

Rafael Tobajas Alonso

Desarrollo de modelos de fatiga
para materiales elastómeros.
Aplicación a componentes de
automoción.

Departamento
Ingeniería Mecánica

Director/es
Gracia Villa, Luis

EXTRACTO

<http://zaguan.unizar.es/collection/Tesis>

El presente documento es un extracto de la tesis original depositada en el Archivo Universitario.

En cumplimiento del artículo 14.6 del Real Decreto 99/2011, de 28 de enero, por el que se regulan las enseñanzas oficiales de doctorado, los autores que puedan verse afectados por alguna de las excepciones contempladas en la normativa citada deberán solicitar explícitamente la no publicación del contenido íntegro de su tesis doctoral en el repositorio de la Universidad de Zaragoza. Las situaciones excepcionales contempladas son:

- Que la tesis se haya desarrollado en los términos de un convenio de confidencialidad con una o más empresas o instituciones.
- Que la tesis recoja resultados susceptibles de ser patentados.
- Alguna otra circunstancia legal que impida su difusión completa en abierto.



Reconocimiento – NoComercial – SinObraDerivada (by-nc-nd): No se permite un uso comercial de la obra original ni la generación de obras derivadas.

© Universidad de Zaragoza
Servicio de Publicaciones

ISSN 2254-7606



Universidad
Zaragoza

Tesis Doctoral [Extracto]

DESARROLLO DE MODELOS DE FATIGA PARA
MATERIALES ELASTÓMEROS. APLICACIÓN A
COMPONENTES DE AUTOMOCIÓN.

