



**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**

## **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] International Union of Railways (UIC) High Speed Department. Design of new lines for speeds of 300-350 km/h. State of the art. First Report. 25 de octubre de 2001.
- [2] Barron-de-Angoití, I. New lines for speeds of 300-350 km/h. UIC France, WCRR/2001 (World Congress on Railway Research). Cologne 26 de noviembre de 2001.
- [3] Ellwanger G. High Speed, International Union of Railways (UIC). High Speed Rail, Successes and Challenges. European Railway Review. Pags, 13-17.
- [4] López Pita, A. Pendulación, Basculación y Construcción de Infraestructuras Ferroviarias. Opciones alternativas y complementarias. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. 1998.
- [5] Rodríguez, A. L. Puesta a punto del tramo de Alta velocidad Madrid-Zaragoza-Lérida. Vía Libre, edición digital. Nº 462. Marzo 2003.

- [6] Casado, J. Polanco, J.A., Gutiérrez-Solana, F. y Carrascal, I. Mechanical Characterization of Railway Insulating Fastenings. Railway Vibration and Rail Vehicle Dynamics. Barcelona. 1998.
- [7] GIF. Pliego de Bases para el suministro de Sujeciones. 1999.
- [8] Vossloh. Sistema de fijación de carril. Clip elástico SKL-14.Ficha técnica.
- [9] Esveld, C.; Modern Railway Track. W. Germany, 1989.
- [10] Alias, J.; Valdes, A; La vía de ferrocarril. Madrid, 1990.
- [11] Mantenimiento de infraestructura de RENFE: N. R. V. 3-2-0.0. Sujeciones rígidas de carriles. Tirafondos y placas de asiento. 1ª Edición. junio, 1980.
- [12] Mantenimiento de infraestructura de RENFE: N. R. V. 3-1-3.1. Traviesas. Traviesa bloque de hormigón 1ª Edición. Septiembre, 1999.
- [13] Mantenimiento de infraestructura de RENFE: N. R. V. 3-2-1.0. Sujeciones de carriles. Sujeción elástica R.N. 1ª Edición. Julio, 1982.
- [14] Mantenimiento de infraestructura de RENFE: N. R. V. 3-2-1.1. Sujeciones de carriles. Sujeción elástica P-2. 1ª Edición. Septiembre, 1985.
- [15] RENFE. Especificación Técnica para el suministro y homologación de piezas aislantes de la sujeción P2. Especificación Técnica 03.360.560.1. Madrid. Primera edición. Septiembre, 1990.
- [16] Casado, J. A.; Polanco, J. A.; Gutiérrez-Solana, F. Informe Técnico: Aplicación de la Especificación Técnica 03.360.560.1 a distintos tipos de piezas aislantes de la sujeción P2. Santander, Noviembre, 1992.
- [17] Polanco, J. A.; Casado, J.A.; Gutiérrez-Solana, F. Influencia del par de apriete en el comportamiento mecánico de las piezas aislantes P2 de sujeción de vía de ferrocarril. Anales de Ingeniería Mecánica. Vol. 6. p (67-72). Santander, Septiembre, 1992.

- [18] Casado, J. A.; Polanco, J. A.; Gutiérrez-Solana, F. Influencia de las condiciones ambientales en el comportamiento mecánico de las piezas aislantes P2 de sujeción de vía de ferrocarril. Anales de Ingeniería Mecánica. Vol. 4. p (89-93). Santander, Septiembre, 1993.
- [19] Casado, J.A.; Polanco, J.A.; Gutiérrez-Solana, F. y Guerra, R. Estudio del efecto del impacto sobre las piezas aislantes de la sujeción P2 de vía de ferrocarril por medio de técnicas experimentales de laboratorio. Anales de Mecánica de Fractura 7 (450-456). Marzo, 1994.
- [20] Casado, J.A.; Polanco, J.A.; Gutiérrez-Solana, F. y 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, Junio 1994. Proceedings of the Third International Conference: 8 págs. (183-190).
- [21] Mendoza, J.J. Mejora del diseño de elementos de sujeción de vía: J-2 y placa acodada Ligera. Ferroviaria'98.
- [22] Mantenimiento de infraestructura de RENFE: N. R. V. 3-2-1.3. Sujeciones de carriles. Sujeción elástica J-2. 1ª Edición. Febrero, 1994.
- [23] RENFE. Mantenimiento de infraestructura. Plano P16.4721.00 de. Conjunto de la sujeción elástica J-2.
- [24] División de Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Universidad de Cantabria. Informe Técnico: Estudio de la pieza aislante J2 de sujeción de vía de ferrocarril. Santander, Marzo, 1994.
- [25] Grupo de Materiales de la U.C. Estudio sobre el control del Comportamiento, Optimización del Diseño y Definición del Procedimiento de Homologación de las Sujeciones J-2. Informe Técnico. Santander, julio 1994.
- [26] TIFSA. Especificación Técnica para la homologación, el control y el suministro de las piezas aislantes de plástico de la sujeción J-2. ET 03.360.560.1. Madrid. Primera edición. Mayo, 1994.



- [27] Mantenimiento de infraestructura de RENFE: N. R. V. 3-2-1.2. Sujeciones de carriles. Sujeción elástica NABLA. 1ª Edición. Agosto, 1992.
- [28] Mantenimiento de infraestructura de RENFE: N. R. V. 3-2-3.0. Sujeciones de carriles. Sujeción elástica PANDROL. 1ª Edición. Septiembre, 1985.
- [29] Olivero, F; Lopez Pita, A.; Megia, M; Tratado de Ferrocarriles I. Vía.
- [30] Mantenimiento de infraestructura de RENFE: N. R. V. 3-2-2.1. Sujeciones de carriles. Sujeción elástica SKL-12. 1ª Edición. Agosto, 1992.
- [31] Mantenimiento de infraestructura de RENFE: N. R. V. 3-2-2.0. Sujeciones de carriles. Sujeción elástica H.M. 1ª Edición. Julio, 1982.
- [32] García de Villegas, J. M. Ferrocarriles. Cátedra de ferrocarriles. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria. Santander. 1994.
- [33] Martín Galvez, F. Las instalaciones fijas de RENFE ante el aumento de velocidad (II). Programa a corto plazo: vía. Seminario sobre el incremento de velocidad comercial en el ferrocarril. Fundación de los ferrocarriles españoles. Madrid. 1986.
- [34] Sánchez González, J.L: El incremento de velocidad desde el punto del material rodante (II): Estabilidad y seguridad de marcha, incremento de velocidad con vehículos especiales de caja inclinable. Seminario sobre el incremento de velocidad comercial en el ferrocarril. Fundación de los ferrocarriles españoles. Madrid. 1986.
- [35] Oficial Journal of the European Communities. Commission Decision of 30 May 2002 concerning the technical specification for interoperability relating to the infrastructure subsystem of the trans-European high-speed rail system. (TSI).
- [36] De Man, A. y Esveld, C. Recording, Estimating and Managing the Dynamic Behaviour of Railway Structures.

- [37] Markine, V. L., De Man, A. y Esveld, C. Identification of Dynamic Properties of a Railway track.
- [38] Esveld, C. y Kok, A. W. Interaction between Moving Vehicles and Railway Track at High Speed.
- [39] Oostermeijer, K. H. y Kok, A. W. Dynamic Behaviour of railway superstructures. Heron. Vol 45. nº1. Págs. 25-34. 2000.
- [40] Domínguez, J. Dinámica de puentes de ferrocarril para alta velocidad: método de cálculo y estudio de la resonancia. Tesis Doctoral. 2001. UPM Madrid.
- [41] ORE C 138 rp 8: "Permissible maximum values for the Y and Q forces and derailment criteria", Utrech September 1984.
- [42] ORE. Question D 71. Sollicitation de la voie, du ballast et de la plateforme sous l'action des charges roulantes. Report nº 6 : Sollicitation des moyens d'attache. Essais en voie. 1967.
- [43] Suarez. A. Las pruebas del Talgo 350 en la línea de alta velocidad. Lineas de tren. Nº 278. Págs. 26-29.
- [44] TIFSA. Instrumentación de vía y ensayos en el tramo de pruebas de los Monegros.
- [45] Lopez Pita, A. La rigidez vertical de la vía y el deterioro de las líneas de alta velocidad. Revista de obras públicas. Nº 3415. Pags. 7-26. Noviembre 2001.
- [46] López-Pita, A. y Robusté, F. Effect of very speed traffic on the deterioration of track geometry quality.
- [47] ERRI D 170/RP 5: 1994. Dimensionnement des divers elements constitutifs de la voie. Normalisation des caracteristiques et des essais d'homologation. Septiembre 1994.

- [48] CEN/TC 256. prEN 13481-1: 2001 (Final Draft). Railway applications – Track – Performance requirement for fastening systems – Part 1: Definitions. Octubre 2001.
- [49] UNE-EN 13481-1: 2003. Aplicaciones Ferroviarias. Vía. Requisitos de funcionamiento para los sistemas de sujeción. Parte 1: Definiciones.
- [50] CEN/TC 256. prEN 13481-2: 2001 (Final Draft). Railway applications – Track – Performance requirement for fastening systems – Part 2: Fastening systems for concrete sleepers. Octubre 2001.
- [51] UNE-EN 13481-2: 2003. Aplicaciones Ferroviarias. Vía. Requisitos de funcionamiento para los sistemas de sujeción. Parte 2: Sistemas de sujeción para las traviesas de hormigón.
- [52] CEN/TC 256. prEN 13146-1: 2002 (Final Draft). Railway applications – Track – Test methods for fastening systems – Part 1: Determination of longitudinal rail restraint. Mayo 2002.
- [53] UNE-EN 13146-1:2003 Aplicaciones ferroviarias. Vía. Métodos de ensayo de los sistemas de fijación. Parte 1: Determinación de la resistencia al deslizamiento longitudinal del carril.
- [54] CEN/TC 256. prEN 13146-2: 2002 (Final Draft). Railway applications – Track – Test methods for fastening systems – Part 2: Determination of Torsional Resistant. Mayo 2002.
- [55] UNE-EN 13146-2:2003 Aplicaciones ferroviarias. Vía. Métodos de ensayo para los sistemas de fijación. Parte 2: Determinación de la resistencia a la torsión.
- [56] CEN/TC 256. prEN 13146-3: 2002 (Final Draft). Railway applications – Track – Test methods for fastening systems – Part 3: Determination of attenuation of impact loads. Mayo 2002.

- [57] UNE-EN 13146-3:2003 Aplicaciones ferroviarias. Vía. Métodos de ensayo de los sistemas de fijación. Parte 3: Determinación de la atenuación de las cargas de impacto.
- [58] CEN/TC 256. prEN 13146-4: 2002 (Final Draft). Railway applications – Track – Test methods for fastening systems – Part 4: Determination of longitudinal rail restraint. Mayo 2002.
- [59] UNE-EN 13146-4:2003 Aplicaciones ferroviarias. Vía. Métodos de ensayo de los sistemas de fijación. Parte 4: Efecto de las cargas repetidas.
- [60] CEN/TC 256. prEN 13146-5: 2002 (Final Draft). Railway applications – Track – Test methods for fastening systems – Part 5: Effect of repeated loading. Mayo 2002.
- [61] UNE-EN 13146-5:2003 Aplicaciones ferroviarias. Vía. Métodos de ensayo de los sistemas de fijación. Parte 5: Determinación de la resistencia eléctrica.
- [62] CEN/TC 256. prEN 13146-6: 2002 (Final Draft). Railway applications – Track – Test methods for fastening systems – Part 6: Effect of several environmental conditions. Mayo 2002.
- [63] UNE-EN 13146-6:2003 Aplicaciones ferroviarias. Vía. Métodos de ensayo de los sistemas de fijación. Parte 6: Efecto de las condiciones ambientales extremas.
- [64] CEN/TC 256. prEN 13146-7: 2002 (Final Draft). Railway applications – Track – Test methods for fastening systems – Part 7: Determination of clamping force. Mayo 2002.
- [65] UNE-EN 13146-7:2003 Aplicaciones ferroviarias. Vía. Métodos de ensayo de los sistemas de fijación. Parte 7: Determinación de la fuerza de apriete.
- [66] Zand, I. and Morzal, J. Static and Dynamic test on rail fastening systems. Delf University of Tecnology. DELFT.

- [67] ISO 9227:1990. Corrosión tests in artificial atmospheres. Salt spray test. TC 156. ICS 77060.
- [68] RENFE. E.T. 03.360.564.1. Especificación Técnica para el suministro de Clips Elásticos para sujeción de Carril. Junio 1981.
- [69] RENFE: Mantenimiento de infraestructura. Plano P16.0089.00 de RENFE. Clip elástico SKL 1. Sujeción Vossloh HM.
- [70] <http://www.dacromet.com>.
- [71] Sujeciones de Vía. Plano SV 005. Vaina SV 22-115.
- [72] Sujeciones de vía. Plano SV 004. Tornillo 22-115-5.
- [73] VAPE RAIL INTERNACIONAL. PLASTIRAIL. Documentación Técnica. ST 00287-6. Edición de abril de 1997.
- [74] RENFE. Especificación técnica para la homologación y el suministro de Placas Guía de plástico". E.T. 03.360.566.8. 1ª edición. Mayo 1994.
- [75] RENFE. Dirección Ingeniería Civil. Plano P 16.0626.00. Placa acodada de guía de plástico (Pag/\*).
- [76] TIFSA. Grupo RENFE. Proyecto V-146. Optimización de piezas acodadas de plástico para traviesas PR-90 y MR-93.
- [77] Casado, J. A. Carrascal, I. Polanco, J.A. y Gutiérrez-Solana F. Control de comportamiento, optimización de diseño y definición del procedimiento de homologación de las piezas acodadas de plástico para sujeción Bolso. Informe Final. Santander, Mayo de 1998.
- [78] RENFE. Especificación Técnica para la homologación y el suministro de placas guía de plástico. Especificación Técnica 03.360.566.8. Madrid. Primera edición. Mayo, 1994.
- [79] RENFE. Mantenimiento de infraestructura. Plano P 16.4961.00. Placa acodada ligera de sujeción A2.

- [80] LADICIM. Informe nº 99020. Ensayos de rigidez sobre placa de asiento AV. Marzo 1999.
- [81] LADICIM. Informe nº 99026. Ensayos de rigidez sobre placa de asiento AV. Abril 1999.
- [82] LADICIM. Informe nº 99035 y 99035/2. Ensayos de cualificación sobre placa de asiento de carril de 7 mm de espesor <ZW 787a>. Junio y septiembre de 1999
- [83] LADICIM. Informe nº 99037. Ensayos de cualificación sobre conjunto de sujeción proporcionado por DYF. Julio 1999.
- [84] López Manchado, M.A. y Arroyo Ramos, M. Revista de Plásticos Modernos, Vol 78, nº 522, pgs, 677-683. 1999.
- [85] <http://www.vossloh.com/>
- [86] Mantenimiento de infraestructura de RENFE: N. R. V. 3-1-2.1. Traviesas. Traviesa monobloque de hormigón 1ª Edición. Diciembre, 1997.
- [87] RENFE. E.T. 03.360.562.7. Especificación Técnica para la homologación y suministro de traviesas monobloque de hormigón pretensado. 2004.
- [88] Plano AI 99-VB-56. Traviesa AI-99 para alta velocidad. Ancho internacional-Carril UIC-60.
- [89] LADICIM. Informe 00112. Informe Técnico. Ensayos de cualificación sobre traviesas de hormigón monobloque de TYPESA (AI-89). Julio 2000.
- [90] LADICIM. Informe 00099. Informe Técnico. Ensayos de cualificación sobre traviesas de hormigón monobloque de TYPESA procedentes de Luceni. Julio 2000.
- [91] Carrasco, J. Estudio y análisis de los elementos de la superestructura en la línea del AVE Madrid-Barcelona. Proyecto Fin de Carrera. Universidad de Burgos. Junio de 2000.

- [92] LADICIM. Informe nº 99074. Informe Técnico. Ensayos de cualificación sobre sistema de sujeción para la vía de alta velocidad Madrid-Lleida. 1999.
- [93] LADICIM. Informe nº 99082. Informe Técnico. Ensayos de cualificación sobre sistema de sujeción para la vía de alta velocidad Madrid-Lleida. 1999.
- [94] LADICIM. Informe nº 99083. Informe Técnico. Ensayos de cualificación sobre sistema de sujeción para la vía de alta velocidad Madrid-Lleida. 1999.
- [95] LADICIM. Informe nº 99095. Informe Técnico. Ensayos de cualificación sobre sistema de sujeción para la vía de alta velocidad Madrid-Lleida. Diciembre 1999.
- [96] LADICIM. Informe nº 00010. Informe Técnico. Ensayos de cualificación sobre sistema de sujeción para la vía de alta velocidad Madrid-Lleida. Marzo 2000.
- [97] Casado J.A., Carrascal I.A. y Polanco J.A. Ensayos de investigación relativos a la especificación técnica de RENFE E.T. 03.360.570.0: Placas elásticas de asiento para sujeción VM. Informe final. Santander. 2005.
- [98] I. A. Carrascal, J. A. Casado, J. A. Polanco y F. Gutiérrez-Solana. Efecto de las características físico-geométricas de las traviesas de hormigón monobloque en el comportamiento eléctrico de la superestructura de vía de ferrocarril para AVE. Materiales compuestos 03. (Actas del VI Congreso nacional de Materiales Compuestos). Pgs 667-674. Valencia. 2005.
- [99] UNE EN 12504-1. Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 1: Testigos. Extracción, examen y ensayos a compresión. 2001.
- [100] UNE 83309 EX. Determinación de la profundidad de penetración de agua bajo presión. 1990.



- [101] UNE 83-306. Ensayo de hormigón. Rotura por tracción indirecta (ensayo brasileño). 1995.
- [102] VALENTA, O. The permeability and the durability of concrete in aggressive conditions. Commission Internat. des Grands Barrages. Q 39 R 6. Montreal. 1970.
- [103] Setién, J., Varona, J.M. "El factor de corrosión, un método alternativo para la evaluación de la corrosión". Ingeniería Química. Noviembre. 1995, pgs 95-99.
- [104] Locati, L. La Fatica dei Materiali Metallici. Ulrico Hoepli. Milano. 1950.
- [105] Locati, L. Programmed Fatigue Test, Variable Amplitude Rotat. Metallurgia Italiana. Vol 44, nº 4, págs 135-144. 1952.
- [106] Casado, J. A.; Polanco J. A.; Carrascal I. and Gutiérrez-Solana, F. Application of the Locati Method to material selection for reinforced polymeric parts subjected to fatigue. International Conference on Fatigue of Composites. Paris, Junio 1997. Proceedings of the Eighth International Spring Meeting: 8 págs. (454-461).
- [107] Casado. J. A. Comportamiento en fatiga de poliamidas reforzadas con fibra de vidrio corta. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria. 2001.
- [108] UNE-EN ISO 6508-1. Materiales Metálicos. Ensayo de dureza Rockwell. Parte 1: Método de ensayo (escalas A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T). Junio 2000.
- [109] Sujeciones de Vía. DT-2. Vaina SV-S1. Plastirail 22-115. Rev. 3. 12/09/200.
- [110] Carrascal I.A., Casado J.A., Polanco J.A. y Gutiérrez-Solana F. Comportamiento dinámico de placas de asiento de sujeción de vía de ferrocarril. Anales de mecánica de la fractura. Vol. XXII. Almagro. 2005.
- [111] UNE-EN ISO 868. Plásticos y ebonitas. Determinación de la dureza de indentación por medio de un durómetro. (Dureza Shore). 2003.

- [112] Sujeciones de Vía. DT-1. Tornillo SV. Plastirail 22-115. Rev. 3. 11/09/2000.
- [113] UNE-EN 10002-1. Materiales metálicos. Ensayo de tracción. Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente. Julio 2002.
- [114] UNE 7-475. Materiales metálicos. Ensayo de Flexión por Choque sobre probeta Charpy. Parte 1: Método de ensayo. 1992.
- [115] UNE –EN ISO 14556. Acero. Ensayo de Flexión por choque sobre probeta Charpy con entalla en V. Método de ensayo instrumentado. Abril 2001.
- [116] SINTAP. Structural Integrity Assessment Procedure for European Industry. SINTAP. BRITE-EURAM Projec. BRPR-CT 95-0024. 1999.
- [117] LADICIM. Informe nº 00087. Informe Técnico. Ensayos de cualificación sobre sistema de sujeción para la vía de alta velocidad Madrid-Lleida. Junio 2000.
- [118] LADICIM. Informe nº 00106. Informe Técnico. Ensayos de cualificación sobre sistema de sujeción para la vía de alta velocidad Madrid-Lleida. 2000.
- [119] LADICIM. Informe nº 00120. Informe Técnico. Ensayos Ensayos sobre placa de asiento Pase2 inyectada por DYF (Mod. Util. Nº 9901107). Agosto 2000
- [120] LADICIM. Informe nº 00132. Informe Técnico. Ensayos de cualificación sobre sistema de sujeción para la vía de alta velocidad Madrid-Lleida. 2000.
- [121] LADICIM. Informe nº 00142. Informe Técnico. Ensayos de cualificación sobre sistema de sujeción para la vía de alta velocidad Madrid-Lleida. 2000.
- [122] LADICIM. Informe nº 01023. Informe Técnico. Ensayos de cualificación sobre sistema de sujeción para la vía de alta velocidad Madrid-Lleida. Marzo 2001.

- [123] LADICIM. Informe nº 01023/2. Informe Técnico. Ensayos de cualificación sobre sistema de sujeción para la vía de alta velocidad Madrid-Lleida. Abril 2001.
- [124] LADICIM. Informe nº 01070. Informe Técnico. Ensayos sobre placas acodadas A2 fabricadas por CEBUTOR para el sistema de sujeción de la vía de alta velocidad Madrid-Lleida. Julio 2001.
- [125] UNE-EN 13230-2. Aplicaciones ferroviarias. Vía. Traviesas de hormigón para plena vía y aparatos. Parte 2: Traviesas monobloque de hormigón pretensado. 2003.
- [126] UNE-EN 13481-6, Aplicaciones ferroviarias. Vía. Requisitos de funcionamiento de los sistemas de sujeción. Parte 6: Sistemas de sujeción especiales para atenuación de las vibraciones. Mayo 2003.
- [127] De Burn C. W. y Garner E. V.. Parking of nylon 6.6 molecules in the triclinic unit cell: a form, Proc. Roy. Soc. Lond. 189A, 39. 1947.
- [128] Ramos, M.A.; De María, M.R. "Ingeniería de los materiales plásticos". Madrid,1988.
- [129] AHARONI, S. M. N-Nylons: their Synthesis, Structure and Properties. John Wiley & Sons. Chichester, 1997.
- [130] Charles, R. and Bauer, R.: "Moisture-related failure". Engineering Plastics. Vol 2. Engineered Materials Handbook. ASM International Ohio, 1988.
- [131] Carrascal I., Casado J.A., Polanco J.A., Gutiérrez-Solana F. y Sánchez, L. Efecto del contenido de humedad en el comportamiento en fatiga de la PA6 reforzada con fibra de vidrio. Anales de Mecánica de la Fractura, Vol XV. 319-324. 1998.
- [132] Akay, M. Moisture absorption and its influence on the tensile properties of G-F reinforced PA 6,6. Polymers and Polymers composites, vol 2, nº 6, 349-354. 1994.

- [133] Valentin, D., Paray, F., Guetta, B. The hygrothermal behaviour of glass fibre reinforced PA66 composites: a study of the effect of water absorption on their mechanical properties. *Journal of material science* 22. 46-56. 1987.
- [134] Bretz, P. E., Hertzberg, R. W., Manson, J. A and Ramirez, A. Effect of moisture on fatigue crack propagation in Nylon 66. *Water in Polymer*. 531-553. 1980.
- [135] Iberofon Plásticos. Estudio de las propiedades mecánicas de las Piezas aislantes de la sujeción J-2 en función del contenido de humedad. Informe Técnico. 1996.
- [136] ISO 291. Plásticos. Atmósferas normalizadas para acondicionamiento y ensayos. 1997.
- [137] UNE-EN ISO 1110. Plásticos. PA. Acondicionamiento acelerado de probetas. 1995.
- [138] UNE-EN ISO 527-2. Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 2: Condiciones de ensayo de plásticos para moldeo y extrusión. 1997.
- [139] UNE-EN-ISO 960. Plásticos. Poliamidas. Determinación del contenido en agua. 1998.
- [140] UNE-EN ISO 62. Plásticos. Determinación de la absorción de agua. 2000.
- [141] Van Hartingsveldt, E. A. Interfacial adhesión and mechanical properties of PA-6/glass bead composites. Tesis Doctoral. Universidad Técnica de Delft. 1987.
- [142] Carrascal I., Casado J.A., Polanco J.A y Gutiérrez-Solana F. Absorción y difusión de agua en al poliamida 6 reforzada con fibra de vidrio corta. *Materiales Compuestos* 01. (Actas del IV Congreso Nacional de Materiales Compuestos), pgs: 469-478. 2001.

- [143] Carrascal I., Casado J.A., Polanco J.A y Gutiérrez-Solana F. Absorption and diffusion of humidity in fiberglass-reinforced polyamide. *Polymer Composites*. Volume 26. Issue 5. Pag 580-586. 2005.
- [144] Callister W.S. *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Ed. Reverte. 1995.
- [145] Fukuda M. and Kawai H. Moisture Sorption mechanism of aromatic Polyamide fibers: diffusion of moisture in Poly (p-phenylene terephthalamide) fibers. *Textile Research Journal*, Vol. 63, nº 4. 185-193. 1993.
- [146] Hernández R. H. And Gavara R. Sorption and transport of water in Nylon-6 Films. *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics*, Vol. 32. 2367-2374. 1994.
- [147] Fukuda M. Diffusion of moisture in Poly (p-phenylene terephthalamide) film. *Polymer engineering and Science*, Vol. 36, nº 4. 558-567. 1996.
- [148] Hull, D.: "Materiales Compuestos". Barcelona, 1987.
- [149] ASTM Standard. Vol 08.02 "Plastics (II)". D 2990-92 "Standard Test Methods for Tensile, Compressive, and Flexural Creep and Creep-Rupture of Plastics". Philadelphia. 1992.
- [150] Jansson, J. F.; Sundström, H. . "Creep and fracture initiation in fiber reinforced plastics". *Failure of plastics*. Ed. by Witold Brostow. Hanser publishers. Munich. 1986.
- [151] Ward, Y. M.; Hadley, D. W. "Mechanical properties of solid polymers". John Wiley & Sons Ltd. Chichester, England. 1993.
- [152] Hunter, S.C., "Mechanics of continuous media". Ellis Horwood Limited. 2nd edition, Great Britain. 1983.
- [153] Throne, J.L., Progelhof, R.C., "Creep and Stress Relaxation". *Engineering Plastics*. Vol 2. *Engineered Materials Handbook*. ASM International Ohio, 1988.

- [154] Crawford, R.J., "Plastics Engineering". Butterwoth-Heinemann. Third Edition. Oxford. 1998.
- [155] Carrascal I., Casado J.A., Polanco J.A. y Gutiérrez-Solana F. Efecto del contenido de humedad en la fluencia bajo cargas elevadas de la PA6 reforzada con fibra de vidrio. Anales de Mecánica de la fractura, Vol XVI. 221-227. 1999.
- [156] Sumpter, B. G.; Noid, D. W. "On the design, analysis, and characterization of materials using computacional neural networks". Annu. Rev. Mater. Sci. 26: pg 223-277. 1996.
- [157] Tuya, J. "Redes Neuronales Artificiales". E.T.S. Ingenieros Industriales. Gijón. 1990.
- [158] Denuth, H., Beale, M.; "Neural Network Toolbox User's Guide for use with Matlab". The Math Works Inc. Marde, 1996.
- [159] AENOR. UNE-EN ISO 6721-1 Plásticos. Determinación de las propiedades mecano-dinámicas. Parte 1: Principios generales. Octubre 1996.
- [160] Balart R., López J., García D. y Parres F. Técnicas experimentales de análisis térmico de polímeros. Ed. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia. 2003.
- [161] Wendlant, W. Thermal Analysis. Chemical analysis, 0069-2883; Vol 19. third edition. New York. 1986.
- [162] ASTM D5026-95. Standard test meted for measuring the dynamic mechanical properties of plastics in tension.
- [163] Carrascal I., Casado J.A., Polanco J.A. y Gutiérrez-Solana F Análisis dinamo-mecánico macroscópico (M-DMA) sobre componentes estructurales de PA 6.6 reforzada con F.V. corta. Materiales Compuestos 03. (Actas del V Congreso Nacional de Materiales Compuestos), pgs: 543-551. Zaragoza. 2003.

- [164] Carrascal I., Casado J.A., Varona, J. M., Polanco J.A. y Gutiérrez-Solana F. Determinación del fallo por fatiga en base a consideraciones energéticas de componentes de PA 6.6 reforzada con fibra de vidrio. *Análes de Mecánica de la Fractura*. Vol XXI. Pags. 427-431. Punta Umbría. 2004.
- [165] Casado J.A, Carrascal I.A., Polanco J.A. y Gutiérrez-Solana F. Fatigue failure of short glass fibre reinforced PA 6.6 structural pieces for railway track fasteners. *Engineering Failure Analysis*. 13. Pgs 182-197. 2006.
- [166] Ferry, J. D. *Viscoelastic properties of polymer*. 3rd ed. Wiley, New York, 1980.
- [167] J. Setién, I. Carrascal, J.F. Figueroa y J.A. Polanco Aplicación de una red neuronal artificial a la dosificación de hormigones premezclados. *Materiales de Construcción* Vol. 53. Nº 270. Pgs. 5-19. 2003.



## ANEXO I

### **GRÁFICAS OBTENIDAS EN LAS PRUEBAS DE OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE SUJECIÓN**

## 1. CONFIGURACIÓN 1 (C1)

Tabla I.1.- Componentes de la configuración nº 1

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

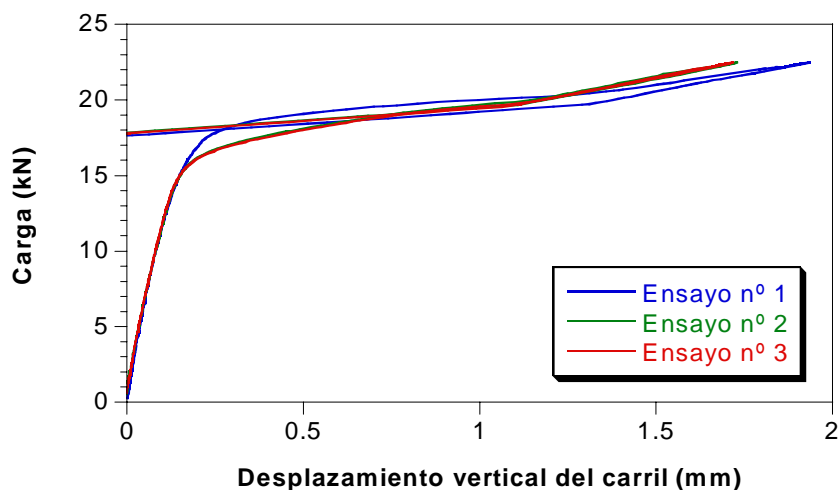


Figura I.1.- Ensayo de fuerza de apriete previo al dinámico (C1)

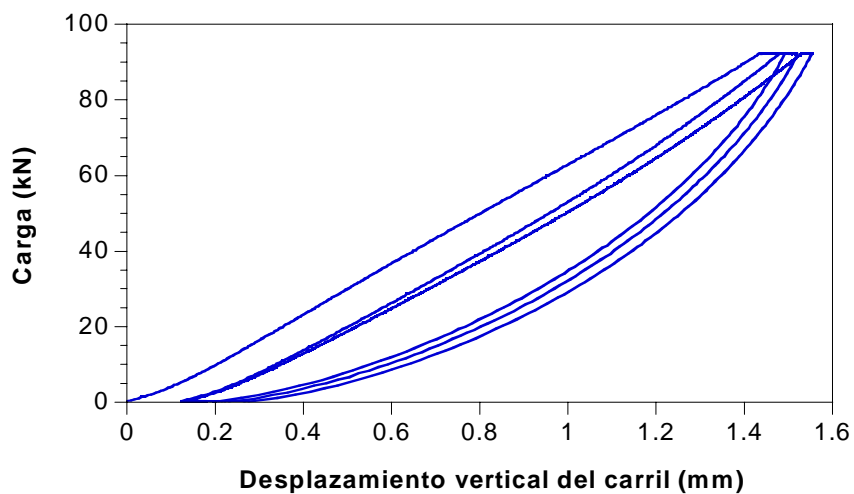


Figura I.2.- Ensayo de rigidez vertical secante  $P_0/P_0+75$  previo al dinámico (C1)

## 2. CONFIGURACIÓN 2 (C2)

Tabla I.2.- Componentes de la configuración n° 2

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

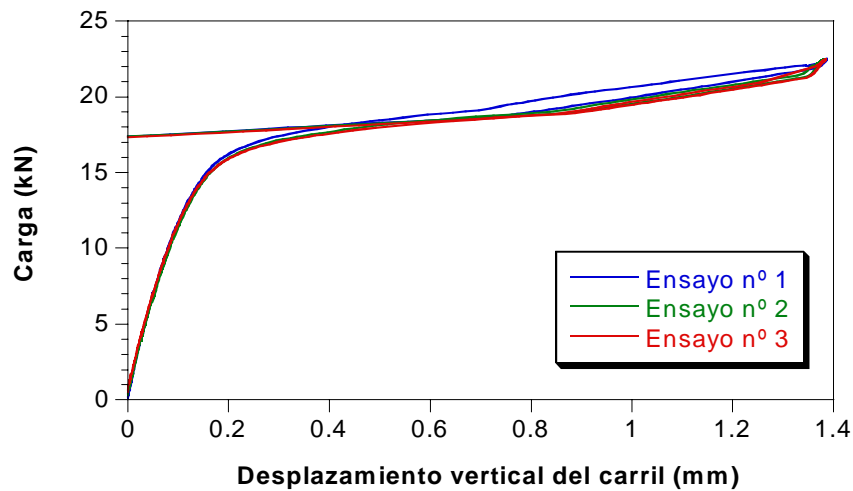


Figura I.3.- Ensayo de fuerza de apriete previo al dinámico (C2)

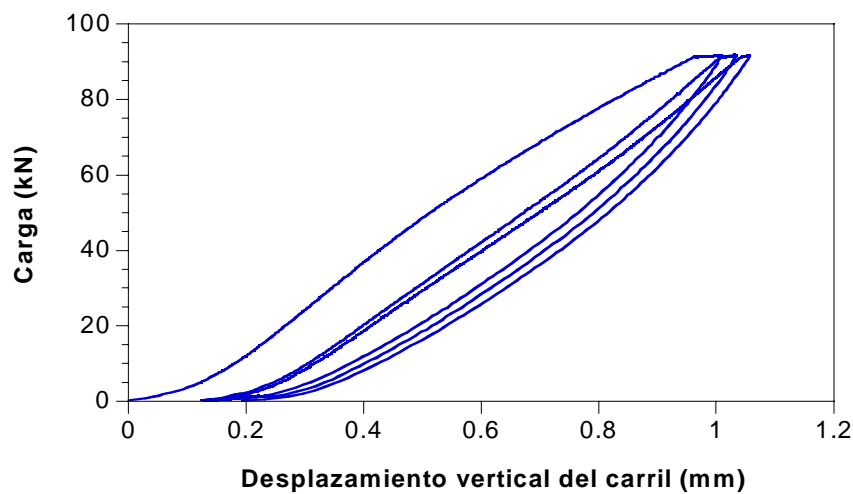


Figura I.4.- Ensayo de rigidez vertical secante  $P_0/P_0+75$  previo al dinámico (C2)

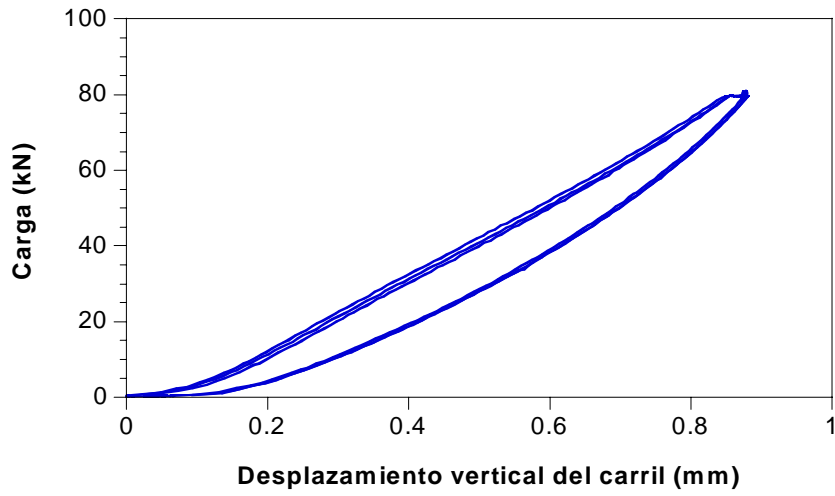


Figura I.5.- Ensayo de rigidez vertical a 80 kN previo al dinámico (C2)

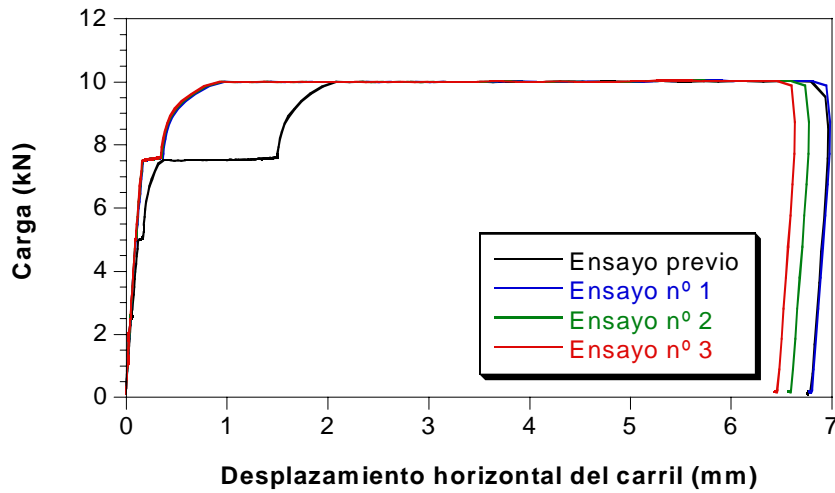


Figura I.6.- Ensayo de deslizamiento longitudinal previo al dinámico (C2)

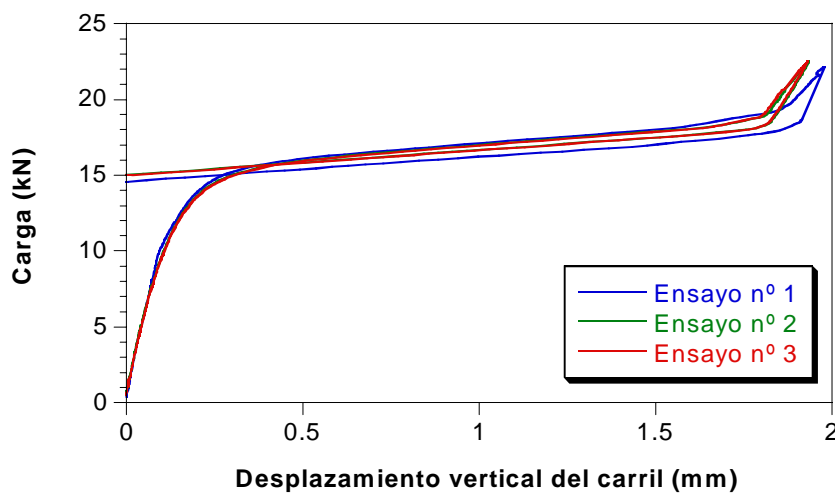


Figura I.7.- Ensayo de fuerza de apriete posterior al dinámico (C2)

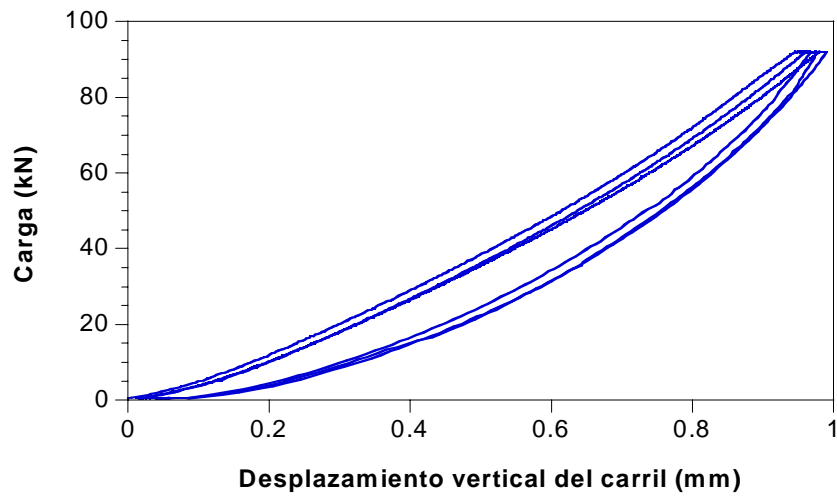


Figura I.8.- Ensayo de rigidez vertical secante  $P_0/P_0+75$  posterior al dinámico (C2)

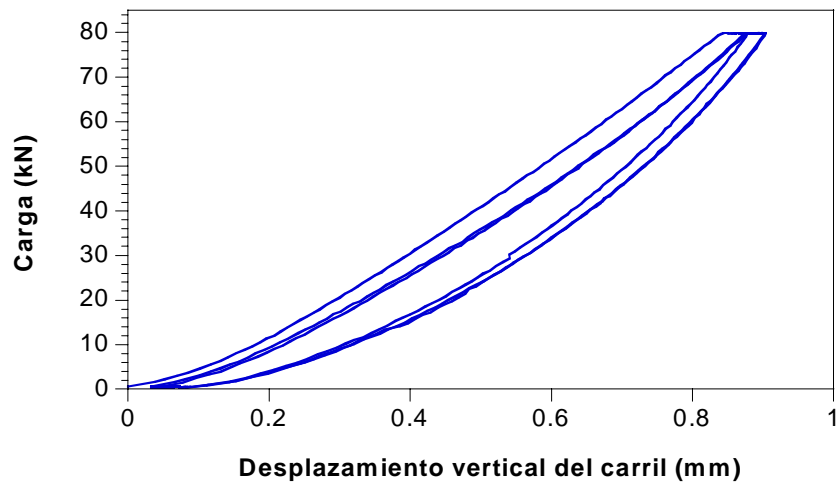


Figura I.9.- Ensayo de rigidez vertical a 80 kN posterior al dinámico (C2)

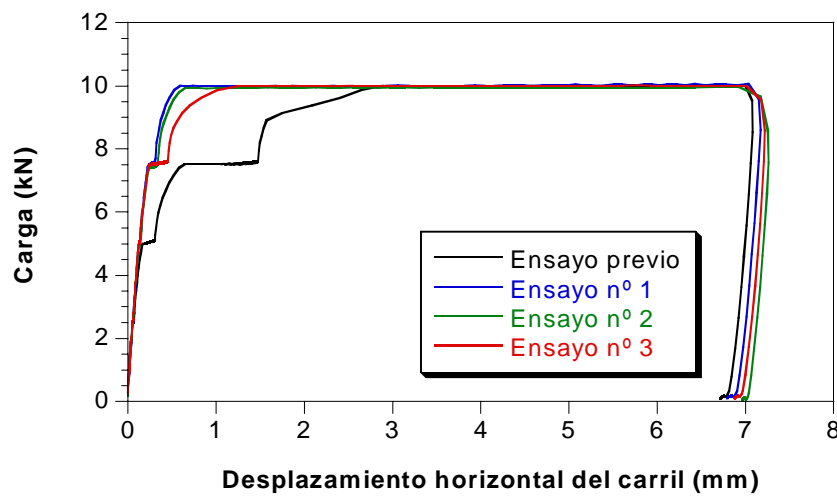


Figura I.10.- Ensayo de deslizamiento longitudinal posterior al dinámico (C2)

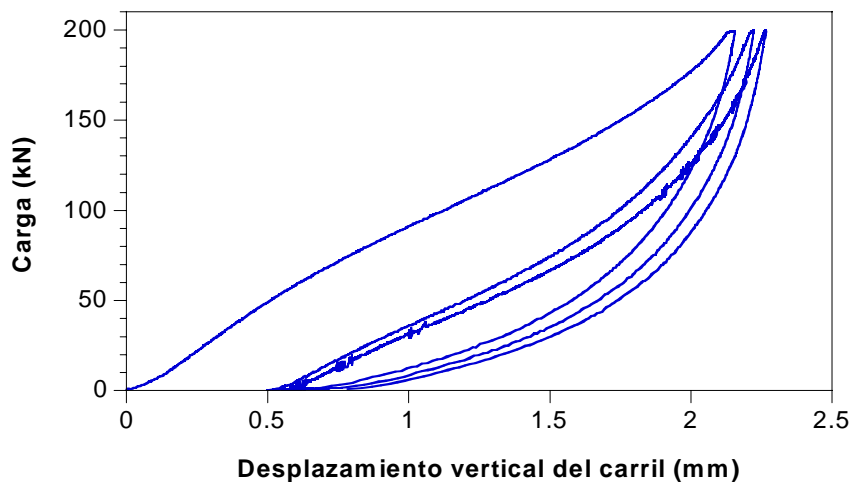


Figura I.11.- Ensayo de rigidez vertical secante 100/200 (C2)

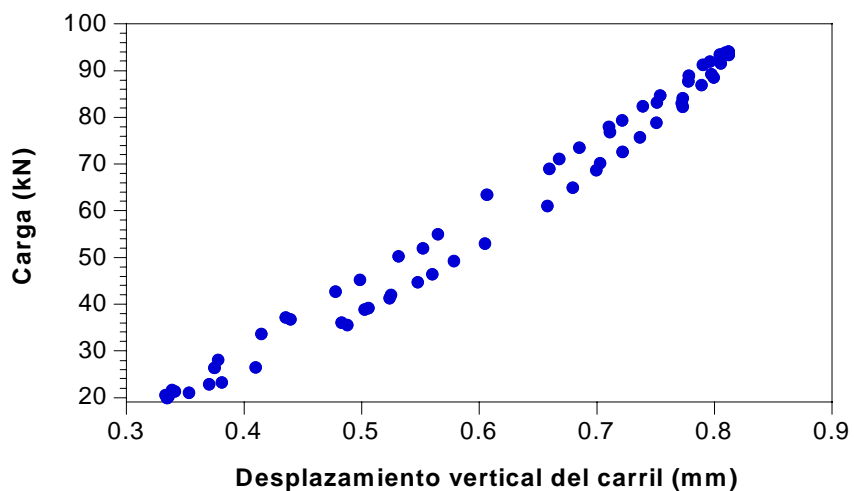


Figura I.12.- Ensayo de rigidez dinámica a baja frecuencia (C2)

