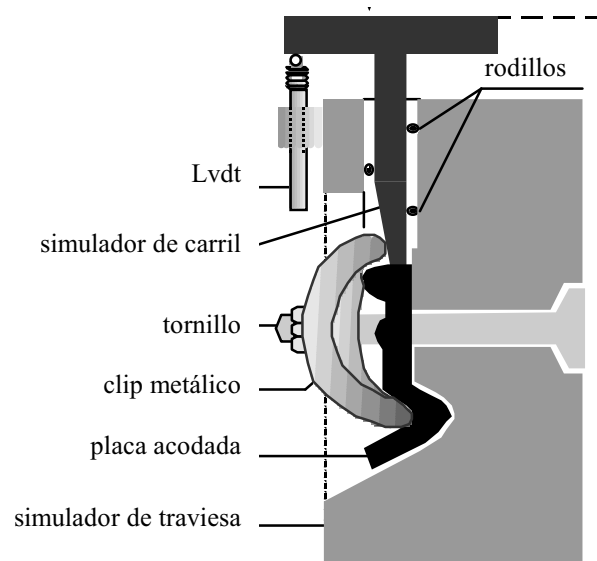


Fig. 3.- Esquema de la unidad de aplicación de carga.

En la fotografía de la Fig. 4 se muestra el utillaje desarrollado y empleado para llevar a cabo los ensayos de caracterización y de control sobre las placas aislantes de sujeción, A2, mencionados en este apartado.



Fig. 4. Utillaje empleado en los ensayos realizados sobre las placas acodadas, A2, y ubicación del captador de desplazamientos Lvd t.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este apartado se presentan los resultados encontrados en los ensayos de caracterización del material inyectado en placa y los de los ensayos correspondientes al control de comportamiento exigidos a las placas acodadas en condiciones de utilización habitual.

3.1. Pruebas de caracterización

En el gráfico de la Figura 5 se indica la evolución del acortamiento de las placas ensayadas en función del tiempo que duró el ensayo de fluencia. Se puede apreciar que cuanto más viscosa es la granza con la que se inyectaron las placas (mayor número de viscosidad) mayor es el acortamiento sufrido por las mismas.

Tomando como referencia de base de medida para la placa la cota que establece la distancia entre el extremo del patín del carril y la traviesa (ver Fig. 6) se puede establecer un índice de la deformación sufrida por las piezas. A partir de esta función variable con el tiempo, se puede determinar la velocidad de deformación correspondiente al estado estacionario, en cada caso, y representarla en función del número de viscosidad nominal de la granza y del medido experimentalmente

sobre muestras extraídas de las placas conforme a la norma UNE-EN ISO 307.

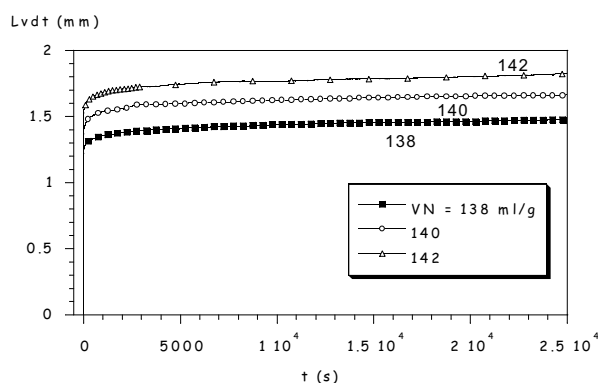


Fig. 5. Evolución del acortamiento de las placas acodadas durante el proceso de compresión bajo carga constante de 70 kN.

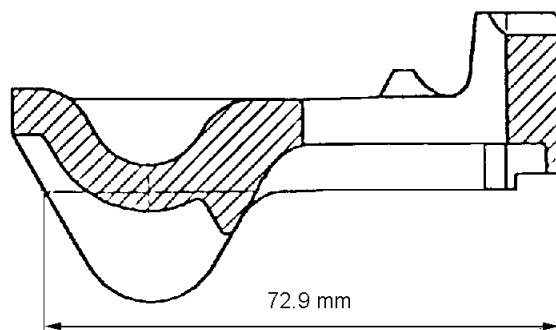


Fig. 6. Distancia de referencia de base de medida para determinar la deformación de las placas [8].

Esta representación se indica en la Fig. 7 donde se puede apreciar que la velocidad de deformación aumenta de forma aproximadamente lineal con la viscosidad.