Autor

Rafael Tobajas Alonso

Director/es

Gracia Villa, Luis

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

Ingeniería Mecánica

2019



Universidad Zaragoza

DESARROLLO DE MODELOS DE FATIGA PARA MATERIALES ELASTÓMEROS

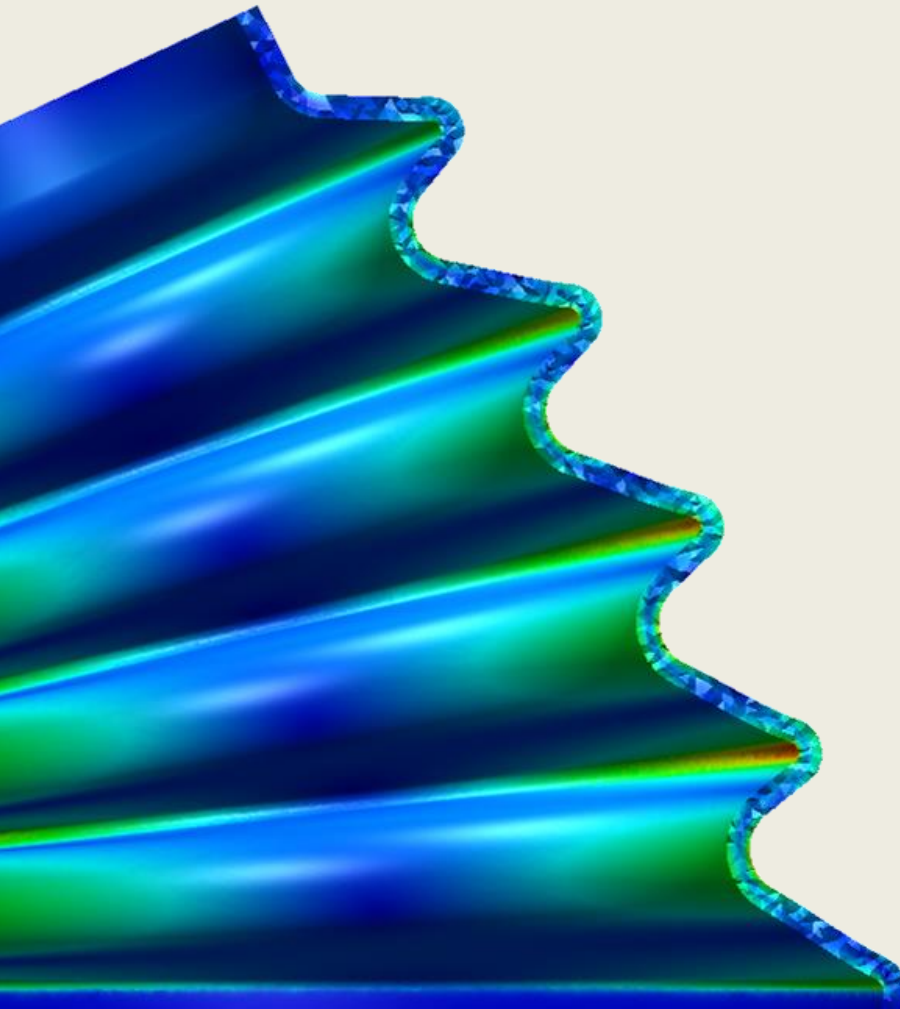
APLICACIÓN A COMPONENTES DE AUTOMOCIÓN

TESIS DOCTORAL

Autor Rafael Tobajas Alonso

Director Dr. Luis Gracia Villa

Versión reducida



Universidad de Zaragoza

Programa de Doctorado
en Ingeniería Mecánica

Abril 2019



Universidad
Zaragoza

Tesis Doctoral

Desarrollo de modelos de fatiga para materiales
elastómeros. Aplicación a componentes de
automoción

Autor/es

Rafael Tobajas Alonso

Director/es

D. Luis Gracia Villa

Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza

Departamento de Ingeniería Mecánica

2019

Agradecimientos

Este trabajo no habría sido posible sin el apoyo y el estímulo de mi familia en todos y cada uno de mis proyectos. A mi pareja Sara, por su comprensión, su apoyo y su amor. A mis pequeñas Julia y Claudia, lo mejor que tengo. A mi madre Milagros, a mi hermano Ángel y su pareja Cristina, y a mis tan queridas sobrinas Emma y Paula, por esos ratos inolvidables. A ellos y a los que no nombro aquí y saben quiénes son, mil gracias.

También debo agradecer el apoyo y los consejos de mi Director de Tesis, el Doctor Luis Gracia Villa, bajo cuya supervisión escogí y desarrollé esta Tesis. A los Doctores Carlos Javierre Lardiés y Daniel Elduque Viñuales, mis consejeros en muchas de las etapas de este trabajo. Han sido generosamente serviciales y me han ayudado de numerosos modos, tanto de forma académica, profesional y personal. No debo olvidarme de la gente de Gijón, cuya acogida y ayuda en los muchos puntos importantes de este trabajo fueron impagables.

No puedo terminar sin recordar la dureza del camino, las horas de lectura, de comprensión, de programación y de escritura, la alopecia areata que inundó mi cara y mi cabeza, y que a fecha de escribir esta Tesis no solo perdura, sino que sigue creciendo. Creo que todo ello me ayuda a forjar el carácter.

A mis pequeñas Julia y Claudia,
a mi compañera de viaje Sara,
y a mi madre Milagros.

Índice de contenidos

Capítulo 1: Introducción.....	35
1.1 Introducción y motivación	35
1.2 Objetivos de la Tesis.....	38
Capítulo 2: Estado del arte en fatiga de elastómeros	41
2.1 Conceptos generales de fatiga	41
2.1.1 Conceptos previos	42
2.1.2 Curvas de vida	43
2.1.3 Tensiones/deformaciones medias distintas de cero.....	44
2.1.4 Fatiga uniaxial y fatiga multiaxial	46
2.1.5 Algoritmos de conteo de ciclos	46
2.2 Aplicación a elastómeros	51
2.2.1 Propagación de grietas por fatiga	51
2.2.2 Nucleación de grietas por fatiga	54
Capítulo 3: Ensayos de fatiga	61
3.1 Material: Santoprene 101-73	61
3.2 Equipamiento para la experimentación.....	66
3.3 Ensayos experimentales.....	66
3.3.1. Material sin procesar.....	67
3.3.2 Material procesado	74
3.4. Otros datos experimentales.....	86
3.4.1 Ensayos de Mars y Fatemi.....	86
3.4.2 Ensayos de Ayoub.....	90
Capítulo 4: Modelos de comportamiento y de vida a fatiga.....	97
4.1. Introducción	97
4.2. Leyes termodinámicas.....	98
4.3. Hiperelasticidad.....	99
4.4 Viscoelasticidad.....	111
4.4.1 Fluencia	112
4.4.2. Relajación de tensiones.....	113
4.4.3. Modelos de viscoelasticidad lineal.....	113
4.4.4. Modelos de viscoelasticidad no lineal.....	118