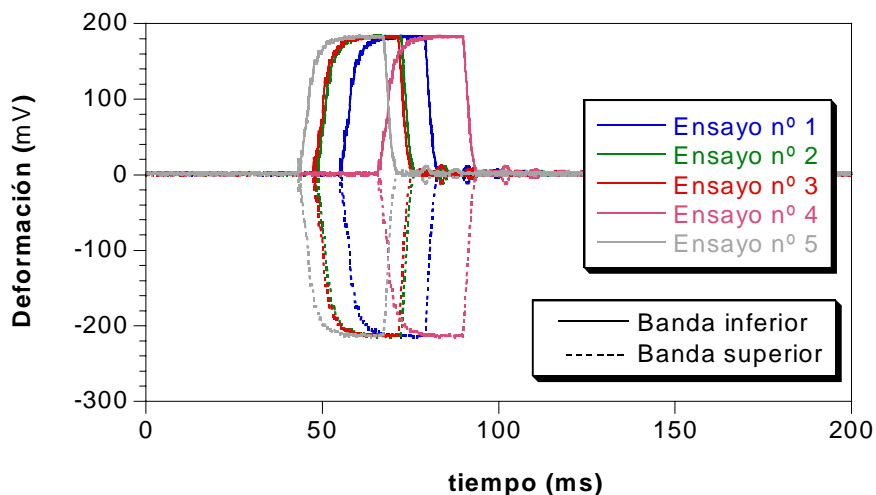


Figura I.13.- Ensayos de atenuación de impacto sobre placa de EVA (C2)

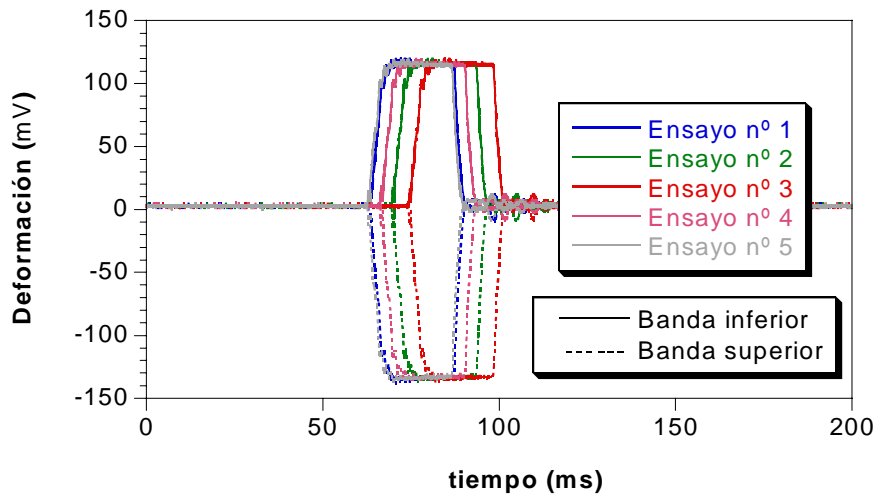


Figura I.14.- Ensayos de atenuación de impacto sobre placa de 7 mm (C2)

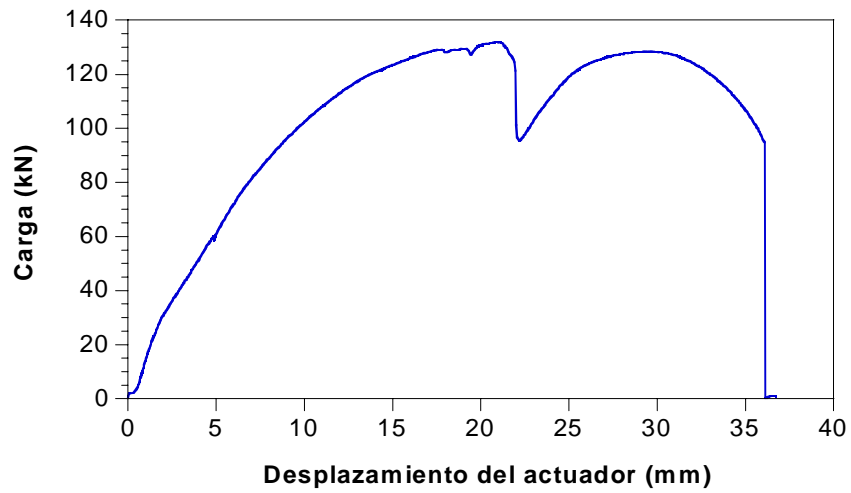


Figura I.15.- Ensayo de carga vertical (C2)

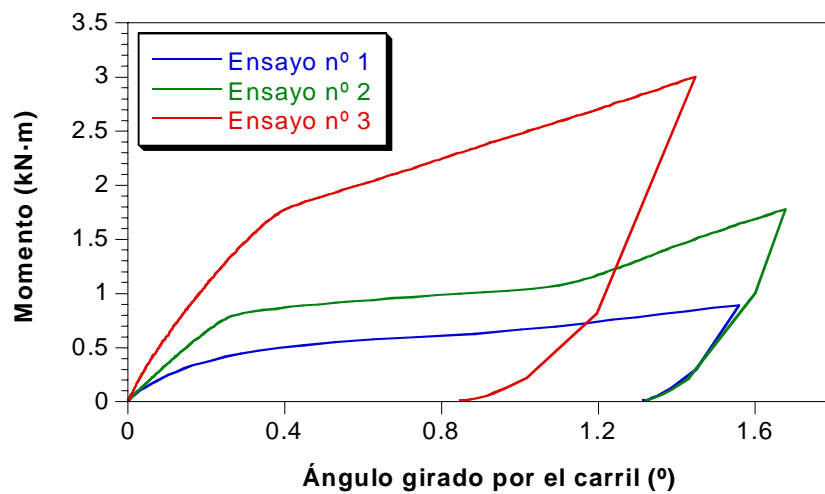


Figura I.16.- Ensayos de resistencia a la torsión (C2)



### 3. CONFIGURACIÓN 3 (C3)

Tabla I.3.- Componentes de la configuración nº 3

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

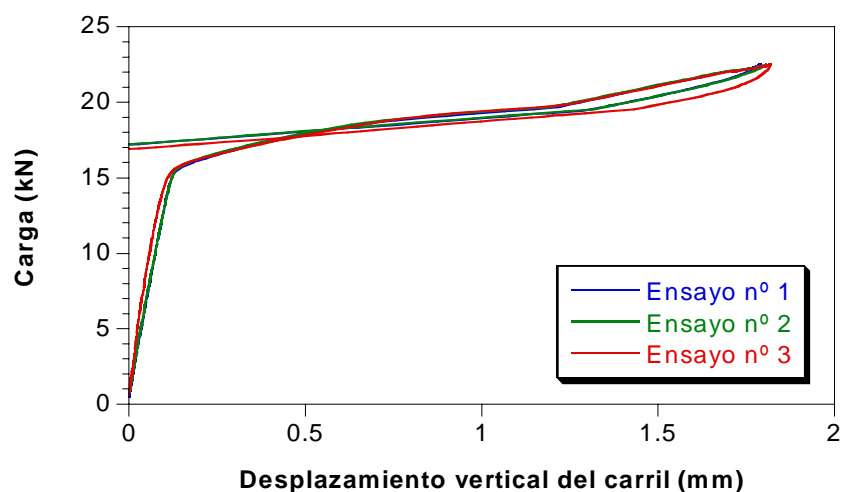


Figura I.17.- Ensayo de fuerza de apriete previo al dinámico (C3)

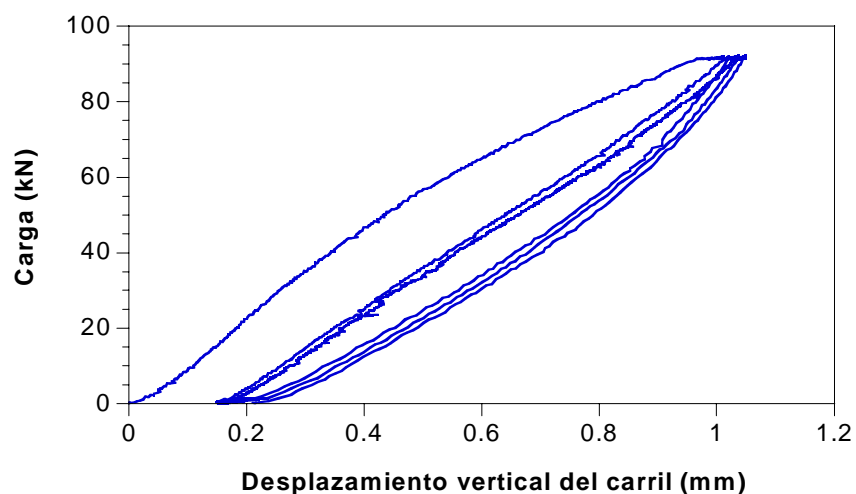


Figura I.18.- Ensayo de rigidez vertical secante  $P_0/P_0+75$  previo al dinámico (C3)

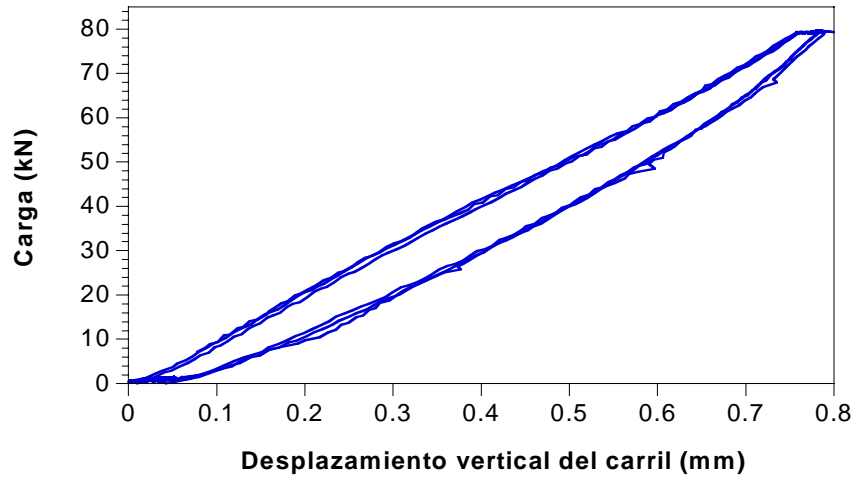


Figura I.19.- Ensayo de rigidez vertical a 80 kN previo al dinámico (C3)

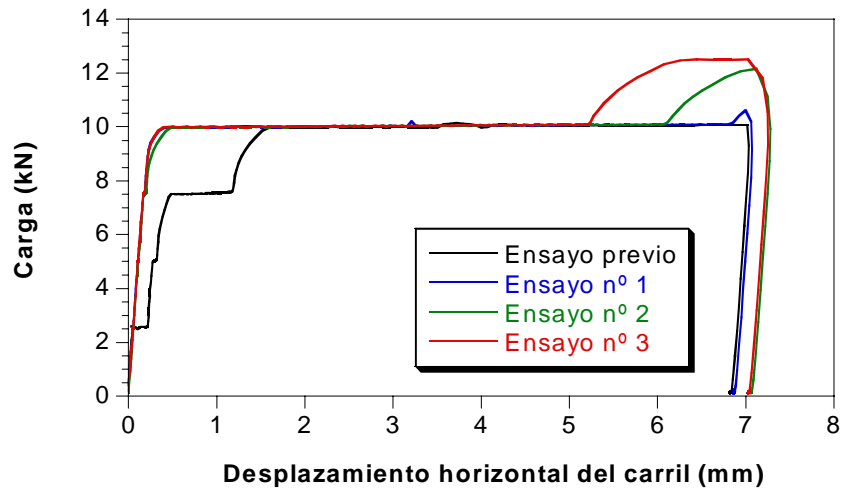


Figura I.20.- Ensayo de deslizamiento longitudinal previo al dinámico (C3)

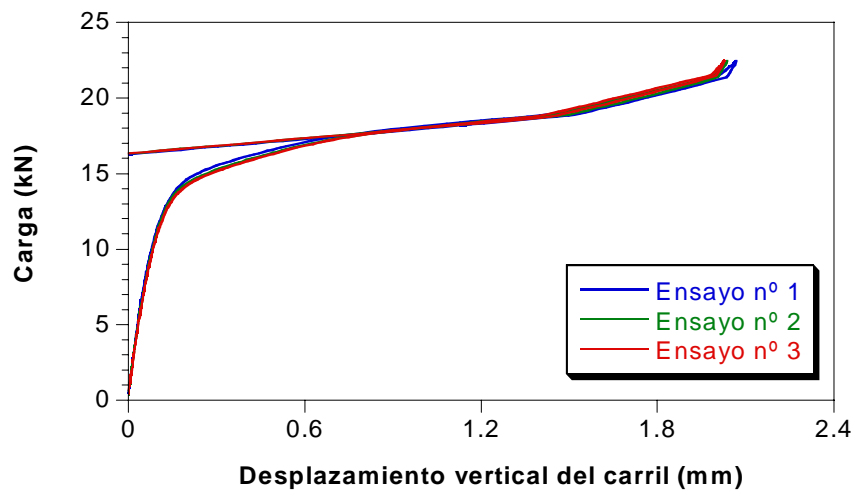


Figura I.21.- Ensayo de fuerza de apriete posterior al dinámico (C3)

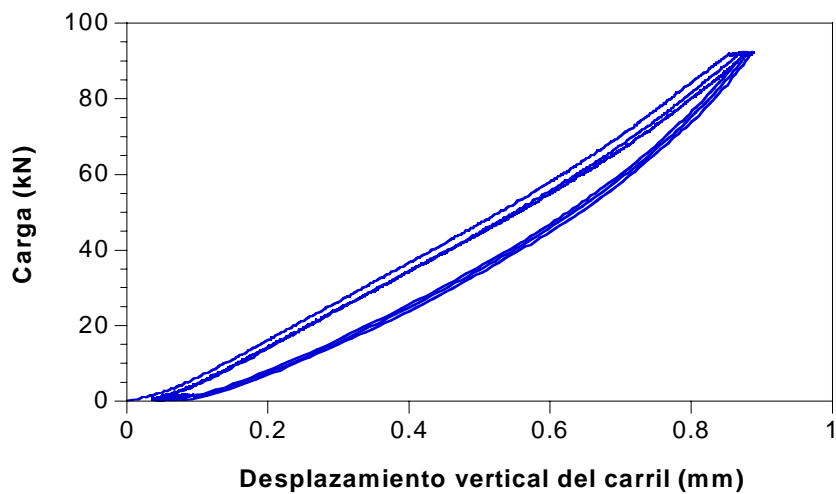


Figura I.22.- Ensayo de rig. vertical secante  $P_0/P_0+75$  posterior al dinámico (C3)

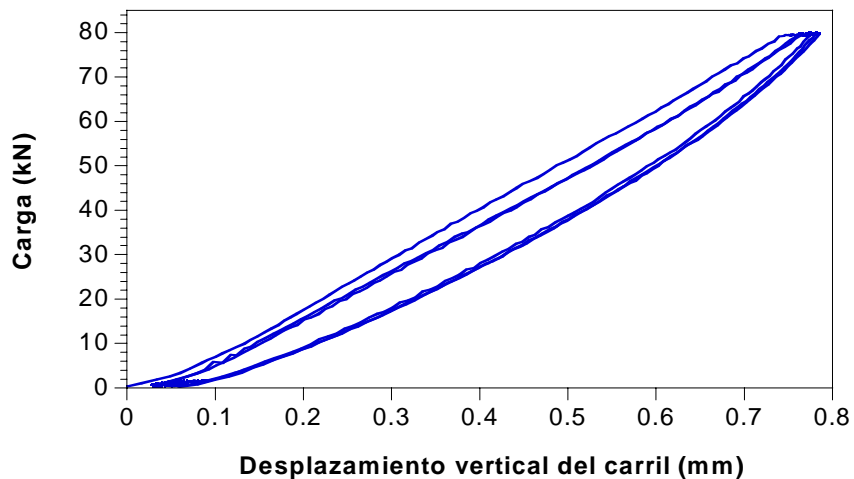


Figura I.23.- Ensayo de rigidez vertical a 80 kN posterior al dinámico (C3)

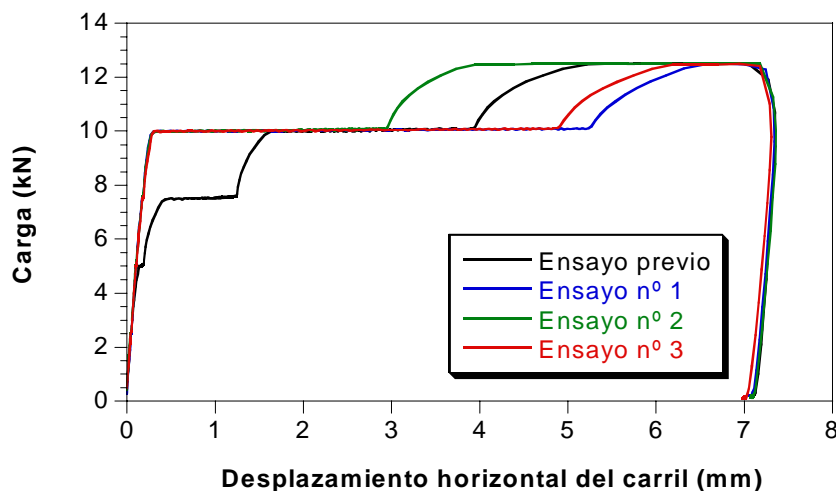


Figura I.24.- Ensayo de deslizamiento longitudinal posterior al dinámico (C3)

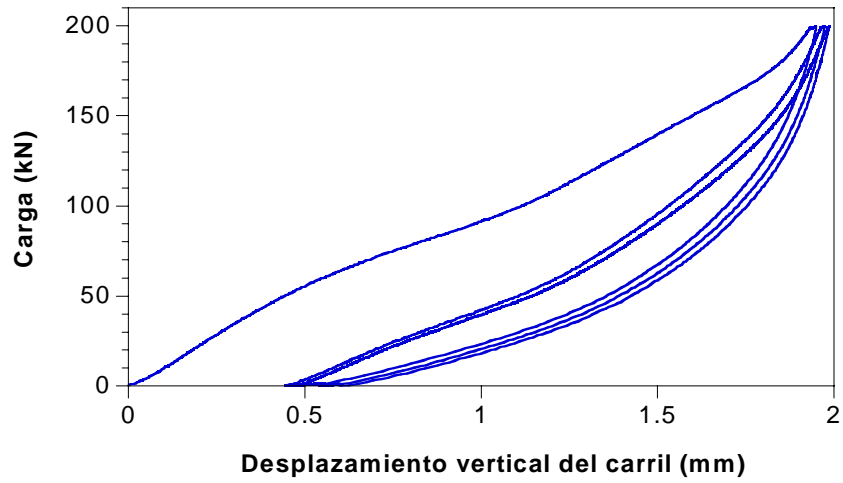


Figura I.25.- Ensayo de rigidez vertical secante 100/200 (C3)

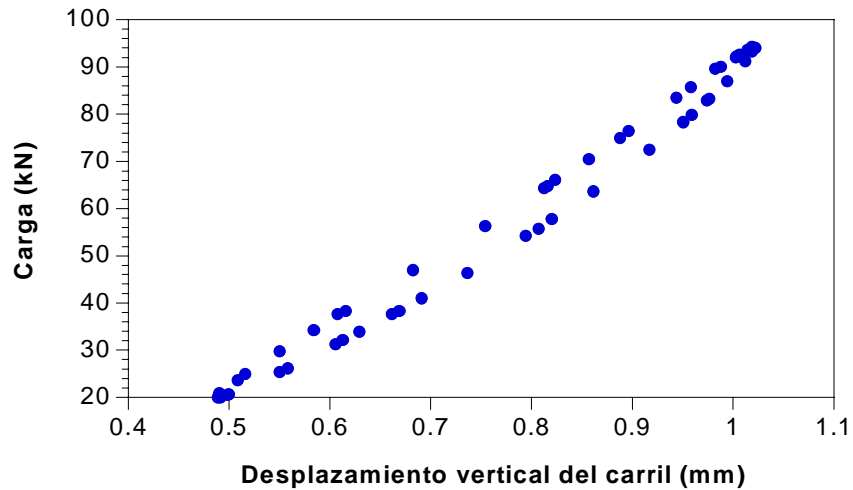


Figura I.26.- Ensayo de rigidez dinámica a baja frecuencia (C3)

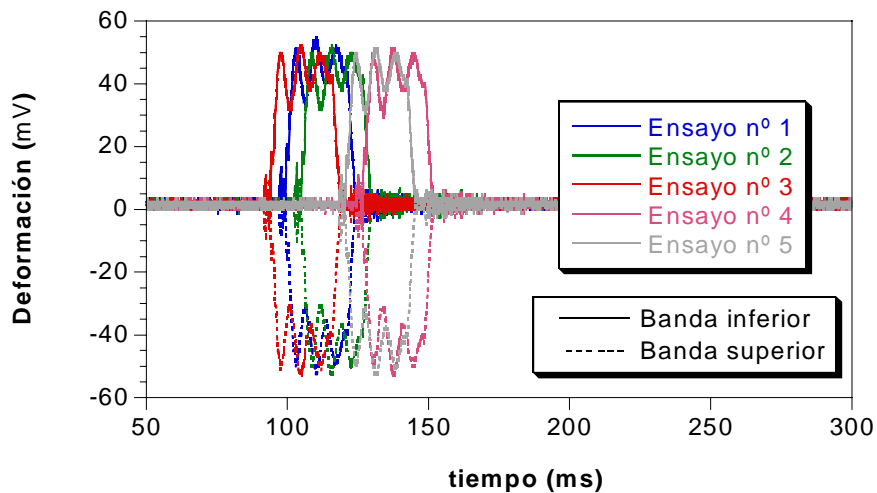


Figura I.27.- Ensayos de atenuación de impacto sobre placa de EVA (C3)

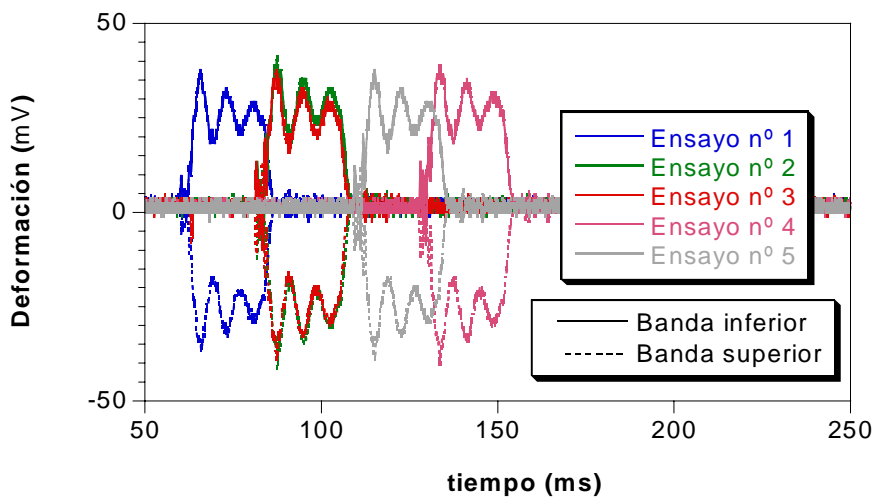


Figura I.28.- Ensayos de atenuación de impacto sobre placa de 7 mm (C3)

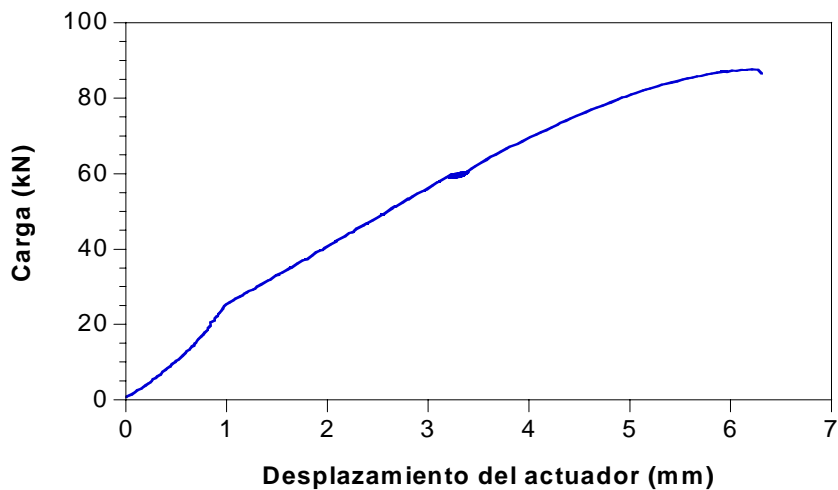


Figura I.29.- Ensayo de carga vertical (C3)

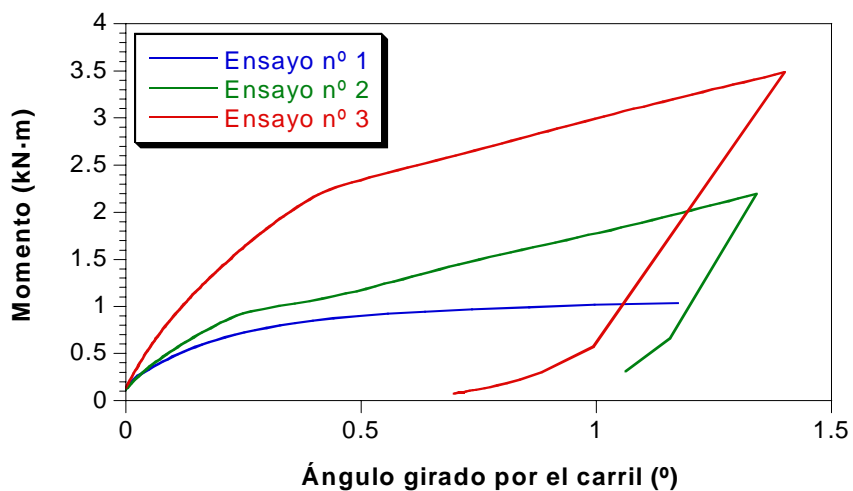


Figura I.30.- Ensayos de resistencia a la torsión (C3)

#### 4. CONFIGURACIÓN 4 (C4)

Tabla I.4.- Componentes de la configuración n° 4

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

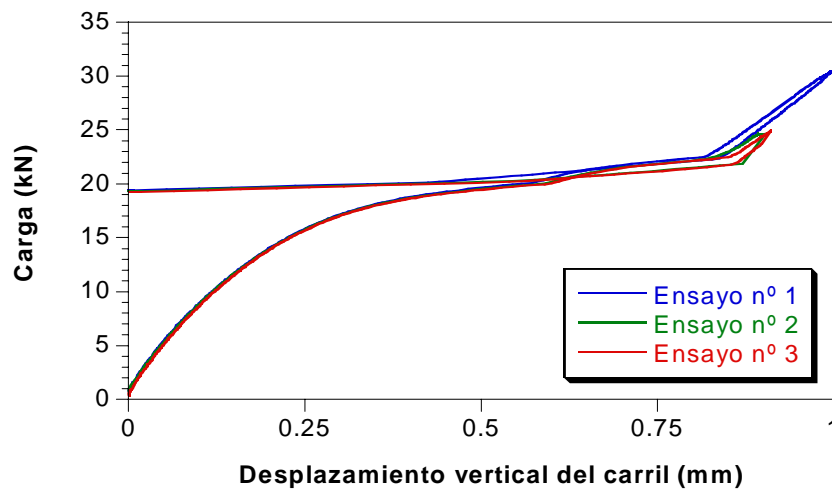


Figura I.31.- Ensayo de fuerza de apriete previo al dinámico (C4)

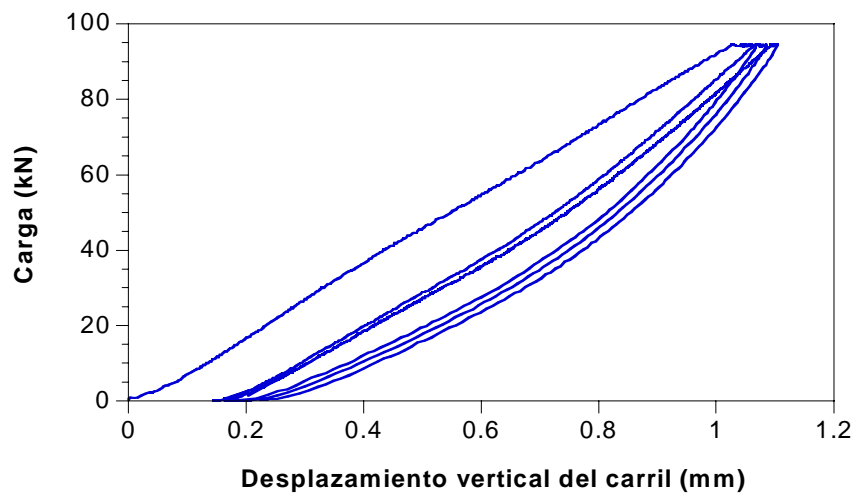


Figura I.32.- Ensayo de rigidez vertical secante  $P_0/P_0+75$  previo al dinámico (C4)

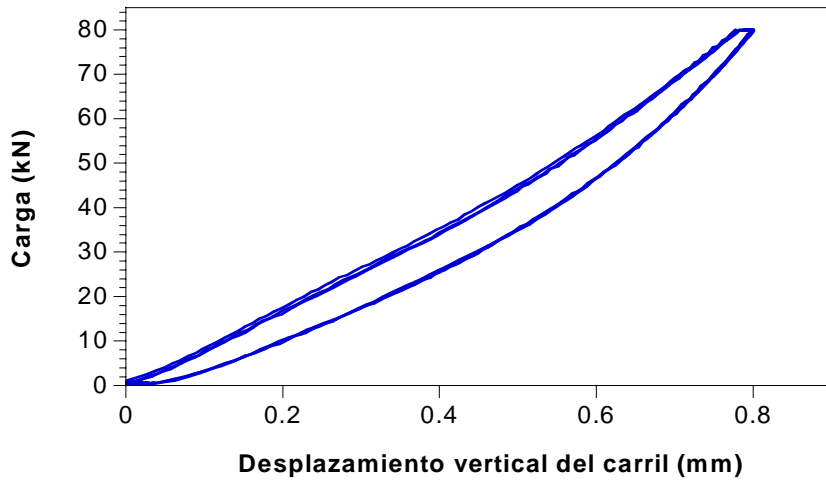


Figura I.33.- Ensayo de rigidez vertical a 80 kN previo al dinámico (C4)

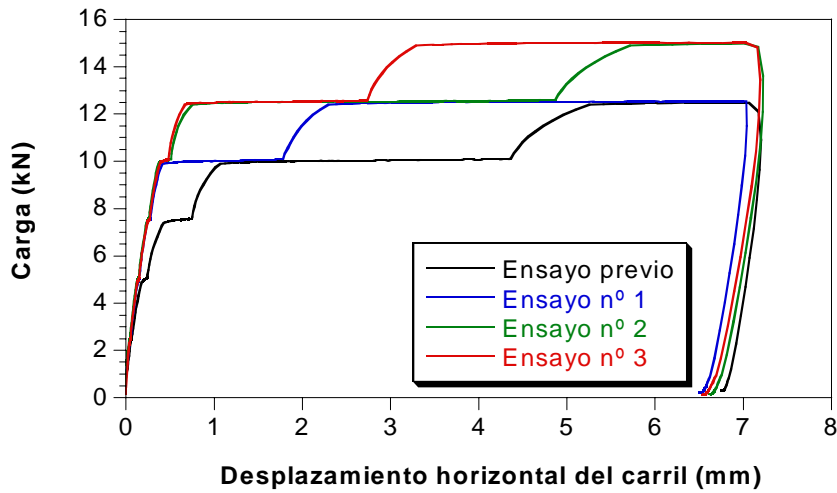


Figura I.34.- Ensayo de deslizamiento longitudinal previo al dinámico (C4)

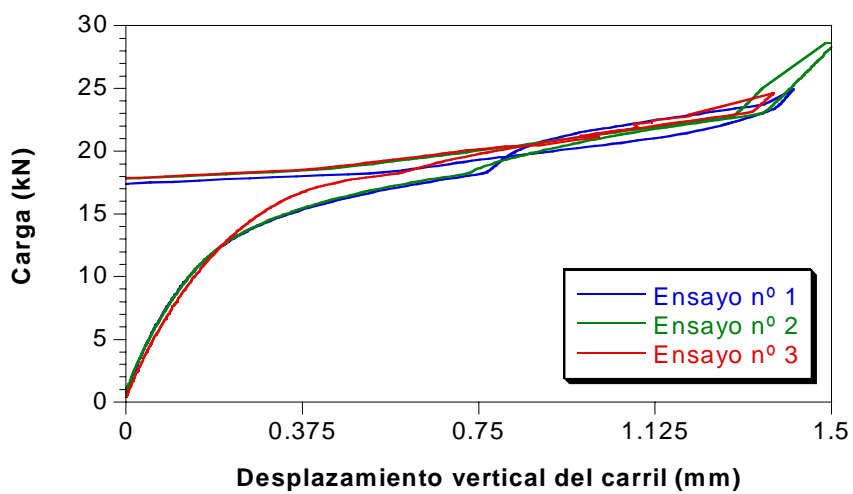


Figura I.35.- Ensayo de fuerza de apriete posterior al dinámico (C4)



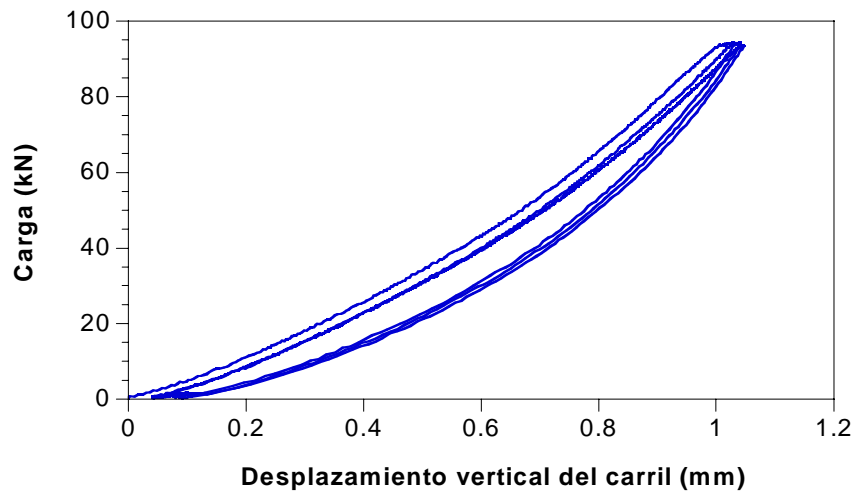


Figura I.36.- Ensayo de rigidez vertical secante  $P_0/P_0+75$  posterior al dinámico (C4)

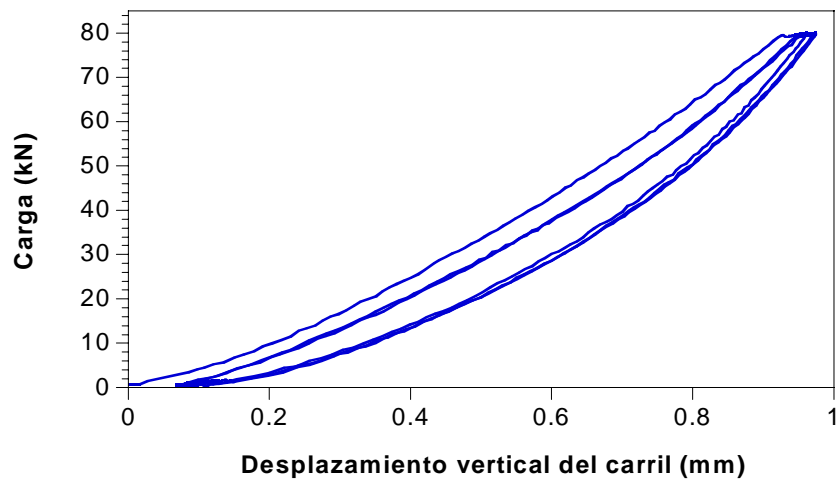


Figura I.37.- Ensayo de rigidez vertical a 80 kN posterior al dinámico (C4)

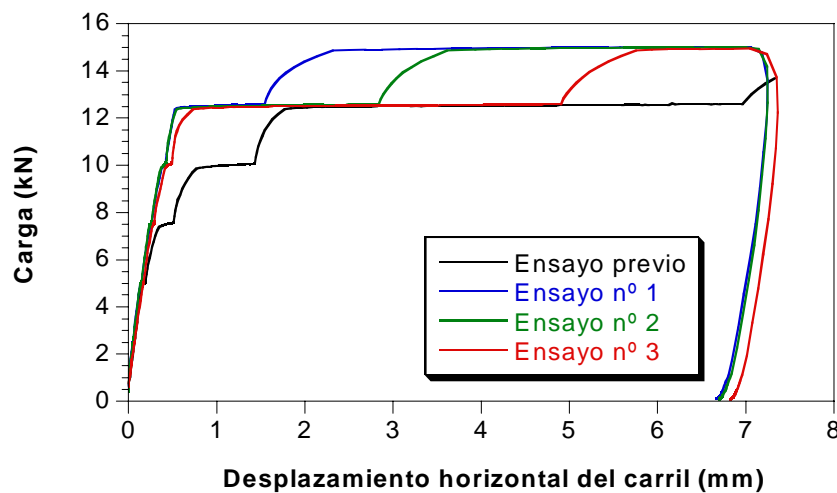


Figura I.38.- Ensayo de deslizamiento longitudinal posterior al dinámico (C4)

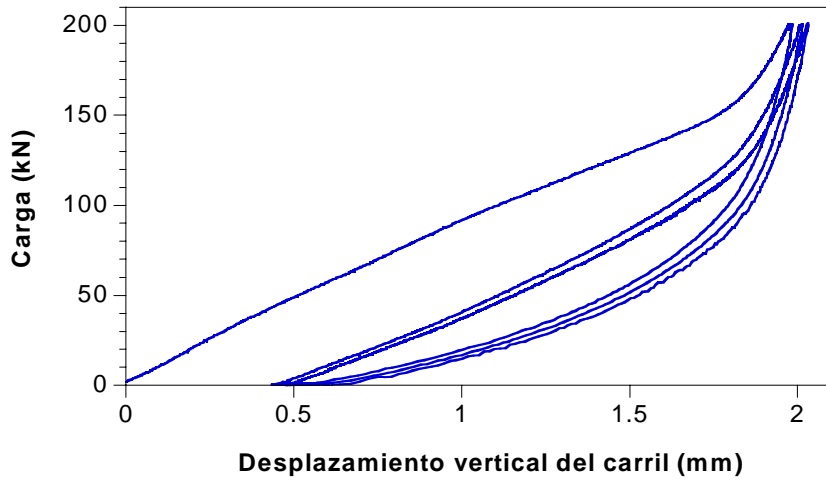


Figura I.39.- Ensayo de rigidez vertical secante 100/200 (C4)

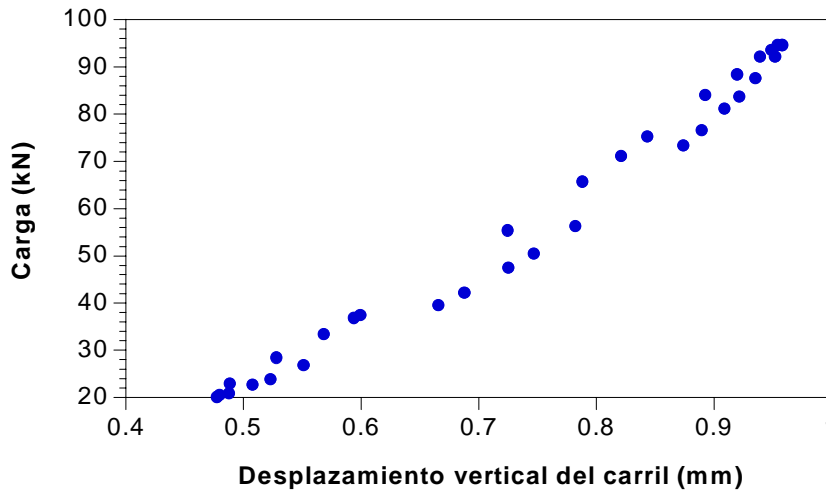


Figura I.40.- Ensayo de rigidez dinámica a baja frecuencia (C4)

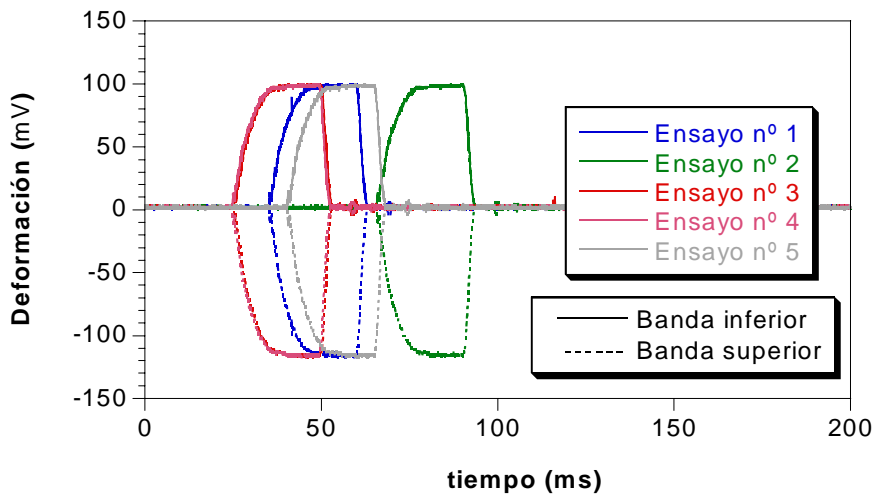


Figura I.41.- Ensayos de atenuación de impacto sobre placa de EVA (C4)

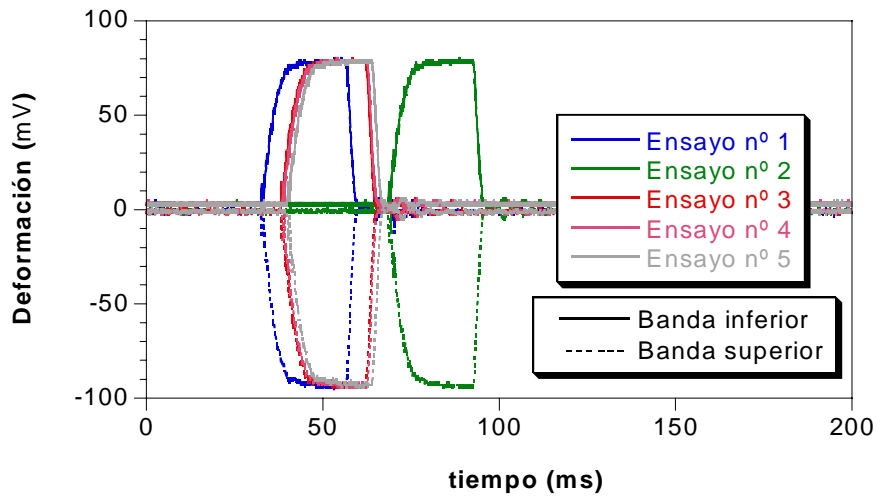


Figura I.42.- Ensayos de atenuación de impacto sobre placa de 7 mm (C4)

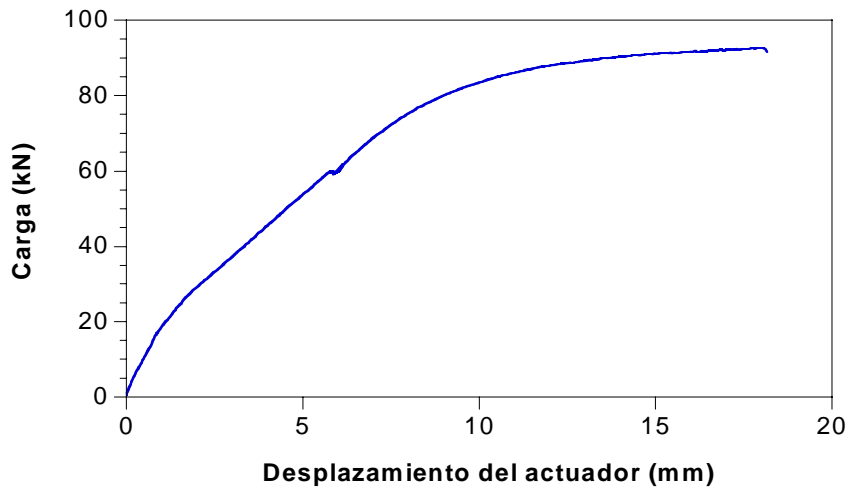


Figura I.43.- Ensayo de carga vertical (C4)

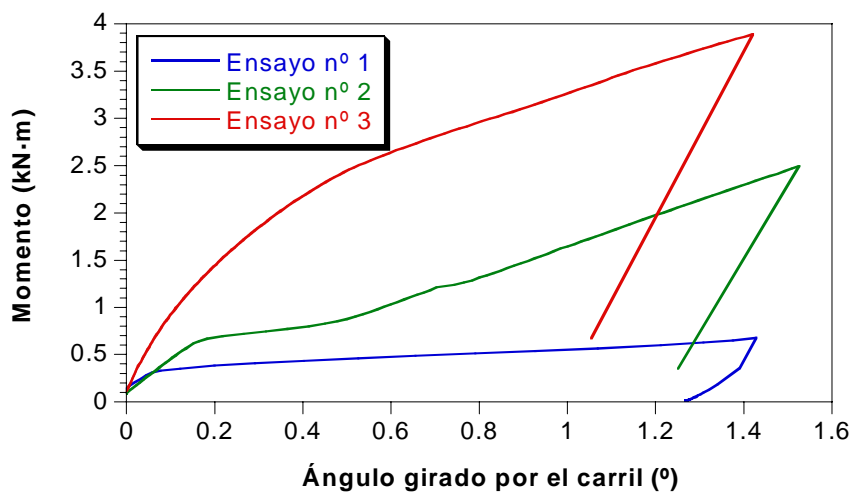


Figura I.44.- Ensayos de resistencia a la torsión (C4)

## 5. CONFIGURACIÓN 5 (C5)

Tabla I.5.- Componentes de la configuración nº 5

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

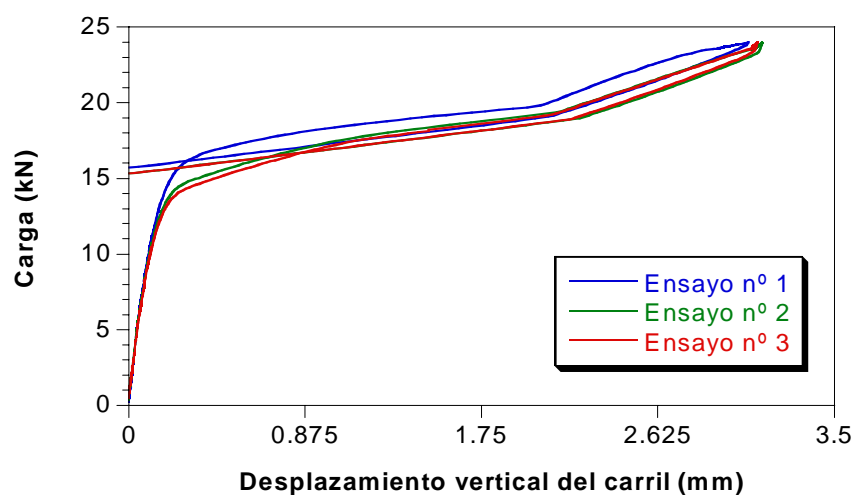


Figura I.45.- Ensayo de fuerza de apriete previo al dinámico (C5)

