

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIA E INGENIERÍA DEL
TERRENO Y DE LOS MATERIALES**

TESIS DOCTORAL

**COMPORTAMIENTO EN FATIGA DE POLIAMIDAS
REFORZADAS CON FIBRA DE VIDRIO CORTA**

JOSÉ ANTONIO CASADO DEL PRADO

Santander, abril 2001

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
DEPARTAMENTO DE CIENCIA E INGENIERÍA DEL
TERRENO Y DE LOS MATERIALES

TESIS DOCTORAL
COMPORTAMIENTO EN FATIGA DE POLIAMIDAS
REFORZADAS CON FIBRA DE VIDRIO CORTA

Autor:

JOSÉ ANTONIO CASADO DEL PRADO

Directores:

D. FEDERICO GUTIÉRREZ-SOLANA SALCEDO

D. JUAN ANTONIO POLANCO MADRAZO

Tesis Doctoral presentada en la Universidad de Cantabria para la
obtención del título de Doctor en Ciencias Físicas

Santander, abril 2001

*A Marta, mi mujer
que ha hecho la Tesis conmigo*

*“Lo importante es no dejar
de hacerse preguntas”*

Albert Einstein

Agradecimientos

Deseo manifestar mi más sincera gratitud a las siguientes personas que, de una u otra forma, han contribuido en la elaboración de esta Tesis Doctoral y que, en sí misma, encierra unos años de mi vida.

A los profesores y amigos:

D. Federico Gutiérrez-Solana Salcedo, por haber tenido fe en mi y concederme la oportunidad de trabajar aprendiendo junto a él y al equipo humano que coordina y dirige. Por su gran labor de dirección de Tesis y dedicación, pese a sus múltiples quehaceres, y por los largos cafés que han fundamentado, en gran medida, los pilares de este trabajo.

D. Juan Antonio Polanco Madrazo, por la magnífica codirección de esta Tesis, por todos sus comentarios y recomendaciones, siempre precisas y acertadas, y por el constante apoyo prestado durante el desarrollo de este trabajo.

D. José María Varona Ruiz, por el conjunto de sus valiosos consejos, sugerencias e indicaciones que ha mejorado la última versión de esta Tesis.

D. Andrés Valiente Cancho, de la Universidad Politécnica de Madrid, por las ideas aportadas a este trabajo en su fase experimental.

A todos mis amigos, antes que compañeros, del Laboratorio de la División de Ciencia e Ingeniería del Terreno y los Materiales, en especial: a Irene Aizpurua por su continuo aliento; a Isidro Carrascal por su inestimable y simpática ayuda prestada en todo momento; a José Alberto Álvarez y Jesús Manuel Alegre por su aportación en los últimos momentos y, por lo tanto, más difíciles por ansiados; a Luciano Sánchez y Jesús Setién por su apoyo siempre que necesité el servicio de microscopía electrónica, y a Manuel Solana y a Javier Laguillo que siempre me facilitaron el trabajo de laboratorio.

A mis padres y a mi familia por el esfuerzo realizado para que todo esto fuera posible.

El presente trabajo queda incluido dentro de los Proyectos de Investigación financiados por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología, CICYT, del Ministerio de Educación y Cultura. (Proyecto de investigación MAT-96-0568).

Se desea agradecer a las siguientes empresas el apoyo prestado como Entes Promotores Observadores (EPO), durante los trabajos de investigación realizados:

TIFSA (Tecnología e Investigación Ferroviaria, S.A.), representada en las personas de sus ingenieros Juan Batanero y Moisés Gilaberte.

RENFE (Jefatura de Vía. Mantenimiento de Infraestructura) por el seguimiento de las investigaciones.

NYLTECH IBÉRICA por el suministro de probetas de material.

DU PONT IBÉRICA, S.A. por el suministro de probetas de material.

DSM ESPAÑA, S.A. por el suministro de probetas de material.

BASF ESPAÑOLA, S.A. por el suministro de probetas de material.

PLÁSTICOS MONDRAGÓN, S.A. por el aporte de piezas acodadas.

ORBELÁN PLÁSTICOS, S.A. por el aporte de piezas acodadas.

IBEROFÓN PLÁSTICOS, S.A. por el aporte de piezas acodadas.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS..... 1

1 INTRODUCCIÓN 1

1.1 Las sujeciones de vía de ferrocarril..... 1

1.2 Esfuerzos dinámicos generados en la vía 4

2 OBJETIVOS..... 7

CAPÍTULO 2

COMPORTAMIENTO EN FATIGA DE MATERIALES COMPUESTOS

DE MATRIZ POLIMÉRICA 9

1 INTRODUCCIÓN 9

2 MECANISMOS DE FALLO POR FATIGA DE LOS MATERIALES POLIMÉRICOS..... 11

2.1 Comportamiento macroscópico..... 11

2.1.1 Fatiga por fallo térmico..... 13

2.1.1.1 Consideraciones energéticas del comportamiento en fatiga..... 15

2.1.1.2	Variación térmica asociada al comportamiento mecánico.....	21
2.1.1.3	Efecto del tiempo	23
2.1.2	Fatiga por fallo mecánico.....	25
2.2	Micromecanismos de fatiga	26
3	MECANISMOS DE FALLO POR FATIGA EN LOS COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMÉRICA REFORZADOS CON FIBRA.....	30
3.1	Comportamiento macroscópico	30
3.2	Comportamiento microscópico	34
4	PERSPECTIVA GLOBAL	40