4.5. El efecto Mullins. Modelos de ablandamiento	119
4.5.1. Cristalización	120
4.5.2. Deformación permanente.....	121
4.5.3. Anisotropía inducida	122
4.5.4. Recuperación.....	122
4.4.5. Modelos fenomenológicos.....	123
4.4.6. Interpretaciones físicas	124
4.4.7. Modelos macromoleculares.....	125
4.6. Modelo visco-hiperelástico con ablandamiento propuesto	126
4.7. Parámetros de daño por fatiga	135
4.7.1. Parámetros tensionales.....	135
4.7.2. Parámetros de deformación	135
4.7.3. Parámetros energéticos	136
4.7.6. Otros.....	136
4.8. Modelos de acumulación de daño por fatiga	136
4.8.1. Modelos lineales	137
4.8.2. Modelos no lineales	137
4.8.3. Modelos de modificación de la curva de vida.....	139
4.8.4. Otros modelos	139
4.9. Modelos estadísticos de fatiga.....	140
4.9.1. Modelo probabilístico empleado	142
Capítulo 5: Simulaciones numéricas	145
5.1 Ensayos con Santoprene 101-73	145
5.1.1 Identificación de las leyes de comportamiento para el material virgen.....	145
5.1.2 Identificación de las leyes de comportamiento para el material manufacturado...	151
5.1.3 Simulaciones por elementos finitos	151
5.1.4 Resultados de variables de fatiga.....	152
5.2 Ensayos de Mars y Fatemi.....	155
5.2.1 Identificación de las leyes de comportamiento	155
5.2.2 Simulaciones por elementos finitos	155
5.2.3 Resultados de magnitudes de fatiga	157
5.3 Ensayos de Ayoub	169
5.3.1 Identificación de las leyes de comportamiento	169
5.3.2 Simulaciones por elementos finitos	169
5.3.3 Resultados de magnitudes de fatiga	170
Capítulo 6: Modelización de la vida a fatiga	187

6.1 Caso uniaxial: Ensayos con Santoprene	189
6.1.1 Análisis de los resultados y conclusiones	211
6.2 Caso multiaxial: Ensayos de Mars y Fatemi	212
6.2.1 Análisis de los resultados y conclusiones	235
6.3 Caso multiaxial: Ensayos de Ayoub	236
6.3.1 Análisis de los resultados y conclusiones	259
6.4. Propuesta de un modelo de fatiga unificado	260
6.4.1 Variables críticas.....	261
6.4.2 Validación del modelo para el caso uniaxial. Ensayos con Santoprene	262
6.4.3 Validación del modelo para el caso multiaxial de Mars y Fatemi	263
6.4.4 Validación del modelo para el caso multiaxial de Ayoub.....	264
6.4.5 Conclusiones del parámetro propuesto.....	265
6.4.6 Implementación del parámetro propuesto a un modelo de fatiga probabilística... 265	
6.4.7 Implementación del parámetro propuesto en un software de elementos finitos (Abaqus).	269
6.4.8 Predicción de vida a fatiga en un componente real de automoción	271
Capítulo 7: Conclusiones y futuras líneas de investigación.....	285
7.1 Conclusiones.....	285
7.2 Futuras líneas de investigación	287
Bibliografía	289