## 6. CONFIGURACIÓN 6 (C6)

Tabla I.6.- Componentes de la configuración nº 6

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

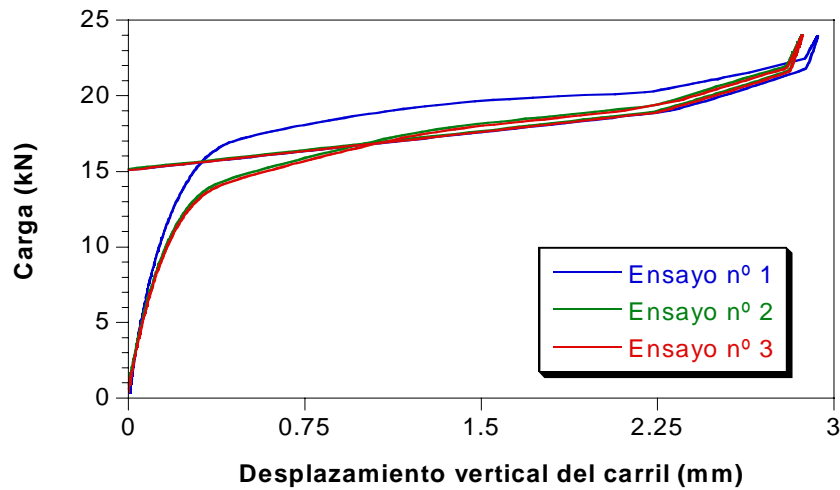


Figura I.46.- Ensayo de fuerza de apriete previo al dinámico sin arandela (C6)

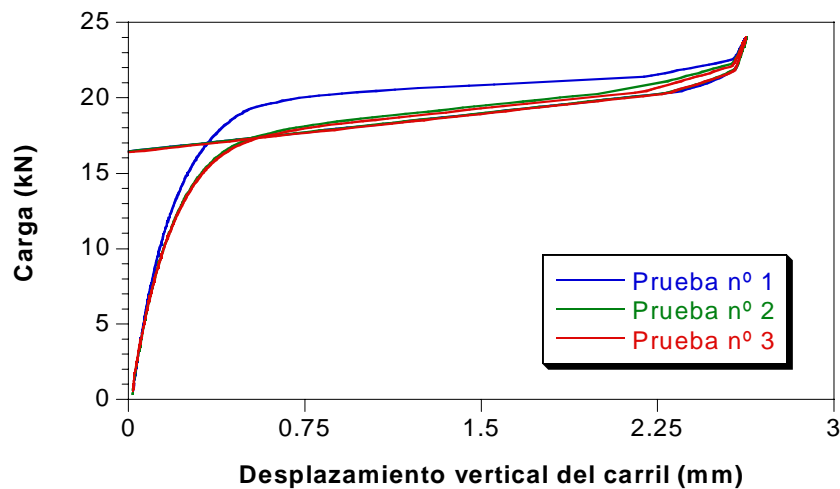


Figura I.47.- Ensayo de fuerza de apriete previo al dinámico con arandela (C6)

## 7. CONFIGURACIÓN 7 (C7)

Tabla I.7.- Componentes de la configuración nº 7

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

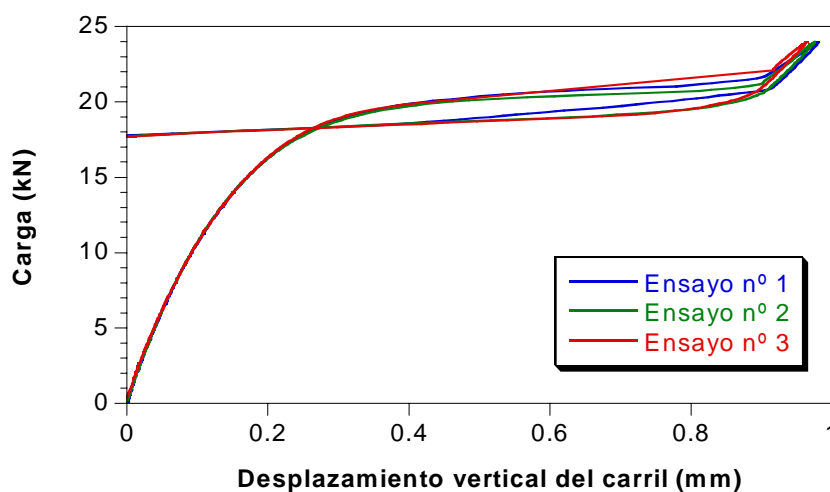


Figura I.48.- Ensayo de fuerza de apriete previo al dinámico (C7)

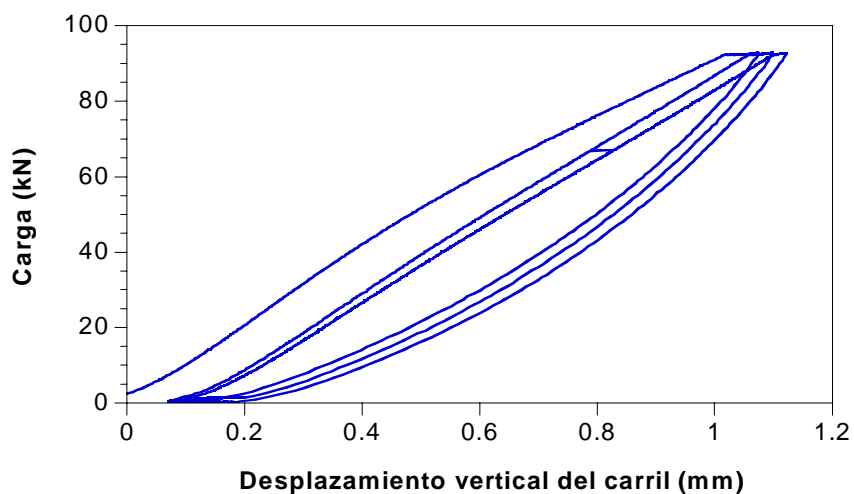


Figura I.49.- Ensayo de rigidez vertical secante  $P_0/P_0+75$  previo al dinámico (C7)

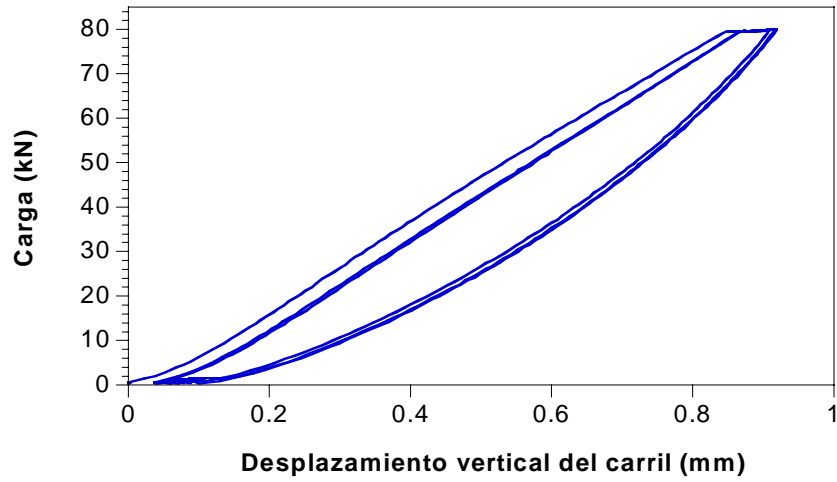


Figura I.50.- Ensayo de rigidez vertical a 80 kN previo al dinámico (C7)

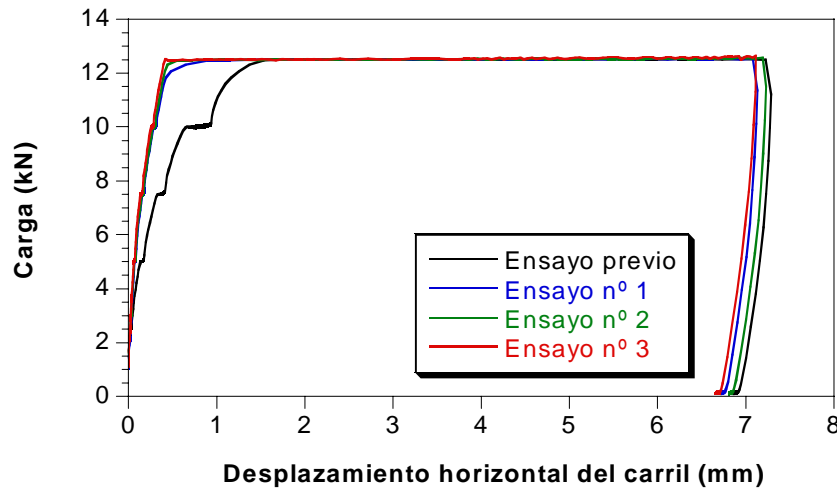


Figura I.51.- Ensayo de deslizamiento longitudinal previo al dinámico (C7)

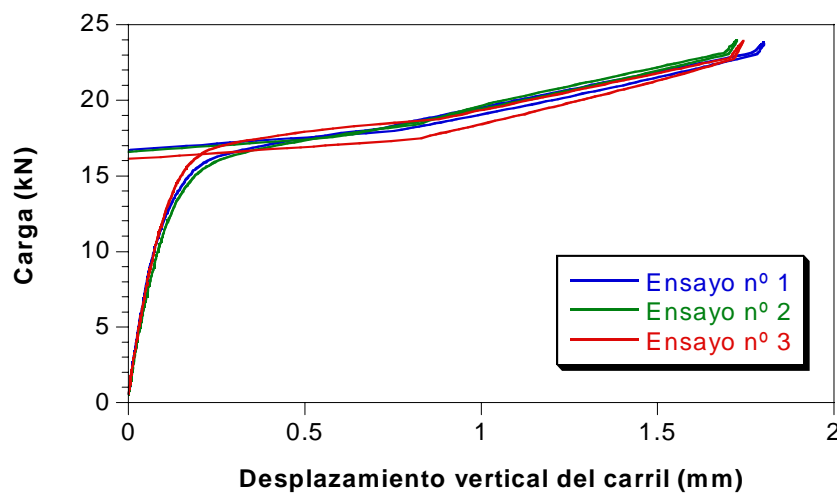


Figura I.52.- Ensayo de fuerza de apriete posterior al dinámico (C7)

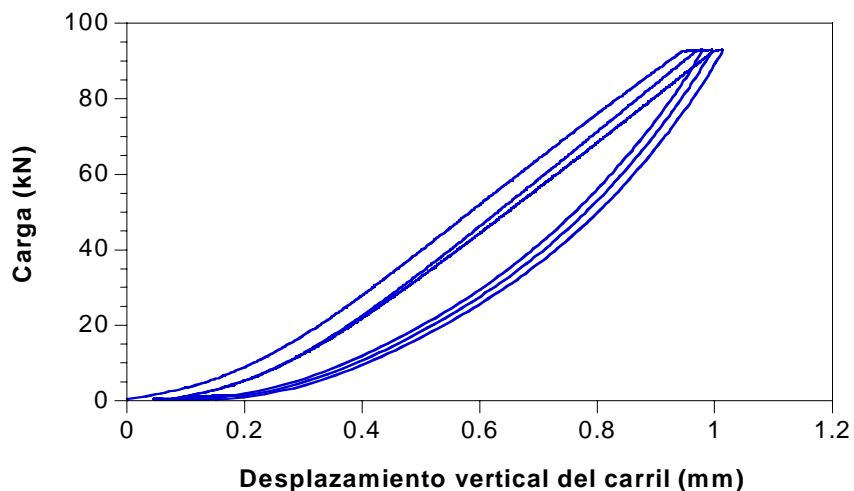


Figura I.53.- Ensayo de rigidez vertical secante  $P_0/P_0+75$  posterior al dinámico (C7)

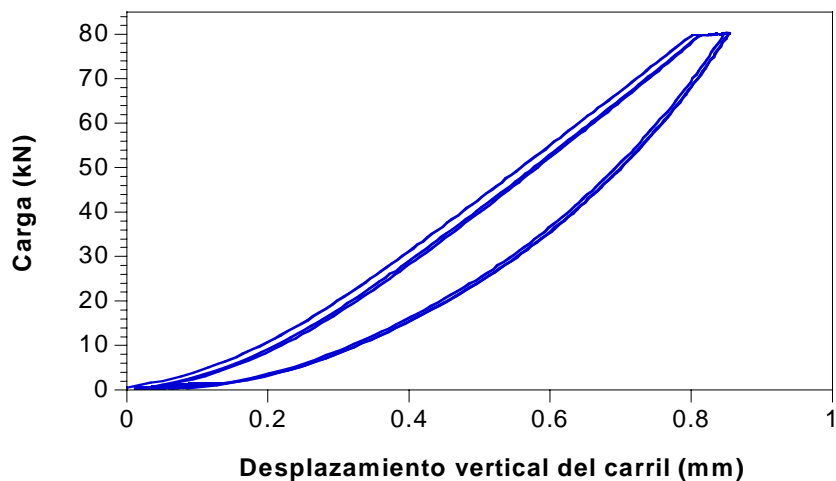


Figura I.54.- Ensayo de rigidez vertical a 80 kN posterior al dinámico (C7)

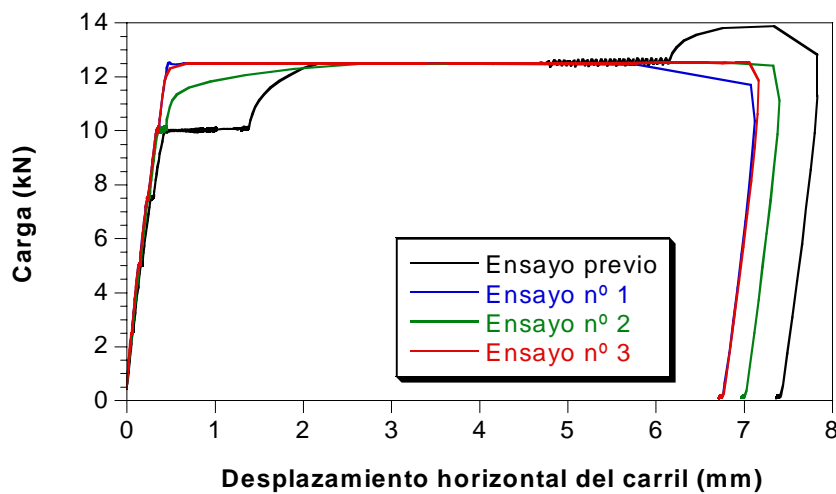


Figura I.55.- Ensayo de deslizamiento longitudinal posterior al dinámico (C7)



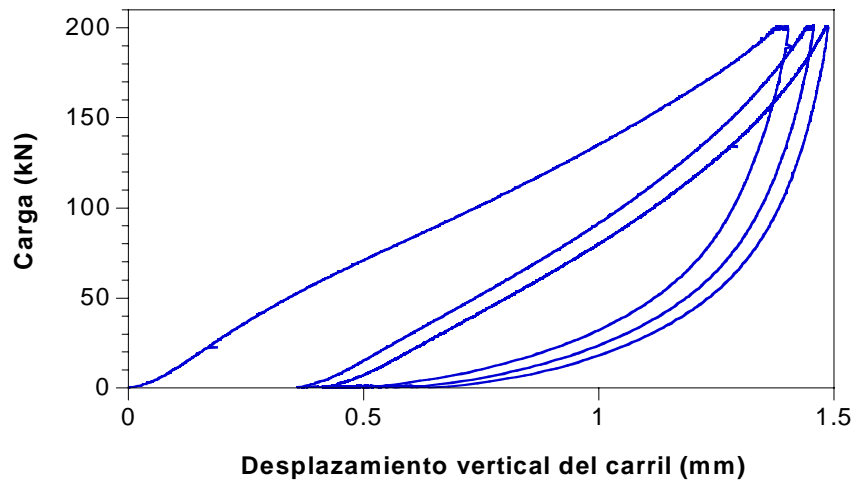


Figura I.56.- Ensayo de rigidez vertical secante 100/200 (C7)

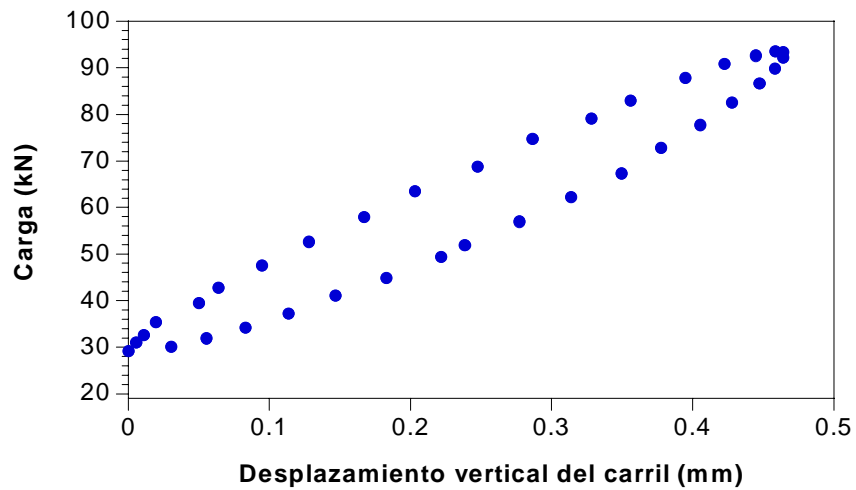


Figura I.57.- Ensayo de rigidez dinámica a baja frecuencia (C7)

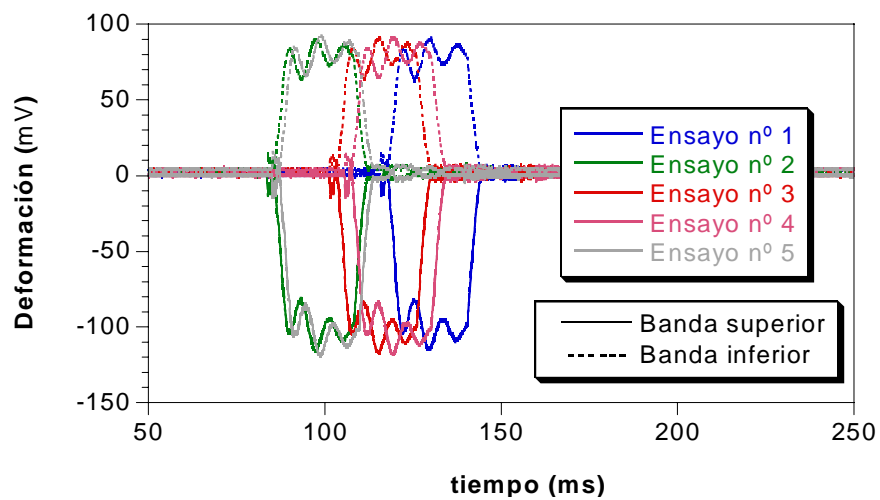


Figura I.58.- Ensayos de atenuación de impacto sobre placa de EVA (C7)

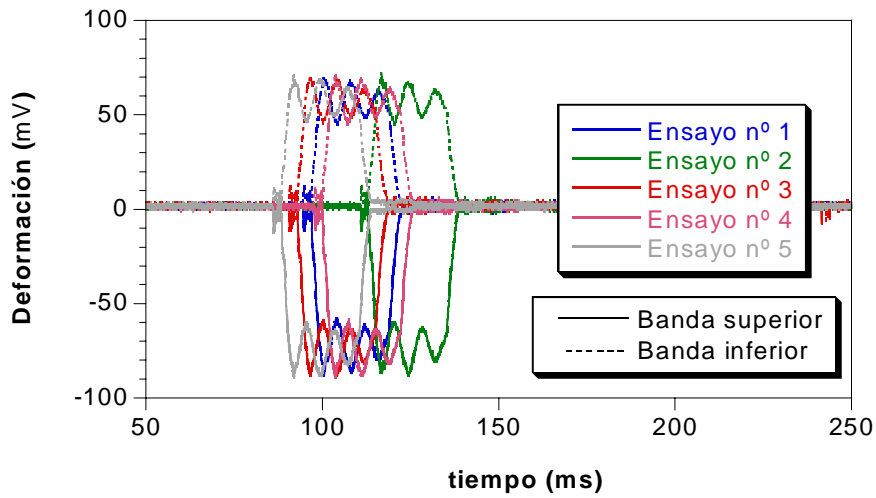


Figura I.59.- Ensayos de atenuación de impacto sobre placa de 7 mm (C7)

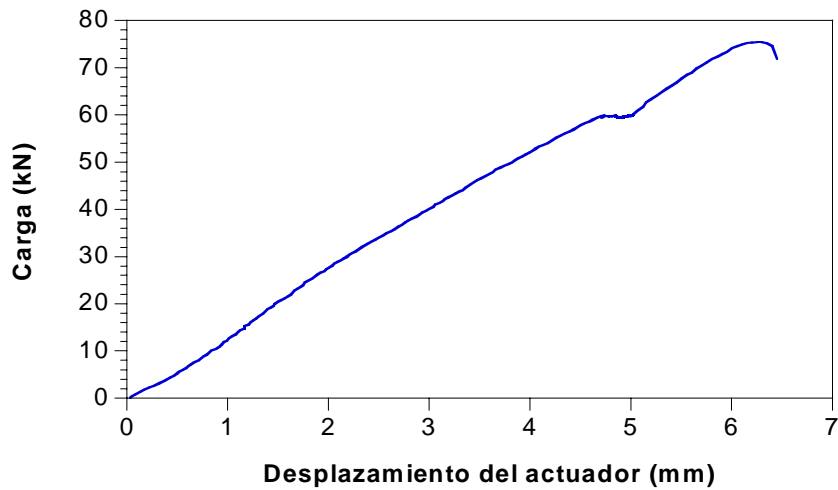


Figura I.60.- Ensayo de carga vertical (C7)

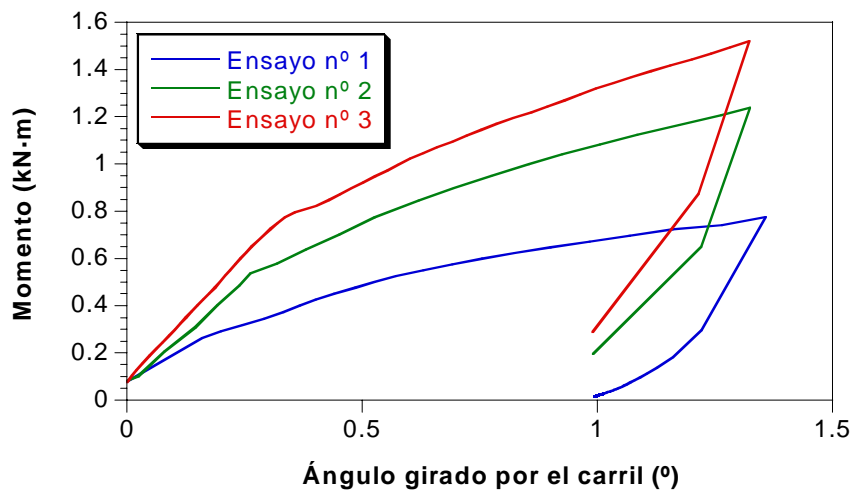


Figura I.61.- Ensayos de resistencia a la torsión (C7)

## 8. CONFIGURACIÓN 8 (C8)

Tabla I.8.- Componentes de la configuración nº 8

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

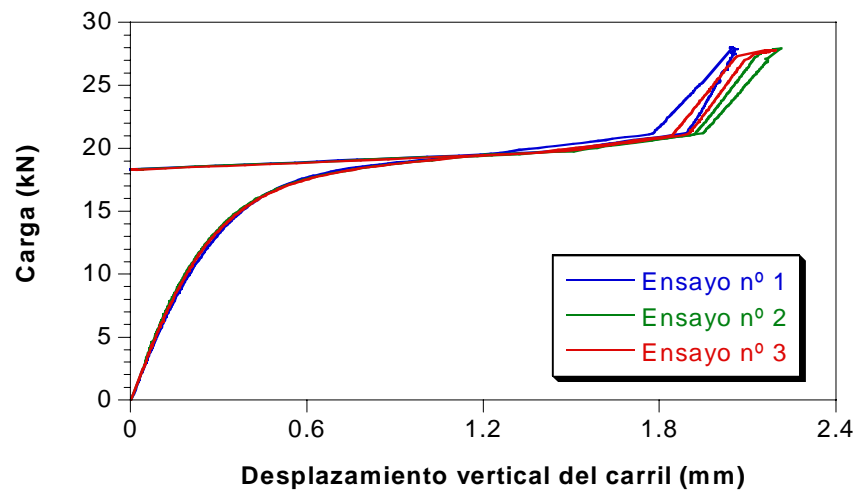


Figura I.62.- Ensayo de fuerza de apriete previo al dinámico (C8)

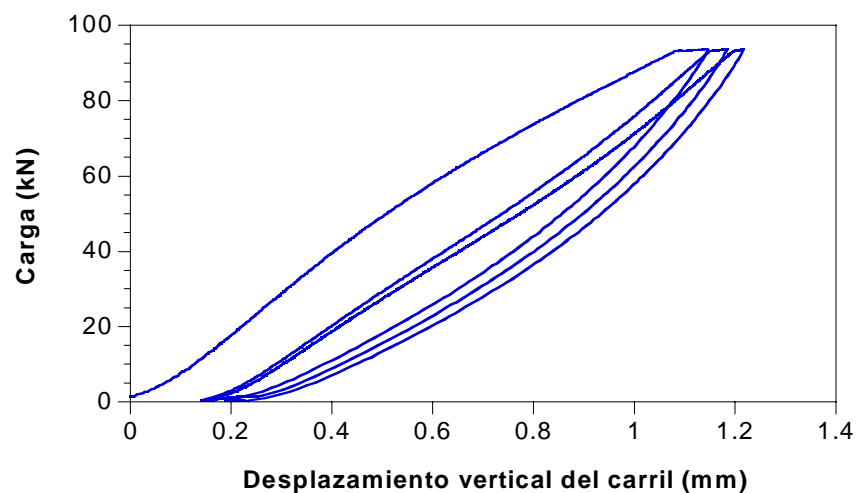


Figura I.63.- Ensayo de rigidez vertical secante  $P_0/P_0+75$  previo al dinámico (C8)

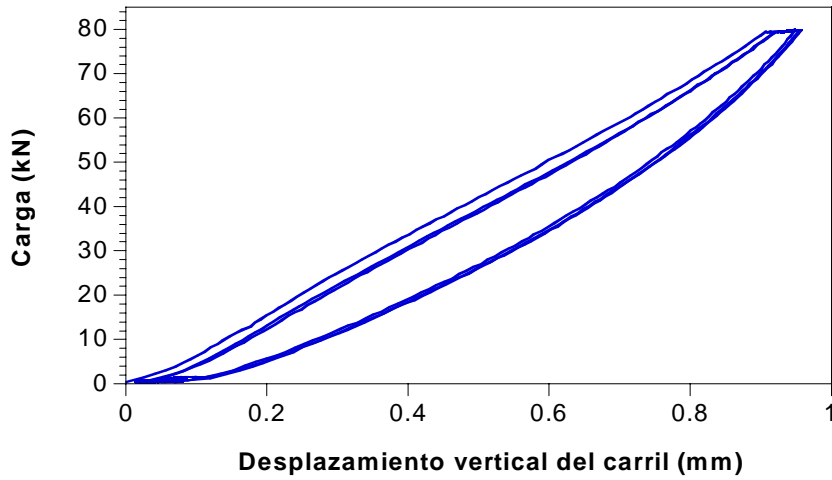


Figura I.64.- Ensayo de rigidez vertical a 80 kN previo al dinámico (C8)

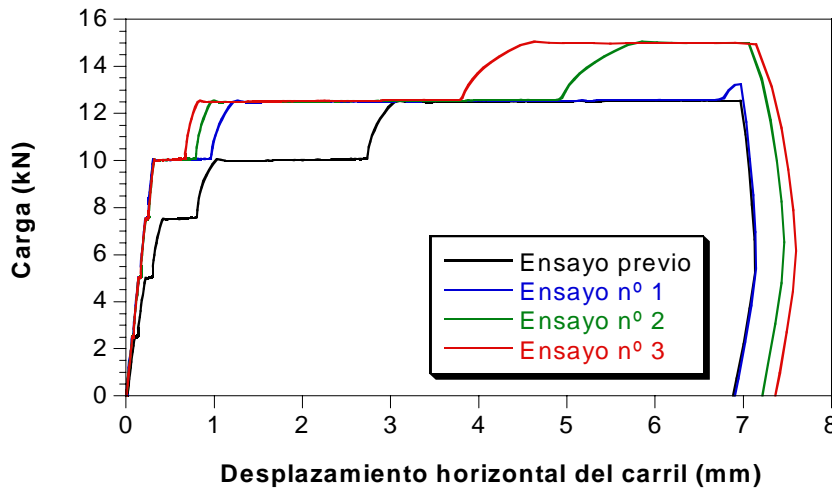


Figura I.65.- Ensayo de deslizamiento longitudinal previo al dinámico (C8)

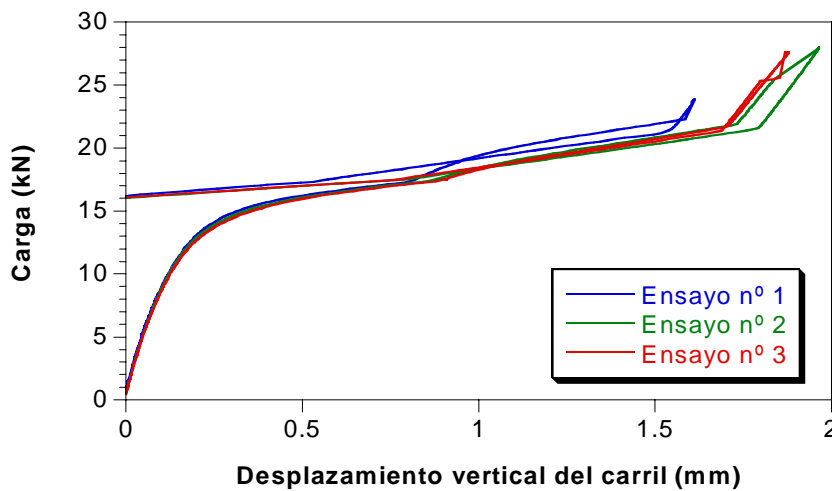


Figura I.66.- Ensayo de fuerza de apriete posterior al dinámico (C8)

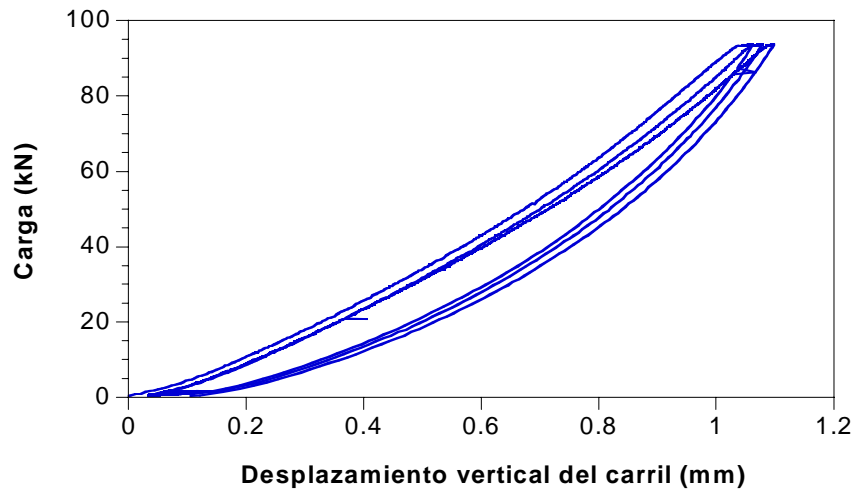


Figura I.67.- Ensayo de rigidez vertical secante  $P_0/P_0+75$  posterior al dinámico (C8)

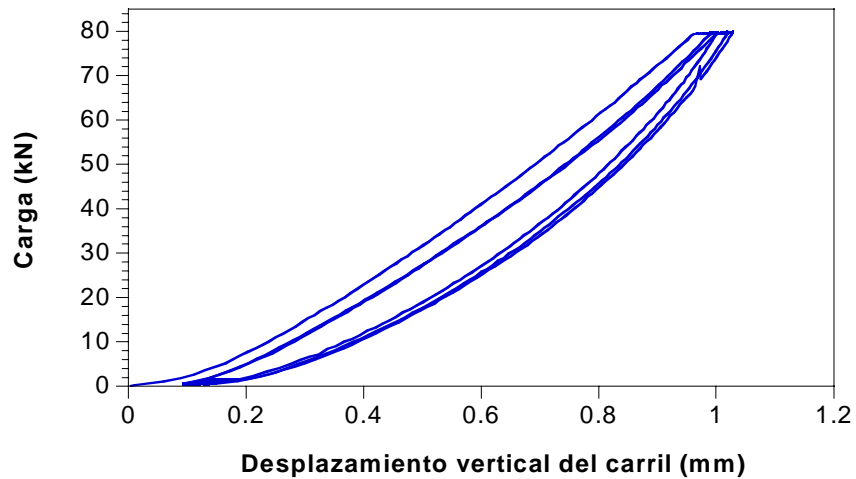


Figura I.68.- Ensayo de rigidez vertical a 80 kN posterior al dinámico (C8)

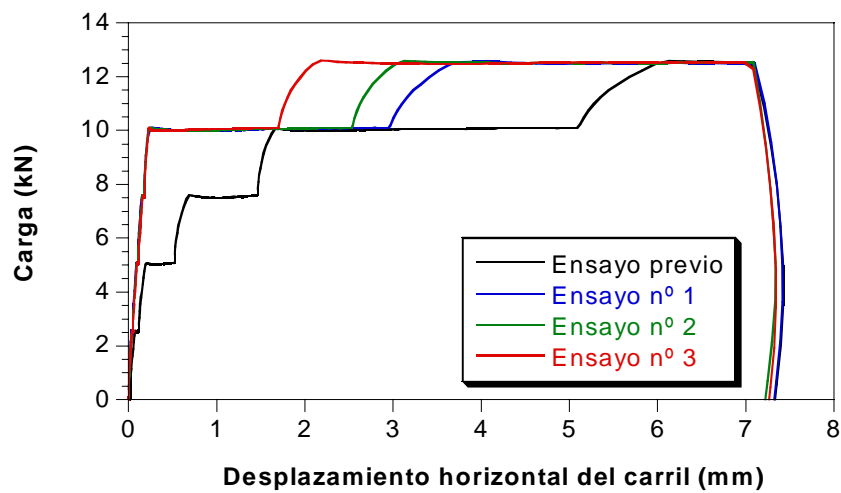


Figura I.69.- Ensayo de deslizamiento longitudinal posterior al dinámico (C8)

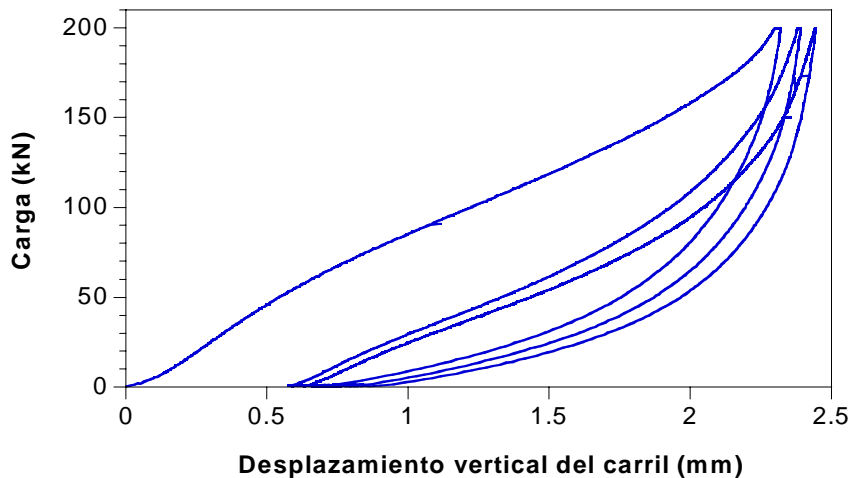


Figura I.70.- Ensayo de rigidez vertical secante 100/200 (C8)

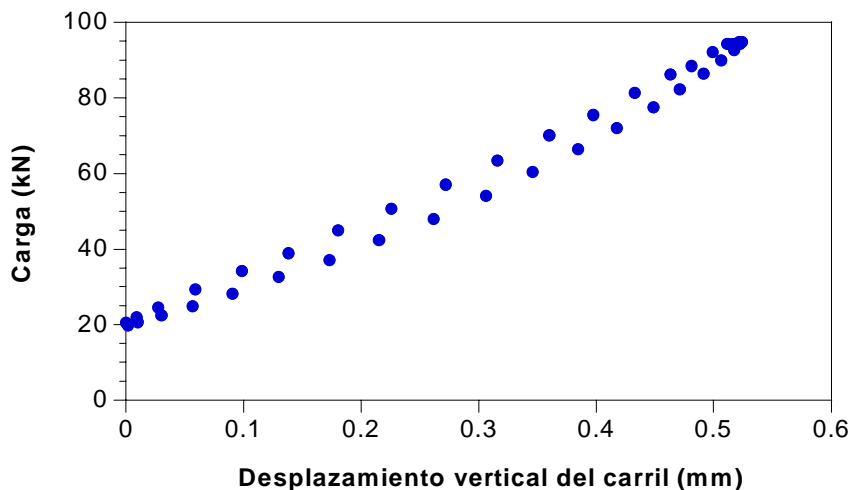


Figura I.71.- Ensayo de rigidez dinámica a baja frecuencia (C8)

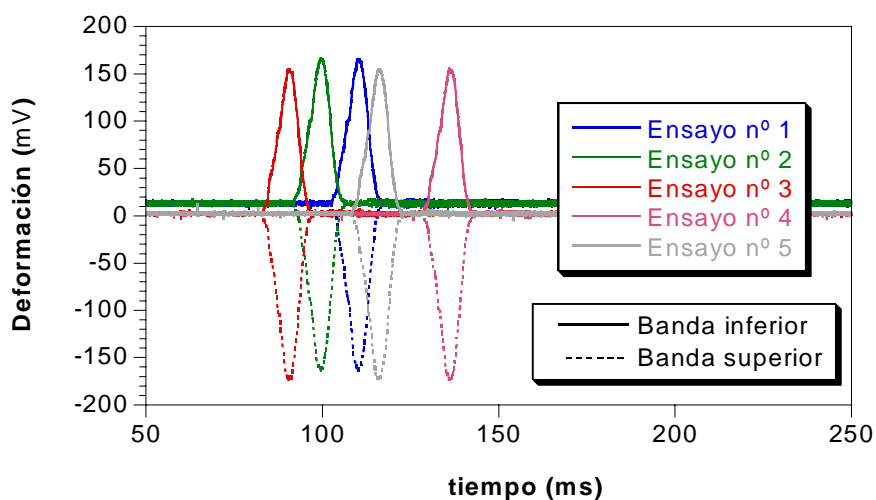


Figura I.72.- Ensayos de atenuación de impacto sobre placa de EVA (C8)

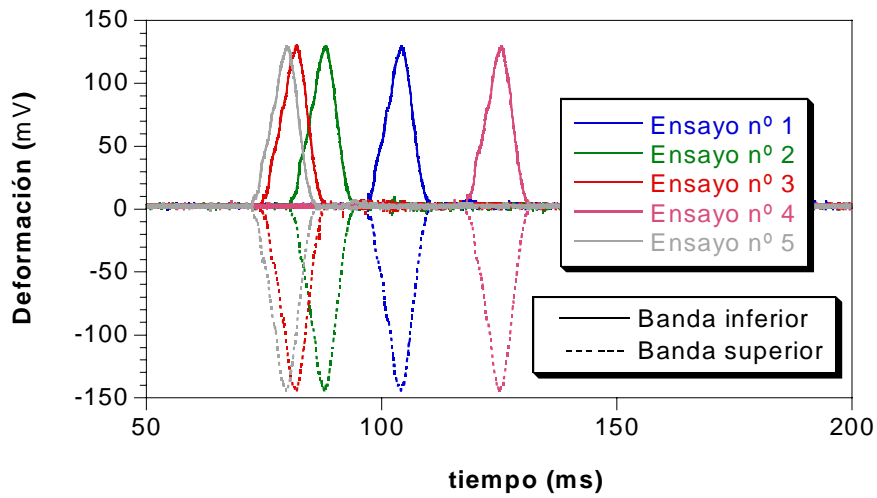


Figura I.73.- Ensayos de atenuación de impacto sobre placa de 7 mm (C8)

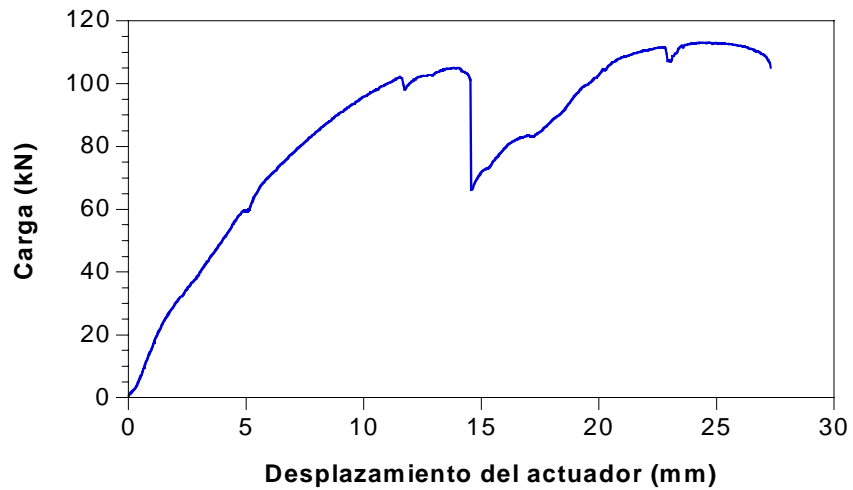


Figura I.74.- Ensayo de carga vertical (C8)

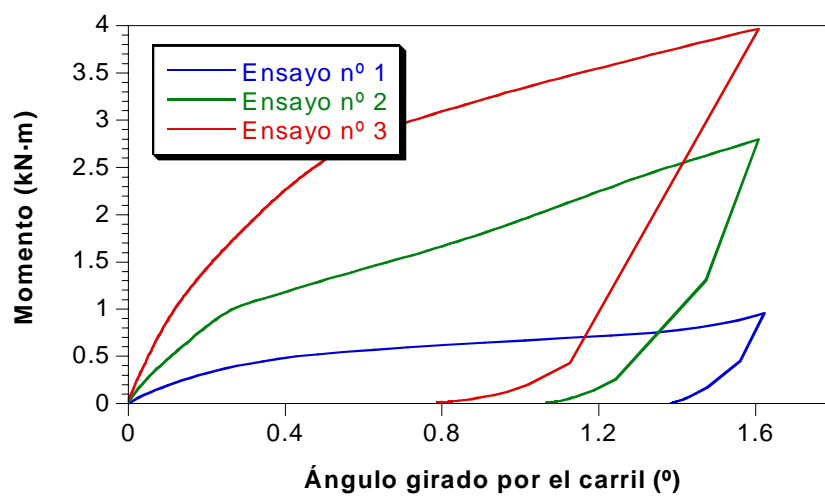


Figura I.75.- Ensayos de resistencia a la torsión (C8)

## 9. CONFIGURACIÓN 9 (C9)

Tabla I.9.- Componentes de la configuración nº 9

Componente	Descripción
Placa asiento	Modelo B, 7 mm, resaltes ovalados, HYTREL
Placa acodada	Wfp 14 K (maciza), PA 6.6 + 35% FV
Espiga	Sdü 21, Polietileno
Tirafondo/Tornillo	Tirafondo nº 9, pavonado
Clip	SKL-14
Traviesa	Al-99, fabricante L
Carril	UIC-60

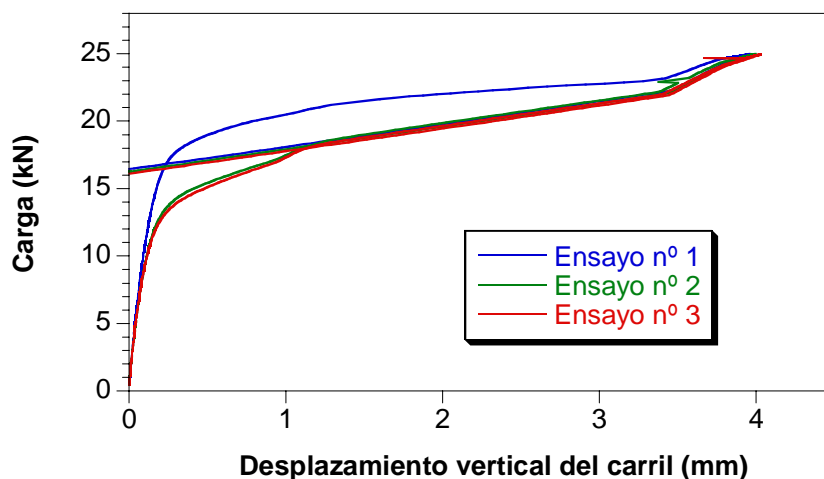


Figura I.76.- Ensayo de fuerza de apriete previo al dinámico (C9)

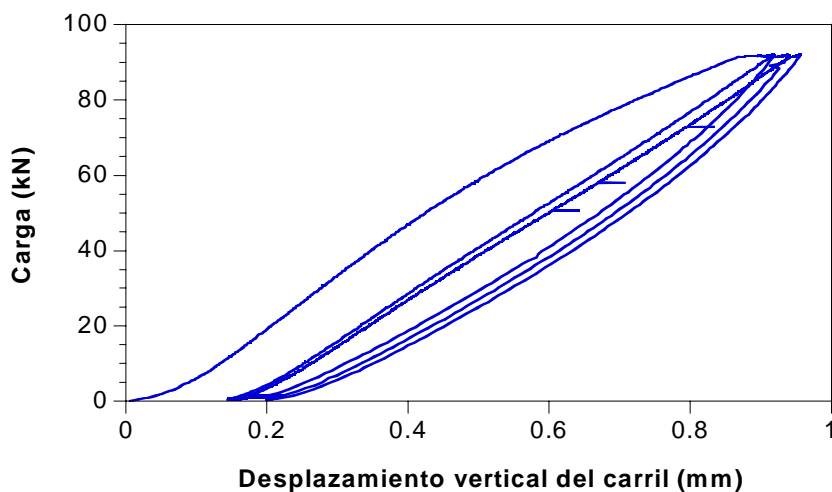


Figura I.77.- Ensayo de rigidez vertical secante  $P_0/P_0+75$  previo al dinámico (C9)



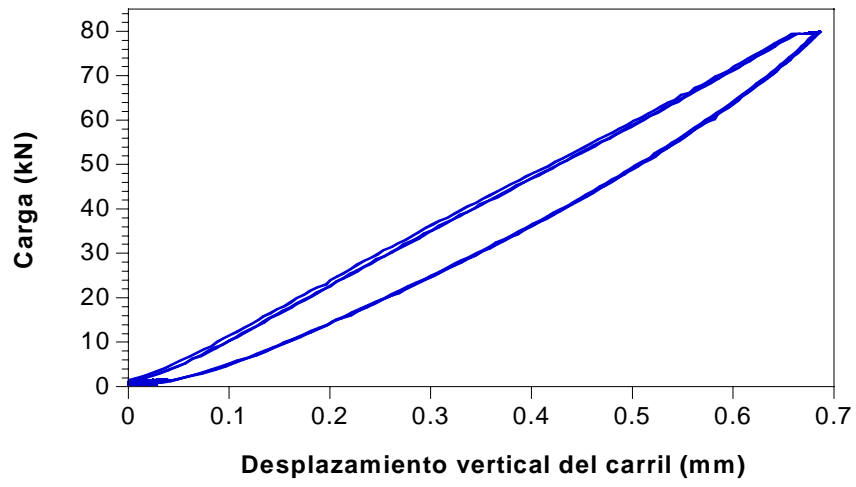


Figura I.78.- Ensayo de rigidez vertical a 80 kN previo al dinámico (C9)

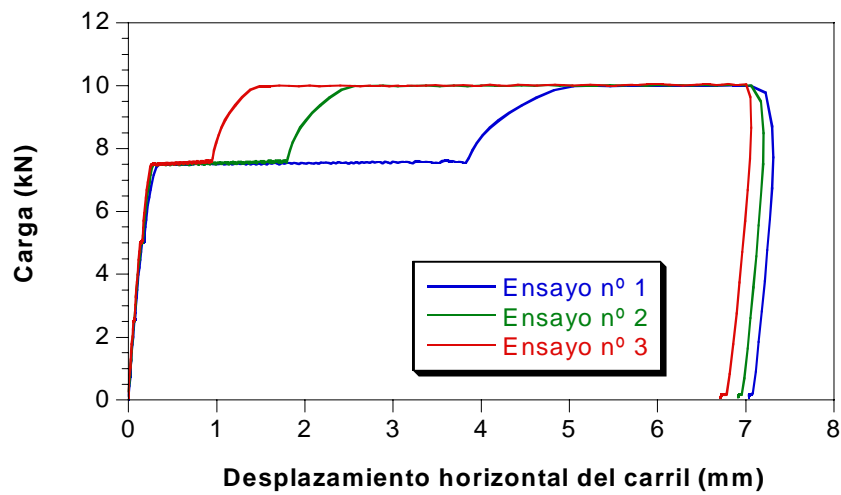


Figura I.79.- Ensayo de deslizamiento longitudinal previo al dinámico (C9)

## ANEXO II

### **INFLUENCIA DE LA HUMEDAD EN LA POLIAMIDA REFORZADA CON FIBRA DE VIDRIO**

#### **1. INTRODUCCIÓN**

El estudio de la influencia de la humedad en la poliamida (PA) comenzó antes de haber optimizado el sistema de la sujeción, y sin saber, por tanto, el tipo de poliamida que se inyectaría en los componentes de la sujeción. Se comenzó el análisis empleando Poliamida 6, pero después de comenzar el estudio la materia prima seleccionada para los componentes de la sujeción optimizada, la vaina y la placa A2, ha sido la Poliamida 6.6. Este aspecto hizo replantearse la posibilidad de repetir la investigación desarrollada hasta ese momento cambiando la Poliamida 6 por la Poliamida 6.6 pero el hecho de que los resultados obtenidos serán comparables al tratarse de dos poliamidas de la misma familia (Figura II.1), así como, de los largos espacios de tiempo empleados en los acondicionamientos de las probetas y que en esos momentos no se disponía de probetas normalizadas de

Poliamida 6.6, lo cual se traduciría en un nuevo retraso, inclinaron la decisión por continuar la investigación empleando Poliamida 6.