Representando el logaritmo neperiano de la velocidad de deformación en estado estacionario, frente al inverso del número de viscosidad (Figura 8), se puede ajustar la correspondiente función a través de una ley semejante a la ecuación de Arrhenius, siendo, en este caso, el parámetro VN el que sustituye a la temperatura en la citada ecuación, como se indica en la expresión (2):

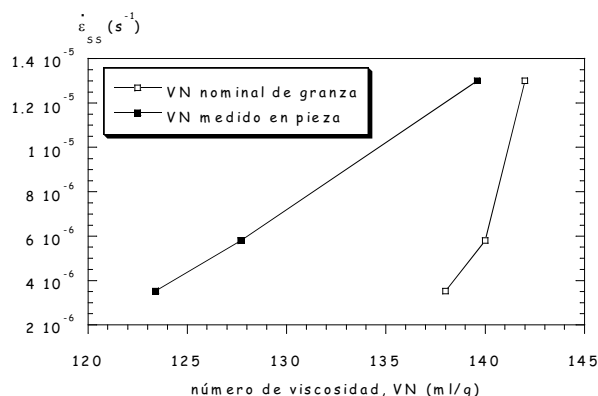


Fig. 7. Variación de la velocidad de deformación de las placas en el estado estacionario con la viscosidad.

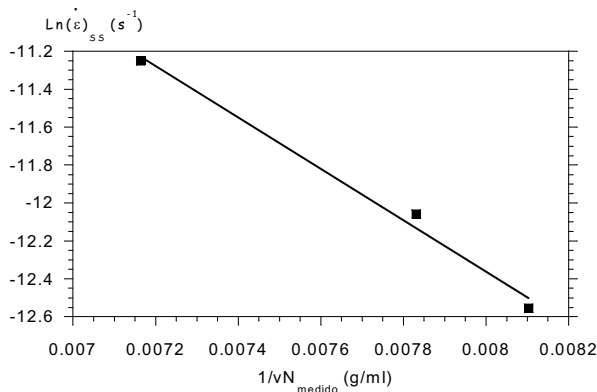


Fig. 8. Variación de logaritmo neperiano de la velocidad de deformación en estado estacionario con el inverso del número de viscosidad.

$$\ln(\dot{\epsilon}_{ss}) = -1.54 - \frac{1353}{VN} \quad (2)$$

Por lo tanto, se puede determinar que la velocidad de deformación registrada durante el proceso de acortamiento de las placas, aumenta exponencialmente con la viscosidad del material que las conforma.

Por otro lado, a partir de la ecuación constitutiva de un material viscoso newtoniano sometido a tracción, dada por la expresión (3), el coeficiente de Trouton ($\eta = 3 \cdot \mu$) puede ser evaluado empíricamente. Para ello, se asumió una sección recta media de las placas de 926.4 mm² sometida a una fuerza de 70 kN.

$$\sigma = \eta \cdot \dot{\epsilon} \approx 3 \cdot \mu \cdot \dot{\epsilon} \quad (3)$$

siendo: σ tensión normal

η viscosidad bajo tensión normal

μ viscosidad bajo tensión tangencial

$$\dot{\epsilon}_{ss} = C \cdot \sigma \cdot \exp\left(\frac{Q}{R \cdot T}\right),$$

C, constante

Q, energía activación;

T, temperatura absoluta

En el gráfico de la Figura 9 se ha representado la variación de η y de μ frente al número de viscosidad de la materia prima empleada para conformar las placas objeto del estudio, pudiendo apreciarse que ambos parámetros disminuyen de forma prácticamente lineal con el aumento de éste último.

No obstante, la Especificación Técnica de Renfe que regula el comportamiento mecánico y marca las prescripciones de fabricación y empleo de las placas, establece que éstas deben de presentar un estándar de masa constante inmediatamente después de haber sido inyectadas. Bajo este condicionante, el material más viscoso requiere una mayor temperatura para poder fluir en condiciones óptimas hacia el molde que conforma la placa. Asimismo, se ha determinado que, si se eleva la temperatura durante el proceso industrial de fabricación, la masa obtenida en el producto acabado desciende

linealmente, como se representa en el gráfico de la Figura 10.