Índice de tablas

Tabla 1: Modelos de tensión equivalente	45
Tabla 2: Valores de T para ensayos de fractura	52
Tabla 3: Tracción uniaxial (línea roja Figura 23).....	67
Tabla 4: Compresión uniaxial (línea roja Figura 24).....	68
Tabla 5: Tracción planar (línea roja Figura 25).....	68
Tabla 6: Datos de ensayo uniaxial de rotura para material sin procesar.....	72
Tabla 7: Resultados de ensayos uniaxiales de fatiga para material sin procesar	73
Tabla 8: Datos de ensayo uniaxial para material procesado.....	75
Tabla 9: Resultados de ensayos de fatiga con probetas onduladas en Santoprene 101-73 procesado	82
Tabla 10: Resultados de ensayos de fatiga con probetas gubia en Santoprene 101-73 procesado en control de fuerza.....	84
Tabla 11: Resultados de ensayos de fatiga con probetas gubia en Santoprene 101-73 procesado en control de desplazamiento	85
Tabla 12: Ensayos realizados por Mars y Fatemi. 1 de 4. [53].	88
Tabla 13: Ensayos realizados por Mars y Fatemi. 2 de 4. [53].	88
Tabla 14: Ensayos realizados por Mars y Fatemi. 3 de 4. [53].	89
Tabla 15: Ensayos realizados por Mars y Fatemi. 4 de 4. [53].	90
Tabla 16: Ensayos realizados por Ayoub [69].....	92
Tabla 17: Parámetros del modelo hiperelástico de Ogden de 2º Orden para simular el material utilizado por Ayoub [69] en sus ensayos	95
Tabla 18: Variables de diferentes modelos para simular el efecto Mullins.....	124
Tabla 19: Valores propuestos de los parámetros de la rama hiperelástica a partir de datos experimentales	131
Tabla 20: Valores propuestos de los parámetros del modelo visco-hiperelástico a partir de datos experimentales	131
Tabla 21: Valores propuestos de los parámetros de la rama viscoelástica a partir de datos experimentales	131
Tabla 22: Valores propuestos de los parámetros del modelo de ablandamiento.....	131
Tabla 23: Valores del coeficiente R^2 determinados para cada modelo constitutivo y ensayo experimental.....	134
Tabla 24: Datos de deformación, tensión, densidad de energía de deformación (W) del Santoprene 101-73 según los datos experimentales del fabricante.	146
Tabla 25: Modelo de Mooney Rivlin. Valores de los parámetros de material y de coeficientes R^2 para las curvas $W-\epsilon$ y $\sigma-\epsilon$	150
Tabla 26: Modelo Neo Hookeano. Valores de los parámetros de material y de coeficientes R^2 para las curvas $W-\epsilon$ y $\sigma-\epsilon$	150
Tabla 27: Modelo de Ogden $N=3$. Valores de los parámetros de material y de coeficientes R^2 para las curvas $W-\epsilon$ y $\sigma-\epsilon$	150
Tabla 28: Modelo de Gent-Thomas. Valores de los parámetros de material y de coeficientes R^2 para las curvas $W-\epsilon$ y $\sigma-\epsilon$	150
Tabla 29: Modelo de Yeoh. Valores de los parámetros de material y de coeficientes R^2 para las curvas $W-\epsilon$ y $\sigma-\epsilon$	151

Tabla 30: Modelo de Arruda-Boyce $N=1$. Valores de los parámetros de material y de coeficientes R^2 para las curvas $W-\epsilon$ y $\sigma-\epsilon$	151
Tabla 31: Comparativa de capacidad de predicción de vida entre variables de fatiga.....	265
Tabla 32: Descripción de los modelos de análisis de malla	273
Tabla 33: Densidad de malla para los modelos de análisis de malla	273
Tabla 34: Resultado del análisis de malla.....	273
Tabla 35: Resultado del análisis de malla.....	274
Tabla 36: Resultados deterministas de vida a fatiga para el tubo	283
Tabla 37: Parámetros utilizados en el multiparámetro propuesto en esta Tesis Doctoral	283