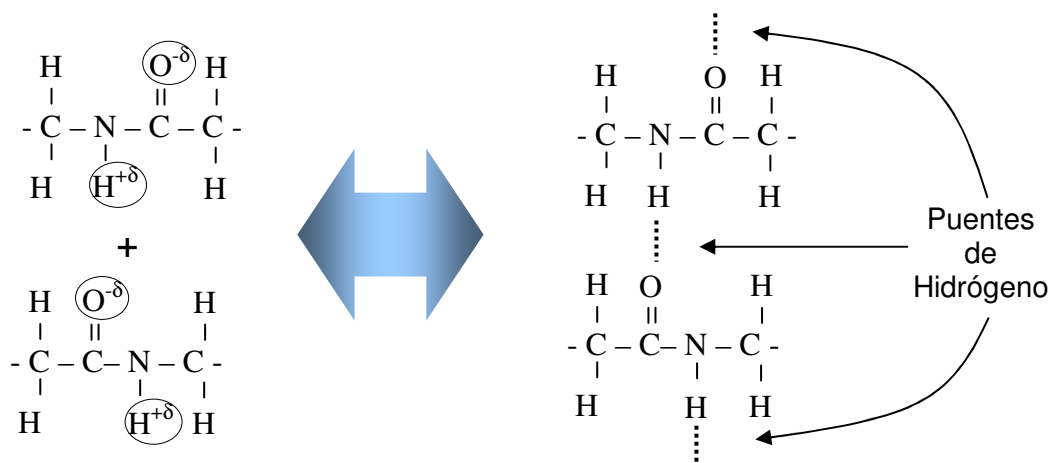
Mero de la PA 6: <b>-[N-H]-[H-C-H]<sub>5</sub>-[C=O]-</b>	Mero de la PA 6.6: <b>-[N-H]-[H-C-H]<sub>6</sub>-[N-H]-[C=O]-[H-C-H]<sub>4</sub>-[C=O]-</b>
--	--

**Figura II.1.** Estructura de la PA 6 y la PA 6.6

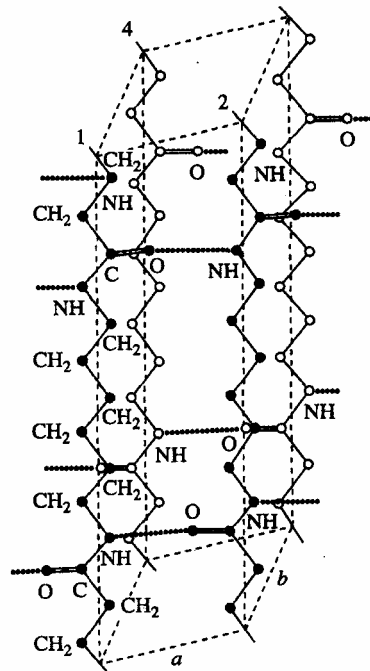
En las moléculas de PA el carácter fuertemente polar de los grupos amida origina potentes atracciones entre grupos análogos consecutivos, estableciéndose puentes de hidrógeno entre moléculas contiguas alineadas, como se muestra en la Figura II.2.

En la Figura II.3 se representa la celda unidad triclinica de la PA 6.6 en la que se pueden observar los puentes de hidrógeno entre moléculas vecinas [127].

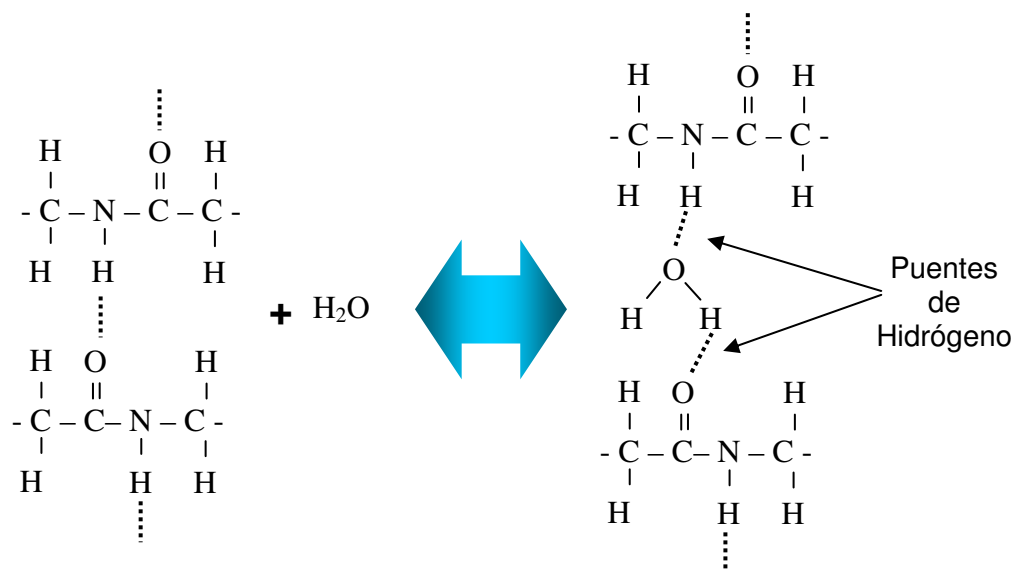
La existencia de estos puentes origina la absorción de agua exclusivamente en grupos que quedan en zonas amorfas, sustituyendo el puente amida-amida por el de amida-agua, como se muestra en la Figura II.4 [128 y 129].



**Figura II.2.** Creación de puentes de hidrógeno entre grupos amida en la PA



**Figura II.3.** Celda unidad de la PA 6.6 [127]

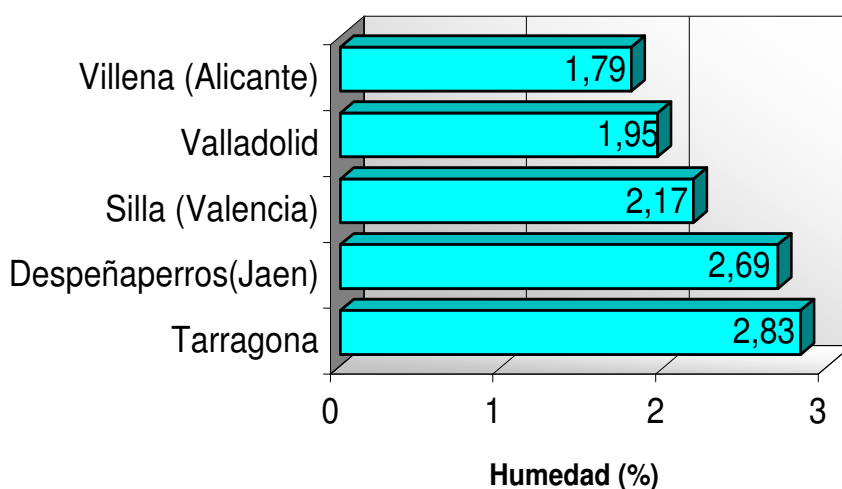


**Figura II.4.** Absorción de agua por la PA

La absorción de agua en la PA 6 varía según el estado de las condiciones ambientales, incrementándose con el aumento de la temperatura y de la humedad relativa. En condiciones de equilibrio a 20°C en atmósfera controlada del 35% de

humedad relativa, se consigue un contenido de humedad próximo al 2%, pudiendo modificarse hasta el 10.2% después de una inmersión en agua a 23°C durante 160 días. La cantidad de humedad absorbida disminuirá con el aumento de contenido en fibra de vidrio del material compuesto. Si la PA 6 se refuerza con un 40% de fibra de vidrio, en las mismas condiciones anteriores, sólo se conseguirá una absorción de humedad del 4.6% [130].

La posibilidad de que un elemento estructural inyectado con PA 6 reforzada con fibra de vidrio absorba agua bajo condiciones ambientales de trabajo, impulsó la realización de un estudio estadístico sobre piezas aislantes de sujeción de vía de ferrocarril procedentes de diferentes puntos geográficos del territorio español [131]. Los resultados del citado estudio, se presentan en la Figura II.5, hallándose valores del contenido de humedad, H (%), comprendidos entre el 1.79 y el 2.83%.



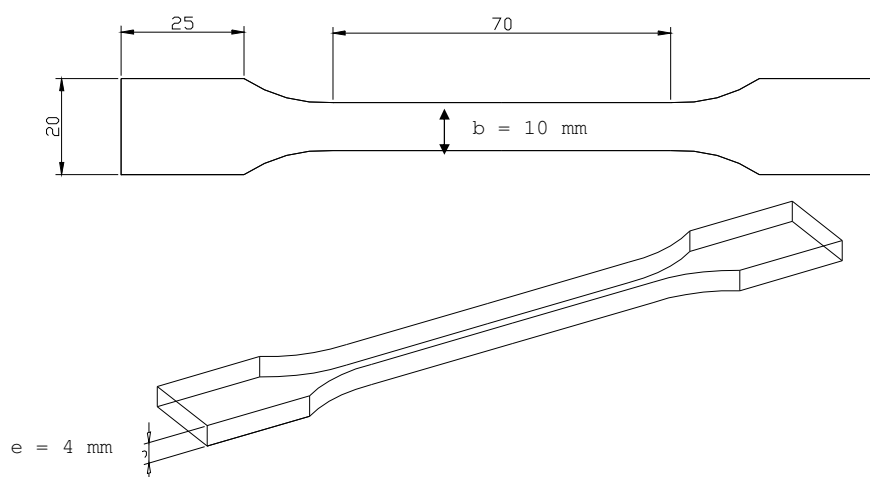
**Figura II.5.** Variación del contenido de humedad en función del punto geográfico

Esta capacidad del material de absorber agua en condiciones normales de trabajo repercute en el comportamiento mecánico del mismo [131-135]. Por tanto, es importante, para realizar un estudio de la influencia de la humedad en las propiedades de este material, acondicionar probetas con diferentes contenidos de humedad. Este acondicionamiento se consigue permitiendo que las probetas alcancen el equilibrio en una atmósfera controlada con una temperatura y humedad relativa especificada.

Esta tarea puede extenderse mucho en el tiempo si se realiza a temperatura ambiente ya que la velocidad de absorción de agua es fuertemente dependiente de la temperatura. Por ejemplo, una probeta de Poliamida 6.6 de 4 mm de espesor tardaría más de un año para alcanzar su equilibrio de contenido de humedad en la atmósfera normalizada de 23 °C y 80 % de humedad relativa. [136]. Para evitar esos tiempos de espera, se ha desarrollado un método de acondicionamiento acelerado [137] que reduce notablemente estos tiempos. El procedimiento consiste en introducir las probetas en atmósfera de 70 °C y 62 % de humedad relativa hasta que la absorción de humedad por la probeta haya alcanzado, como mínimo, el 95 % de su nivel de equilibrio.

Para el desarrollo del presente estudio se ha empleado una poliamida 6 (PA6) sin refuerzo y otras reforzadas con diferentes grados de fibra corta de vidrio. El código empleado para la identificación de cada material ha sido "PA6(X)", donde X indica el contenido del refuerzo de fibra corta de vidrio en porcentaje respecto al peso total del material.

El material, fabricado por DSM, estaba inyectado en probetas normalizadas de tracción [138] con un fuste de sección 4x10 mm, como puede observarse en la Figura II.6.



**Figura II.6.** Probeta de PA 6 empleada en el estudio

## **2. Absorción y difusión de agua en la poliamida reforzada con fibra de vidrio**

La determinación del contenido de agua en una PA hasta valores del 0.01%, se realiza siguiendo las especificaciones indicadas en la Norma UNE-EN-ISO 960 [139]. Existen cuatro métodos diferentes, uno manométrico y los tres restantes de extracción (por disolución, por fusión en vacío y con metanol anhidro) con valoración posterior. El contenido de agua a estos niveles de humedad tiene importancia en la transformación de la PA, puesto que se ha de mantener bajo, para prevenir la degradación de la pieza fabricada. Para humedades superiores, la determinación del contenido de humedad en una probeta y su evolución a lo largo del tiempo se realizó empleando técnicas gravimétricas, según las indicaciones de la Norma UNE-EN ISO 62 [140].

Para establecer el modelo de la absorción y difusión del agua dentro de la poliamida, inicialmente, se emplearon las probetas normalizadas completas de 4 mm espesor, cuya geometría se refleja en la Figura II.6.

Para validar el modelo, de los extremos de las probetas de tracción seleccionadas, se extrajeron muestras prismáticas de 20x20x4 mm, a las que, posteriormente, se dotó de distintos espesores, pero con el mismo acabado superficial, por medio de un pulido con lijas de diferentes tamaños de grano, partiendo de una lija de nº 100 y terminando en el 1200, pasando sucesivamente por las lijas de 200, 400 y 800. Se obtuvieron así muestras de espesores aproximados de 1 mm (probeta tipo A), 1.8 mm (probeta tipo B), 2.5 mm (probeta tipo C) y 3.4 mm (probeta tipo D).

En todos los casos, la primera operación acometida fue secar las probetas en una estufa a 80 °C durante el tiempo necesario hasta conseguir una masa constante, para así conocer su peso seco ( $m_d$ ). A este valor se referirán el resto de los valores de masa para obtener el contenido de humedad (H). Una vez secas, las probetas se introdujeron en un baño de agua con temperatura controlada. Las probetas se sacaban del baño cada cierto tiempo para realizar mediciones de la masa. Esta medición venía precedida de un secado superficial de las probetas empleando papel secante, para evitar que el agua adherida al exterior de la probeta introdujese

errores en la medida. La pesada se realizó por medio de una balanza de 0.001 g de división de escala.

Para obtener la humedad,  $H(t)$ , o contenido medio de humedad de la probeta en el instante  $t$ , se empleó la expresión (AII.1) siendo  $m(t)$  la masa de la probeta para el instante  $t$ .

$$H(t) = \frac{m(t) - m_d}{m_d} \cdot 100 \quad (\text{AII.1})$$

El valor final de humedad a cada instante se obtuvo como el promedio de la humedad medida sobre cuatro probetas diferentes.

Una de las variables fundamentales en el proceso de difusión es la temperatura, por lo que se realizaron medidas de absorción para diferentes temperaturas del baño: 40, 50, 60, 80 y 100 °C. La primera de las inmersiones de las probetas se realizó en agua a 40 °C durante más de dos meses para asegurar el valor de masa constante máxima y calcular, a partir de ella, la humedad de saturación,  $H_s$ . Este valor se empleó como referencia para el resto de temperaturas. En el gráfico de la Figura II.7, se puede observar la evolución de la humedad para las diferentes probetas con distintos refuerzos sumergidas en agua a 40 °C y los valores de la humedad de saturación,  $H_s$ , para los tres materiales ensayados.

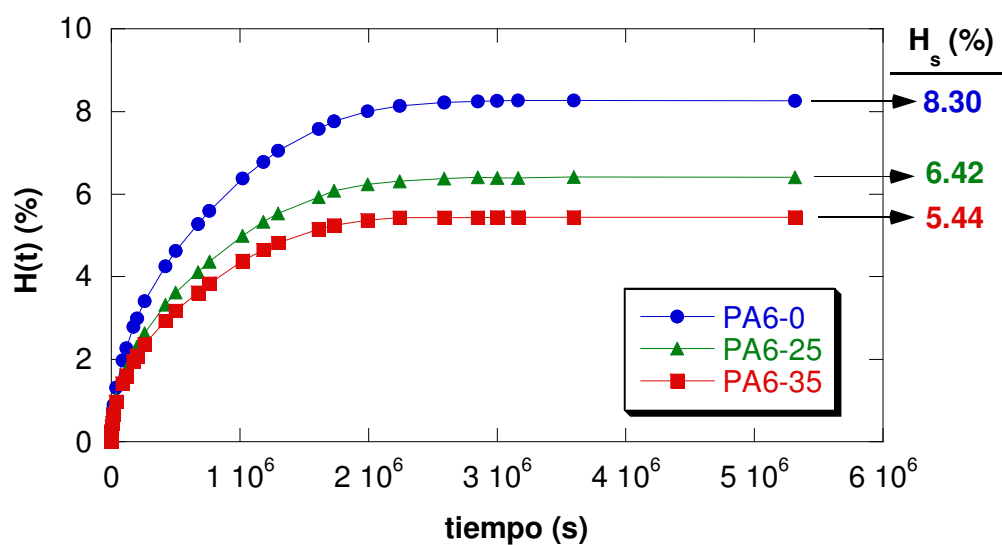


Figura II.7. Evolución de  $H(t)$  para los diferentes porcentajes de refuerzo sumergidos en agua a 40 °C



Los valores de  $H_s$  disminuyen con el incremento de refuerzo. Ello se debe a que la cantidad de fase higroscópica neta, constituida por la PA, decrece conforme aumenta la cantidad de refuerzo, si bien se genera una interfase fibra-matriz de carácter eminentemente higroscópico, que también participa en los valores finales detectados.

Una vez obtenidos experimentalmente los valores de  $H_s$  a 40 °C se realizaron inmersiones en baños a las restantes temperaturas: 60, 80 y 100 °C, obteniéndose resultados similares a los reflejados en el gráfico de la Figura II.7, salvo que la  $H_s$  se obtuvo antes a medida que se incrementaba la temperatura del baño.

Para diferenciar la cantidad de agua absorbida por la matriz de PA, de la recluida en la interfase se define una nueva variable,  $H_m$ , que establece la cantidad de agua que absorbe el material referenciada exclusivamente al peso seco de la matriz, descontando el peso de la fibra:

$$H_m = \frac{( ) - d}{m_{PA_d}} \cdot 100 \quad (\text{AII.2})$$

donde  $m_{PA_d}$  es la masa de la PA6 seca sin refuerzo. Sabiendo que la masa seca de la probeta es igual a la masa seca de la matriz más la masa de la fibra de vidrio [ $m_d = m_{PA_d} + m_{FG}$ ], y que el porcentaje de fibra de vidrio (FG) se expresa como una relación entre las masas de fibra de vidrio y la masa seca de la probeta [ $FG = m_{FG}/m_d$ ] se podrá expresar el parámetro  $H_m$  de la siguiente manera:

$$H_m = H(t) \frac{( )}{-3} \quad (\text{AII.3})$$

En la gráfica de la Figura II.8 se representa la evolución tanto de  $H(t)$  como de  $H_m$  frente al tiempo para una temperatura del agua de 80 °C

Puede observarse que los valores de  $H_m$ , tanto para el 25 como para el 35 % de refuerzo son muy parecidas a los de  $H(t)$  de PA6(0), aunque ligeramente superiores y crecientes con la cantidad de refuerzo. Esta diferencia correspondería a la humedad absorbida por la interfase matriz-fibra, ya que el vidrio de la fibra sería impermeable al agua y no absorbería cantidad alguna de la misma [141]. Se repitió la operación con el resto de temperaturas y no se aprecia la diferencia entre las

curvas de  $H_m$  para los diferentes refuerzos, apareciendo indistintamente una por encima de la otra. Este hecho, da idea de que el método empleado para la medición del contenido de humedad no tenga la suficiente precisión como para discernir estas mínimas variaciones. De todas formas, en los cuatro casos estudiados la curva de  $H(t)$  de la PA sin refuerzo se mantiene por debajo de la curva  $H_m$  de las probetas reforzadas (Figura II.9), lo que confirma, de alguna forma, que el espacio ocupado por la interfase tenga capacidad de almacenar agua.

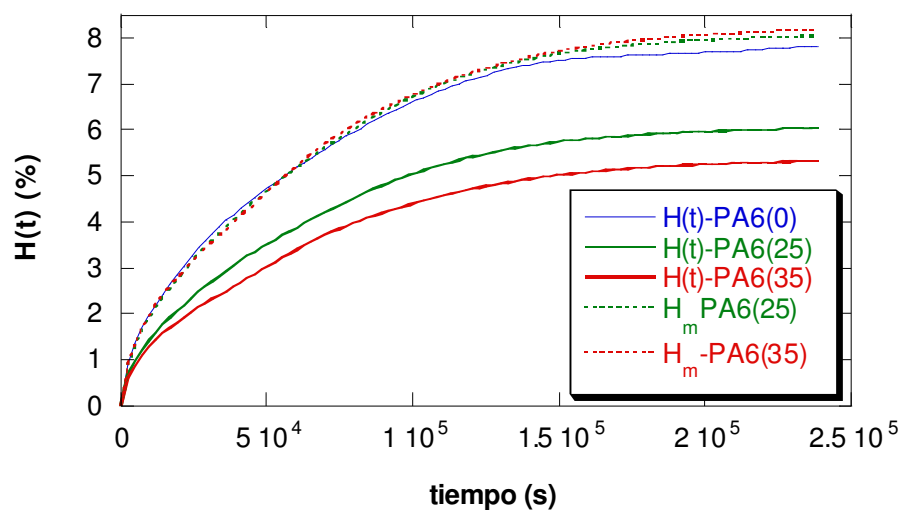


Figura II.8. Evolución de  $H$  y  $H_m$  para una  $T^a$  de  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$

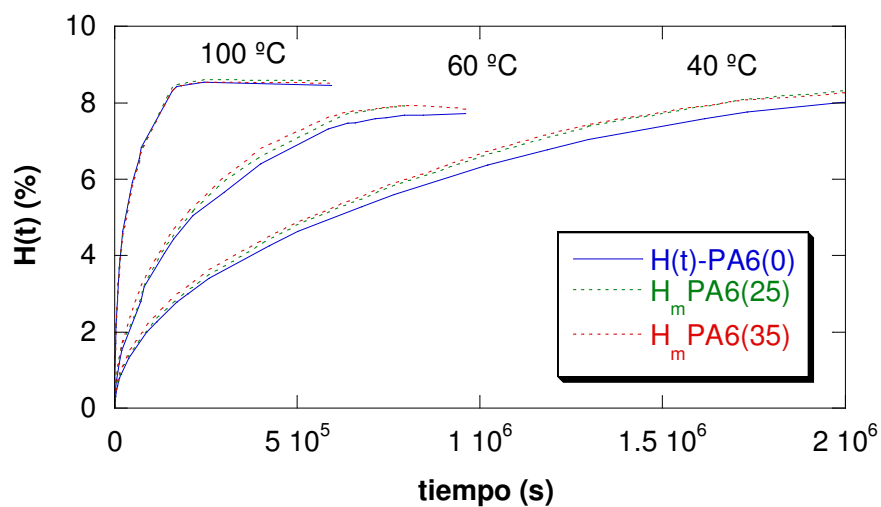


Figura II.9. Comparación de  $H_m$  con  $H(t)$ -PA6(0) para diferentes  $T^a$

Para corroborar el efecto de que la interfase en el comportamiento del material frente al agua se comporta como un material higroscópico, se realizó una prueba adicional consistente en la medida de la resistencia eléctrica, constatándose que la resistencia eléctrica disminuía más rápidamente al aumentar el contenido de humedad en las probetas con mayor contenido de refuerzo. Esta comprobación indica que la interfase puede ser un camino preferencial del agua dentro de estos materiales.

La evolución de la cantidad de agua absorbida por la probeta sumergida en función del tiempo se puede determinar a partir de la segunda ley de Fick, que define el fenómeno de difusión de un material en otro. En este caso, el material que difunde sería el agua.

Por tanto se podría escribir dicha ley, sustituyendo la concentración por el contenido de humedad, de la siguiente forma [142 y 143]:

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} D \left( \frac{\partial}{\partial x} \right) \quad (\text{AII.4})$$

donde D es el coeficiente de difusión expresado en [mm<sup>2</sup>/s] y x es la profundidad de penetración en la probeta [mm] sobre la que se está midiendo la humedad.

Las soluciones a esta expresión (humedad en función del tiempo y de la posición, H(x,t)) se consiguen especificando condiciones límites físicamente significativas [144]. En la práctica, una solución importante es la de un sólido semiinfinito cuya concentración superficial se mantiene constante, su humedad inicial está uniformemente distribuida, (H<sub>0</sub>) y el tiempo se toma igual a cero en el momento de sumergirlo en agua. La solución a la ecuación (AII.4), en la que se imponen como condiciones límites que la humedad inicial (t = 0) sea nula para todas las profundidades y que para tiempos posteriores la humedad en superficie sea la de saturación y a una profundidad teórica infinita sea cero, vendrá dada por la expresión (AII.5).

$$H(x,t) = H_s \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (\text{AII.5})$$

De esta solución desconocemos el valor del coeficiente de difusión, D. Por tanto se recurre a la solución de una geometría en la que el valor de x no sea una variable y poder así definir el valor de D. Esta geometría puede ser una placa de espesor conocido [145-147].

La solución de la ecuación (AII.5) para una lámina de espesor e, asumiendo que el coeficiente de difusión es independiente de la concentración de agua, vendría dada por la ecuación siguiente:

$$H(t) = H_s \left[ 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{2k-1} \exp \left[ -\frac{D (2k-1)^2}{e^2} t \right] \right] \quad (\text{AII.6})$$

Donde H(t) es la cantidad total de agua absorbida en la probeta en el instante t, expresada en tanto por ciento. En los puntos cercanos a la superficie la H será superior a la que se puede encontrar en puntos interiores. Es decir, H(t) sería una media de la humedad en cada uno de los puntos de la probeta. Para conocer como se distribuye la humedad en función de la profundidad, x, se debe encontrar una solución a la ecuación (AII.5) para cada geometría en concreto.

El siguiente paso es suponer la probeta normalizada como una placa de 4 mm de espesor y aplicar a los resultados obtenidos de las inmersiones a diferentes temperaturas un ajuste similar al de la ecuación (AII.6).

En los gráficos de la Figura II.10 se muestra la bondad de los ajustes de la ecuación (AII.6) realizados sobre los datos obtenidos para los diferentes materiales y temperaturas de baño con el objeto de definir el valor del coeficiente de difusión. En la Tabla II.1 se muestran los resultados obtenidos para D en los diferentes ajustes realizados.

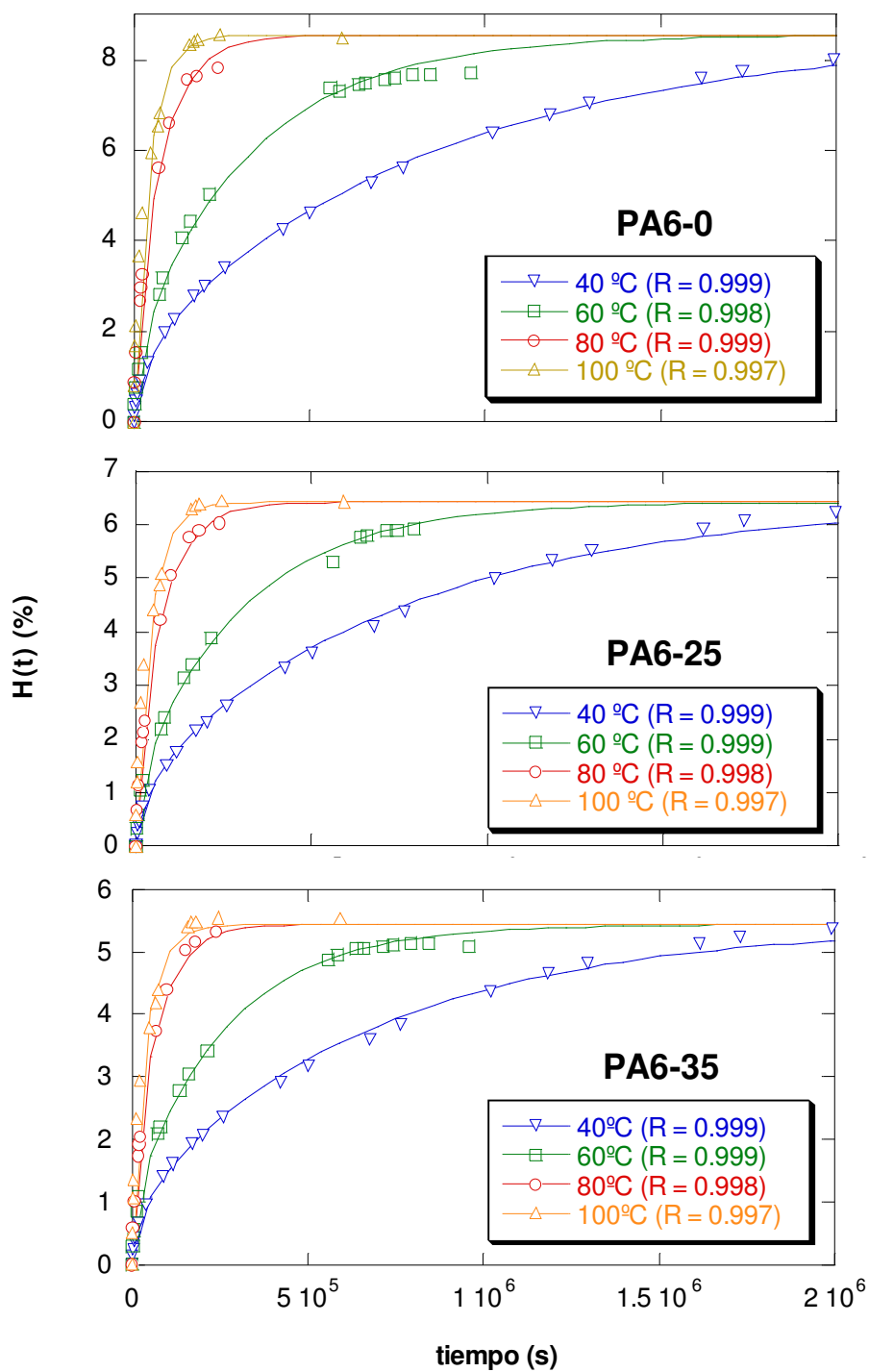


Figura II.10. Ajuste de la ley de Fick para las probetas de PA6(0/25/35) a diferentes temperaturas

**Tabla II.1.** Valores obtenidos para  $D$  en función del material y la  $T^a$  del agua

$T^a$ (°C)	$D$ [mm <sup>2</sup> /s]		
	PA6(0)	PA6(25)	PA6(35)
40	$1.88 \cdot 10^{-6}$	$2.11 \cdot 10^{-6}$	$2.32 \cdot 10^{-6}$
60	$4.73 \cdot 10^{-6}$	$5.20 \cdot 10^{-6}$	$5.96 \cdot 10^{-6}$
80	$1.96 \cdot 10^{-5}$	$2.00 \cdot 10^{-5}$	$2.22 \cdot 10^{-5}$
100	$3.44 \cdot 10^{-5}$	$3.35 \cdot 10^{-5}$	$3.534 \cdot 10^{-5}$

Como se observa, y era de esperar ya que la difusión es un fenómeno térmicamente activado, el valor de  $D$  es fuertemente dependiente de la temperatura a la que se encuentra el agua del baño, pudiéndose definir por medio de una ley de tipo Arrhenius:

$$D = D_0 e^{-Q/RT} \quad (\text{AII.7})$$

donde:  $D_0$  es un parámetro del material independiente de la temperatura expresado en [mm<sup>2</sup>/s],

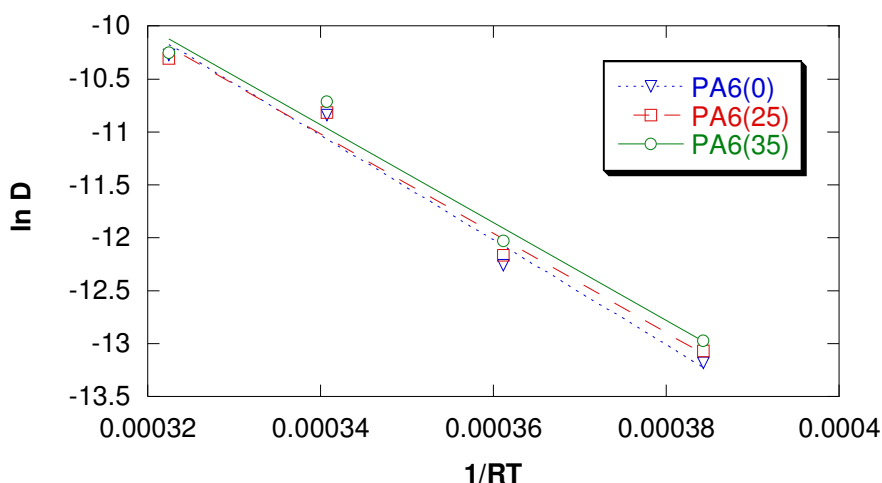
$Q$  es la energía de activación del proceso expresada en [J/mol],

$R$  es la constante de los gases [8.31 J/mol K]

y  $T$  es la temperatura absoluta [K].

Para obtener los valores de  $D_0$  y  $Q$ , basta con representar en escala semilogarítmica la relación  $\ln D - 1/RT$  (Figura II.11); la pendiente de la recta cambiada de signo sería directamente el valor de la energía de activación,  $Q$ , y la ordenada en el origen el valor  $\ln D_0$ . Los valores obtenidos para las diferentes constantes, tras el ajuste lineal, son los que se reflejan en la Tabla II.2

También en la Tabla II.1 puede observarse que el valor de  $D$  se incrementa para todo el rango de temperaturas con el contenido de fibra, corroborando que la interfase fibra-matriz puede convertirse en un camino preferencial de avance de la humedad dentro del seno de la PA6.



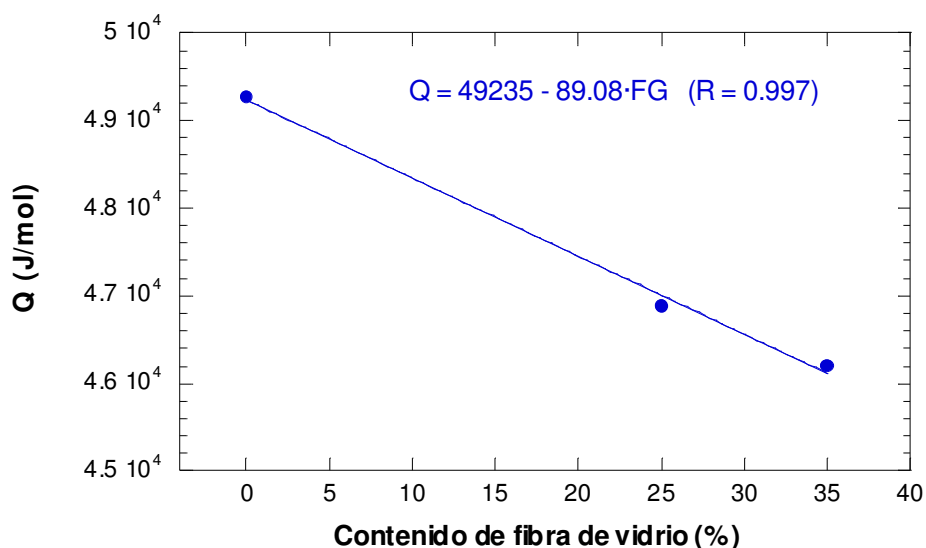
**Figura II.11.** Representación  $1/RT - \ln D$  y ajuste lineal

**Tabla II.2.** Valores obtenidos tras el ajuste para determinar el parámetro  $D$

Material	Q [J/mol]	$D_0$ [mm <sup>2</sup> /s]	D [mm <sup>2</sup> /s]
PA6(0)	49270	301.90	$D = 301.90 \cdot \exp(-49270/RT)$
PA6(25)	46887	137.22	$D = 137.22 \cdot \exp(-46887/RT)$
PA6(35)	46204	119.03	$D = 119.03 \cdot \exp(-46204/RT)$

De los valores observados en la Tabla II.2, destaca la disminución de la energía de activación del proceso de difusión en función del aumento del contenido de fibra del material. En la Figura II.12 se refleja la variación lineal de la energía de activación con el porcentaje de refuerzo, evidenciando que la difusión se hace con menos trabas al incrementarse el contenido de fibra ya que la energía necesaria para que se produzca el fenómeno es inferior.

Una vez definido el valor del coeficiente de difusión para los diferentes materiales en función de la temperatura del baño, debe validarse el modelo de comportamiento reflejado por la expresión (AII.6) sobre otra geometría diferente y para una temperatura no empleada anteriormente. Para ello, se utilizaron las probetas mecanizadas en forma de placa de 20x20 mm y de espesores comprendidos entre 1 y 3.5 mm.



**Figura II.12.** Variación de la energía de activación con el contenido de fibra

La temperatura del baño elegida para el ensayo de validación fue de 50 °C. Los valores del parámetro  $D$  para esta temperatura ( $D_{50}$ ), obtenido a partir de la expresión (AII.7) y la Tabla II.2, así como, las propiedades geométricas de las diferentes probetas empleadas, se representan en la Tabla II.3.

**Tabla II.3.** Valor de  $D$  para 50 °C y espesores de las probetas prismáticas

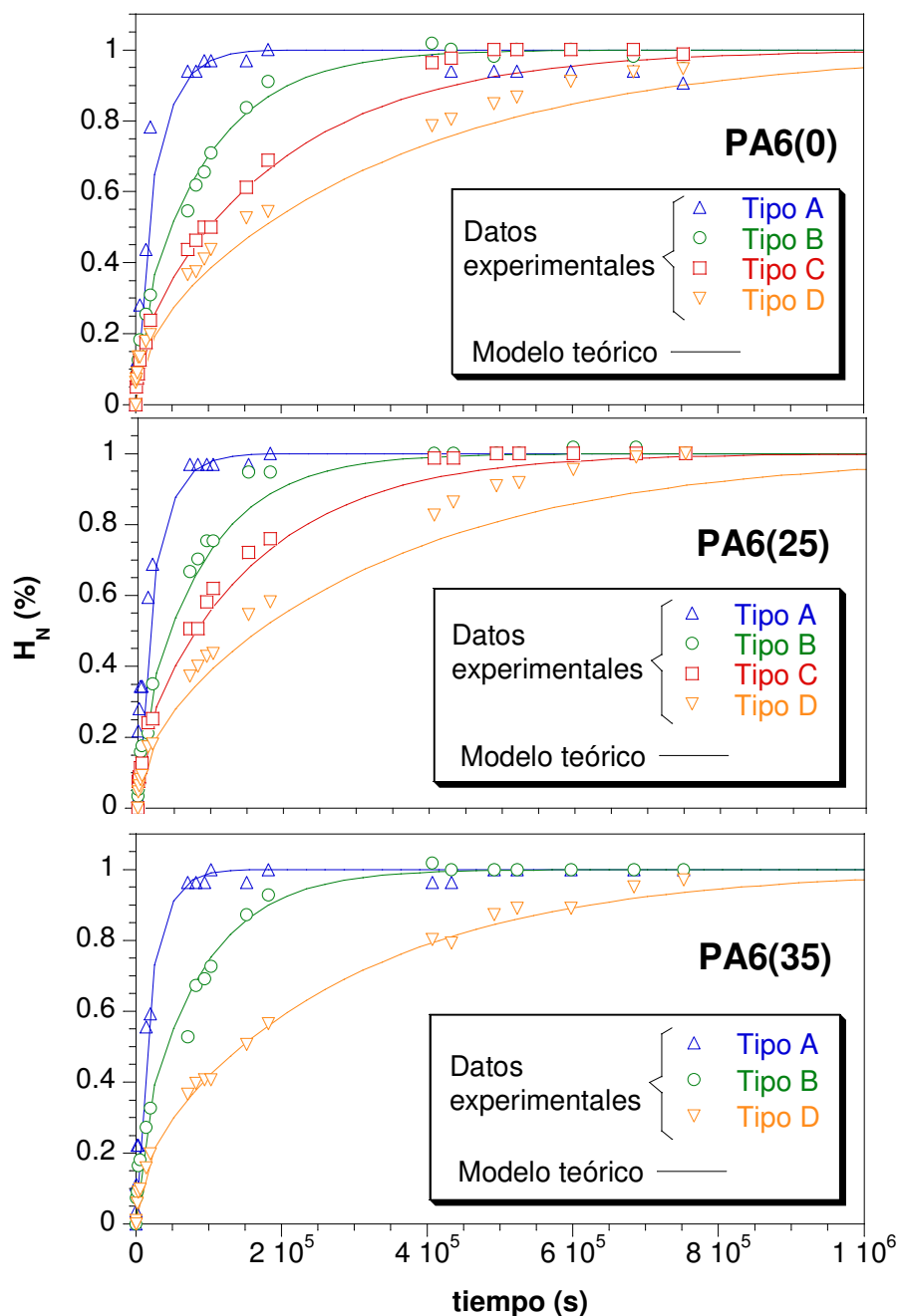
Material	$D_{50}$ [mm <sup>2</sup> /s]	Espesor (mm)			
		Probeta A	Probeta B	Probeta C	Probeta D
PA6(0)	$3.22 \cdot 10^{-6}$	1.00	1.79	2.58	3.40
PA6(25)	$3.55 \cdot 10^{-6}$	0.99	1.81	2.42	3.48
PA6(35)	$3.98 \cdot 10^{-6}$	0.97	1.86	---	3.44

Debido a la pequeña masa de las probetas, 0.462 g en las de menor espesor, la imprecisión en la medida de la humedad aumenta, por lo que el valor de humedad de saturación para cada una de ellas,  $H_{si}$ , variaba ligeramente respecto a los obtenidos en la Figura II.7,  $H_s$ . Por esta razón, para uniformizar los resultados se procedió a normalizar la variable  $H$  obteniendo así un nuevo parámetro, humedad normalizada a la de saturación propia,  $H_N = H/H_{si}$ .

En el gráfico de la Figura II.13 se representa el comportamiento teórico obtenido a partir del modelo definido por la ecuación (AII.6), para  $H_s = 1$ , sobre las curvas de



absorción experimentales, obtenidas sobre las probetas prismáticas. En el mismo, se puede comprobar la bondad de los pronósticos realizados.



**Figura II.13.** Validación del modelo de difusión sobre las placas sumergidas en agua a 50 °C

Verificado el valor de  $D$ , se podría solucionar la expresión (AII.5) para una placa semiinfinita, obteniendo ábacos de isocronas en las que se podría calcular el valor de  $H$  a diferentes profundidades. En la Figura II.14, se muestran las isocronas para los diferentes materiales a  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

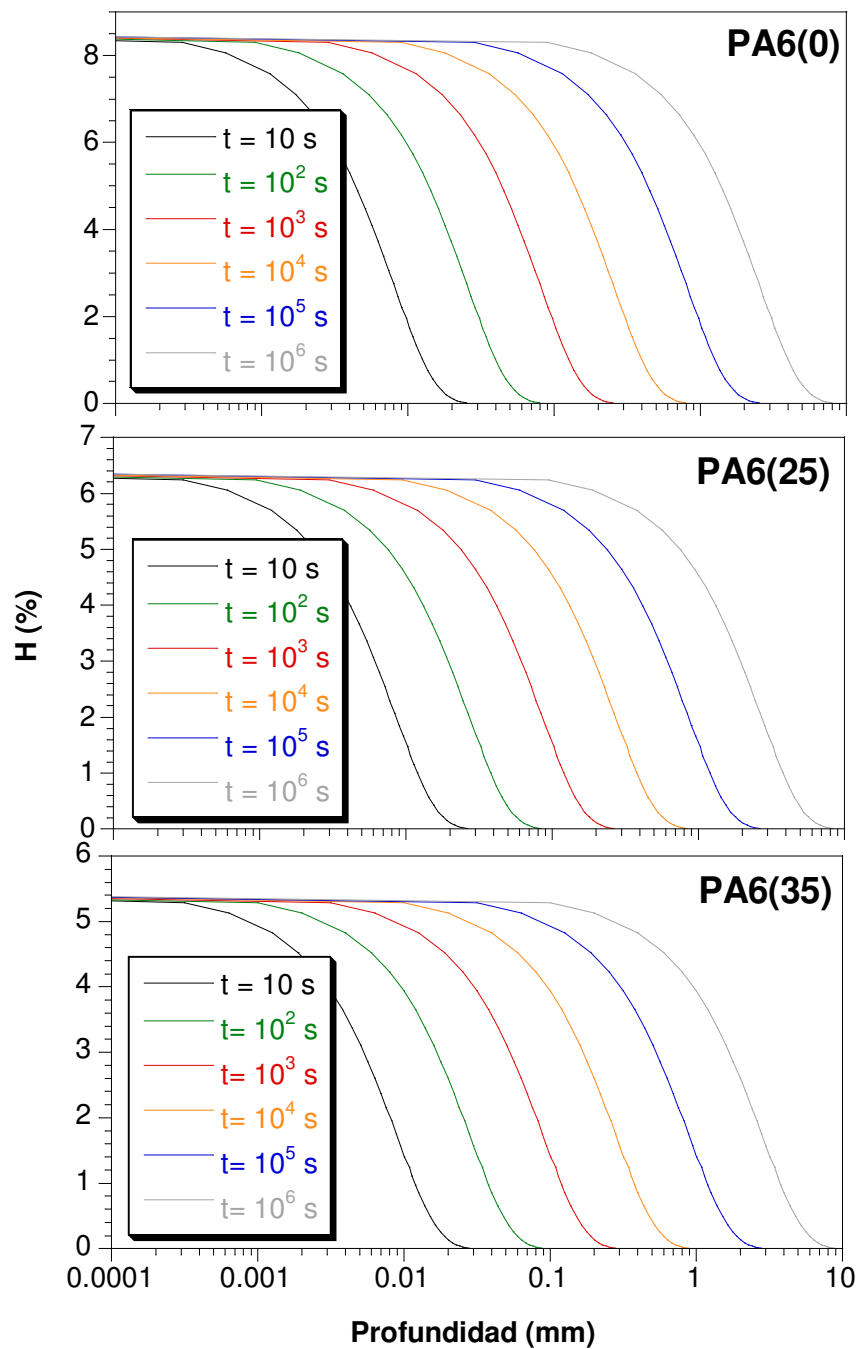


Figura II.14. Isocronas de humedad para PA sumergida en agua a  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$

Estas isocronas permiten determinar cuales son las condiciones heterogéneas de humedad en cada instante conocidas las condiciones externas. Por ejemplo, al cabo de 11 días y medio ( $10^6$  s) se habría alcanzado el 4 % de humedad a 1.83 mm de profundidad en la poliamida 6 sin refuerzo, mientras que, si el refuerzo es del 25 %, ese mismo contenido de humedad se alcanzaría a 1.33 mm de la superficie y si se incrementa el refuerzo hasta el 35 % se alcanzaría el 4 % de humedad a solamente 0.96 mm de profundidad.