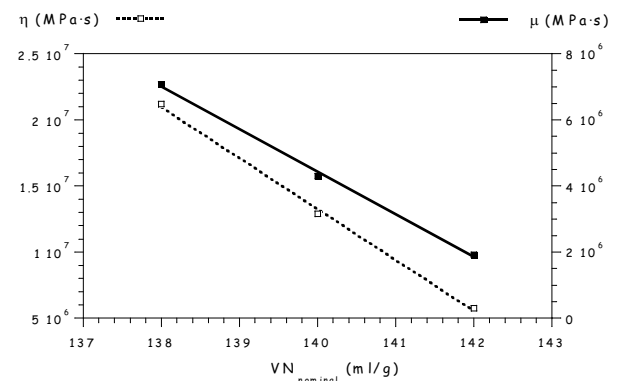


Fig. 9. Variación de η y de μ frente a VN.

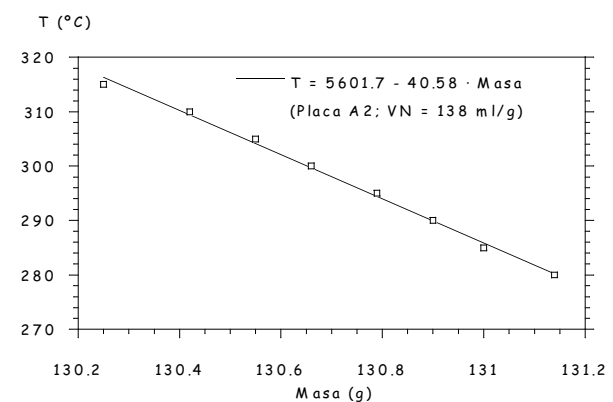


Fig. 10. Valores de masa en placa acodada obtenidos a diferentes temperaturas de procesamiento por inyección.

Este fenómeno puede ser explicado a través de la teoría del volumen libre enunciada por Doolittle [9], la cual establece que el espacio vacío dejado por los segmentos de las cadenas moleculares que conforman el material, aumenta con la temperatura al encontrarse favorecida la posibilidad del movimiento molecular de los segmentos. En efecto, los valores de densidad medidos sobre las placas analizadas disminuyen conforme aumenta el número de viscosidad como se puede apreciar en la representación de la Figura 11.

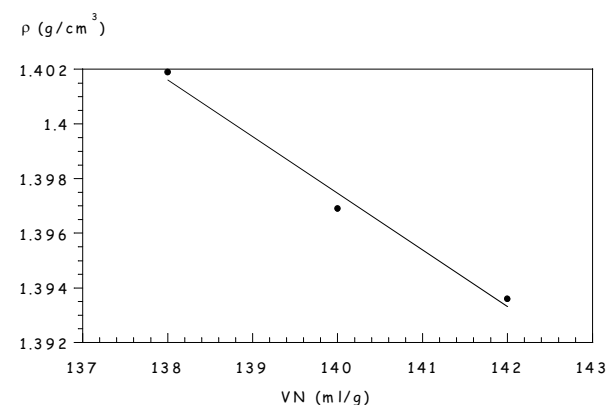


Fig. 11. Variación de la densidad de las placas acodadas frente a VN.

Este hecho justifica que las placas acodadas inyectadas con mayor número de viscosidad y, por lo tanto, con mayor temperatura, posean una menor densidad, siendo este hecho el que las hace fluir bajo carga con una mayor velocidad como se ha puesto de manifiesto a lo largo del estudio realizado en este trabajo.

3.2. Pruebas de control de comportamiento

En la gráfica de la Figura 12 se puede apreciar que en el ensayo estático de resistencia bajo carga lateral (RCL), representando los valores de viscosidad extremos, la pieza inyectada con mayor número de viscosidad se comporta de forma más flexible y presenta mayor capacidad de deformación bajo carga. No obstante, tras la descarga la placa presenta mayor capacidad de recuperación, ofreciendo una deformación remanente más baja, lo que le permite satisfacer los requerimientos exigidos de bajo acortamiento tras el ensayo de forma holgada.

En cuanto al comportamiento resistente de las placas hasta la rotura en régimen dinámico bajo impacto (RICL) se observa una tendencia similar a la mostrada en condiciones estáticas, siendo más resistente la placa más densa y, por lo tanto, la de menor número de viscosidad, como se puede apreciar en el gráfico de la Figura 13.

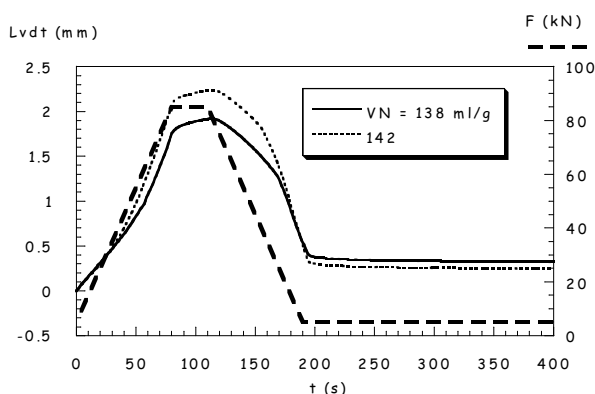


Fig. 12. Comportamiento en condiciones estáticas de placas acodadas ensayadas a RCL.