Índice de Figuras

Figura 1: Usos de materiales elastómeros	36
Figura 2: Tipos de cargas: (a) Constante en el tiempo. (b) Periódica o cíclica. (c) Aleatoria.	42
Figura 3: Historia de tensiones con ciclos sinusoidales.....	42
Figura 4: Curva de vida	44
Figura 5: Diagrama de Haigh	45
Figura 6: Diagrama de Cadwell.....	45
Figura 7: Historia de carga compleja	46
Figura 8: Método “Level crossing count”	48
Figura 9: Método “PeakCount”	49
Figura 10: Método “RangeCount”	49
Figura 11: Método “Rainflow”	50
Figura 12: Ensayos de fractura	52
Figura 13: Velocidad de fisuración para SBR (Caucho estireno-butadieno) y NR (caucho natural) en fatiga [22]	53
Figura 14: Efecto de la histéresis en la velocidad de fisuración[26]	54
Figura 15: Ficha técnica completa de Santoprene 101-73.....	62
Figura 16: Tipos de ensayos realizados por el proveedor del material.....	63
Figura 17: Relaciones tensión-deformación para los ensayos realizados por el proveedor.....	64
Figura 18: Modelos hiperelásticos con el valor de sus parámetros sugeridos por el proveedor	65
Figura 19: Condiciones de los ensayos experimentales realizados por el proveedor	65
Figura 20: Máquina de ensayos dinámica MTS, modelo Bionix – Servohydraulic Test System [67].	66
Figura 21: Equipo óptico de precisión GOM Aramis 5M [68]	66
Figura 22: Probeta tipo dogbone o "hueso de perro"	67
Figura 23: Relación tensión-deformación para tracción uniaxial facilitados por ExxonMobil....	69
Figura 24: Relación tensión-deformación para compresión uniaxial facilitados por ExxonMobil	69
Figura 25: Relación tensión-deformación para tracción planar facilitados por ExxonMobil.....	70
Figura 26: Esquema de las diferentes posiciones del procedimiento.....	72
Figura 27: Campo S-N en ensayos a fatiga con probetas tipo “DogBone” de material sin procesar.....	73
Figura 28: Esquema del componente de donde se extrajeron las probetas del material procesado.....	74
Figura 29: Probetas tipo "rectangular"	75
Figura 30: Relación tensión-deformación para material procesado y sin procesar	76
Figura 31: Relación tensión-deformación para cada una de las probetas rectangulares de Santoprene 101-73 procesado.....	77
Figura 32: Relación tiempo-desplazamiento para cada una de las probetas rectangulares de Santoprene 101-73 procesado.....	77
Figura 33: Relación tiempo-fuerza para cada una de las probetas rectangulares de Santoprene 101-73 procesado.....	78
Figura 34: Fallo por fatiga en un componente en la zona del fuelle.....	78
Figura 35: Probeta tipo fuelle.....	79
Figura 36: Forros de acero para probetas tipo fuelle.....	79
Figura 37: Forros de aluminio para probetas tipo fuelle	79
Figura 38: Forros de madera para probetas tipo fuelle	80