### **3. Influencia del contenido de humedad en el comportamiento mecánico de la poliamida 6**

Para el desarrollo de este apartado se empleó PA 6 reforzada con un 35% en peso de fibra corta de vidrio [PA6(35)] con diferentes contenidos de humedad inyectada en probetas de tracción normalizadas (halteras), con la geometría establecida según la Figura II.6, de forma que la fibra corta de vidrio se orientó paralelamente al eje longitudinal de las mismas.

Para la realización de los ensayos, se empleó una máquina universal de ensayo servohidráulica de 100 kN de capacidad y un equipo de extensometría de 12.5 mm de base nominal y  $\pm 5$  mm de recorrido. Las condiciones ambientales de temperatura y humedad relativa se mantuvieron entre los intervalos de  $20\pm 2^\circ\text{C}$  y  $65\pm 5\%$ , respectivamente, durante la totalidad de los ensayos.

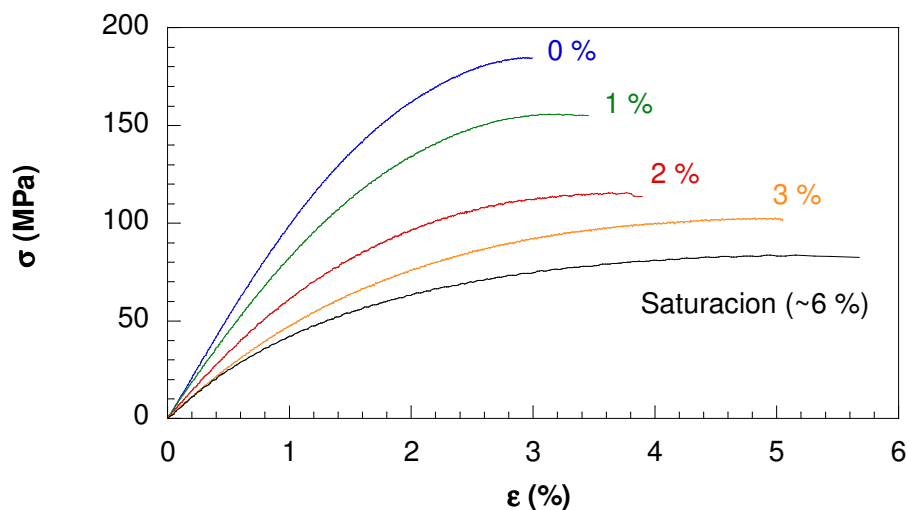
#### **3.1. Comportamiento a tracción (estático y dinámico)**

A tenor de los resultados observados en la Figura II.5, se estudió el comportamiento del material bajo cuatro cantidades diferentes de agua absorbida: 0, 1, 2 y 3%, realizándose, además, una prueba estática con una probeta llevada hasta la saturación, con una humedad próxima al 6 %. Para dotar a las probetas con estos grados de humedad, previamente se sometieron a un tratamiento de secado en estufa a  $90^\circ\text{C}$  durante 9 días y, posteriormente, se introdujeron en un baño de agua a  $40^\circ\text{C}$  del que se extrajeron a medida que adquirían el contenido de

humedad deseado, de acuerdo con el modelo previamente establecido. Durante el estudio, las probetas se mantuvieron almacenadas en bolsas herméticamente cerradas, a fin de preservar su contenido de humedad.

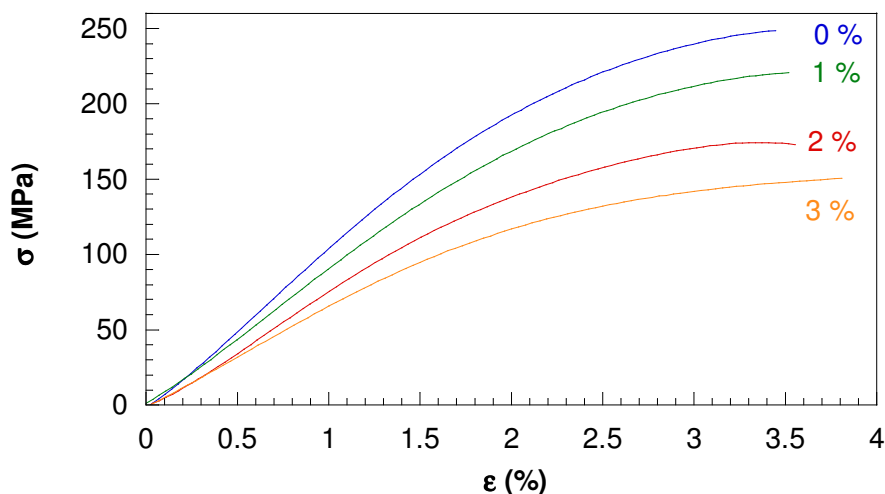
Se realizaron ensayos convencionales de tracción y de impacto a la tracción, a fin de establecer la variación de los parámetros mecánicos en régimen estático y dinámico en impacto en función del contenido de humedad presente en el seno del material.

La Figura II.15 muestra los registros tensión ( $\sigma$ )-deformación ( $\epsilon$ ) obtenidos en los ensayos de tracción. En régimen estático, el aumento de humedad provoca una flexibilización del material (caída del módulo de elasticidad, E) y una disminución del límite elástico y de la resistencia a la rotura, mientras que la deformación en rotura aumenta considerablemente.



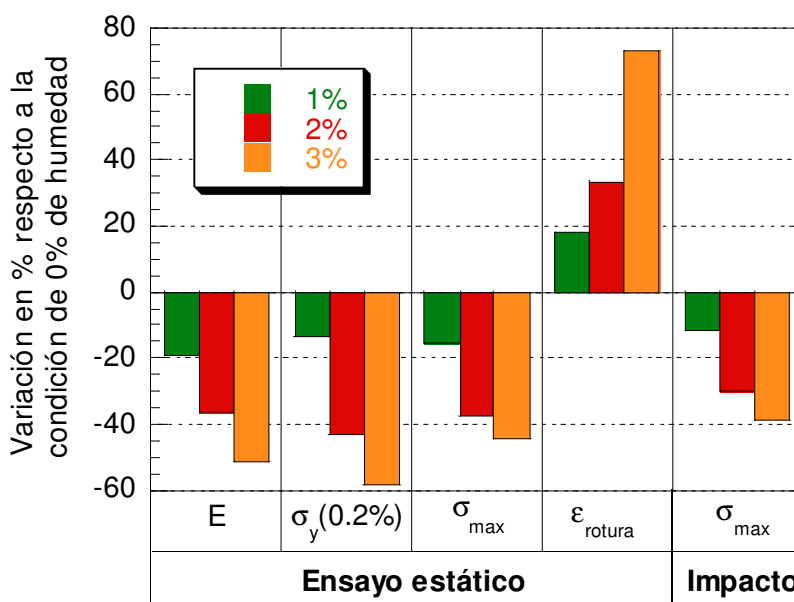
**Figura II.15.** *Ensayo de tracción estático*

La Figura II.16 muestra los registros tensión ( $\sigma$ )-deformación ( $\epsilon$ ) obtenidos en los ensayos de impacto a la tracción. En régimen dinámico, se observan las mismas pautas de comportamiento, si bien la capacidad de deformación en rotura no muestra una tendencia tan evidente en función de la humedad como en el comportamiento estático, por lo menos, hasta el 3% de humedad.



**Figura II.16.** *Ensayo de tracción dinámico o de impacto*

En el gráfico de la Figura II.17 se representa la variación porcentual de los parámetros mecánicos (estáticos y dinámicos) medidos anteriormente con respecto a los valores obtenidos para la condición H=0%. Se observa para H=1% una variación de los parámetros en torno al 15%, para H=2% cercanas al 35%, mientras que para H=3% existe una mayor dispersión, registrándose un intervalo de variación entre el 40 y el 60%.



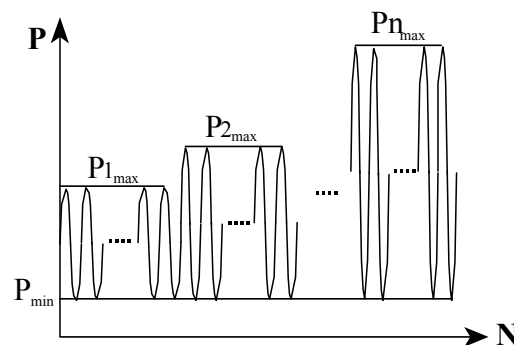
**Figura II.17.** *Variación de parámetros respecto a la condición de H = 0 %*

### 3.2. Comportamiento en fatiga

Para la caracterización dinámica en fatiga, se realizaron dos tipos de ensayos diferentes:

- ❑ Ensayo Locati [104-106]
- ❑ Ensayo de fatiga convencional sobre probeta entallada.

La metodología del ensayo Locati 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 a una frecuencia determinada. En este estudio se aplicaron bloques de ondas senoidales de 20.000 ciclos a la frecuencia de 5 Hz. La carga mínima se mantuvo constante en todos los ensayos e igual a 0.3 kN (7.42 MPa). Por otro lado, la carga máxima se incrementó en 0.2 kN para cada escalón de carga desde el valor inicial de 2.4 kN. La Figura II.18 indica, esquemáticamente, cómo varía la fuerza aplicada en cada escalón o bloque de carga.



**Figura II.18.** Variación de la carga aplicada

Este tipo de ensayo se presenta como alternativa a la curva de Wöhler, permitiendo estimar de forma rápida, con un único ensayo, el límite de durabilidad del componente en estudio. Asimismo, permite comparar cómodamente los diferentes parámetros dinámicos determinados en cada uno de los ensayos realizados.

La Tabla II.4 muestra de forma resumida los parámetros empleados en este ensayo. En la misma se indica el número del escalón de carga aplicado, la fuerza y la tensión máxima ( $P_{max}$ ,  $\sigma_{max}$ ), la fuerza y la tensión media ( $P_m$ ,  $\sigma_m$ ) y la amplitud de la fuerza y de la tensión aplicadas ( $P_a$ ,  $\sigma_a$ ).

**Tabla II.4.** *Parámetros empleados en el ensayo Locati*

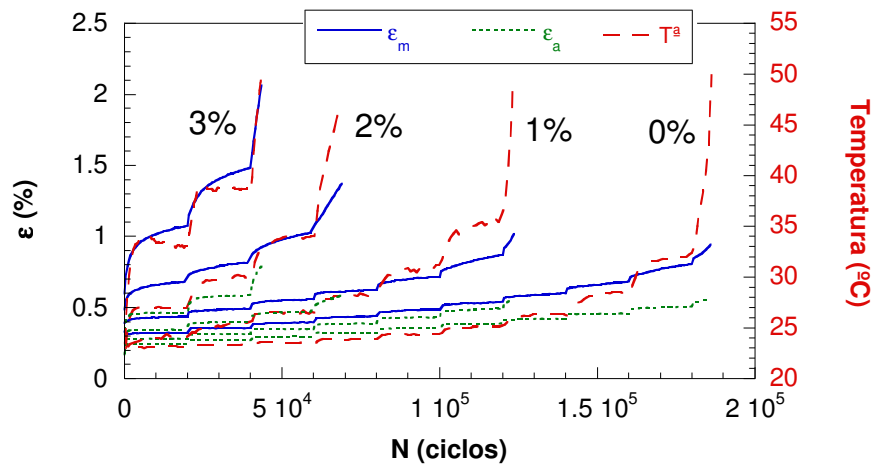
Esc.	Intervalo Ciclo·(10 <sup>3</sup> )	P <sub>max</sub> (kN)	σ <sub>max</sub> (MPa)	P <sub>m</sub> (kN)	σ <sub>m</sub> (MPa)	P <sub>a</sub> (kN)	σ <sub>a</sub> (MPa)
1	0-20	2.4	59.41	1.35	33.42	1.05	26.00
2	20-40	2.6	64.35	1.45	35.89	1.15	28.47
3	40-60	2.8	69.31	1.55	38.37	1.25	30.94
4	60-80	3.0	74.26	1.65	40.84	1.35	33.42
5	80-100	3.2	79.21	1.75	43.32	1.45	35.89
6	100-120	3.4	84.16	1.85	45.79	1.55	38.37
7	120-140	3.6	89.11	1.95	48.27	1.65	40.84
8	140-160	3.8	94.06	2.05	50.74	1.75	43.32
9	160-180	4.0	99.01	2.15	53.22	1.85	45.79
10	180-200	4.2	104.0	2.25	55.69	1.95	48.27

Con el propósito de conocer la evolución continua de la temperatura de la probeta a lo largo del ensayo, se colocó un termopar que incorpora una resistencia sensitiva en contacto con la superficie del material.

Por otro lado, se realizaron ensayos de fatiga sobre probetas entalladas con la finalidad de estudiar la influencia del contenido de humedad en el mecanismo de propagación de fisuras. Para ello, se aplicaron ondas senoidales de amplitud constante entre valores de 0.3 (7.42) y 1.9 kN (47.03 MPa) con una frecuencia de 5 Hz.

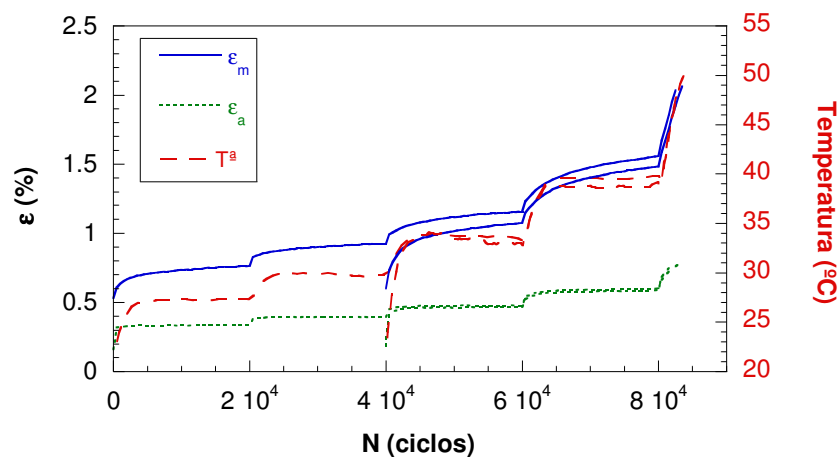
Las entallas se realizaron empleando una cuchilla incorporada al pistón de una máquina de ensayo, para obtener una profundidad de entalla controlada, próxima a los 2 mm.

En los ensayos Locati realizados, se registraron datos de ondas completas cada 500 ciclos, almacenándose 50 puntos por onda de carga y de deformación, además de la temperatura, permitiendo representar la evolución de estos parámetros a lo largo del ensayo. En la Figura II.19 se muestra el progreso de las deformaciones medias ( $\epsilon_m$ ) y de las amplitudes de deformación ( $\epsilon_a$ ), así como el de la temperatura con el número de ciclos aplicado para cada uno de los contenidos de humedad estudiados.



**Figura II.19.** Resultado de los ensayo Locati

Según se observa, existe un escalón de carga crítica para cada humedad a partir del cual los valores de los parámetros medidos pierden su estabilidad y crecen a una velocidad acelerada que precede a la rotura de la muestra. Para la condición  $H=3\%$  existe una clara tendencia al fallo en el primer escalón, por lo que se realizó un nuevo ensayo Locati, para este caso, comenzando dos escalones por debajo, es decir, con cargas máximas de 2 y 2.2 kN (Figura II.20).

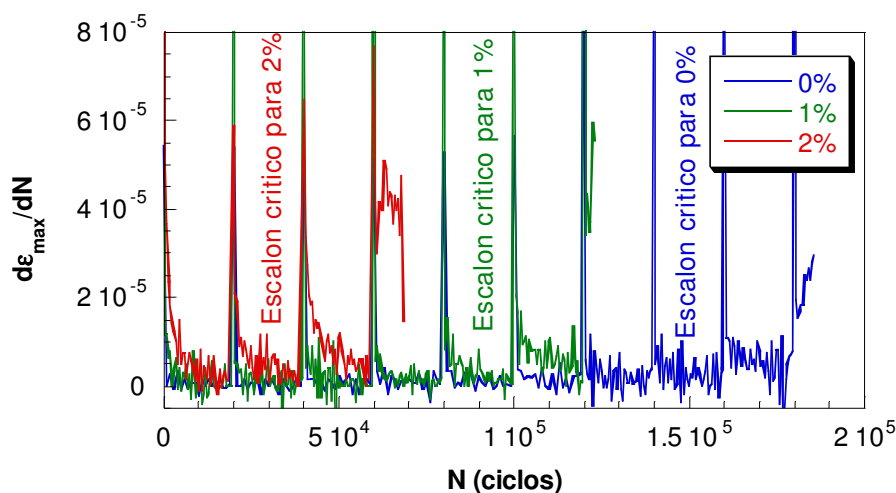


**Figura II.20.** Ensayos Locati para  $H=3\%$

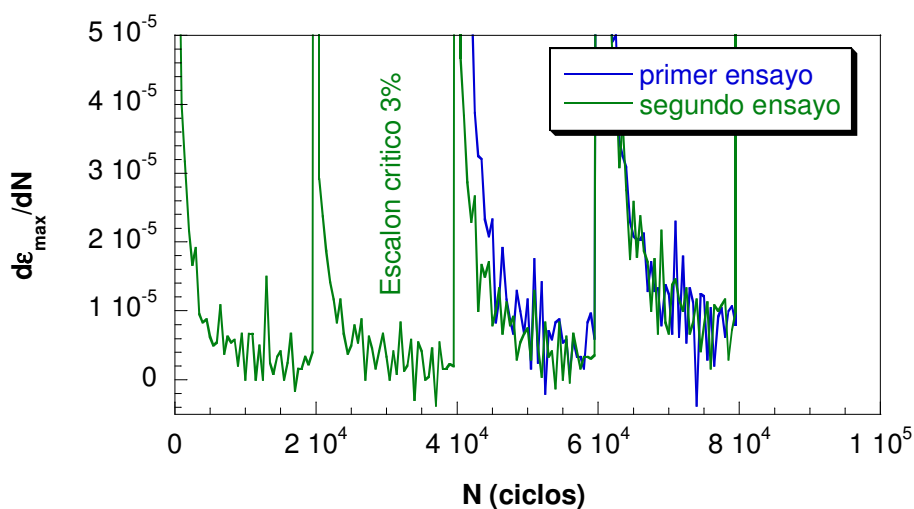
Se comprobó que la aplicación de dos nuevos escalones influye, ligeramente, sobre la deformación media, mientras que la temperatura y la amplitud permanecieron inalteradas. Por lo tanto, se consideró el primer bloque como escalón de carga crítica debido a que la deformación media en el segundo es muy elevada y siempre creciente.



De este modo, es posible establecer, a partir de las consideraciones previas, un nivel de variación de la tensión 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  $n^\circ$  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 ( $\epsilon_{m\acute{a}x} = \epsilon_m + \epsilon_a$ ). El escalón crítico será el último en el que la derivada de la deformación máxima se anula, es decir, alcanza el valor de 0, como puede observarse en la Figura II.21, para las humedades de 0 a 2 % y en la Figura II.22 para el caso de H=3%.



**Figura II.21.** Derivada de la deformación para 0, 1 y 2 % de humedad

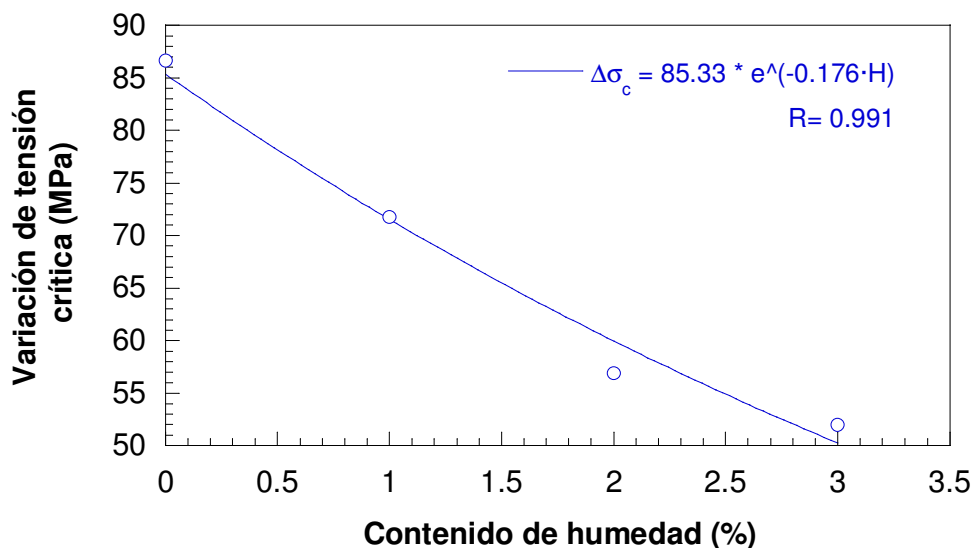


**Figura II.22.** Derivada de la deformación para 3 % de humedad

Los resultados obtenidos en los ensayos Locati, se resumen en la Tabla II.5. La variación de la tensión crítica estimada presenta una correlación exponencial respecto al contenido de humedad expresado en %, como puede verse en la Figura II.23.

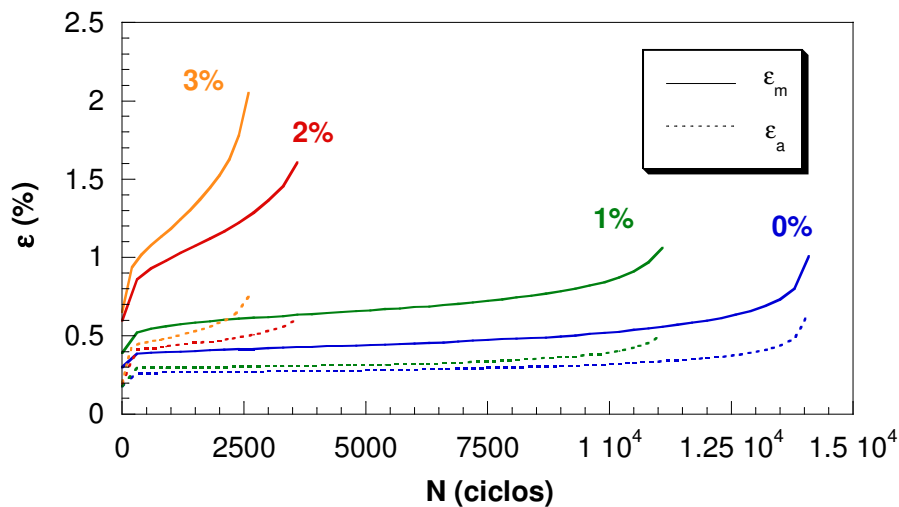
**Tabla II.5.** Resumen de resultados del ensayo Locati

H (%)	0	1	2	3
$\Delta\sigma_c$ (MPa)	86.63	71.78	56.93	51.98



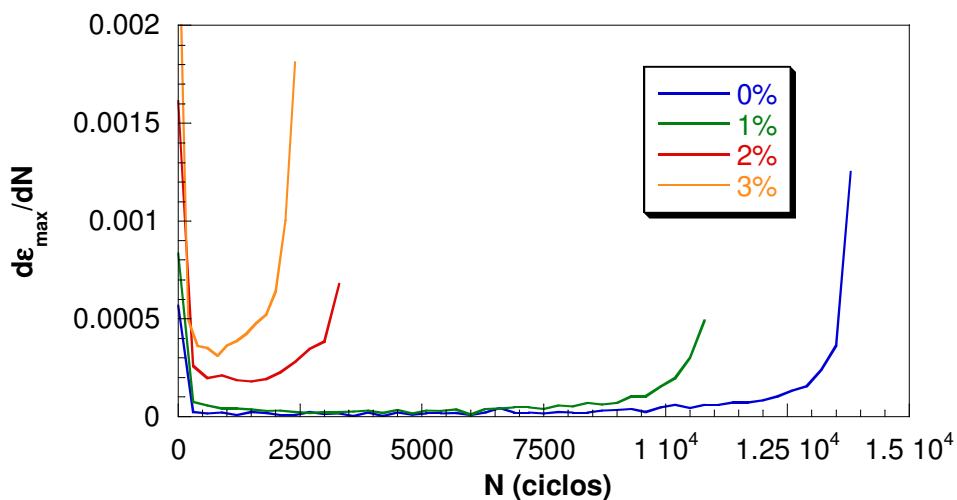
**Figura II.23.** Variación del  $\Delta\sigma_c$  en función de H

En la Figura II.24 se recogen los resultados obtenidos en fatiga monótona sobre las probetas entalladas. Los gráficos representan la evolución de la deformación en el material con el número de ciclos aplicado, en función de su grado de humedad. Los resultados indican una disminución de la vida en fatiga del material al aumentar su contenido de humedad, como previamente se observó en los ensayos Locati realizados sobre probetas no entalladas.



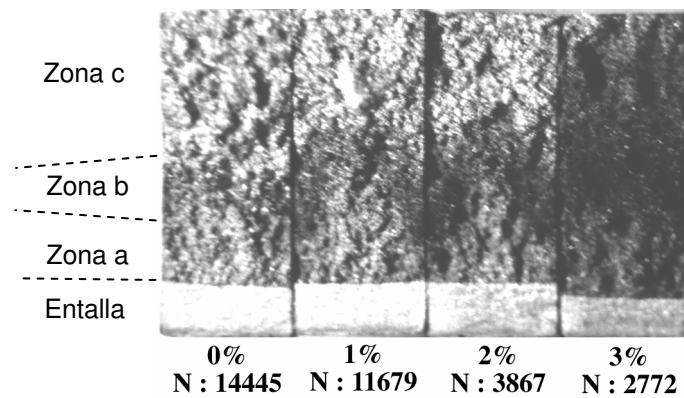
**Figura II.24.** *Fatiga sobre probeta entallada*

Realizando el mismo análisis que se realizó en los ensayos Locati, se estudia la evolución de la velocidad de deformación máxima frente al número de ciclos para facilitar la diferenciación de los distintos tramos de la curva (Figura II.25).



**Figura II.25.** *Evolución de la derivada de deformación en las probetas entalladas*

La macrografía de la Figura II.26 muestra las superficies de fractura de cuatro probetas entalladas con diferentes contenidos de humedad y el nº de ciclos de rotura ( $N_R$ ) de cada una de ellas.

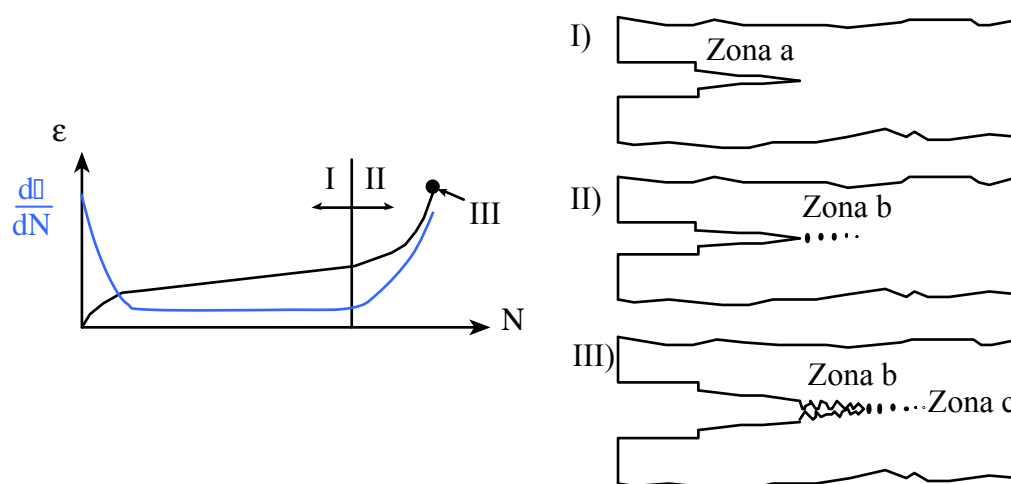


**Figura II.26.** Macrografía de las superficies de rotura

Como se puede apreciar aparecen tres zonas claramente diferenciadas a simple vista por su tonalidad. Estas zonas serán denominadas “a”, “b” y “c” empezando por la contigua a la entalla [107,131].

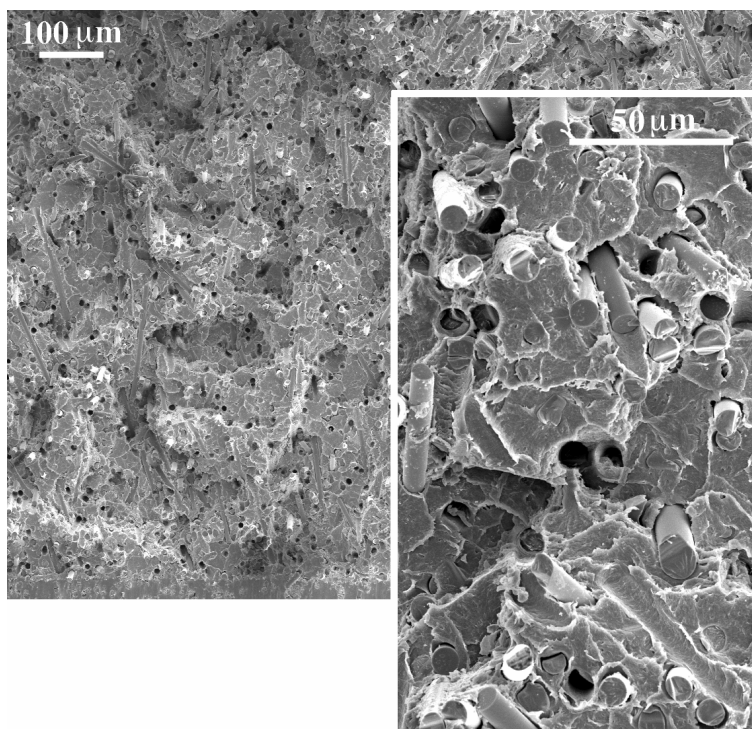
Por último, sobre la superficie de rotura de las probetas ensayadas se realizó un análisis fractográfico por medio de técnicas de microscopía electrónica de barrido.

Para comprender mejor la morfología de cada una de estas zonas se seguirá el esquema de la Figura II.27, en las que se muestra una evolución de las superficies en función de la curva de comportamiento  $\epsilon$ -N y  $d\epsilon/dN$ .



**Figura II.27.** Esquema de formación de las diferentes zonas

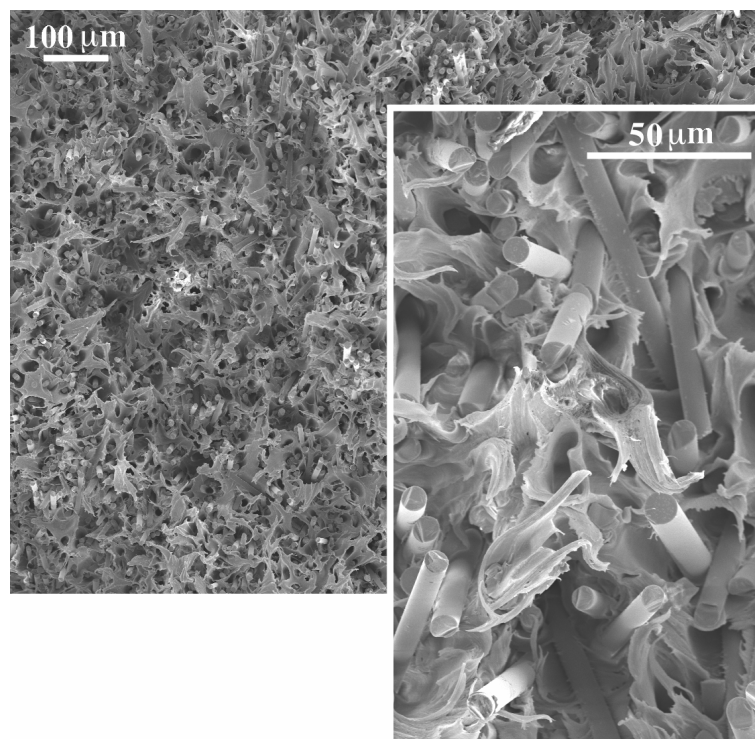
La morfología de la zona a corresponde a la primera parte de la curva de la figura anterior, es decir, al tramo donde la pendiente de la misma se mantiene constante (I). Se trata de un crecimiento de fisura lento que poco a poco va agotando la sección recta de la probeta. Como puede observarse en la Figura II.28, esta zona se corresponde con una superficie de rotura más bien lisa, con poco relieve, en la que la matriz está muy poco deformada y las fibras aparecen rotas en el plano de la fisura o arrancadas, presentando una escasa longitud al descubierto. En la probeta con  $H = 3\%$  esta zona es prácticamente inapreciable, aumentando su tamaño conforme disminuye  $H$ , alcanzando el máximo en la probeta seca.



**Figura II.28.** *Fractografía de la zona “a” y detalle de la misma*

La zona b se corresponde con el tramo II de la curva de la Figura II.27, donde la pendiente se hace creciente. Su desarrollo se genera a partir de pequeños huecos que aparecen en el fondo de fisura según se esquematiza en dicha figura, dando lugar a la creación de pseudo-fisuras o “crazes”. La coalescencia de las mismas debilita el ligamento resistente (fisura cohesiva), provocando deformaciones elevadas acompañadas de aumentos en la temperatura, debido al mayor estiramiento de las cadenas moleculares, que provoca que el material se torne más

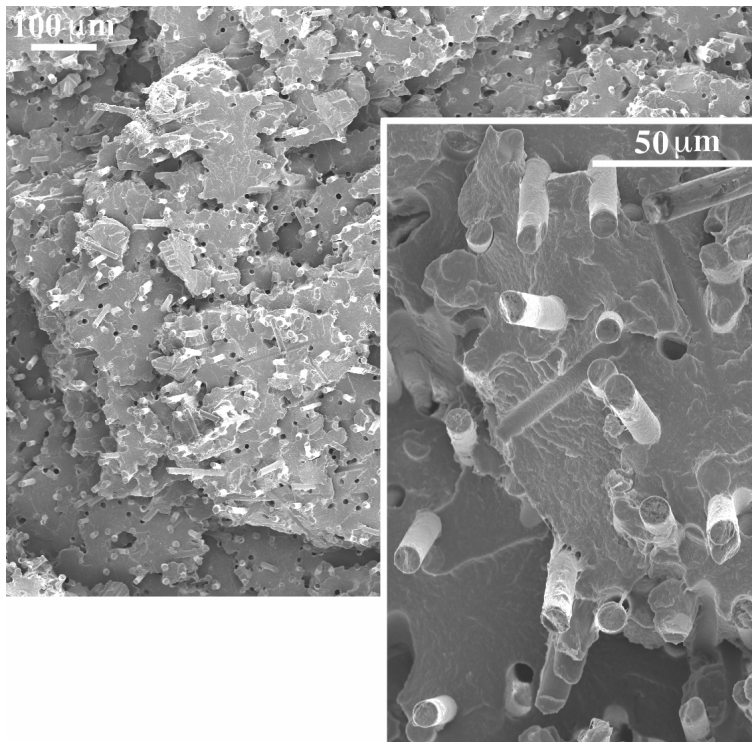
blando y deformable. Este ciclo termina con la rotura del material. Como se observa en la Figura II.29, el aspecto característico de la superficie de rotura presenta una matriz muy deformada. Por otro lado, las fibras aparecen enteras y sin restos de interfase adherida a su superficie. Esta morfología, por lo general, no aparece en las probetas secas, mientras que en las húmedas ocupa prácticamente la totalidad de la superficie. Este fenómeno puede favorecerse por el efecto dañino que la humedad ejerce sobre la interfase fibra-matriz, reduciendo el efecto reforzante de las fibras al disminuir su adherencia con la matriz [148].



**Figura II.29.** *Fractografía de la zona “b” y detalle de la misma*

La zona c es la zona última o de rotura y sobreviene cuando el crecimiento de fisura y los huecos generados en la zona b alcanzan conjuntamente una situación crítica como para que la sección neta no resista las cargas aplicadas. Esta zona es muy parecida morfológicamente a la zona a, en cuanto que la matriz se rompe frágilmente. La diferencia radica en que esta rotura se produce en un único ciclo y el relieve de la fractura es un poco más acusado, mostrando varios planos de rotura. Las fibras no aparecen rotas, sino que se han desgarrado de la matriz,

apareciendo con mayor longitud visible que en la zona a. Del mismo modo, los huecos se manifiestan con mayor profundidad (Figura II.30).



**Figura II.30.** *Fractografía de la zona “c” y detalle de la misma*

### **3.3. Comportamiento en fluencia**

Los componentes de sujeción de la vía de ferrocarril son solicitados por esfuerzos de diferente naturaleza y, entre ellos, juega un papel importante la aplicación de una tensión o de una deformación constante (fluencia o relajación, respectivamente).

En la Figura II.31, se representa la variación de la carga de rotura ( $\sigma_R$ ) y de la carga de plastificación al 0.2% de deformación ( $\sigma_Y$ ) con el contenido de humedad. También se puede observar en la misma figura cómo pueden ser afectadas las condiciones tensionales de diseño de un componente estructural al variar en el mismo el contenido de agua. Por ejemplo, un componente que soporta una tensión constante de 70 MPa estaría por debajo de su límite elástico siempre que no se

sobrepase el 2% de humedad (equilibrio), mas si, por cualquier circunstancia, el componente absorbe agua pasaría a trabajar en condiciones de deformación totalmente diferentes a las de diseño.

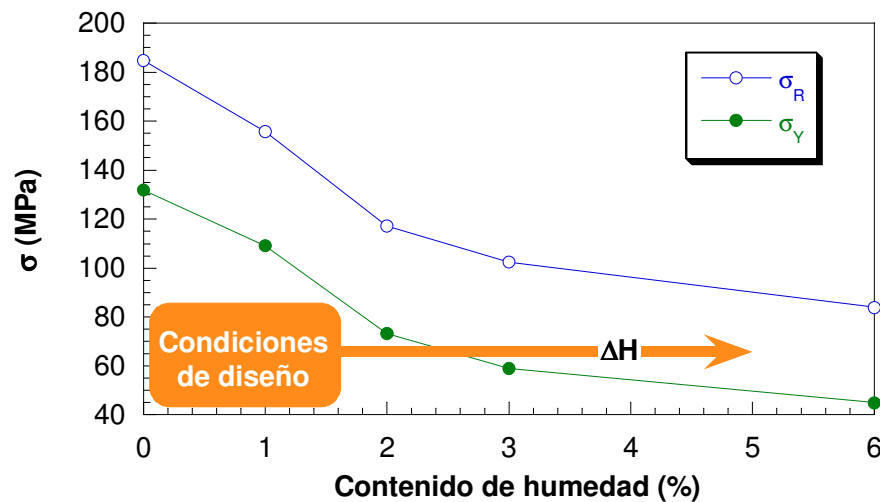


Figura II.31. Variación de las condiciones de diseño

El diagrama clásico de fluencia [149] en el que se representan la tensión ( $\sigma$ ), la deformación ( $\epsilon$ ) y el tiempo ( $t$ ), se ve modificado por la incorporación de una nueva variable, el contenido de humedad ( $H$ ), según puede observarse en la Figura II.32.

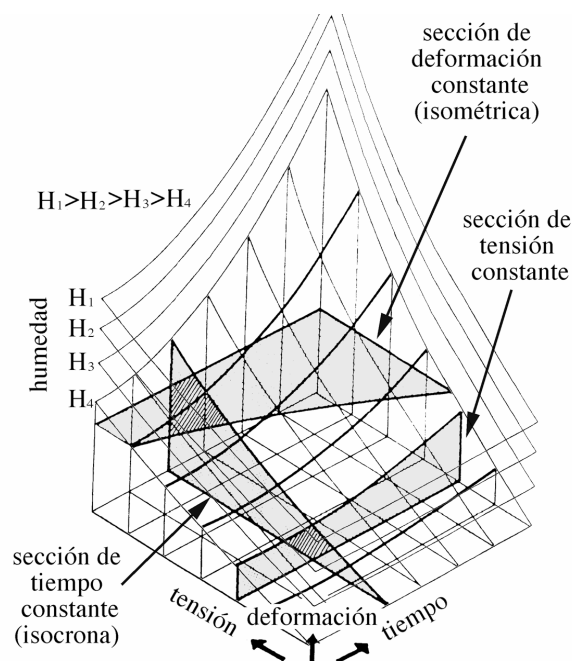


Figura II.32. Relación de la  $\sigma$ ,  $\epsilon$ ,  $t$  y  $H$  en fluencia



Un componente de poliamida, diseñado para soportar una tensión constante e inferior a su límite elástico, debido a su naturaleza higroscópica, puede absorber agua, disminuyendo sus parámetros resistentes, incluso por debajo del nivel de tensión aplicada. En esta situación, si no se disminuye el esfuerzo aplicado, la fluencia se produce para esfuerzos que pueden superar el límite elástico del material.

La caracterización del comportamiento de materiales poliméricos y compuestos en fluencia por debajo de su límite elástico, se encuentra descrita ampliamente en la bibliografía, empleando los modelos simplificados a base de combinar deformaciones elásticas (muelles) y/o deformaciones viscosas (amortiguadores) [150-154].

En este apartado se caracteriza el comportamiento de la PA 6 reforzada con un 35 % de fibra corta de vidrio en fluencia bajo niveles tensionales superiores a su límite elástico, determinando cual será el nivel de deformación en función del resto de variables, incluido el contenido de humedad, así como el tiempo previsto para el fallo del componente.

El principal problema que plantean los ensayos de fluencia es la larga duración de los mismos para poder disponer de datos fiables de tiempos de rotura. En este trabajo este problema se ha evitado al trabajar con cargas elevadas, superiores al límite elástico.

En las gráficas de las Figuras II.33 a II.37 se representan la deformación y el módulo de fluencia obtenidos en los ensayos realizados en función del tiempo, la humedad y la tensión aplicada.