CAPÍTULO 3

MATERIALES DISPONIBLES: CARACTERIZACIÓN CONVENCIONAL Y

SELECCIÓN	41
1 INTRODUCCIÓN.....	41
2 MATERIALES.....	42
3 NATURALEZA DE LOS MATERIALES.....	43
3.1 Poliamidas.....	43
3.1.1 Obtención de la poliamida PA 6	47
3.1.2 Obtención de la poliamida PA 6.6	48
3.1.3 Transformación de las poliamidas.....	51
3.1.4 Propiedades de las poliamidas.....	51
3.2 La fibra de vidrio.....	57
3.2.1 Fabricación de la fibra de vidrio.....	59
3.3 Unión entre fibra y matriz.....	60
3.4 Resina acetálica (POM).....	62
3.4.1 Síntesis del polióxido de metileno	62

3.4.2	Propiedades del polióxido de metileno	65
3.4.3	Transformación del polióxido de metileno	65
3.5	Comparación de las principales propiedades	66
4	CARACTERIZACIÓN PREVIA	67
4.1	Caracterización composicional.....	69
4.1.1	Introducción.....	69
4.1.2	Metodología experimental.....	70
4.1.3	Resultados	71
4.2	Caracterización mecánica	72
4.2.1	Introducción.....	72
4.2.2	Metodología experimental.....	72
4.2.2.1	Ensayos de tracción	72
4.2.2.2	Ensayos de flexión en tres puntos	74
4.2.3	Resultados	76
4.2.3.1	Ensayos de tracción	76
4.2.3.2	Ensayos de flexión en tres puntos	78
4.2.4	Observaciones fractográficas.....	83
4.2.4.1	Introducción	83
4.2.4.2	Metodología experimental	84
4.2.4.3	Análisis de resultados	84
4.3	Envejecimiento	89
4.3.1	Envejecimiento por rayos ultravioleta	90
4.3.1.1	Método de envejecimiento por rayos ultravioleta.....	91
4.3.2	Envejecimiento por fatiga térmica	91
4.3.2.1	Método de envejecimiento por fatiga térmica	92
4.3.3	Envejecimiento por hidrocarburos	92

4.3.2.1	Método de envejecimiento por hidrocarburos	92
4.3.4	Ensayos de tracción sobre material envejecido	93
4.3.4.1	Influencia del envejecimiento por rayos ultravioleta	93
4.3.4.2	Influencia del envejecimiento por fatiga térmica.....	94
4.3.4.3	Influencia del envejecimiento por hidrocarburos	94
4.3.5	Ensayos de flexión en tres puntos sobre material envejecido	95
4.3.5.1	Influencia del envejecimiento por rayos ultravioleta	96
4.3.5.2	Influencia del envejecimiento por fatiga térmica.....	97
4.3.5.3	Influencia del envejecimiento por hidrocarburos	98
4.3.6	Observaciones fractográficas	99
5	CONSIDERACIONES Y SELECCIÓN DE MATERIAL	101
5.1	Respecto al comportamiento mecánico.....	101
5.2	Respecto a la influencia de los tratamientos de envejecimiento	102
5.3	Consideraciones finales.....	103

CAPÍTULO 4

CARACTERIZACIÓN EN FATIGA.....	105
1 INTRODUCCIÓN.....	105
2 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	106
2.1 Material ensayado.....	106
2.2 Técnicas experimentales	107
3 RESULTADOS	110
3.1 Determinación del esfuerzo dinámico de rotura	110
3.2 Ensayos de fatiga.....	113
3.2.1 Curvas de Wöhler	113
3.2.2 Evolución de la rigidez y de la temperatura.....	119

3.3	Estudio fractográfico.....	121
4	ANÁLISIS DE RESULTADOS	124
4.1	Efecto del nivel tensional.....	125
4.2	Efecto del tipo de onda.....	126
4.3	Efecto del material.....	129
5	EFFECTO DEL TIEMPO DE ESPERA.....	130
5.1	Resultados.....	130
5.1.1	Curvas de Wöhler.....	132
5.1.2	Evolución de la rigidez y de la temperatura	136
5.1.3	Fractografía	137
5.2	Análisis de resultados.....	137
5.2.1	Influencia sobre el comportamiento térmico	138
5.2.2	Influencia sobre el comportamiento mecánico.....	140
5.2.3	Cuantificación del efecto del tiempo de espera en el comportamiento de los diferentes materiales	142
6	CONSIDERACIONES GENERALES.....	148