Figura 39: Forros de aluminio moleteado y de mayor dimensión para probetas tipo fuelle	80
Figura 40: Forros de acero moleteado por ambas caras para probetas tipo fuelle.....	80
Figura 41: Parte de una de las cuñas donde se aprecia la curvatura.....	81
Figura 42: Juego de cuñas donde se aprecia el hueco para el refuerzo	81
Figura 43: Vista lateral del conjunto cuñas-probeta	81
Figura 44: Vista frontal del conjunto cuñas-probeta	82
Figura 45: Campo S-N para probetas onduladas en Santoprene 101-73 procesado.....	83
Figura 46: Probeta tipo "gubia" y tipo "rectangulares".....	83
Figura 47: Campo S-N para probetas tipo gubia en Santoprene 101-73 procesado	84
Figura 48: Campo ϵ -N para probetas tipo gubia en Santoprene 101-73 procesado	85
Figura 49: Probetas tipo anillo utilizadas por Mars y Fatemi[53].	86
Figura 50: Tipos de ensayos realizados por Mars y Fatemi. Designaciones: δ = desplazamiento, θ = torsión, P = Fuerza axial y T = Momento torsor [53].....	87
Figura 51: Modelo 2D para el cálculo de tensiones, deformaciones y energías[53]	87
Figura 52: Modelo 3D para el cálculo de tensiones, deformaciones y energías de los ensayos de Mars y Fatemi[53].	88
Figura 53: Probetas tipo diábolo utilizadas por Ayoub [69].....	91
Figura 54: Tipos de ensayos realizados por Ayoub. Designaciones: δ = desplazamiento, θ = torsión [69].....	91
Figura 55: Modelo 3D para el cálculo de tensiones, deformaciones y energías de los ensayos de Ayoub [69].....	92
Figura 56: Formulación del material empleado por Ayoub xxx en sus ensayos.	95
Figura 57: (a)Modelo elástico lineal. (b)Modelo no lineal	97
Figura 58: Clasificación de modelos hiperelásticos.....	103
Figura 59: Evolución temporal de la deformación de un material elástico y otro viscoelástico sometidos a tensiones constantes	112
Figura 60: Evolución temporal de la deformación de materiales elásticos, viscoelásticos y viscosos puros sometidos a tensiones constantes.....	113
Figura 61: Modelo de muelle elástico puro (Hooke).....	114
Figura 62: Modelo de amortiguador viscoso puro.....	114
Figura 63: Modelo de Maxwell.....	115
Figura 64: Modelo de Kelvin-Voigt.....	115
Figura 65: Modelo del sólido lineal estándar o de Zener.....	116
Figura 66: Modelo de los cuatro elementos o de Burgers	116
Figura 67: Modelo generalizado de Kelvin-Voigt	117
Figura 68: Modelo de generalizado de Maxwell.....	118
Figura 69: Tipos de modelos para reproducir el efecto Mullins	123
Figura 70: Representación reológica del modelo visco-hiperelástico propuesto.....	128
Figura 71: Comparación entre los datos experimentales y las curvas de fuerza-desplazamiento simuladas con el modelo Elastico Lineal	132
Figura 72: Comparación entre los datos experimentales y las curvas de fuerza-desplazamiento simuladas mediante el modelo hiperelástico	132
Figura 73: Comparación entre los datos experimentales y las curvas de fuerza-desplazamiento simuladas mediante el modelo visco-hiperelástico	133
Figura 74: Comparación entre datos experimentales y curvas de fuerza-desplazamiento simuladas utilizando el modelo visco-hiperelástico con el modelo de daño de Ogden-Roxburgh.	133