El módulo de fluencia,  $E(t)$ , viene definido por la expresión (6.9).

$$E(t) = \frac{\sigma}{\epsilon(t)} \quad (\text{AII.8})$$

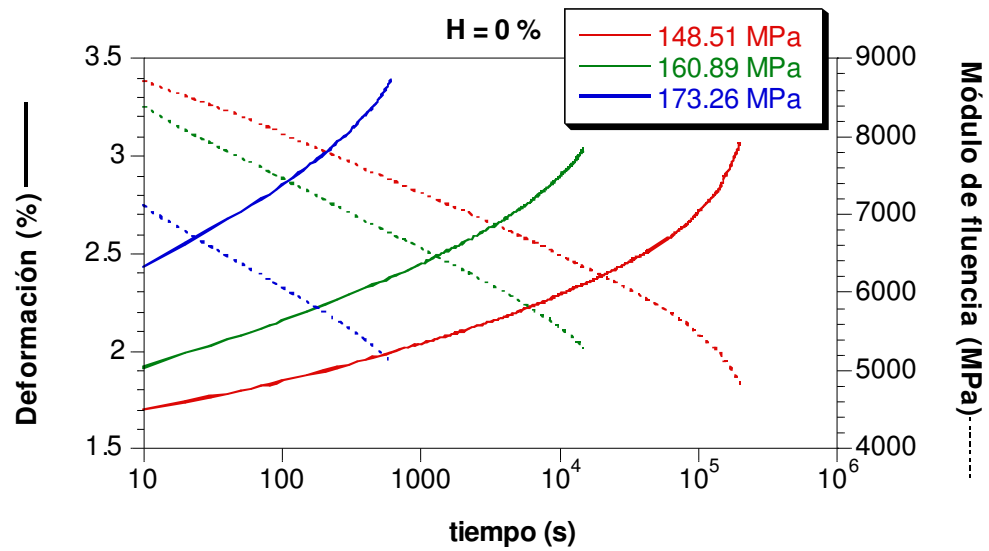


Figura II.33. Ensayos de fluencia para una humedad del 0%

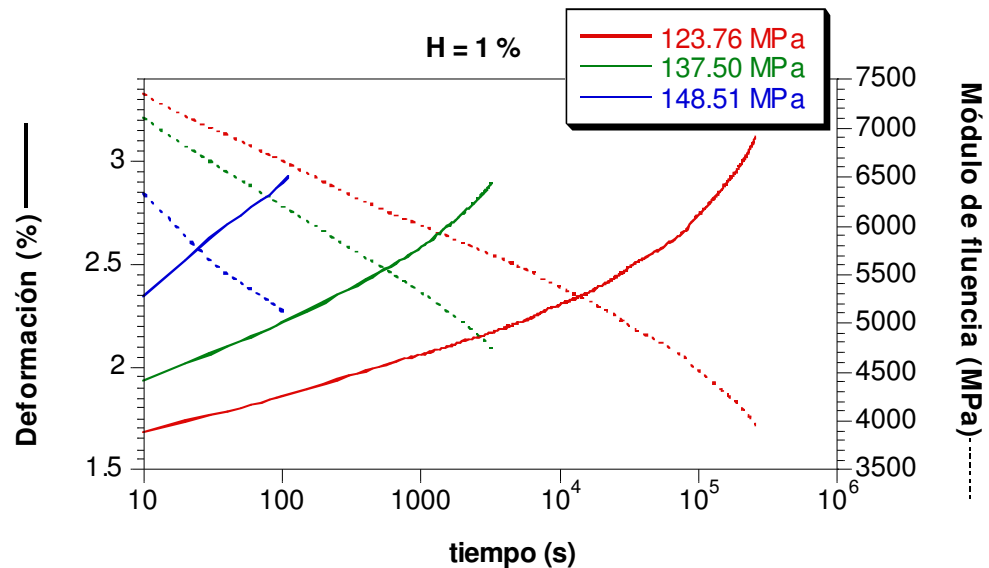


Figura II.34. Ensayos de fluencia para una humedad del 1%

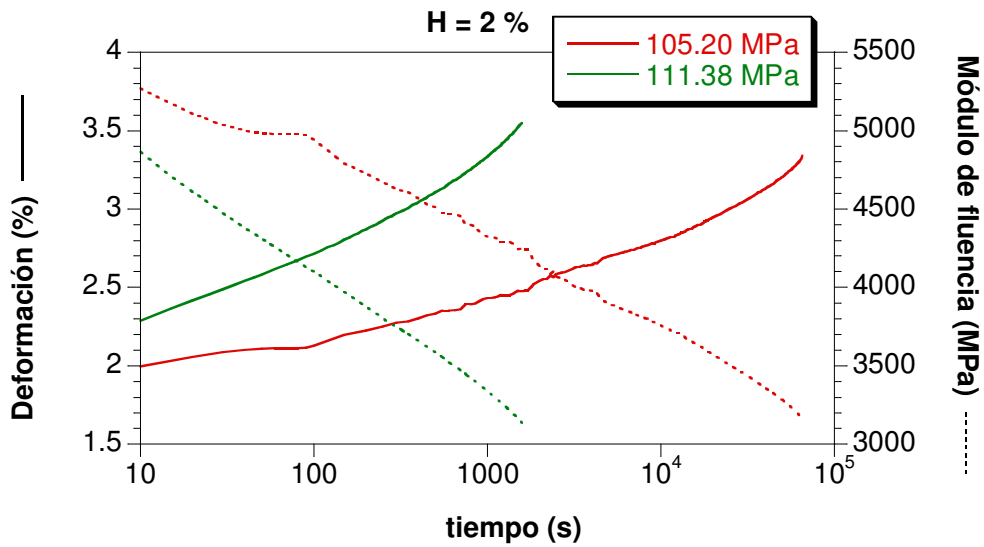


Figura II.35. Ensayos de fluencia para una humedad del 2%

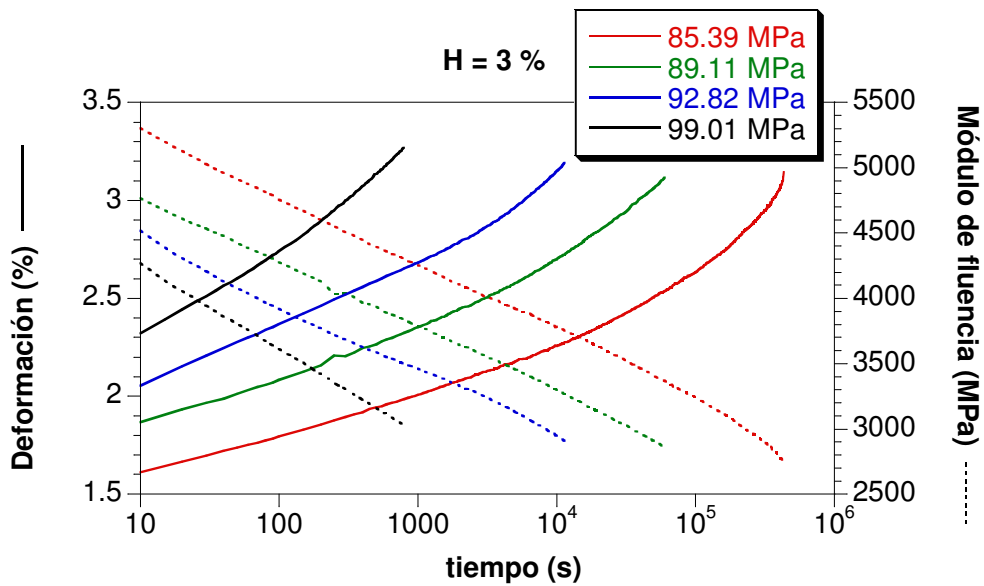
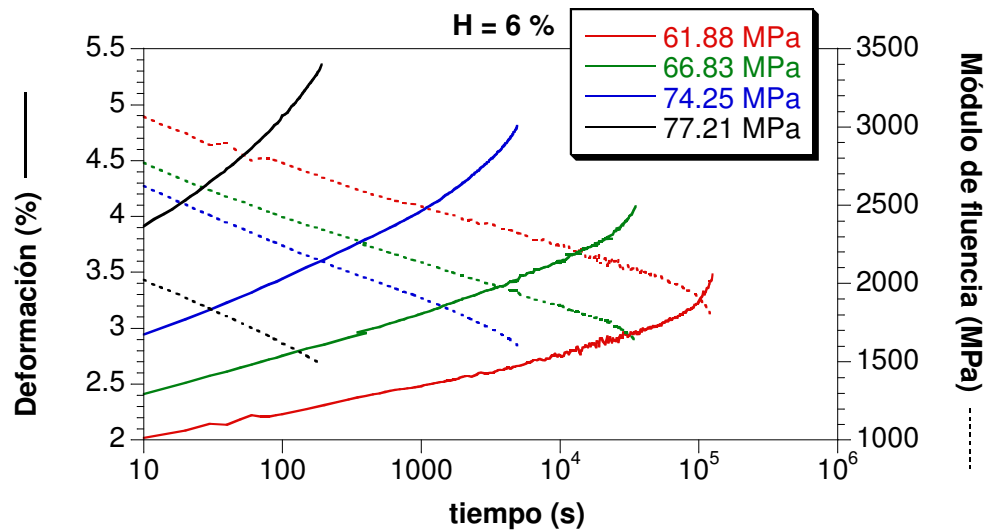


Figura II.36. Ensayos de fluencia para una humedad del 3%



**Figura II.37.** Ensayos de fluencia para una humedad del 6%

El análisis de los resultados obtenidos permite asegurar la existencia de un fallo por deformación. En todos los casos estudiados, salvo en el de saturación y para cargas elevadas (superiores a 70 MPa), la rotura se produce en un nivel de deformación situado entre 3 y 3.5%. Sin embargo, el módulo de fluencia en rotura es variable, disminuyendo al aumentar el grado de humedad, y se mantiene prácticamente constante para las probetas con el mismo contenido de humedad.

Ante la imposibilidad de poder modelizar por los medios tradicionales el comportamiento del material trabajando con cargas constantes elevadas e introduciendo una nueva variable, H, se optó por el empleo de la metodología de las redes neuronales artificiales (ANN, Artificial Neuronal Network) [155].

Desde la aparición de las ANN, todas las ciencias y tecnologías han hecho uso de ellas obteniendo ventajas sorprendentes. La Ciencia y Tecnología de Materiales [156] se ha aprovechado de la potencia y flexibilidad que ofrecen en un amplio conjunto de problemas. Concretamente en este trabajo se han aplicado al modelizado del comportamiento mecánico.

Las ANN se basan en la organización de muchos elementos de proceso de una forma semejante a la anatomía del cerebro. Además de estas semejanzas estructurales muestran unas propiedades funcionales muy interesantes como son

la capacidad de aprender de la experiencia, capacidad de generalización a partir de determinados ejemplos, permitiendo discernir entre características, aun cuando existan datos equívocos o irrelevantes [157].

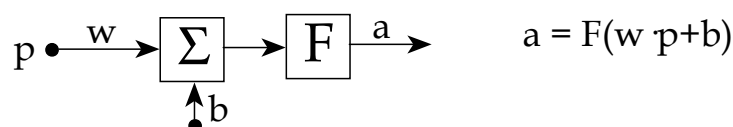
Su ventaja más importante está en solucionar problemas que son demasiado complejos para las técnicas convencionales: problemas que no tienen un algoritmo específico para su solución, o cuyo algoritmo es demasiado complejo para ser encontrado. En cambio, existen tareas para las que las ANN no son adecuadas, como pueden ser las tareas de cálculo y en general tareas repetitivas. Otro punto negativo es que las ANN son incapaces de explicar el razonamiento que ha conducido a la resolución de determinado problema, la red se comporta como una caja negra.

Los puntos claves de las ANN se encuentran en sus componentes estructurales así como en sus propiedades funcionales. El conjunto de modelo de estructura y funcionamiento de una ANN se denomina paradigma. El paradigma consiste en la especificación de:

- ❑ Los elementos de proceso: neuronas, función de activación, tipo de normalización, etc.
- ❑ La arquitectura de la red: número de capas, forma de conexiones, número de neuronas por capa, etc.
- ❑ El método de aprendizaje.

El desarrollo de una ANN consistirá, básicamente, en seleccionar el paradigma o paradigmas a utilizar, ajustar los parámetros de la red y conseguir efectuar un entrenamiento con el conjunto de datos adecuado.

El elemento básico que forma una ANN es la neurona, cuyo esquema se representa en la Figura II.38.



**Figura II.38.** Esquema de una neurona

La neurona está formada por una entrada,  $p$  (que puede ser múltiple), dos parámetros ajustables como son el peso,  $w$ , y el error,  $b$ , la función de activación,  $F$ , y la salida,  $a$ . En el problema que se plantea, las entradas serán tres,  $H$ ,  $\sigma$  y  $t$ , siendo  $\varepsilon$  la salida única.

La función de activación puede tomar diferentes formas: lineal, escalón, rampa, tangente o sigmoide, ésta última es la empleada en este trabajo y su ecuación viene dada por la expresión (AII.9):

$$f(x) = \frac{x}{1 + x^2} \quad (\text{AII.9})$$

La arquitectura se refiere a la configuración de las neuronas, es decir, a la distribución de las mismas, así como a la forma de realizar la interconexión entre ellas. Las neuronas se distribuyen en capas (en serie) y dentro de cada capa las neuronas se colocan en paralelo. En este trabajo, se ha empleado una red de 2 capas con 12 neuronas en la capa de entrada y una en la de salida, según se indica en la Figura II.39.

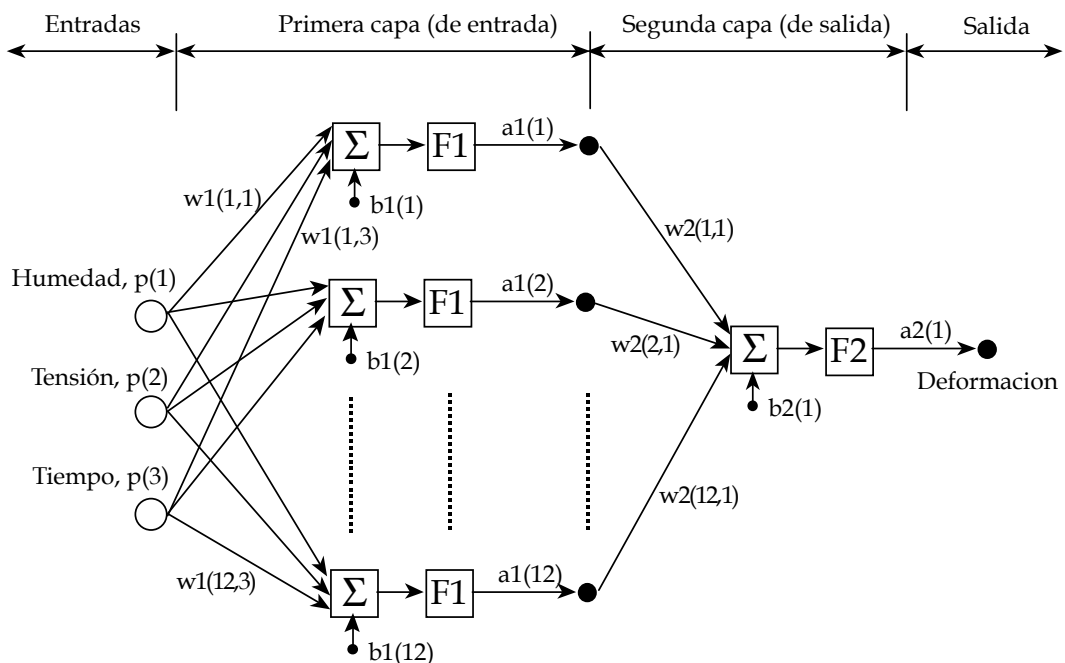


Figura II.39. Arquitectura de la red empleada en este estudio

Usando los datos disponibles, una ANN “aprende” las relaciones esenciales entre entradas y salidas dadas por el almacenamiento de la información en una distribución de pesos de conexión. Un algoritmo de aprendizaje proporciona las reglas o ecuaciones dinámicas que cambian la distribución de los pesos. Una vez aprendida la relación fundamental entre entradas y salidas, la red neuronal debe, entonces, ser capaz de producir salidas razonables para entradas desconocidas. Este proceso se denomina generalización.

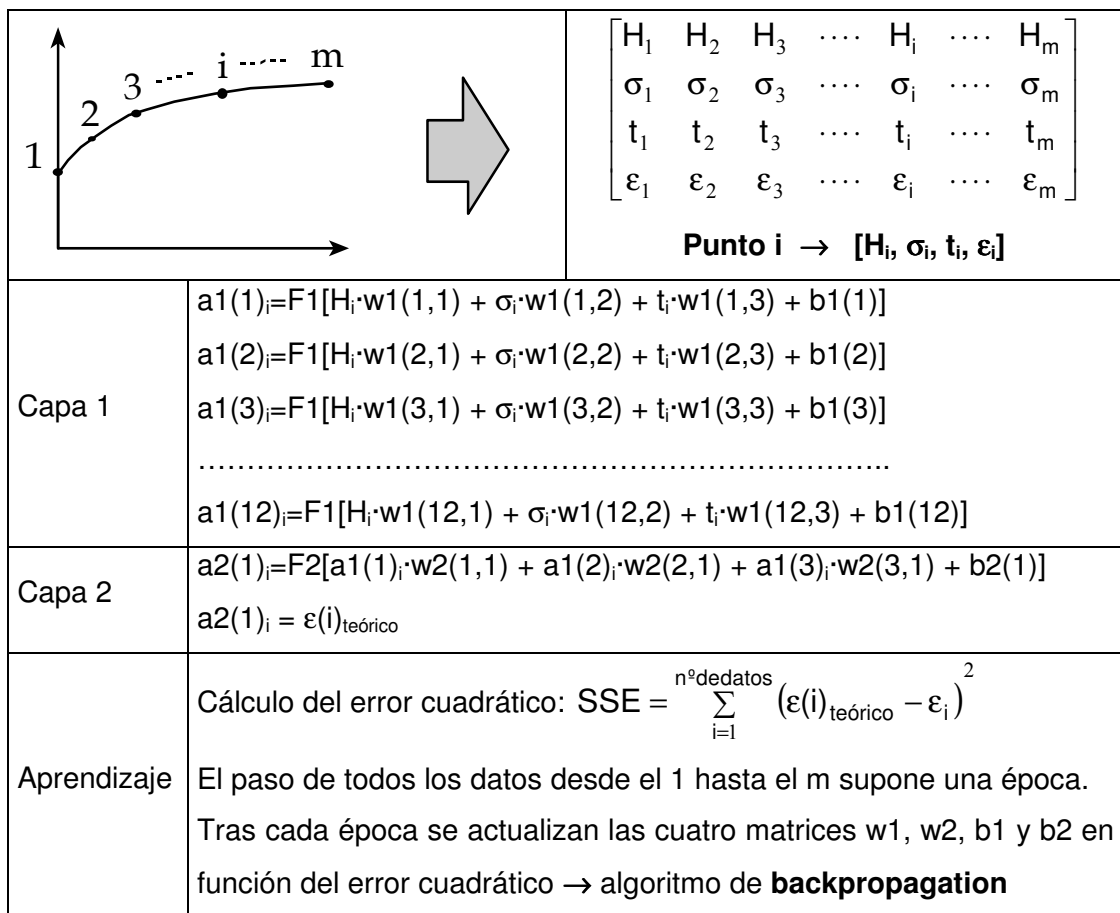
El algoritmo de aprendizaje empleado en este trabajo por las ANN es el de backpropagation. La base del aprendizaje que emplea el backpropagation es bastante simple, puesto que, en cada presentación de un conjunto de entrenamiento se conoce la diferencia entre la salida deseada y la realmente conseguida, pudiéndose calcular el valor del error cuadrático cometido. El objetivo es minimizar dicho error. Para ello, se han de modificar los pesos de cada uno de los elementos de dicha capa en el sentido de disminución de éste, lo cual se consigue modificándolos en la dirección de su derivada (gradiente).

El problema que existe para las capas que no son de salida, donde no se conoce la salida deseada de los elementos de dicha capa, se resuelve estimando el valor que hubiera tenido la salida deseada en función de los errores cometidos en la capa posterior, es decir el ajuste de los pesos de una capa se realiza en función de la variación del error de la capa posterior (propagación del gradiente del error). Esto se realiza de forma iterativa para cada una de las capas empezando por el final.

Para el desarrollo de las redes neuronales se ha utilizado el módulo “Neural Network Toolbox” para Matlab [158].

Los datos obtenidos en los ensayos serán normalizados y se dispondrán en dos matrices, la de datos de entrada, [P], de dimensiones  $(3 \times m)$  formada por  $m$  vectores de dimensión  $(3 \times 1)$ , y la de datos de salida, [T], de dimensiones  $(1 \times m)$ , siendo “ $m$ ” el  $n^{\circ}$  de datos.

Una vez definidos los elementos de proceso y la arquitectura, se comienza el proceso de entrenamiento según se indica en el esquema de la Figura II.40.



**Figura II.40. Proceso de aprendizaje**

En la misma, se ha representado la iteración “i” realizada por el algoritmo; el proceso repetido para todos los datos se denomina “época”. Al final de cada época los parámetros, w(i,j) y b(i) variarán en función de la suma del error cuadrático acumulado a lo largo de la totalidad de las iteraciones (SSE), es decir, tantas como datos se dispone para entrenar la red.

La red desarrollada realizó 4604 épocas hasta conseguir que la suma del error cuadrático estuviese por debajo de 0.1, valor fijado al diseñar la red.

Una vez definidas las matrices de pesos definitivas se podrán generalizar los datos para entradas de las que se desconoce su correspondiente salida. Es decir, se podrá modelizar el comportamiento (obtener la deformación) del material en estudio introduciendo en la red las variables de entrada (H, σ, y t).



Los datos empleados para el entrenamiento de la ANN son los que se reflejan en la Tabla II.6.

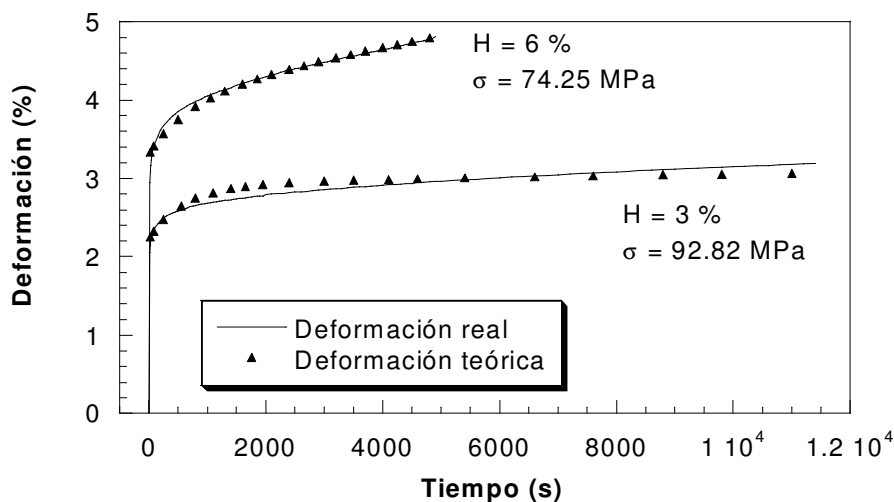
**Tabla II.6.** Datos empleados en el entrenamiento

Humedad (%)	Tensión (MPa)		
0	173.26	160.89	148.51
1	148.51	137.50	123.76
2	111.38	105.20	---
3	99.01	89.11	85.39
6	77.21	66.83	61.88

Una vez diseñada la red se trató de modelar dos situaciones no utilizadas en el entrenamiento:

- ❑ humedad = 3 % y carga = 92.82 MPa.
- ❑ humedad = 6 % y carga = 74.25 Mpa.

Los resultados obtenidos se representan en la Figura II.41.

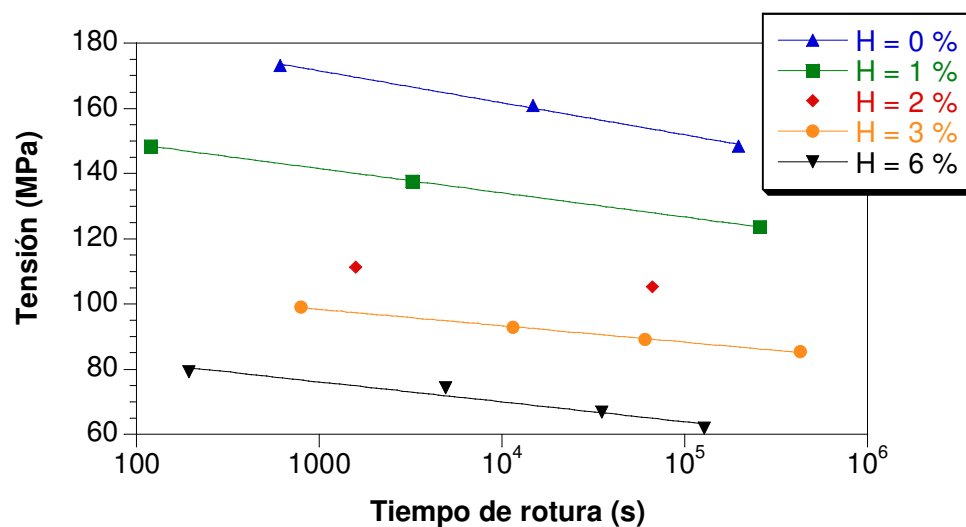


**Figura II.41.** Resultados obtenidos por la red neuronal

Como se puede observar, los resultados obtenidos por la red en todos los casos difieren menos de un 5% del valor real obtenido en los ensayos.

Al aplicar cargas altas se han podido obtener tiempos de rotura relativamente pequeños, inferiores en todos los casos a 500.000 segundos, es decir, 6 días aproximadamente, lo que permitirá relacionarlos con la tensión aplicada y con la humedad contenida en las probetas y así poder definir los diagramas de fallo a cargas elevadas.

En el gráfico de la Figura II.42 se representa cada uno de los ensayos llevados hasta rotura en función de la tensión aplicada y del tiempo medido en la rotura ( $t_R$ ).



**Figura II.42.** Ajuste logarítmico sobre las curvas  $\sigma-t_r$

Como puede observarse en el gráfico es posible realizar un ajuste de tipo logarítmico sobre los ensayos realizados con el mismo contenido de humedad. No se incluye en el ajuste los ensayos realizados para el 2% por no disponer más que de dos ensayos válidos, pero servirán los ensayos realizados con esta humedad para contrastar la bondad del modelo obtenido. Las expresiones que ajustan los resultados, así como el valor de la correlación, índice de la bondad del ajuste, se muestran a continuación.

□ H = 0%	→	$\sigma = 201.05 - 9.8343 \cdot \log(t_r);$	R = 0.998
□ H = 1%	→	$\sigma = 163.78 - 7.4162 \cdot \log(t_r);$	R = 0.999
□ H = 3%	→	$\sigma = 113.36 - 5.0114 \cdot \log(t_r);$	R = 0.999
□ H = 6%	→	$\sigma = 91.95 - 5.2787 \cdot \log(t_r);$	R = 0.968

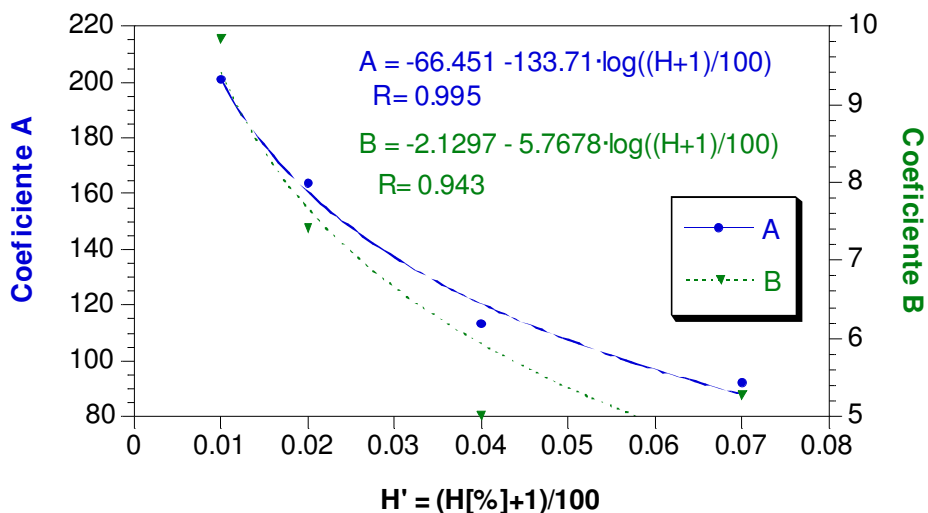
Es decir, se pueden relacionar la tensión y el tiempo de rotura mediante una expresión de la forma:

$$\sigma = A - B \cdot \log(t_r) \quad (\text{AII.10})$$

Si se consigue incluir la humedad en la anterior expresión, se tendrían las tres variables en estudio relacionadas entre sí. Para ello, se busca relacionar los coeficientes A y B con el contenido de humedad, dado que se observa que ambos disminuyen logarítmicamente con el aumento de la humedad. Para buscar la relación que ligue los coeficientes a la humedad, ésta se expresará como H', siendo:

$$H' = \frac{\%(\quad) + 1}{10} \quad (\text{AII.11})$$

Así se evita el problema que se plantea en el caso de que el contenido de humedad sea 0%. En el gráfico de la Figura II.43, se muestra la evolución de ambos coeficientes con la variación del contenido de la variable H'.



**Figura II.43.** Coeficientes A y B en función de H'

Sustituyendo los valores hallados para A y B en la expresión (AII.10) se obtiene:

$$\sigma = 66.451 + 133.7 \log \left( \frac{H+1}{100} \right) - 2 \left( 1297 + 5.7678 \log \left( \frac{H+1}{100} \right) \right) \log t \quad (\text{All.12})$$

Generalmente, lo que interesa es conocer el tiempo de fallo de un componente en función del nivel tensional aplicado y de su contenido de humedad, por lo que invirtiendo la expresión se obtiene:

$$t_r = 10^{\frac{A H(\%) + \sigma}{B H(\%)}} \quad (\text{All.13})$$

Si se representan estas curvas teóricas sobre un diagrama  $\sigma$ -log(tr) para diferentes contenidos de humedad se tienen los diagramas de fallo para cada una de esas humedades. En el gráfico de la Figura II.44 aparecen las curvas teóricas que se pueden comparar con los datos reales obtenidos en los ensayos. Se observa una buena correlación entre el modelo planteado y los ensayos reales, incluso para el caso del 2% no empleado en la definición del modelo.

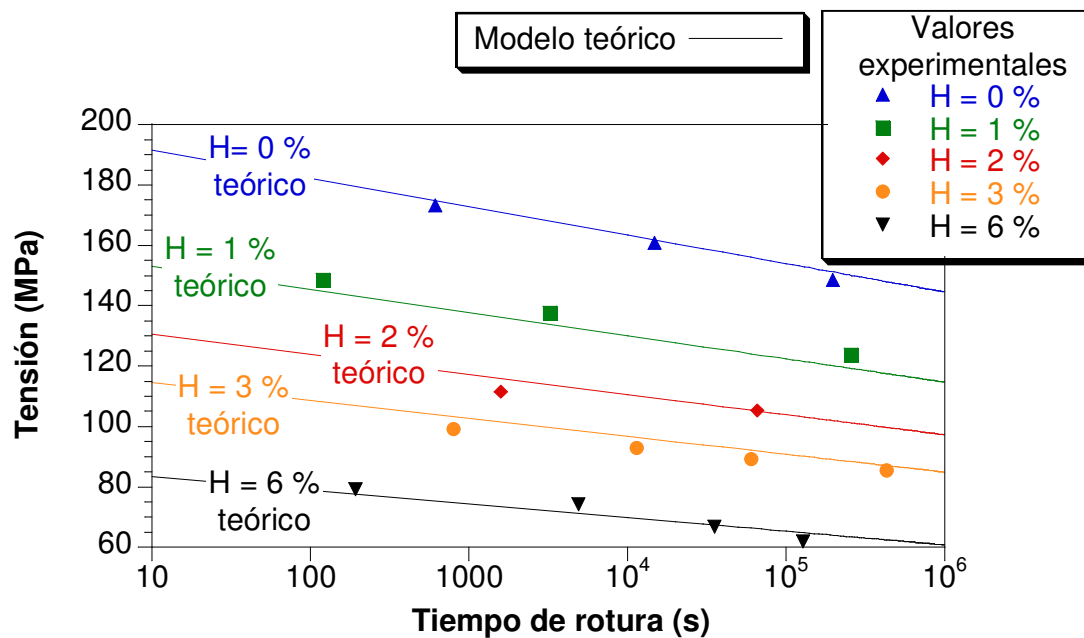


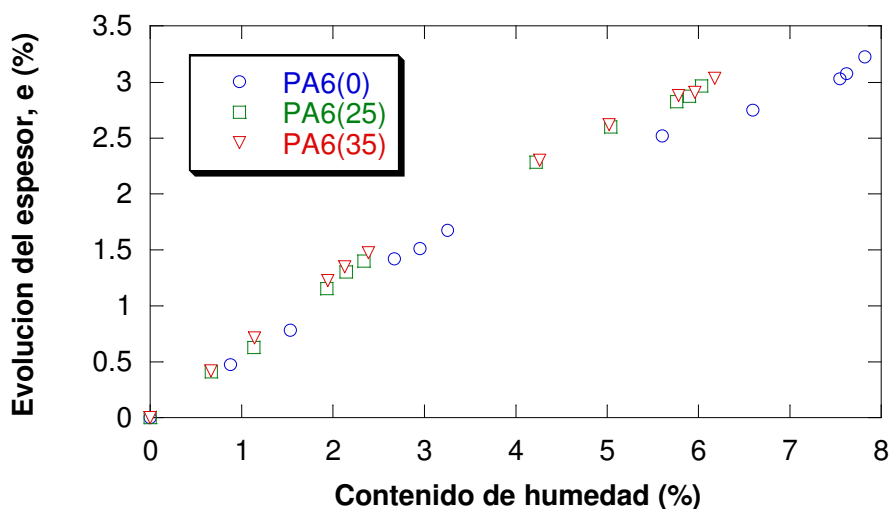
Figura II.44. Comparación entre el diagrama de fallo teórico y los datos experimentales reales

#### **4. Influencia del contenido de humedad en la estabilidad dimensional de la poliamida 6**

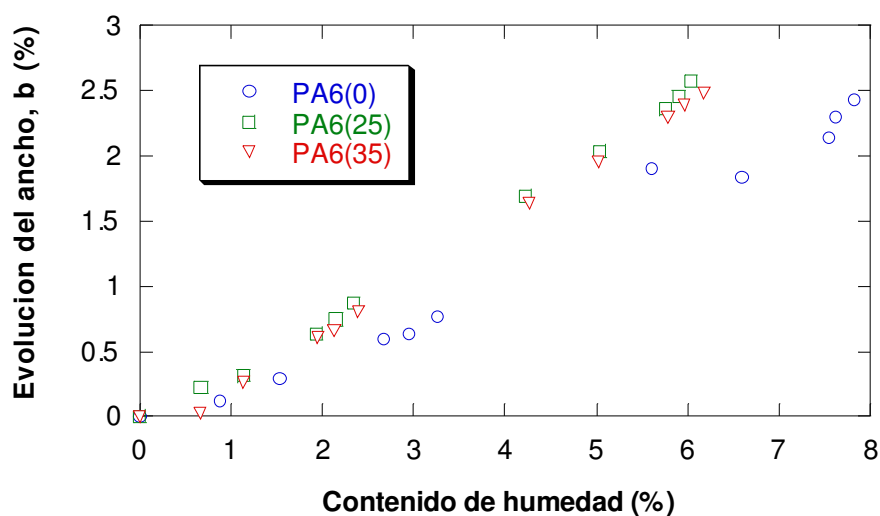
Para el estudio de la estabilidad dimensional de la PA se empleó la misma probeta que la empleada en los ensayos mecánicos. Se realizó la comprobación de las dimensiones perpendiculares al eje longitudinal de la fibra, es decir que se analizó la variación de la sección transversal de la probeta en función del contenido de humedad poseído.

Para ello, se emplearon probetas de PA 6 y PA 6 reforzada con 25 y 35 % de fibra corta de vidrio secadas durante un mes, aproximadamente, en estufa a 100 °C. Las probetas se metieron en baño de agua a 80 °C y, a medida que transcurría el tiempo, se controlaba la cantidad de agua absorbida así como la variación de las dimensiones del espesor ( $e = 4$  mm) y del ancho ( $b = 10$  mm) por medio de un micrómetro de 0.001 mm de resolución.

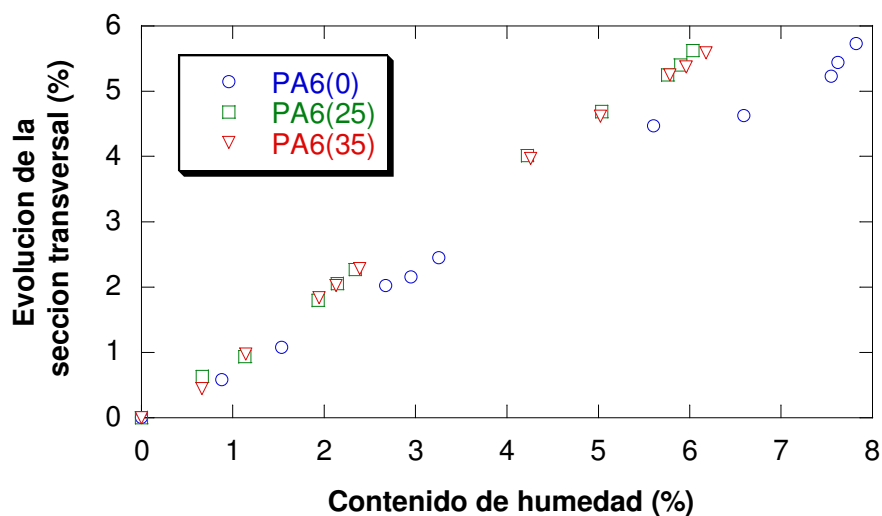
En el gráfico de la Figura II.45 se muestra la evolución de la variación del espesor, en valor porcentual, en función del contenido de humedad, así como del contenido de fibra de la probeta. El gráfico de la Figura II.46 representa lo mismo que el anterior pero para la dimensión del ancho. Y, por último, la Figura II.47 representa la evolución de la variación del área transversal de la probeta.



**Figura II.45.** *Evolución de la variación del espesor en función de la humedad*



**Figura II.46.** Evolución de la variación del ancho en función de la humedad



**Figura II.47.** Evolución de la variación de la sección transversal en función de la humedad

De la observación de las tres curvas anteriores, se comprueba que la evolución de los tres parámetros controlados es prácticamente lineal frente al contenido de humedad, alcanzando, en saturación los valores de 3, 2.5 y 5.5 %, aproximadamente, el crecimiento del espesor, del ancho y de la sección transversal, respectivamente. Como se comprueba la curva correspondiente a la

PA6(0) se mantiene siempre por debajo de las reforzadas, entre las que apenas hay diferencias, debido a que para una humedad concreta la PA reforzada tendrá una matriz con un mayor contenido de humedad, ya que la fibra no absorbe agua, y por tanto, más deformada.

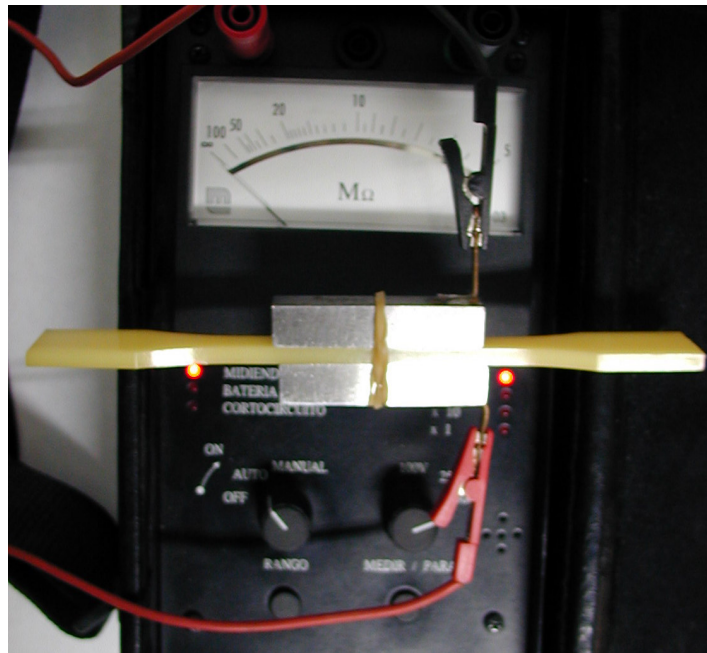
## **5. Influencia del contenido de humedad en el comportamiento eléctrico de la poliamida 6**

Una de las razones para el uso de la PA en componentes de sujeción de ferrocarril es su naturaleza de aislante eléctrico. El hecho de que la poliamida absorba agua en cantidades variables en función de las condiciones ambientales, puede modificar la resistencia eléctrica del material. Para determinar cuál puede ser la influencia del contenido de humedad en la resistencia eléctrica, se diseñó un ensayo, aprovechando las probetas normalizadas empleadas a lo largo de todo el estudio.

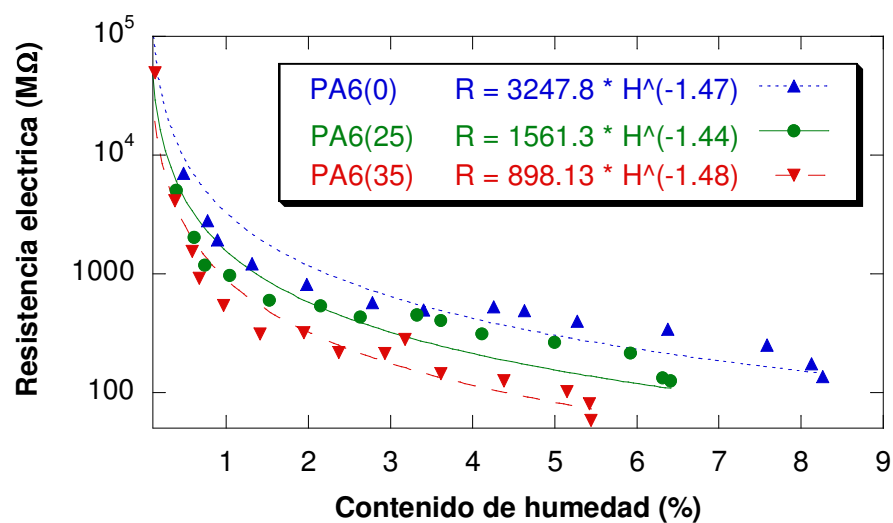
El ensayo consistió en la aplicación de una tensión continua de 500 V a través del espesor de la probeta por medio de unos electrodos de sección  $55 \times 10 \text{ mm}^2$  y medida de la resistencia por medio de un ohmnímetro. Los electrodos se eligieron de esta dimensión para que su anchura coincidiese con la de la probeta y, de esta manera, facilitar el montaje del dispositivo de ensayo. Los electrodos se colocaron en el centro del fuste de la probeta de la forma indicada en la Figura II.48.

Se realizaron ensayos sobre tres tipos de materiales, PA6 sin refuerzo y reforzada con un 25 y un 35 % de fibra corta de vidrio, para poder comprobar, además de la influencia del contenido de humedad, el del contenido de refuerzo en el parámetro en estudio.

Los resultados obtenidos, se reflejan en el gráfico de la Figura II.49 donde se representa la evolución de la resistencia eléctrica en escala logarítmica frente al contenido de humedad adquirido en un baño de agua a 40 °C.



**Figura II.48.** Dispositivo empleado para la medición de la resistencia eléctrica



**Figura II.49.** Influencia de la humedad en la resistencia eléctrica de la PA

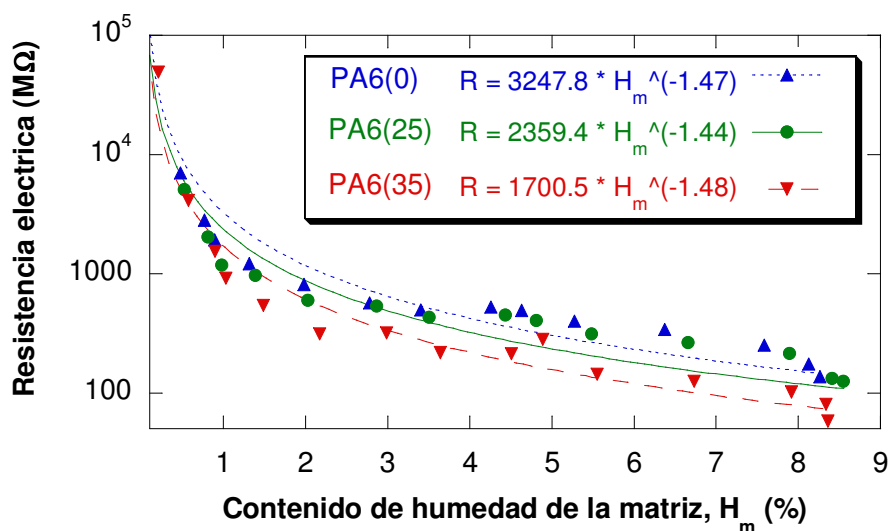
Como se puede observar en el gráfico la PA, independientemente del refuerzo, pierde propiedades aislantes al adquirir humedad. La resistencia de los tres materiales secos no pudo ser medida por superar este valor el rango de medida del equipo empleado ( $10^5$  MΩ). Como también se puede observar la evolución de la



resistencia eléctrica frente al contenido de humedad se puede ajustar por una ley de tipo potencial con muy buena correlación en los tres materiales.

Esta variación entre las tres cantidades de refuerzo, en parte, es debida a que para un mismo contenido de humedad del material, mientras más refuerzo contenga, el contenido de humedad en la matriz es mayor, ya que la fibra no absorbe agua.

Para analizar la posible influencia que pudiera tener la interfase en el comportamiento eléctrico del material, en el gráfico de la Figura II.50 se representa la evolución de la resistencia eléctrica frente al contenido de humedad de la matriz de poliamida.



**Figura II.50.** *Influencia de la humedad de la matriz,  $H_m$ , de PA6 en la resistencia eléctrica del material*

Como se puede observar, la tendencia es similar a la anterior (Figura II.49), es decir, que el material se hace menos aislante para un mismo contenido de humedad de la matriz a medida que se incrementa el refuerzo, lo que confirma la teoría de que la interfase es un camino preferencial para el avance del agua que absorbe el material.

## ANEXO III

### **DETERMINACIÓN DEL FALLO POR FATIGA EN BASE A CONSIDERACIONES ENERGÉTICAS**

#### **1. INTRODUCCIÓN**

Para la caracterización en fatiga, se empleó la técnica del ensayo LOCATI, que ya ha sido empleado en diferentes capítulos de la presente Tesis. 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.

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 con una velocidad crítica 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.

Para contrastar los resultados obtenidos es la búsqueda de este escalón crítico a partir de parámetros energéticos, se compararán con los obtenidos de la deformación [106] ó de la variación de las deformaciones frente al nº 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 ( $\epsilon_{m\acute{a}x}$ ), como en el caso de las pruebas realizadas sobre probeta y recogidas en el Anexo II.

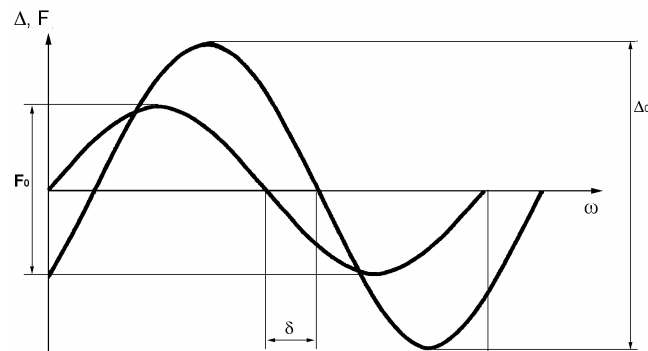
En este anexo, se presenta un modelo para la determinación del fallo por fatiga, analizando el parámetro que relaciona a las energías disipadas y almacenadas por ciclo ( $E_d/E_a$ ) a partir de los resultados obtenidos en el ensayo de caracterización acelerada empleando el método LOCATI.

Por tratarse de materiales con matriz termoplástica, la temperatura será otro parámetro importante a controlar y del cual obtener información en el momento de producirse el fallo.

## **2. ANÁLISIS TEÓRICO PARA NIVEL MEDIO IGUAL A CERO**

En el estudio que nos ocupa, la terminología clásica de tensiones y deformaciones será sustituida por la de fuerzas y desplazamientos debido a la especial naturaleza de los componentes analizados y a la dificultad que entrañaría el obtener los parámetros clásicos.

En la Figura III.1, se representa la evolución de las variables dinámicas que intervienen en el proceso de fatiga.



**Figura III.1.- Variables dinámicas**

El esfuerzo aplicado sobre el componente es una fuerza de variación sinusoidal con el tiempo como se indica en la Ecuación (AIII.1), donde  $F_0$  es la amplitud y  $\omega$  es la frecuencia expresada en radianes por segundo. La respuesta ofrecida por el componente será de la forma mostrada en la Ecuación (AIII.2), donde  $\Delta_0$  es la amplitud del desplazamiento y  $\delta$  es el ángulo de desfase entre las dos variables.

$$F = F_0 \text{sen}(\omega t) = F_0 e^{i\omega t} \quad (\text{AIII.1})$$

$$\Delta = \Delta_0 \text{sen}(\omega t - \delta) = \Delta_0 e^{i(\omega t - \delta)} \quad (\text{AIII.2})$$

Si el componente estudiado hubiese sido perfectamente elástico, las señales de fuerza y desplazamiento estarían en fase, mientras que si, por el contrario, se hubiera tratado de un componente viscoso, el desfase entre las dos señales sería de  $90^\circ$ . En realidad, las placas al igual que el resto de los materiales poliméricos reales, no se encuentran en ninguno de los dos extremos contemplados, sino que exhiben un comportamiento viscoelástico, es decir, que la respuesta obtenida en desplazamiento podrá desdoblarse en dos componentes, una elástica, en fase con la fuerza aplicada, y otra viscosa, desfasada  $90^\circ$  respecto al esfuerzo externo.