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO EN FATIGA DE LAS POLIAMIDAS

REFORZADAS..... 149

1	INTRODUCCIÓN	149
2	MEDICIÓN DE DEFORMACIONES	150
2.1	Fatiga continua	150
2.2	Fatiga discontinua	157
2.3	Observaciones fractográficas de la superficie de rotura.....	164
3	ESTUDIO VISCOELÁSTICO	165

4	ESTUDIO DE FLUENCIA.....	179
4.1	Técnica experimental.....	180
4.2	Resultados	183
4.3	Comparación fatiga-fluencia	187
5	ESTADOS DEL COMPORTAMIENTO EN FATIGA DE LAS POLIAMIDAS REFORZADAS	189
6	ANÁLISIS DEL ESTADO DE LA SUPERFICIE LATERAL DE LAS PROBETAS ENSAYADAS	190
6.1	Observación por microscopía electrónica.....	191
6.2	Cuantificación de la rugosidad superficial	192
6.2.1	Material de ensayo	193
6.2.2	Metodología de ensayo	193
6.2.3	Resultados y análisis de la rugosidad del material ensayado a fatiga	196
6.2.4	Evolución de la rugosidad durante un ensayo de fatiga.....	204
6.2.5	Resultados y análisis de la rugosidad en el material ensayado a fluencia.....	207
6.3	El estado de daño superficial como indicador de los mecanismos de fatiga	208
7	CONDICIONES DE ROTURA	209
7.1	Efecto de la temperatura en la resistencia última del material	209
7.1.1	Técnica experimental.....	210
7.1.2	Resultados	210
7.1.3	Análisis.....	215
7.2	Aspectos morfológicos de las superficies de rotura. Condiciones de rotura.....	216

7.3	Estado tensional previo a la rotura.....	220
8	CONSIDERACIONES FINALES.....	225
CAPÍTULO 6		
	VALIDACIÓN DEL MODELO DE COMPORTAMIENTO EN FATIGA	227
1	INTRODUCCIÓN	227
2	VALIDACIÓN DEL MODELO DE COMPORTAMIENTO PARA POLIAMIDAS CON OTROS PORCENTAJES DE REFUERZO	228
2.1	Caracterización del comportamiento en fatiga de la PA 6 + 25% F.V. (PS25).....	229
2.2	Estados de comportamiento.....	229
2.3	Caracterización superficial y fractográfica del daño	232
2.4	Condiciones de rotura	235
3	APLICACIÓN DEL MODELO DE COMPORTAMIENTO A PIEZAS ACODADAS DE SUJECCIÓN DE VÍA DE FERROCARRIL PARA ALTA VELOCIDAD ESPAÑOLA (AVE)	238
3.1	Material ensayado	240
3.2	Metodología experimental	242
3.3	Resultados.....	244
3.4	Análisis del comportamiento en fatiga.....	246
3.5	Aplicación : Estudio del efecto de la frecuencia.....	252
4	APLICACIÓN DEL MODELO DE COMPORTAMIENTO A PROBETAS ENTALLADAS.....	255
4.1	Proceso experimental.....	255
4.2	Resultados y análisis del comportamiento en fatiga.....	256
4.3	Condiciones de rotura	258

4.4	Medida e identificación de los mecanismos de daño	263
5	CONSIDERACIONES FINALES	271
CAPÍTULO 7		
CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO		273
1	CONCLUSIONES.....	273
2	TRABAJO FUTURO	292
CAPÍTULO 8		
BIBLIOGRAFÍA		295
ANEXO I	CURVAS DE CARACTERIZACIÓN MECÁNICA EN TRACCIÓN	
ANEXO II	CURVAS DE CARACTERIZACIÓN MECÁNICA EN TRACCIÓN (Efecto del envejecimiento)	
ANEXO III	CURVAS DE CARACTERIZACIÓN MECÁNICA: FLEXIÓN EN TRES PUNTOS (Efecto del envejecimiento)	
ANEXO IV	CURVAS DE CARACTERIZACIÓN EN FATIGA	
ANEXO V	CURVAS DE CARACTERIZACIÓN EN FATIGA: Efecto del tiempo de espera	
ANEXO VI	EVOLUCIÓN DE LOS VALORES DEL MÓDULO	

	DE ELASTICIDAD IMAGINARIO
ANEXO VII	EVOLUCIÓN DE LOS CICLOS DE HISTÉRESIS
ANEXO VIII	ESTUDIO POR ELEMENTOS FINITOS DEL TIEMPO DE ATEMPERAMIENTO DEL MATERIAL
ANEXO IX	ESTUDIO DE LA TENSIÓN COHESIVA
ANEXO X	CURVAS DE CARACTERIZACIÓN EN FATIGA SOBRE PROBETAS ENTALLADAS