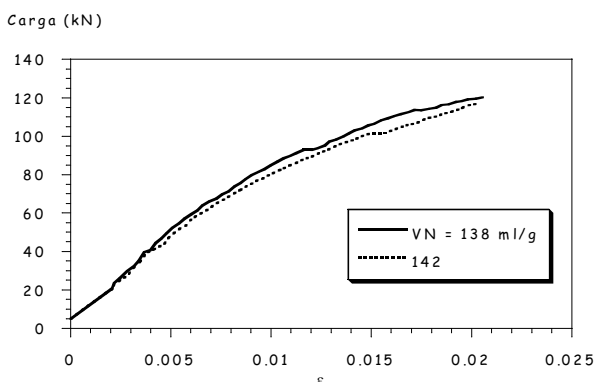


Fig. 13. Comportamiento en condiciones dinámicas de placas acodadas ensayadas a RICL.

4. CONCLUSIONES

Del trabajo realizado concerniente a la influencia de la viscosidad del material en granza, en el comportamiento mecánico de las placas aislantes de sujeción de vía de ferrocarril, se pueden extraer una serie de conclusiones que se relacionan a continuación.

1. El valor de la viscosidad con que se inyectan las placas modifica las condiciones de presión y/o temperatura durante su procesamiento para que el peso exigido para las mismas se mantenga constante tras su fabricación.
2. Bajo el condicionante anterior de peso en placa constante, aquellas inyectadas con alto VN presentan una densidad más baja puesto que requieren mayor temperatura de procesamiento, aumentando así la fracción de espacio vacío intermolecular. De esta forma se muestran como componentes más deformables bajo carga, tanto en régimen estático como en dinámico.
3. Las placas con alto VN son más deformables y ligeramente menos resistentes, pero ofrecen una mayor capacidad de recuperación dimensional tras su descarga, lo que las hace comportarse mejor ante los requisitos de baja deformación remanente impuestos por la especificación técnica.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean expresar su más sincero agradecimiento a la empresa transformadora de plásticos CEBUTOR, S.L. por la disposición que siempre mostró para proporcionar el material objeto de estudio, así como los datos registrados durante el proceso de fabricación del mismo.

Asimismo, los autores de este artículo desean hacer extensivo el agradecimiento al Ministerio de Fomento por la ayuda económica concedida para llevar a cabo el proyecto "Optimización y control de comportamiento de sujeciones para vías de alta velocidad española".

REFERENCIAS

- [1] TIFSA (Tecnología e Investigación Ferroviaria, S. A.). Especificación Técnica para la homologación, el control y el suministro de las piezas aislantes de plástico de la sujeción J-2, mayo 1994.
- [2] Informe Técnico: "Resultados de los ensayos realizados sobre los elementos de la sujeción HM suministrados por Vossloh". División de Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Universidad de Cantabria, julio 1995.

- [3] Mantenimiento de Infraestructura de RENFE. Dirección Técnica. Jefatura de Vía. Especificación Técnica: E.T. 03.360.578.3. "Placas acodadas ligeras de sujeción". 1ª Edición, mayo 1998.
- [4] European Committee for Standardization. CEN/TC 256. prEN 13146-5. Railway applications - Track - Test methods for fastenings systems. March, 1998.
- [5] UNE-EN ISO 307. Plásticos. Poliamidas: 1998. Determinación del número de viscosidad.
- [6] Ramos Carpio, M. A. y De María Ruiz, M. R.: "Ingeniería de los materiales plásticos". Madrid, 1988.
- [7] Casado, J. A.; Polanco, J. A.; Gutiérrez-Solana, F. & Guerra, R. "The characterization of the resistance to lateral impact of the insulating part of the P2 rail fastening". Third International Conference: "Structures Under Shock and Impact-94". Madrid, June 1994. Proceedings of the Third International Conference: 8 pp. 183-190.
- [8] Renfe. Dirección General Civil. Plano 16.0626.00. Placa acodada de guía de plástico (pag-p).
- [9] Kinloch, A. J. & Young, R. J. "Fracture Behaviour of Polymers. Elsevier Applied Science. London, 1990.