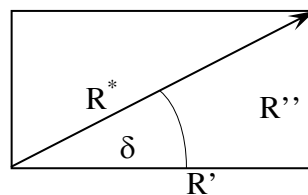
Para poder estudiar estas dos componentes por separado, se define un nuevo parámetro que relaciona las dos señales estudiadas, la rigidez compleja, como se observa en la Ecuación (AIII.3).

$$R^* = \frac{F}{\Delta} = R' + R''i \quad (\text{AIII.3})$$

Donde  $R'$  es la rigidez elástica o de almacenamiento (parte real de  $R^*$ ) y  $R''$  es la rigidez viscosa o de pérdidas (parte imaginaria de  $R^*$ ), las cuales pueden ser obtenidas a partir de las Ecuaciones (AIII.4) y (AIII.5), respectivamente. En la Figura III.2, se representa la relación entre las propiedades dinamo-mecánicas vistas sobre el plano de los números complejos [151 y 154].

$$R' = \frac{F_0}{\Delta_0} \cdot \cos \delta \quad (\text{AIII.4})$$

$$R'' = \frac{F_0}{\Delta_0} \cdot \text{sen} \delta \quad (\text{AIII.5})$$



**Figura III.2.-** *Relación entre las propiedades dinamo-mecánicas*

Por último, se define el parámetro factor de pérdida ó tangente del ángulo de desfase, Ecuación (AIII.6), que servirá como medida de la amortiguación del componente con comportamiento viscoelástico, y que relaciona la rigidez de pérdida con la de almacenamiento.

$$\tan \delta = \frac{R''}{R'} \quad (\text{AIII.6})$$

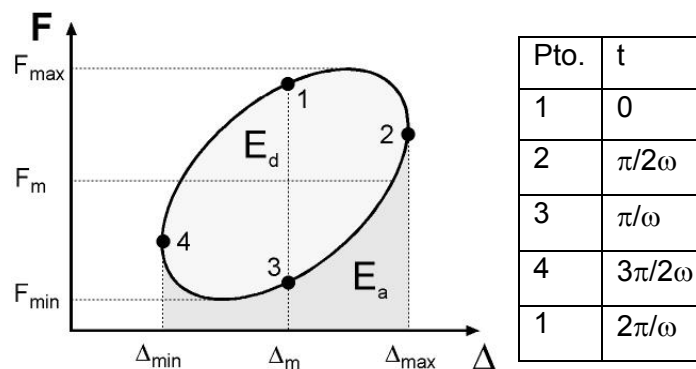
### **3. ESTUDIO TEÓRICO PARA EL CASO DE NIVEL MEDIO DISTINTO DE CERO**

La rigidez de almacenamiento ( $R'$ ) es proporcional a la energía máxima almacenada ( $E_a$ ) durante un ciclo de esfuerzo, mientras que la rigidez de pérdida ( $R''$ ) es proporcional a la energía disipada ( $E_d$ ) durante ese mismo ciclo [159], como puede verse en las expresiones (AIII.7) y (AIII.8).

$$E_a = k' \cdot R' \quad (\text{AIII.7})$$

$$E_d = k'' \cdot R'' \quad (\text{AIII.8})$$

La energía disipada y almacenada por ciclo, se representa en la Figura III.3 como el área encerrada por el bucle de histéresis y el área bajo el propio bucle, respectivamente, en un diagrama fuerza-desplazamiento.



**Figura III.3.- Energía almacenada y disipada**

Estas nuevas relaciones proporcionan un parámetro proporcional a la tangente del ángulo de desfase, de acuerdo con la expresión (AIII.9).

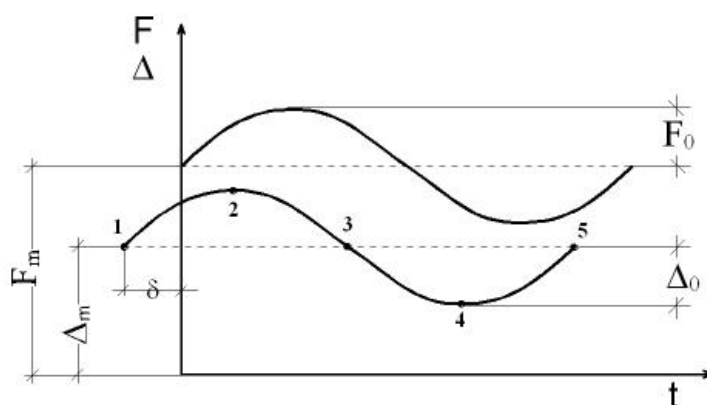
$$\tan \delta = \frac{R''}{R'} = k \frac{E_d}{E_a} \quad (\text{AIII.9})$$

Estando relacionados de esta forma el ángulo de desfase y el cociente entre energías disipada y almacenada, se podría realizar un análisis similar al DMA [160-163], pero sustituyendo la temperatura aportada por una fuente externa por la generada internamente por el componente por efecto de la carga cíclica [164 y 165].

Al realizar un ensayo de fatiga sobre un componente de naturaleza polimérica, se consigue incrementar su temperatura por efecto del rozamiento entre las cadenas. Analizando la evolución del ángulo de desfase frente a la temperatura, éste, al igual que ocurre en un análisis DMA, presentará un máximo al alcanzarse internamente

la  $T_g$  del material. Y como se desprende de la expresión (AIII.9), podría realizarse un análisis paralelo, si en lugar de emplear la tangente del ángulo de desfase se emplea el cociente  $E_d/E_a$ , ya que son proporcionales.

Para determinar la relación entre la tangente del ángulo de desfase y el cociente de energías se parte de la situación real, donde los ensayos LOCATI realizados para la caracterización en fatiga de la placa A2 se realizaron en control de carga, aplicando un esfuerzo sinusoidal con un nivel medio de carga diferente a 0, obteniéndose por tanto, una respuesta similar en desplazamiento, también de valor medio diferente a 0. En la Figura III.4, se representa, esquemáticamente, la evolución de la carga y el desplazamiento a lo largo del tiempo de uno de los ciclos de carga, donde  $F_m$  y  $\Delta_m$  representan los valores medios y  $F_0$  y  $\Delta_0$  las amplitudes de carga y desplazamiento respectivamente.



**Figura III.4.- Desfase entre carga y desplazamiento con nivel medio diferente a 0**

Las ecuaciones (AIII.10) y (AIII.11) representan la evolución de la carga y el desplazamiento a lo largo del tiempo [166]:

$$F = F_m + F_0 \text{sen} \omega t \quad (\text{AIII.10})$$

$$\Delta = \Delta_m + \Delta_0 \text{sen}(\omega t - \delta) \quad (\text{AIII.11})$$

desarrollando la expresión (AIII.11):

$$\Delta = \Delta_m + \Delta_0 (\cos \delta \operatorname{sen} \omega t - \operatorname{sen} \delta \cos \omega t) \quad (\text{AIII.12})$$

Se podría obtener la energía disponible a lo largo de un ciclo a partir de la siguiente expresión:

$$dE = Fd\Delta = F \frac{d\Delta}{dt} dt = F\dot{\Delta} dt \quad (\text{AIII.13})$$

donde:

$$\dot{\Delta} = \frac{d\Delta}{dt} = \Delta_0 \omega (\cos \delta \cos \omega t + \operatorname{sen} \delta \operatorname{sen} \omega t) \quad (\text{AIII.14})$$

y por tanto, (AIII.14) se podría expresar como:

$$dE = \Delta_0 \omega (F_m + F_0 \operatorname{sen} \omega t) (\cos \delta \cos \omega t + \operatorname{sen} \delta \operatorname{sen} \omega t) dt \quad (\text{AIII.15})$$

La energía disponible dentro de un ciclo entre dos instantes de tiempo  $t_1$  y  $t_2$  se obtiene integrando (AIII.15) entre dicho intervalo:

$$E_{t_1/t_2} = \int_{t_1}^{t_2} dE \quad (\text{AIII.16})$$

$$E_{t_1/t_2} = \Delta_0 \omega \left( \begin{array}{l} F_m \left( \cos \delta \int_{t_1}^{t_2} \cos \omega t dt + \operatorname{sen} \delta \int_{t_1}^{t_2} \operatorname{sen} \omega t dt \right) + \\ F_0 \left( \cos \delta \int_{t_1}^{t_2} \operatorname{sen} \omega t \cos \omega t dt + \operatorname{sen} \delta \int_{t_1}^{t_2} \operatorname{sen}^2 \omega t dt \right) \end{array} \right) \quad (\text{AIII.17})$$

$$E_{t_1/t_2} = \Delta_0 \left( \begin{array}{l} F_m \left( \cos \delta \operatorname{sen} \omega t \Big|_{t_1}^{t_2} - \operatorname{sen} \delta \cos \omega t \Big|_{t_1}^{t_2} \right) + \\ \frac{F_0}{2} \left( \cos \delta \operatorname{sen}^2 \omega t \Big|_{t_1}^{t_2} + \omega \operatorname{sen} \delta \left( t - \frac{\operatorname{sen} 2\omega t}{2\omega} \right) \Big|_{t_1}^{t_2} \right) \end{array} \right) \quad (\text{AIII.18})$$

Esta energía total puede descomponerse, tal como se ve en la Figura III.3, en energía disipada, representada por el bucle de histéresis y energía almacenada recuperada por la placa tras finalizar el ciclo.

La energía disipada por ciclo se puede obtener como el área encerrada por el bucle (Figura III.3), es decir, la integral de (AIII.15) en un período completo.



$$E_d = \oint dE = \int_0^{2\pi} dE = \pi F_0 \Delta_0 \text{sen} \delta \quad (\text{AIII.19})$$

Mientras que la energía almacenada correspondería al área encerrada bajo el bucle, o lo que es lo mismo, la integral cambiada de signo entre los puntos 2 y 4 de la Figura III.3 (AIII.20).

$$E_a = (-1) \int_{\frac{\pi}{2\omega}}^{\frac{3\pi}{2\omega}} dE = 2F_m \Delta_0 \cos \delta - \frac{\pi}{2} F_0 \Delta_0 \text{sen} \delta \quad (\text{AIII.20})$$

Dividiendo la ecuación (III.19) por la (III.20) se llega a una expresión que correlaciona el ángulo de desfase con el cociente entre la energía disipada y la almacenada,  $E_{d/a}$  (AIII.21) [164].

$$\text{tg} \delta = \frac{4F_m \frac{E_d}{E_a}}{\pi F_0 \left( 2 + \frac{E_d}{E_a} \right)} = \frac{4F_m E_{d/a}}{\pi F_0 (2 + E_{d/a})} \quad (\text{III.21})$$

#### **4. DESARROLLO EXPERIMENTAL DEL MODELO**

Para poner en práctica este procedimiento, se empleó la caracterización acelerada en fatiga por la técnica del ensayo LOCATI sobre placas A2 con una humedad próxima al 1.5 %. Con este ensayo se pretende determinar el valor de la carga que provoca el fallo por fatiga con un único ensayo.

Se aplicaron bloques de 40.000 ciclos de onda senoidales a una frecuencia de 5 Hz, entre valores de carga de compresión iniciales de 5 y 45 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 III.1.

El dispositivo empleado para la realización del ensayo es el descrito en la Especificación técnica de la placa Acodada A2 [78].

**Tabla III.1.- Parámetros empleados en el ensayo LOCATI**

nº	N (ciclos)	F <sub>máx</sub> (kN)	F <sub>min</sub> (kN)	F <sub>m</sub> (kN)	F <sub>0</sub> (kN)
1	[1 - 40.000]	45	5	25	20
2	[40.000 - 80.000]	47	5	26	21
3	[80.000 - 120.000]	49	5	27	22
4	[120.000 - 160.000]	51	5	28	23
5	[160.000 - 200.000]	53	5	29	24
6	[200.000 - 240.000]	55	5	30	25
7	[240.000 - 280.000]	57	5	31	26
8	[280.000 - 320.000]	59	5	32	27

En los ensayos LOCATI realizados se registraron datos de ondas completas cada 1000 ciclos, almacenándose 50 puntos por onda de carga y de desplazamiento relativo entre el simulador del patín del carril y el asiento de la placa. También, se registró, de forma continua, la evolución de la temperatura alcanzada por la placa por medio de un termopar colocado entre dos de los nervios por la parte interior de la misma.

A un cierto nivel de carga, aparece un escalón ó nivel crítico a partir del cual los valores de la deformación pierden su estabilidad y crecen con una velocidad crítica que precede a la rotura de la placa. De este modo, es posible establecer un nivel de variación de fuerza crítico equivalente al valor de la resistencia a la fatiga de la pieza.

En el gráfico de la Figura III.5, se representa la evolución de los parámetros medidos a lo largo del ensayo LOCATI, comprobándose que, a partir de un cierto nivel de carga, los parámetros no se estabilizan dentro del propio escalón, creciendo hasta provocar el fallo del componente por fatiga. En este mismo diagrama, se aprecia la dificultad existente a la hora de definir cuál de todos los niveles corresponde al crítico.

Para precisar la localización de este escalón crítico, se procede al cálculo de las energías disipadas y almacenadas por ciclo en base a la determinación de las áreas del bucle de histéresis en un diagrama fuerza-desplazamiento y al área encerrada bajo este bucle, respectivamente, tal como se indica en la Figura III.3.

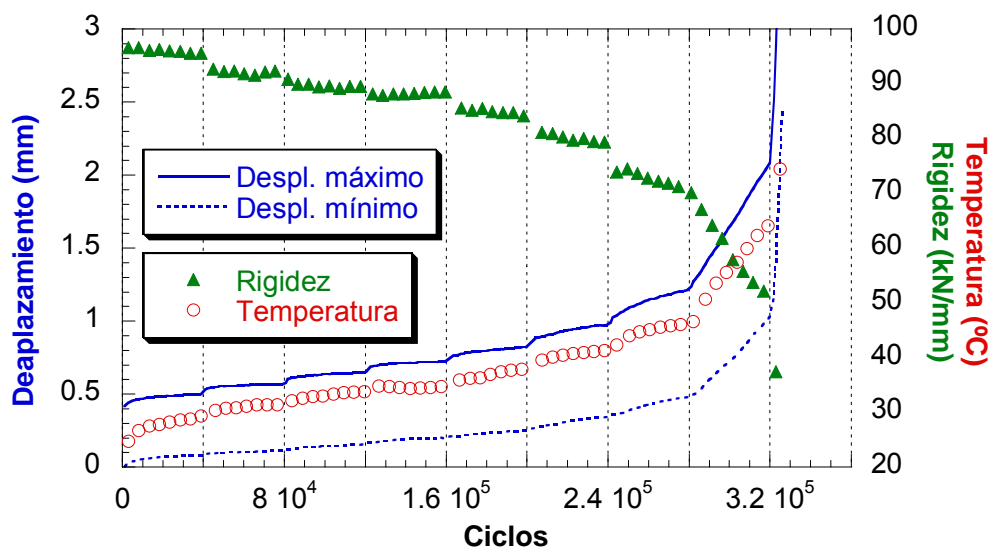


Figura III.5.- Ensayo LOCATI (Desplazamientos, rigidez y  $T^a$  frente al  $n^\circ$  de ciclos)

Antes de continuar con la metodología, se comprueba la correlación entre la tangente del ángulo de desfase medida directamente de las ondas de carga y desplazamiento y la estimada a partir de la expresión (AIII.21). En la Figura III.6, se representa la variable medida y estimada, comprobando que no coinciden, pero que la forma es semejante, es decir, que los cambios significativos sobre la curva se producen para el mismo número de ciclo.

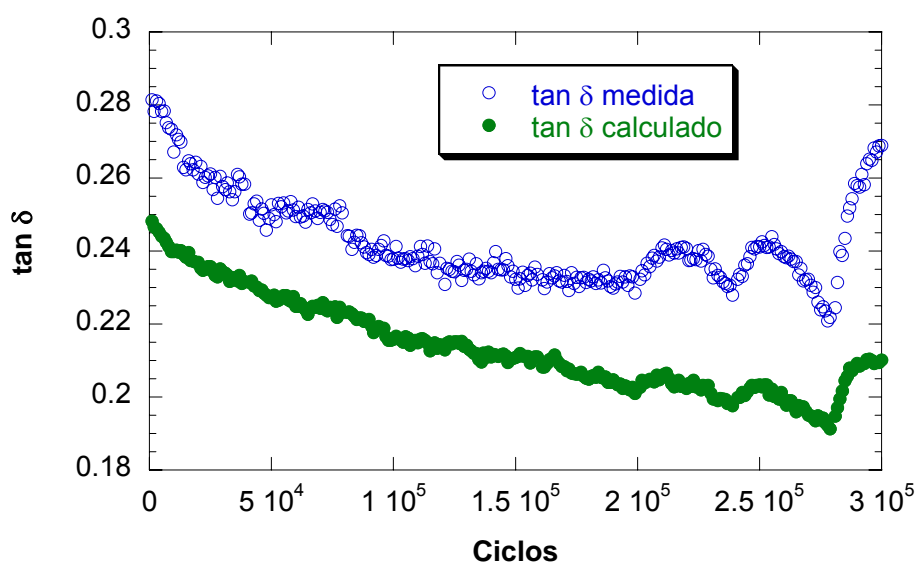
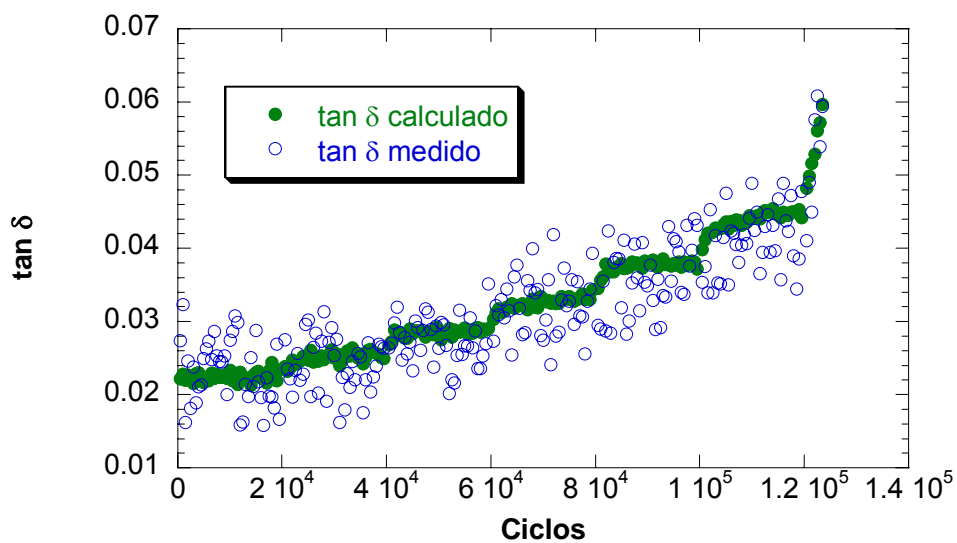


Figura III.6.- Tangente del ángulo de desfase medida y calculada para una placa

La no coincidencia de las curvas se explica desde las pérdidas de energía sufridas debido al rozamiento entre la placa A2 y el útil de ensayo, incrementadas éstas, por el efecto del clip que tiende a mantener la placa apretada contra el útil. Estas pérdidas de energía sin cuantificar, no permiten la correcta realización de un balance energético con el que poder establecer el valor de la tangente del ángulo de desfase en función del cociente entre energías.

Si se prescinde de estas pérdidas de rozamiento, como es el caso de una probeta normalizada, por ejemplo la ensayada en el apartado 3.2 del Anexo II correspondiente a una humedad similar a la de la placa (entorno al 1 %), los valores de la tangente medidos y estimados a partir de la expresión (AIII.21) coinciden plenamente como se puede observar en la Figura III.7.



**Figura III.7.-** Tangente de  $\delta$  medida y calculada para una probeta normalizada

En la Figura III.8 se representa el cociente entre la energía disipada y la almacenada ( $E_{d/a}$ ) frente a la  $T^a$ , comprobando que existe una correlación entre este parámetro y el ángulo de desfase como se demostró en la expresión (AIII.21). En esta misma figura, 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,  $T_c$ .

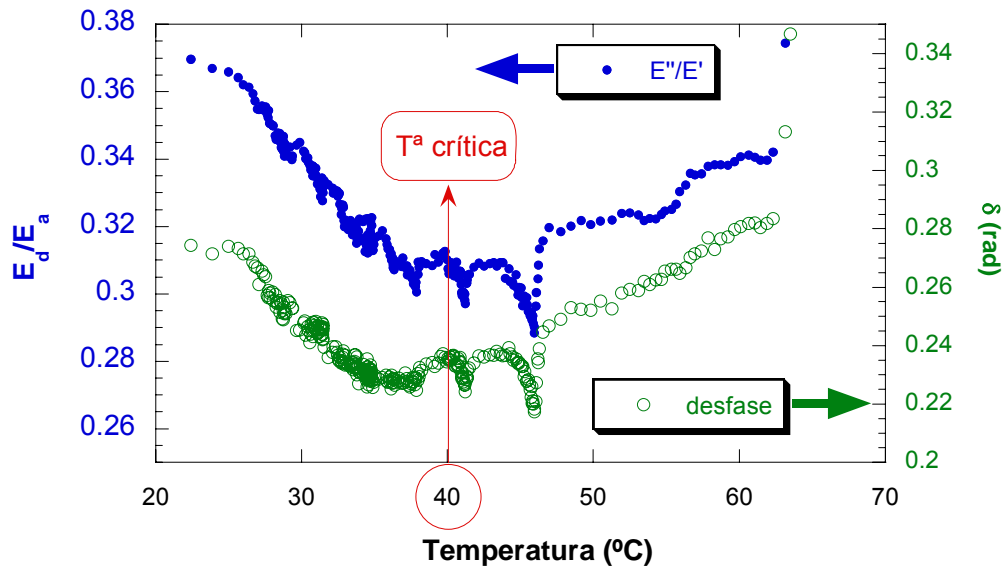


Figura III.8.- Desfase y relación de energías frente a  $T^a$ . Definición de  $T_c$

Para confirmar este valor de temperatura crítica, se realizó otro ensayo reduciendo el número de ciclos por escalón a la mitad (20.000 ciclos). Los resultados se reflejan en el gráfico de la Figura III.9 comprobándose que, en ambos casos, incluso reduciendo el tiempo de ensayo a la mitad, el valor obtenido para la temperatura crítica osciló en torno a los 40 °C.

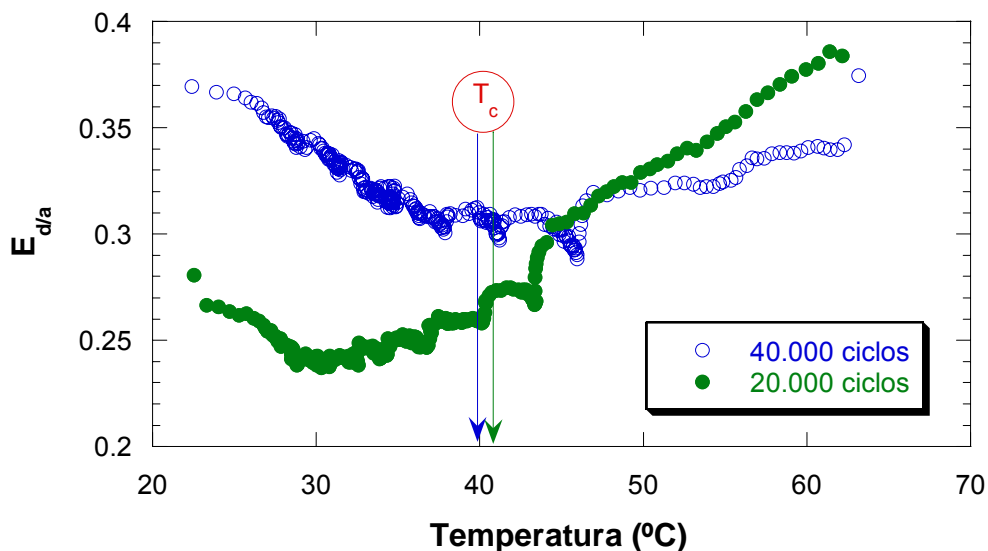
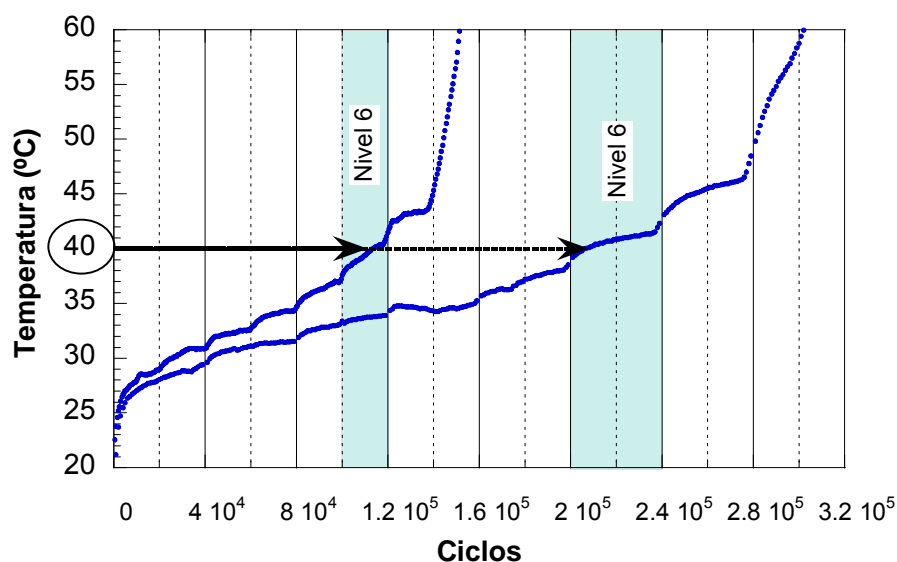


Figura III.9.- Comparativa del LOCATI a 20.000 y 40.000 ciclos

Una vez confirmada la temperatura crítica, para obtener el valor de nivel de carga crítico, se recurre al gráfico de la Figura III.10 donde se representa la temperatura frente al número de ciclos.

En la citada Figura III.10 se recogen los ensayos LOCATI realizados, uno con escalones de 40.000 ciclos y el otro con escalones de 20.000 ciclos, comprobándose que, en ambos casos, la temperatura crítica se consigue en el 6º nivel de carga, es decir, para una  $F_{max}$  de 55 kN.



**Figura III.10.- Definición del nivel crítico**

También se calculó este escalón o nivel crítico empleando el método de la derivada de la deformación máxima respecto al número de ciclos [107]. En la Figura III.11 se representa en doble eje de abscisas y de ordenadas, los dos ensayos realizados con escalones de 20.000 y 40.000 ciclos, comprobando que en ambos casos, el escalón crítico se sitúa en el sexto de los niveles de carga, ya que en este nivel la derivada de la deformación no llega a alcanzar el valor nulo.

Para contrastar estos resultados, se realizaron ensayos de fatiga monótona convencionales aplicando una carga máxima de 53, 55 y 57 kN, manteniendo en todos ellos 5 kN de carga mínima. Los resultados obtenidos se muestran en la

Figura III.12, donde se representan, en cada caso, las variables de desplazamiento máximo y temperatura alcanzada por la piezas ensayadas.

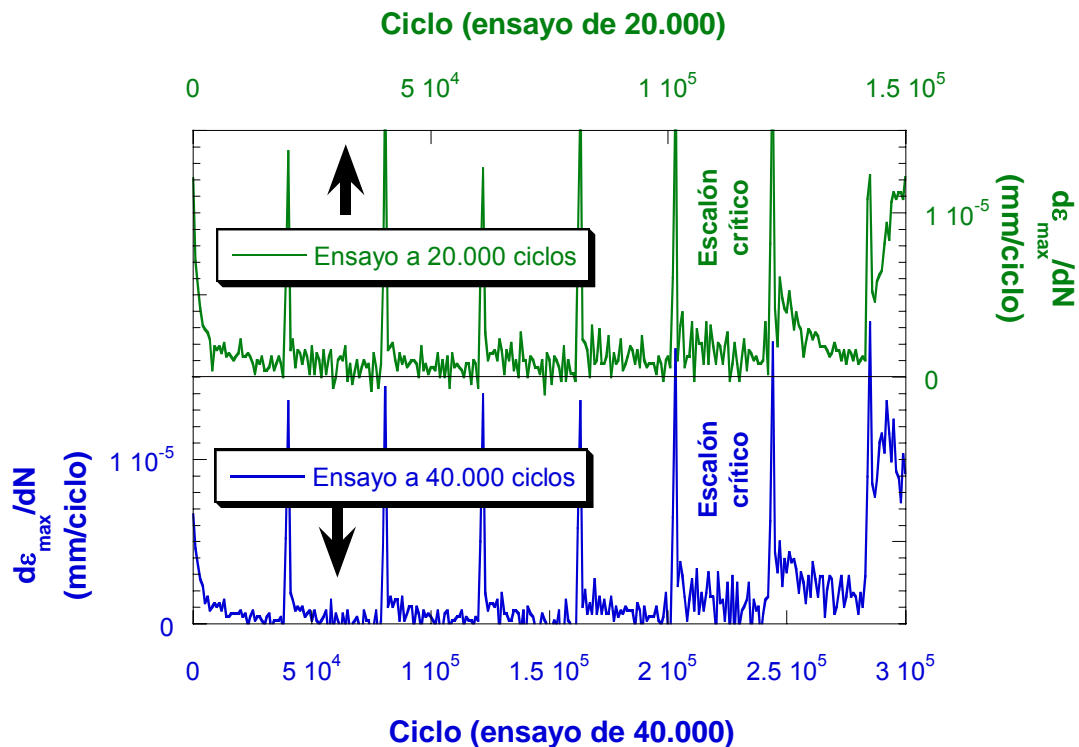


Figura III.11.- Definición del nivel crítico empleando la derivada de la  $\epsilon_{\max}$

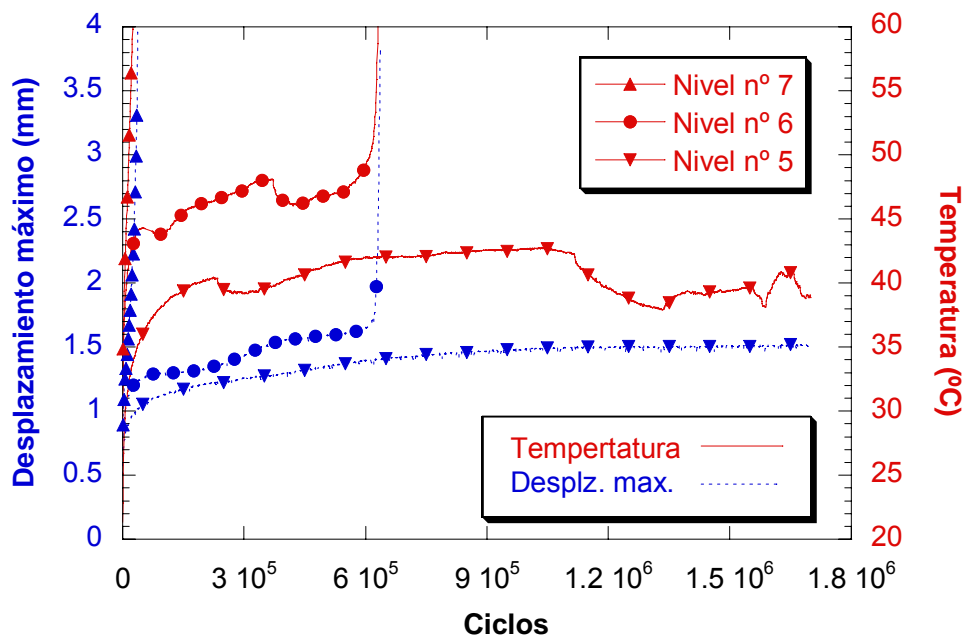


Figura III.12.- Ensayos de fatiga monótona

La placa ensayada con el nivel del escalón 5 superó  $1.7 \cdot 10^6$  ciclos sin rotura y con una temperatura sensiblemente estabilizada en torno a la  $T_c$  (40 °C). La correspondiente al escalón 6, rompe sin alcanzar los 700.000 ciclos, mientras que, la ensayada con el nivel de carga 7 soporta un número de ciclos irrelevante.

Se puede observar que, para el nivel crítico y el superior, la temperatura supera rápidamente el valor de  $T_c$  y que, al contrario de lo que sucede también a estos niveles, los valores de desplazamiento se estabilizan en el nivel 5, convirtiéndose el desplazamiento máximo en una recta prácticamente horizontal a partir del millón de ciclos.

Por tanto, se puede concluir que el límite de fatiga queda definido en un ensayo LOCATI como el escalón inmediatamente inferior al crítico, ya que en él se alcanza la temperatura crítica, y si el material consigue dicha temperatura sufre una transición que conduce a su fallo por fatiga.



## ANEXO IV

### **GRÁFICAS OBTENIDAS EN LAS PRUEBAS DE CONTROL DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE SUJECCIÓN**

## 1. CONFIGURACIÓN 3 (C3)

Todas las gráficas de comportamiento de la configuración C3 se encuentran en el ANEXO I.

## 2. CONFIGURACIÓN 4 (C4)

Todas las gráficas de comportamiento de la configuración C4 se encuentran en el ANEXO I.

## 3. CONFIGURACIÓN 7 (C7)

Todas las gráficas de comportamiento de la configuración C7 se encuentran en el ANEXO I.

## 4. CONFIGURACIÓN 10 (C10)

**Tabla IV. 1.- Componentes de la configuración nº 10**

Componente	Descripción
Placa asiento	Modelo A, 7 mm, resaltes rectangulares, Arnitel
Placa acodada	A2 (ligera), fabricante D, PA 6.6 + 35% FV
Espiga	VAPE 2-115-5, PA 6.6 + 30 % FV
Tirafondo/Tornillo	VAPE 2-115-5, galvanizado
Clip	SKL-1, clip A
Traviesa	AI-99, fabricante I
Carril	UIC-60

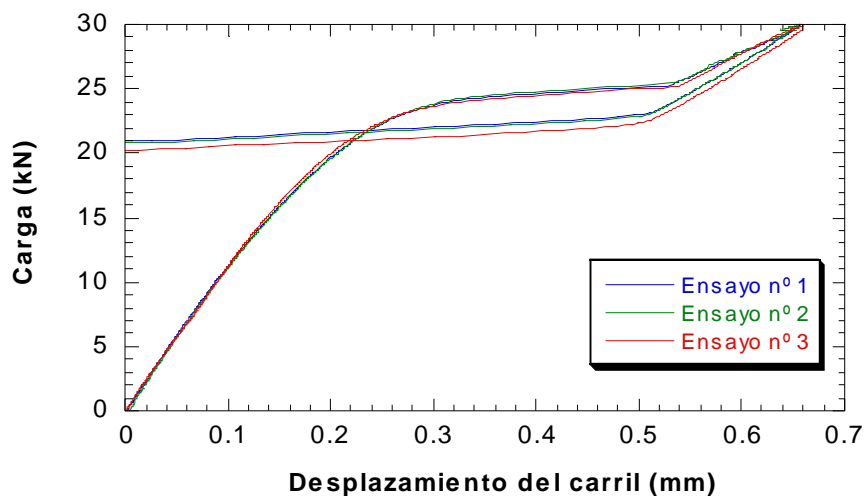


Figura IV.1.- Ensayo de fuerza de apriete previo al dinámico (C10)

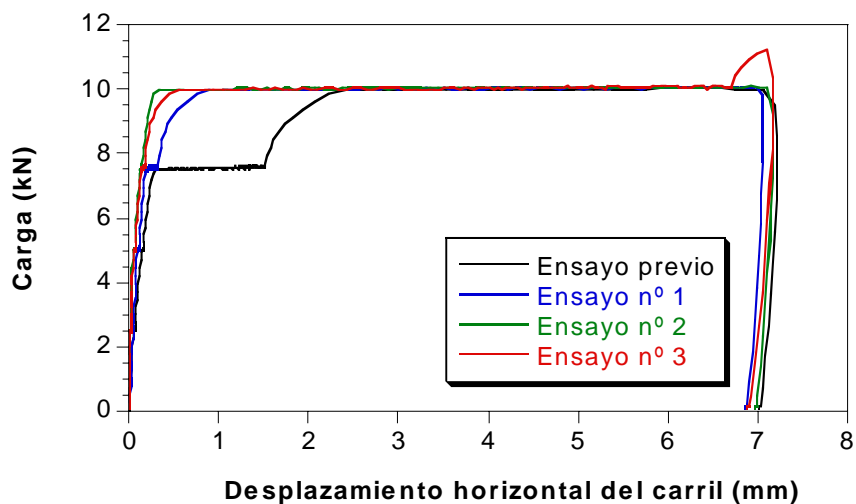


Figura IV.2.- Ensayo de deslizamiento longitudinal previo al dinámico (C10)

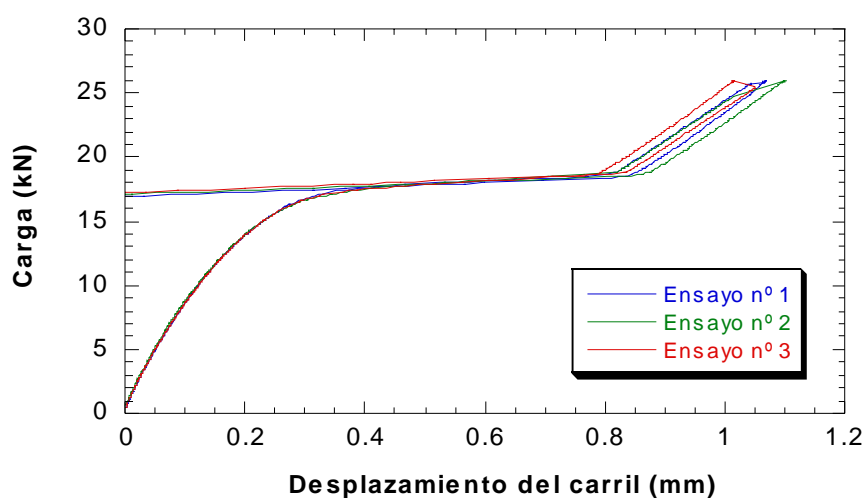


Figura IV.3.- Ensayo de fuerza de apriete posterior al dinámico (C10)

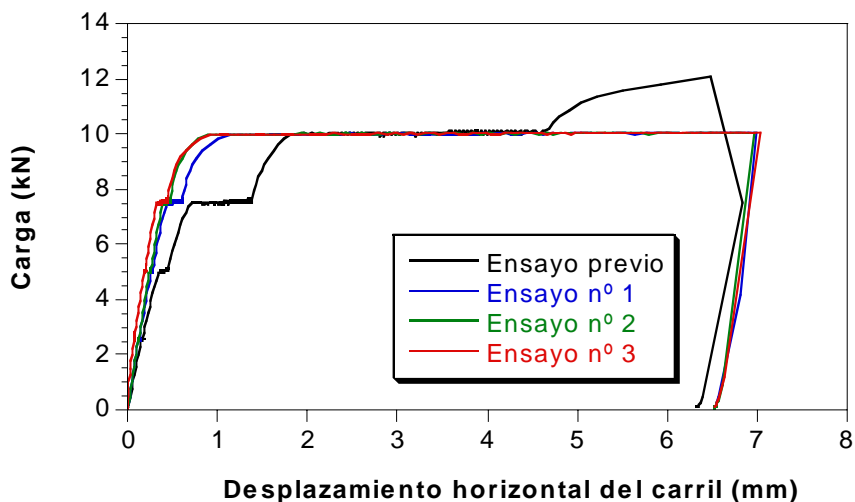


Figura IV.4.- Ensayo de deslizamiento longitudinal posterior al dinámico (C10)

## 5. CONFIGURACIÓN 11 (C11)

Tabla IV. 2.- Componentes de la configuración nº 11

Componente	Descripción
Placa asiento	Modelo A, 7 mm, resaltes rectangulares, Arnitel
Placa acodada	A2 (ligera), fabricante B, PA 6.6 + 35% FV
Espiga	VAPE 2-115-5, PA 6.6 + 30 % FV
Tirafondo/Tornillo	VAPE 2-115-5, galvanizado
Clip	SKL-1, clip A
Traviesa	AI-99, fabricante I
Carril	UIC-60

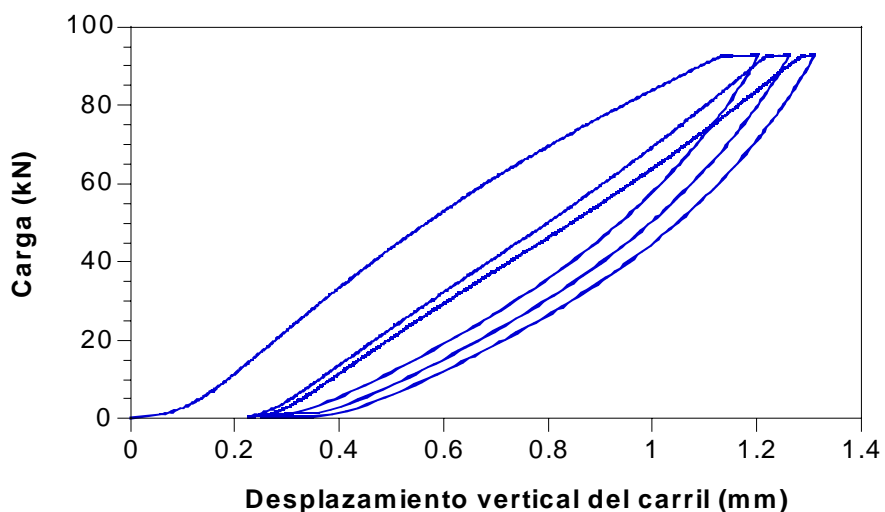


Figura IV.5.- Ensayo de rigidez vertical secante  $P_0/P_0+75$  previo al dinámico (C11)

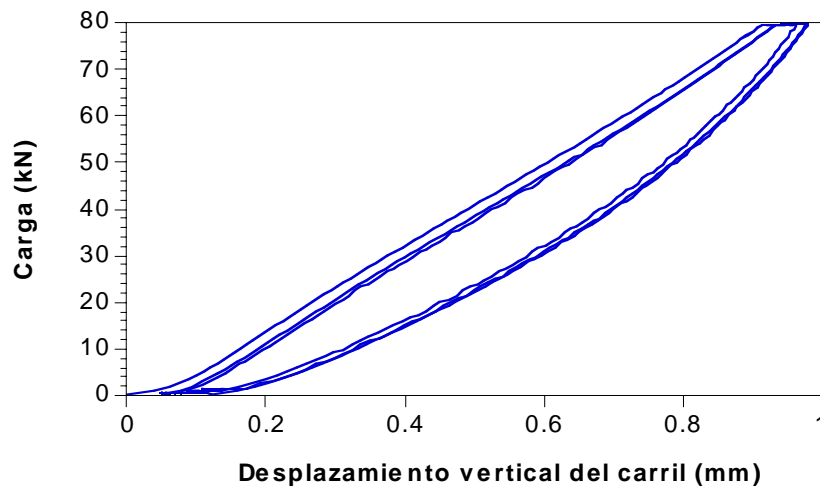


Figura IV.6.- Ensayo de rigidez vertical a 80 kN previo al dinámico (C11)

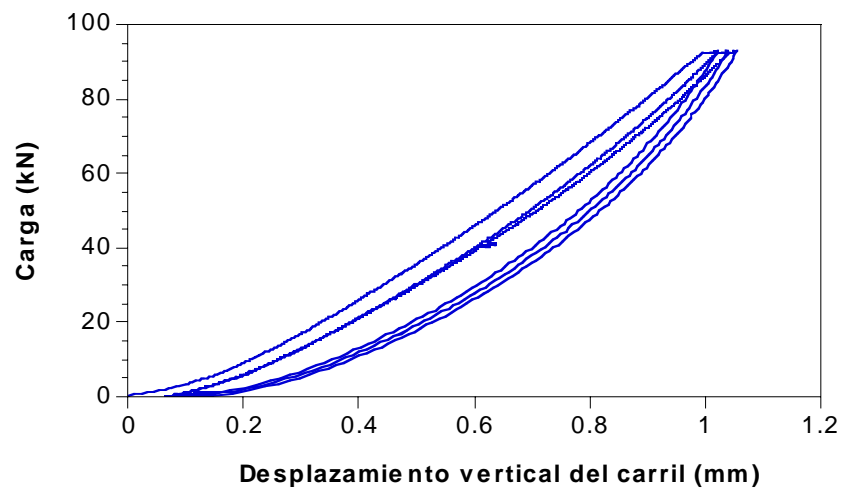


Figura IV.7.- Ensayo de rigidez vertical secante  $P_0/P_0+75$  posterior al dinámico (C11)

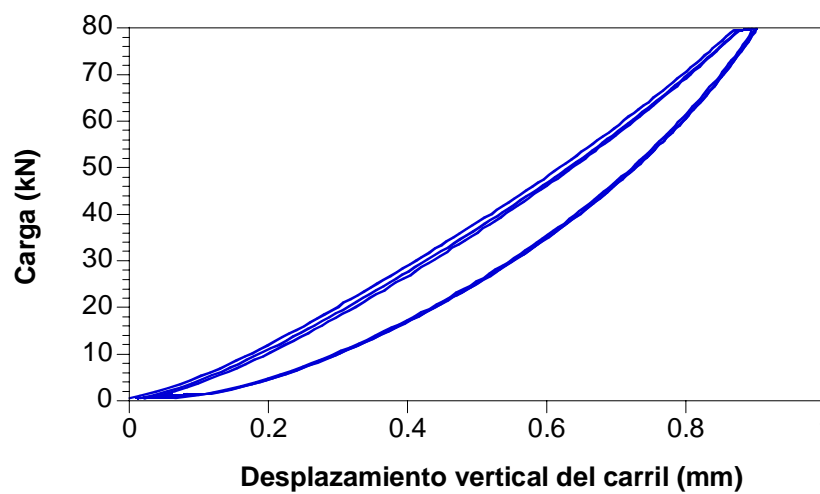


Figura IV.8.- Ensayo de rigidez vertical a 80 kN posterior al dinámico (C11)

## 6. CONFIGURACIÓN 12 (C12)

Tabla IV. 3.- Componentes de la configuración nº 12

Componente	Descripción
Placa asiento	Modelo A, 7 mm, resaltes rectangulares, Arnitel
Placa acodada	A2 (ligera), fabricante B, PA 6.6 + 35% FV
Espiga	VAPE 2-115-5, PA 6.6 + 30 % FV
Tirafondo/Tornillo	VAPE 2-115-5, galvanizado
Clip	SKL-1, clip A
Traviesa	AI-99, fabricante L
Carril	UIC-60

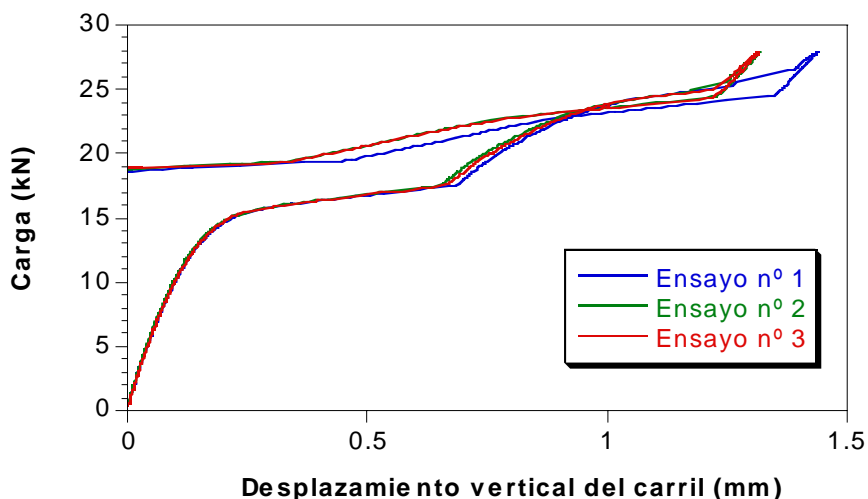


Figura IV.9.- Ensayo de fuerza de apriete previo al dinámico (C12)

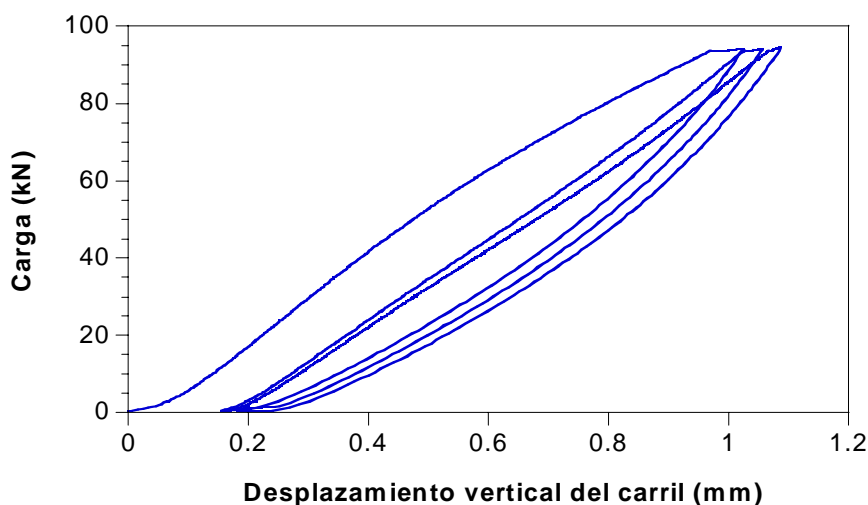


Figura IV.10.- Ensayo de rigidez vertical secante  $P_0/P_0+75$  previo al dinámico (C12)

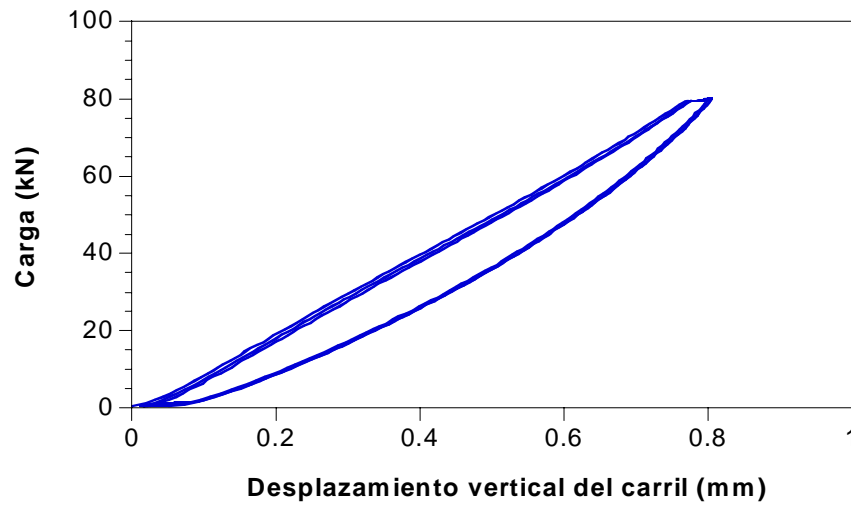


Figura IV.11.- Ensayo de rigidez vertical a 80 kN previo al dinámico (C12)

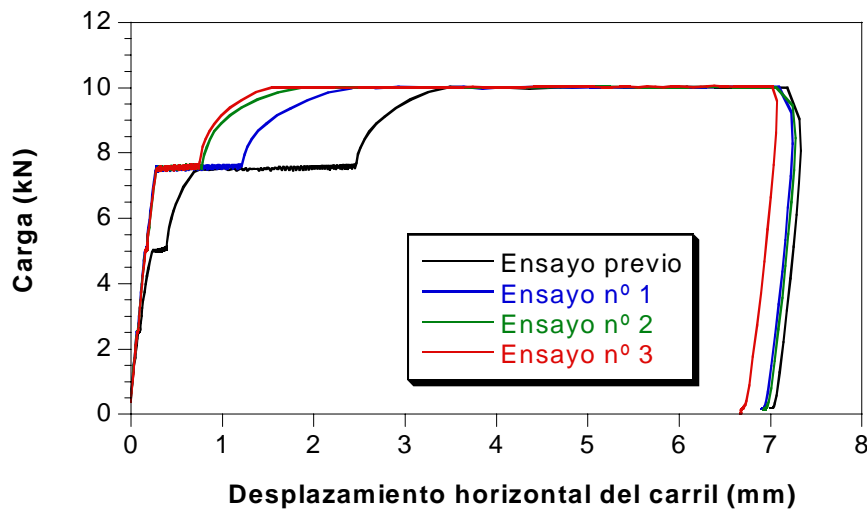


Figura IV.12.- Ensayo de deslizamiento longitudinal previo al dinámico (C12)

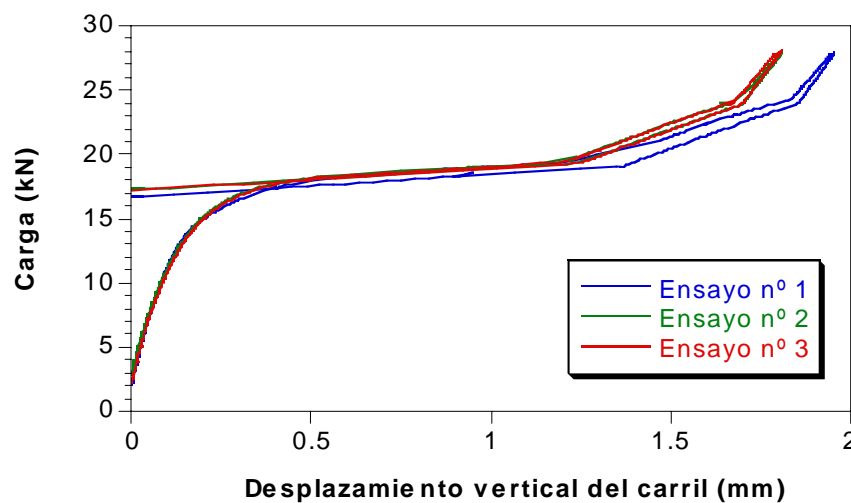


Figura IV.13.- Ensayo de fuerza de apriete posterior al dinámico (C12)

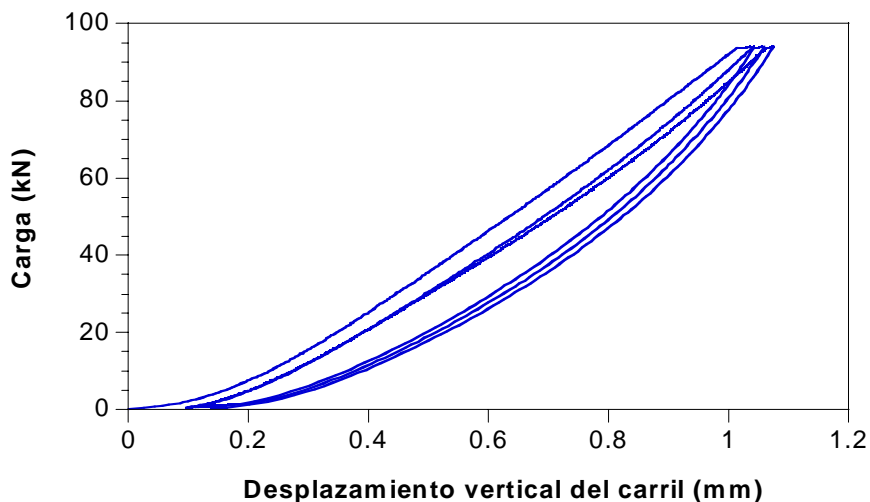


Figura IV.14.- Ensayo de rigidez vertical secante  $P_0/P_0+75$  posterior al dinámico (C12)

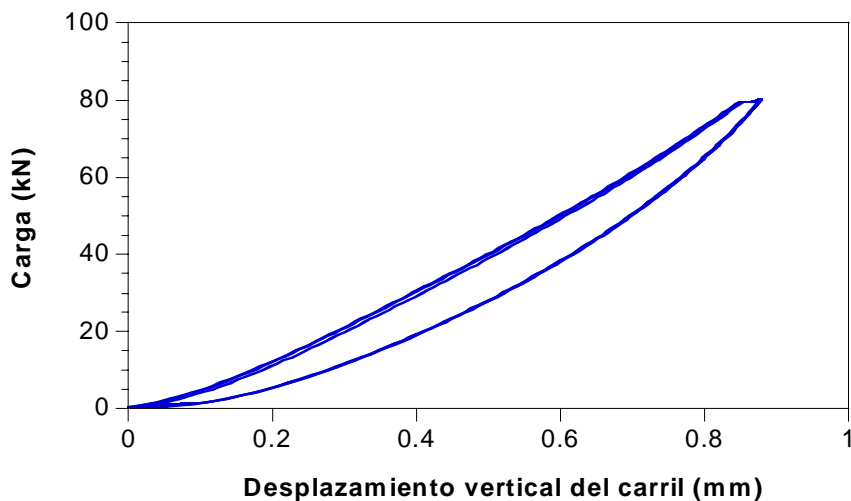


Figura IV.15.- Ensayo de rigidez vertical a 80 kN posterior al dinámico (C12)

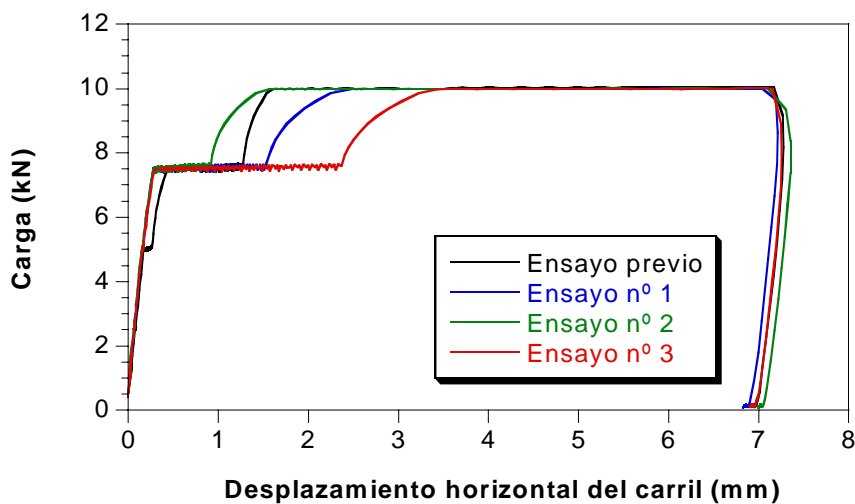


Figura IV.16.- Ensayo de deslizamiento longitudinal posterior al dinámico (C12)



## 7. CONFIGURACIÓN 13 (C13)

Tabla IV. 4.- Componentes de la configuración nº 13

Componente	Descripción
Placa asiento	Modelo A, 7 mm, resaltes rectangulares, Arnitel
Placa acodada	A2 (ligera), fabricante B, PA 6.6 + 35% FV
Espiga	VAPE 2-115-5, PA 6.6 + 30 % FV
Tirafondo/Tornillo	VAPE 2-115-5, galvanizado
Clip	SKL-1, clip A
Traviesa	AI-99, fabricante H
Carril	UIC-60

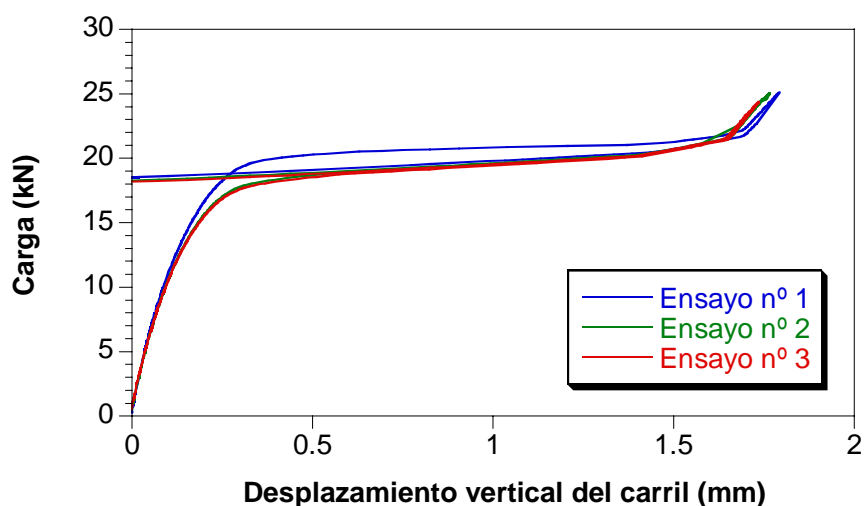


Figura IV.17.- Ensayo de fuerza de apriete previo al dinámico (C13)

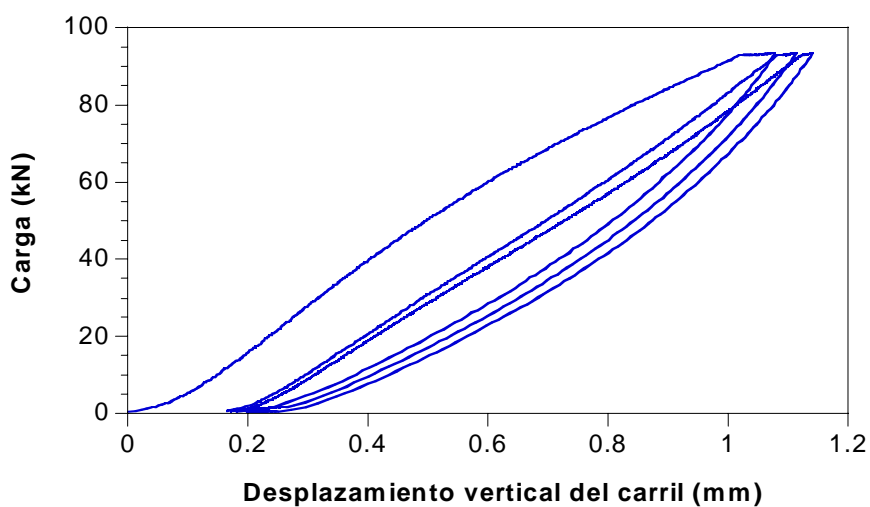


Figura IV.18.- Ensayo de rigidez vertical secante  $P_0/P_0+75$  previo al dinámico (C13)

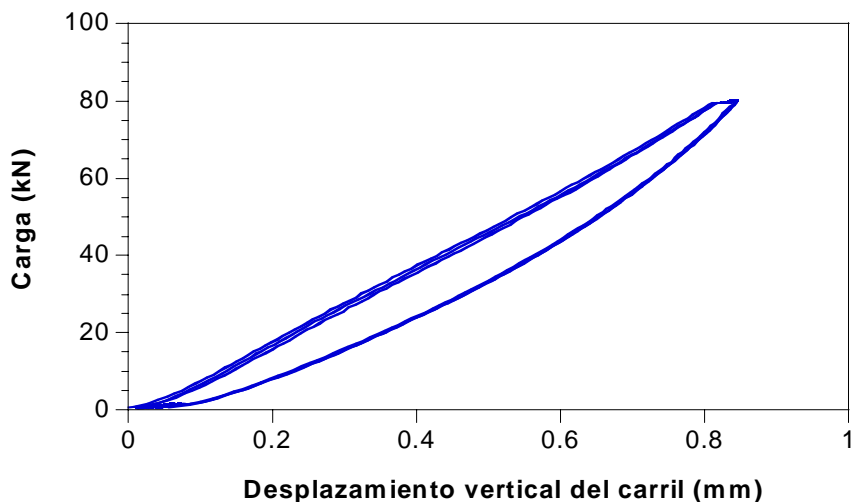


Figura IV.19.- Ensayo de rigidez vertical a 80 kN previo al dinámico (C13)

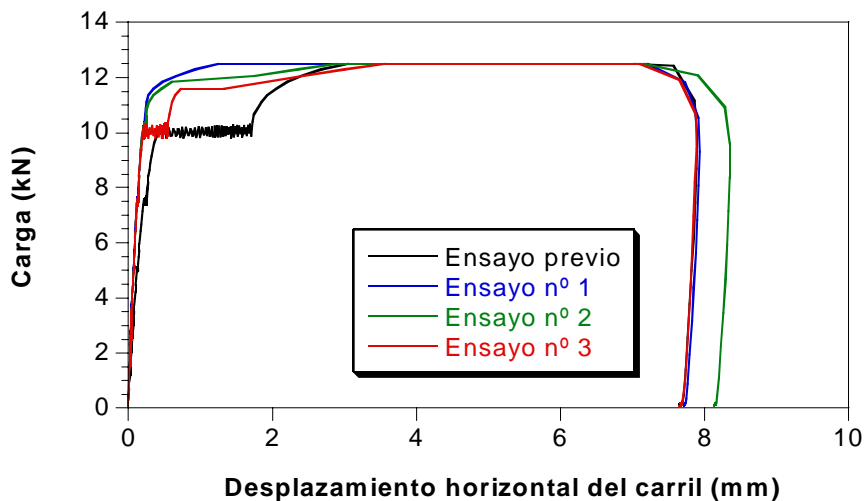


Figura IV.20.- Ensayo de deslizamiento longitudinal previo al dinámico (C13)

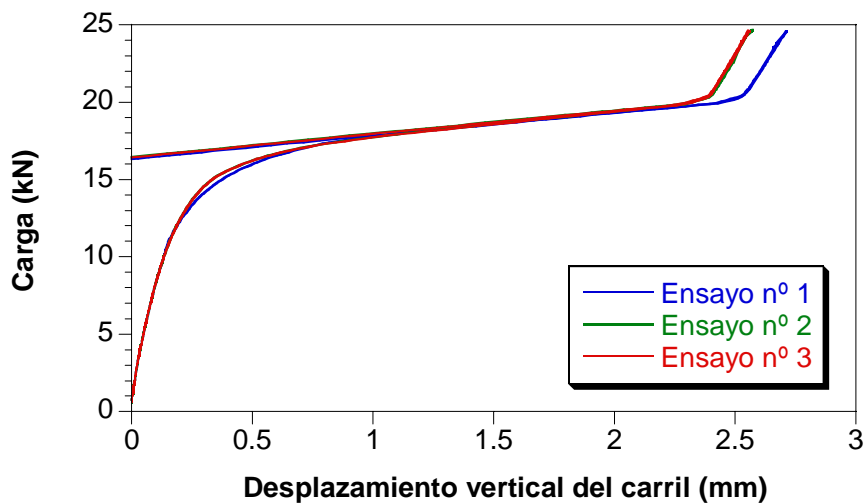


Figura IV.21.- Ensayo de fuerza de apriete posterior al dinámico (C13)

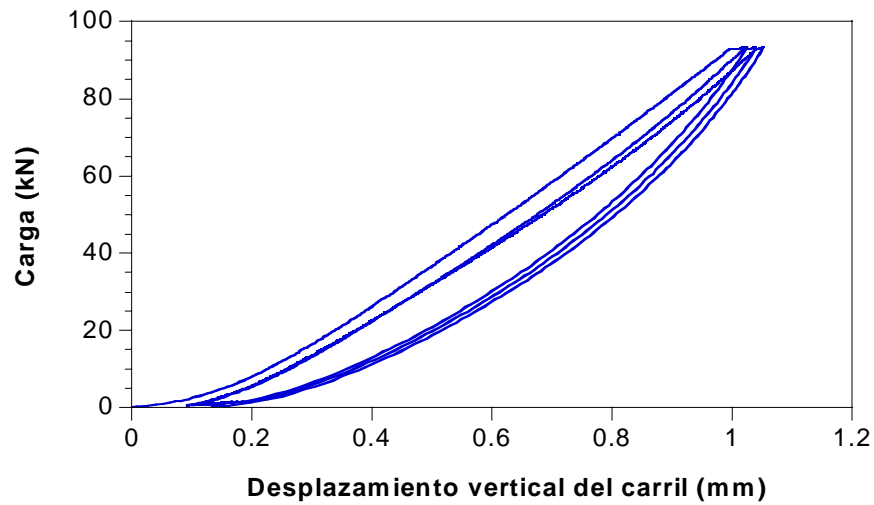


Figura IV.22.- Ensayo de rigidez vertical secante  $P_0/P_0+75$  posterior al dinámico (C13)

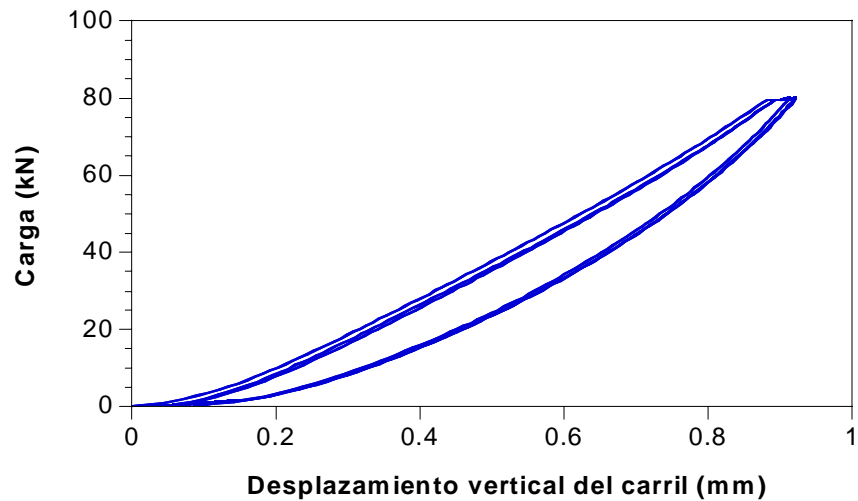


Figura IV.23.- Ensayo de rigidez vertical a 80 kN posterior al dinámico (C13)

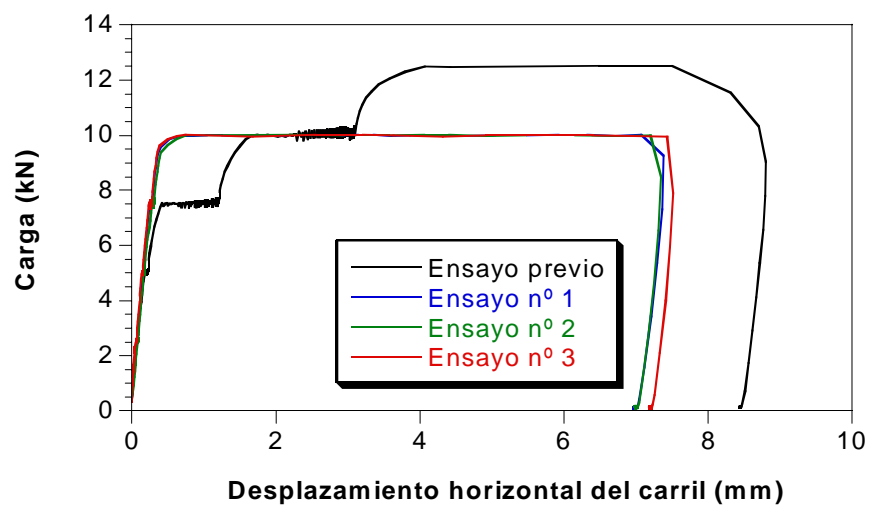


Figura IV.24.- Ensayo de deslizamiento longitudinal posterior al dinámico (C13)

## 8. CONFIGURACIÓN 14 (C14)

Tabla IV. 5.- Componentes de la configuración nº 14

Componente	Descripción
Placa asiento	Modelo B, 7 mm, resaltes ovalados, Hytrel
Placa acodada	A2 (ligera), fabricante D, PA 6.6 + 35% FV
Espiga	VAPE 2-115-5, PA 6.6 + 30 % FV
Tirafondo/Tornillo	VAPE 2-115-5, galvanizado
Clip	SKL-1, clip B
Traviesa	AI-99, fabricante I
Carril	UIC-60

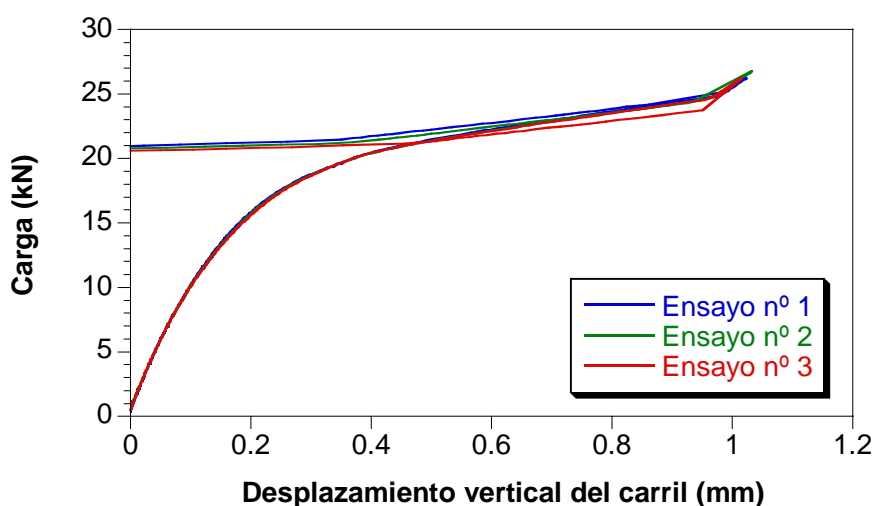


Figura IV.25.- Ensayo de fuerza de apriete previo al dinámico (C14)

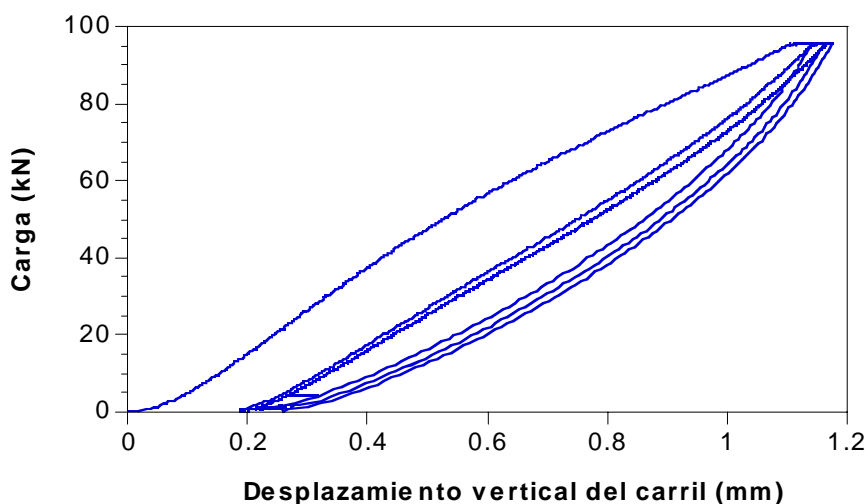


Figura IV.26.- Ensayo de rigidez vertical secante  $P_0/P_0+75$  previo al dinámico (C14)

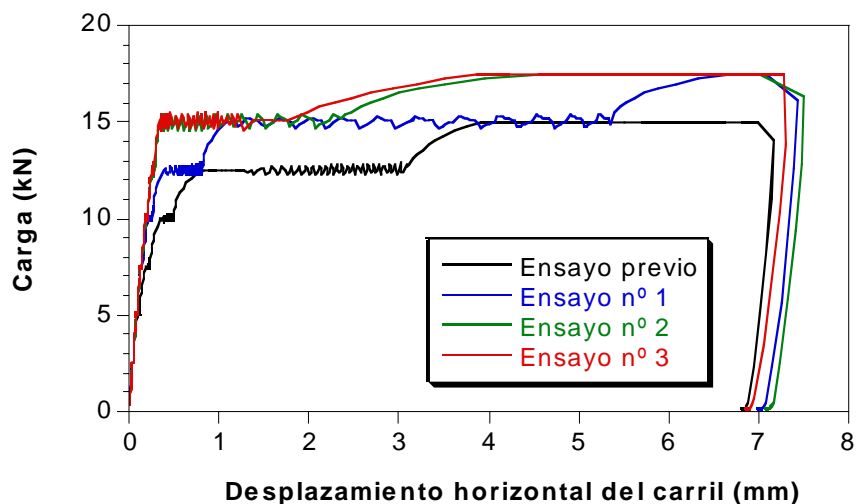


Figura IV.27.- Ensayo de deslizamiento longitudinal previo al dinámico (C14)

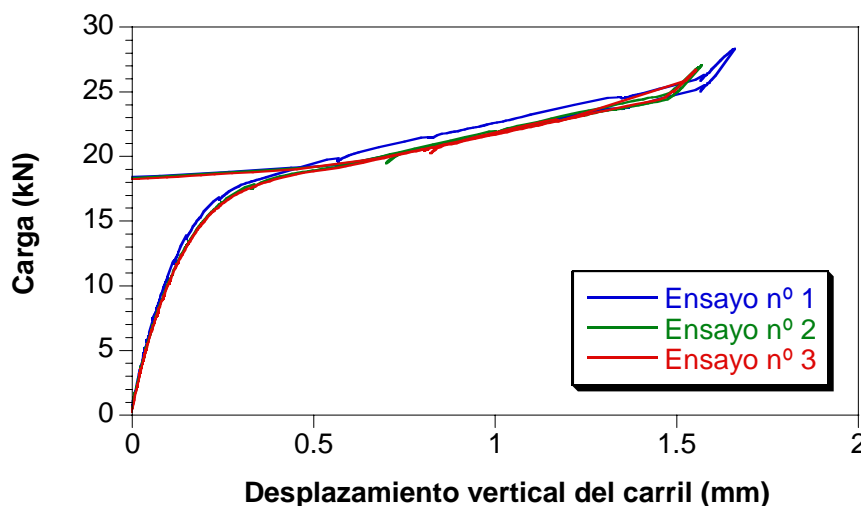


Figura IV.28.- Ensayo de fuerza de apriete posterior al dinámico (C14)

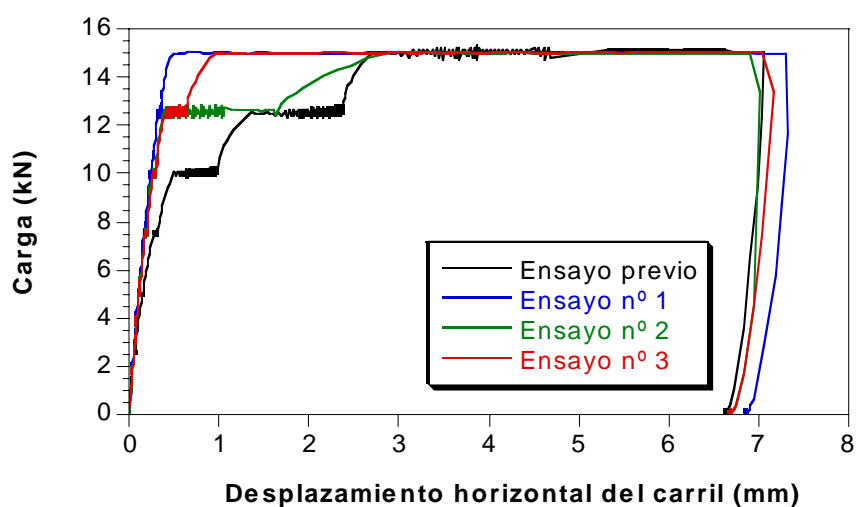


Figura IV.29.- Ensayo de deslizamiento longitudinal posterior al dinámico (C14)

## 9. CONFIGURACIÓN 15 (C15)

Tabla IV. 6.- Componentes de la configuración nº 15

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

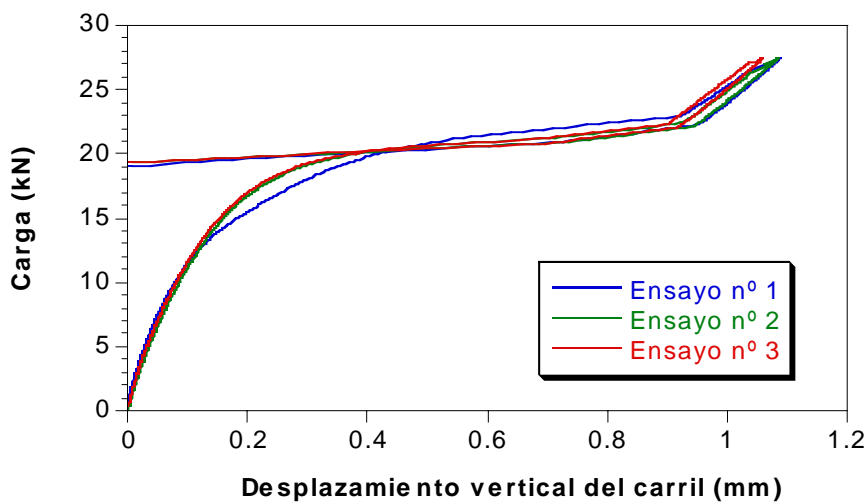


Figura IV.30.- Ensayo de fuerza de apriete previo al dinámico (C15)

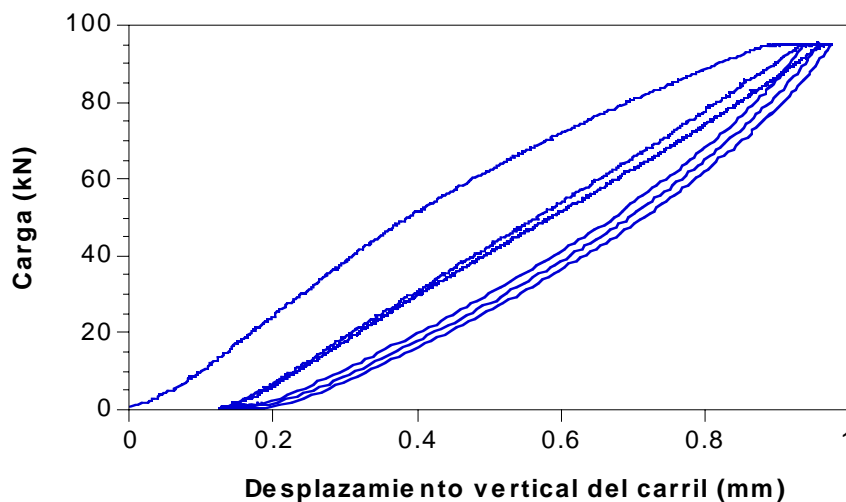


Figura IV.31.- Ensayo de rigidez vertical secante  $P_0/P_0+75$  previo al dinámico (C15)

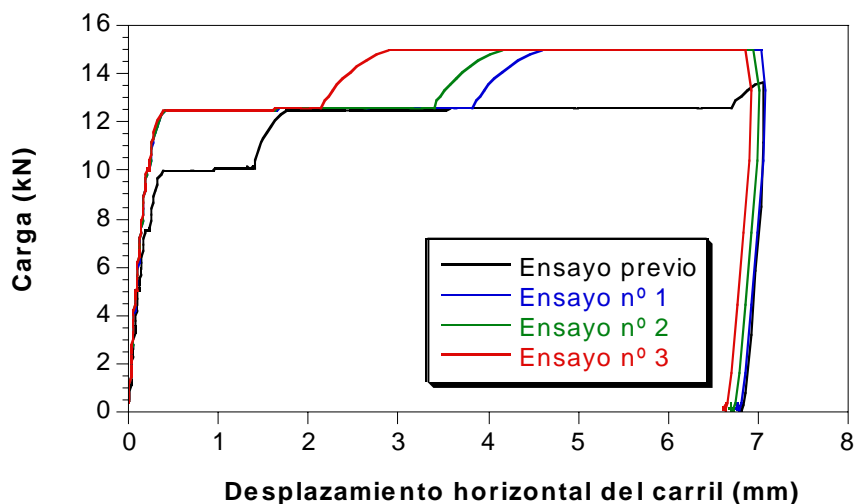


Figura IV.32.- Ensayo de deslizamiento longitudinal previo al dinámico (C15)

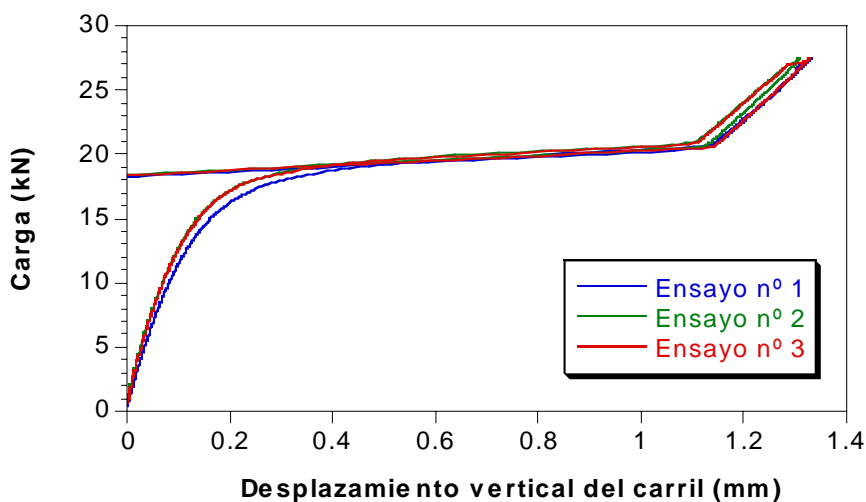


Figura IV.33.- Ensayo de fuerza de apriete posterior al dinámico (C15)

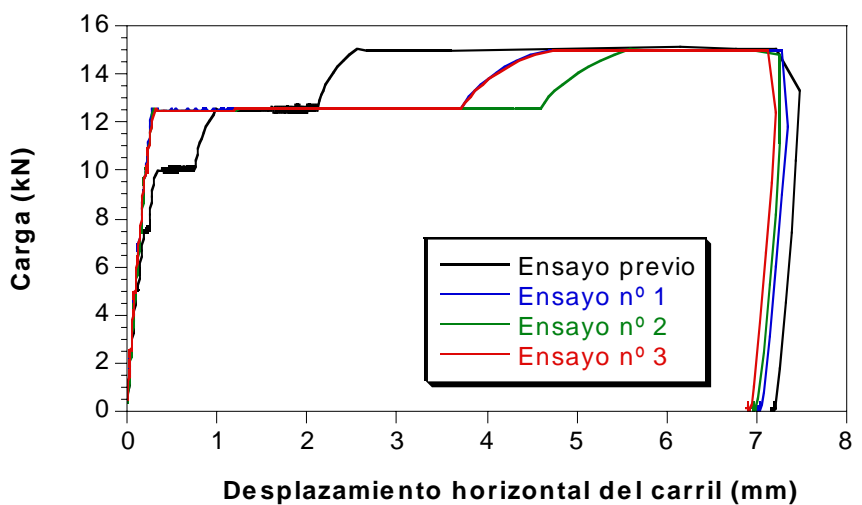


Figura IV.34.- Ensayo de deslizamiento longitudinal posterior al dinámico (C15)

## 10. CONFIGURACIÓN 16 (C16)

Tabla IV. 7.- Componentes de la configuración nº 16

Componente	Descripción
Placa asiento	Modelo B, 7 mm, resaltes ovalados, Hytrel
Placa acodada	A2 (ligera), fabricante E, PA 6.6 + 35% FV
Espiga	VAPE 2-115-5, PA 6.6 + 30 % FV
Tirafondo/Tornillo	VAPE 2-115-5, galvanizado
Clip	SKL-1, clip A
Traviesa	AI-99, fabricante G
Carril	UIC-60

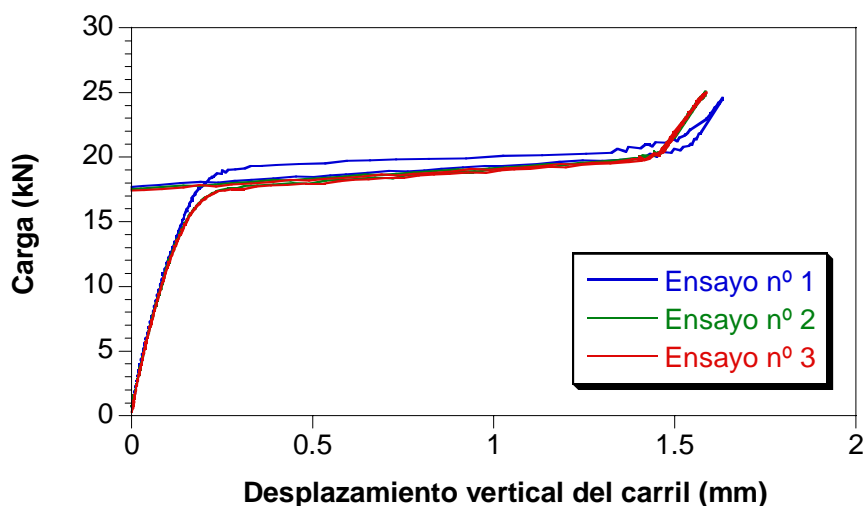


Figura IV.35.- Ensayo de fuerza de apriete previo al dinámico (C16)

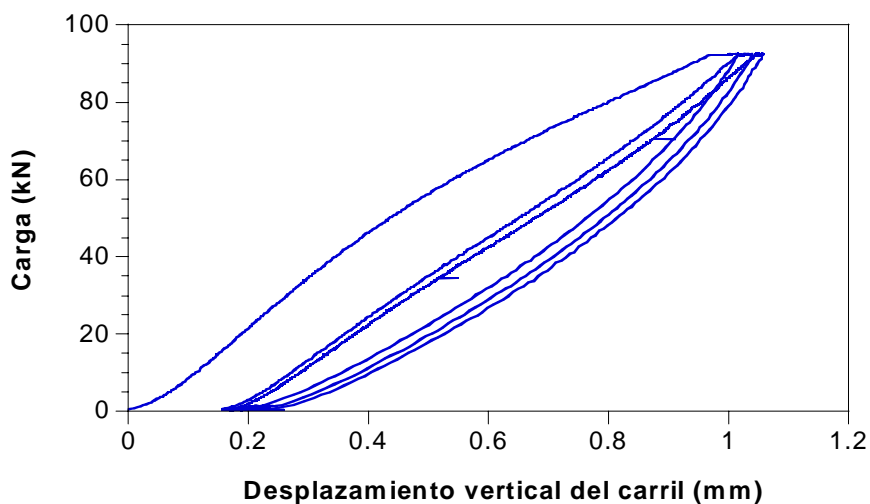


Figura IV.36.- Ensayo de rigidez vertical secante  $P_0/P_0+75$  previo al dinámico (C16)



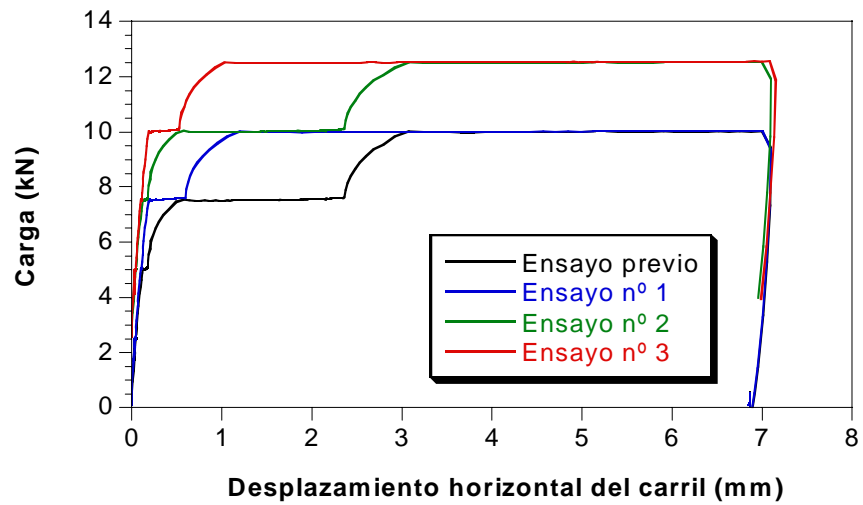


Figura IV.37.- Ensayo de deslizamiento longitudinal previo al dinámico (C16)

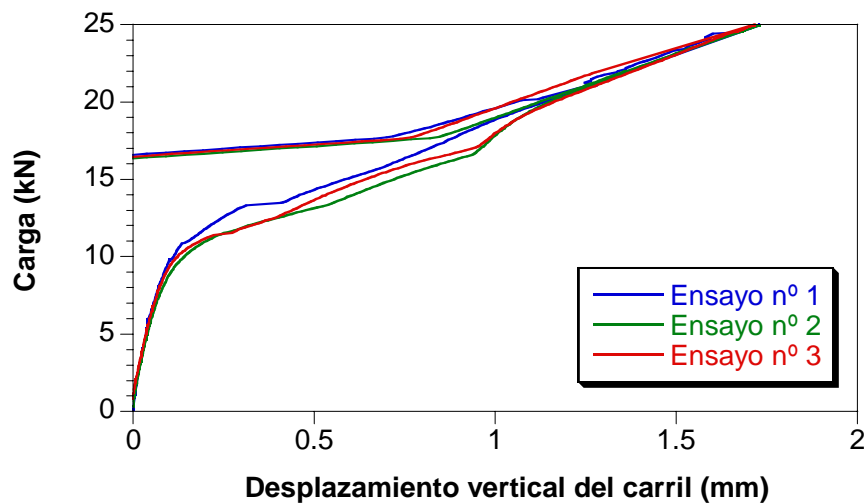


Figura IV.38.- Ensayo de fuerza de apriete posterior al dinámico (C16)

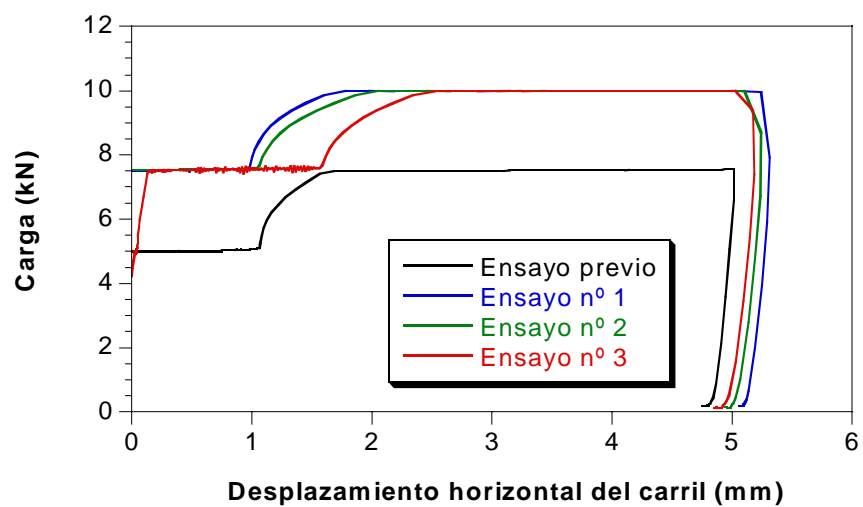


Figura IV.39.- Ensayo de deslizamiento longitudinal posterior al dinámico (C16)