Figura 75: Comparación entre los datos experimentales y las curvas de fuerza-desplazamiento simuladas utilizando el modelo propuesto	134
Figura 76: Curvas S-N equi-probabilísticas.....	140
Figura 77: Curvas N-P(Probabilidad de fallo) a diferentes niveles de tensión	141
Figura 78: Curvas S-N con la distribución de fallo a cada nivel de tensión	141
Figura 79: Representación de la curva de probabilidad del parámetro de regresión u	143
Figura 80: Representación del campo de vida útil probabilístico p - ψ -N de Weibull.....	144
Figura 81: Diagrama de tensión-deformación del Santoprene 101-73 según los datos experimentales del fabricante.	146
Figura 82: Modelo de Mooney Rivlin. (a) Curva Densidad de energía de deformación - deformación; (b) Curva tensión - deformación.....	148
Figura 83: Modelo Neo Hookeano. (a) Curva Densidad de energía de deformación - deformación; (b) Curva tensión - deformación.....	148
Figura 84: Modelo de Gent-Thomas. (a) Curva Densidad de energía de deformación - deformación; (b) Curva tensión - deformación.....	149
Figura 85: Modelo de Ogden N=3. (a) Curva Densidad de energía de deformación - deformación; (b) Curva tensión - deformación.....	149
Figura 86: Modelo de Yeoh. (a) Curva Densidad de energía de deformación - deformación; (b) Curva tensión - deformación.....	149
Figura 87: Modelo de Arruda-Boyce. (a) Curva Densidad de energía de deformación - deformación; (b) Curva tensión - deformación.....	150
Figura 88: Desplazamientos impuestos en las probetas para los ensayos. Simulación numérica con el software de elementos finitos Abaqus [6].	152
Figura 89: Resultado de la simulación mecánica del ensayo 1 en el punto de rotura de la probeta por fatiga: (a) Desplazamiento (mm) y giro (grados) impuesto a la probeta en un ciclo de carga. (b) Variables tensionales: Tensión ppal. máx., tensión ppal. med., tensión ppal. mín., tensión de Von Mises, tensión de Tresca. (c) Variables de deformación: Deformación ppal. máx., deformación ppal. med., deformación ppal. mín., def. octaédrica, distorsión angular octaédrica. (d) Variables de energéticas: Densidad de energía de deformación, densidad de energía de deformación para la grieta de Mars y Fatemi. -- Evolución de los parámetros de plano crítico según el ángulo de dicho plano con respecto a la dirección ppal. máxima, en el momento de máxima tensión principal máxima en la historia de carga. (e) Brown-Miller y Fatemi-Socie. (f) Findley y Wang-Brown. (g) Smith-Watson-Topper y McDiarmid. (h) Liu W y Liu WII.....	153
Figura 90: Resultado de la simulación mecánica del ensayo Gubia 1 en el punto de rotura de la probeta por fatiga: (a) Desplazamiento (mm) y giro (grados) impuesto a la probeta en un ciclo de carga. (b) Variables tensionales: Tensión ppal. máx., tensión ppal. med., tensión ppal. mín., tensión de Von Mises, tensión de Tresca. (c) Variables de deformación: Deformación ppal. máx., deformación ppal. med., deformación ppal. mín., def. octaédrica, distorsión angular octaédrica. (d) Variables de energéticas: Densidad de energía de deformación, densidad de energía de deformación para la grieta de Mars y Fatemi. -- Evolución de los parámetros de plano crítico según el ángulo de dicho plano con respecto a la dirección ppal. máxima, en el momento de máxima tensión principal máxima en la historia de carga. (e) Brown-Miller y Fatemi-Socie. (f) Findley y Wang-Brown. (g) Smith-Watson-Topper y McDiarmid. (h) Liu W y Liu WII.....	154
Figura 91: Desplazamientos impuestos en las probetas para los ensayos de Mars y Fatemi. .	156

Figura 92: Simulación mecánica con el software de elementos finitos Abaqus [259] del ensayo C1 de Mars y Fatemi.....	156
Figura 93: Elemento finito del que se obtienen las variables mecánicas. Representa la zona geométrica donde se inicia la rotura por fatiga de la probeta.	157
Figura 94: Resultado de la simulación mecánica del ensayo A1 en el punto de rotura de la probeta por fatiga: (a) Desplazamiento (mm) y giro (grados) impuesto a la probeta en un ciclo de carga. (b) Variables tensionales: Tensión ppal. máx., tensión ppal. med., tensión ppal. mín., tensión de Von Mises, tensión de Tresca. (c) Variables de deformación: Deformación ppal. máx., deformación ppal. med., deformación ppal. mín., def. octaédrica, distorsión angular octaédrica. (d) Variables de energéticas: Densidad de energía de deformación, densidad de energía de deformación para la grieta de Mars y Fatemi. -- Evolución de los parámetros de plano crítico según el ángulo de dicho plano con respecto a la dirección ppal. máxima, en el momento de máxima tensión principal máxima en la historia de carga. (e) Brown-Miller y Fatemi-Socie. (f) Findley y Wang-Brown. (g) Smith-Watson-Topper y McDiarmid. (h) Liu W y Liu WII.....	158
Figura 95: Resultado de la simulación mecánica del ensayo B1 en el punto de rotura de la probeta por fatiga: (a) Desplazamiento (mm) y giro (grados) impuesto a la probeta en un ciclo de carga. (b) Variables tensionales: Tensión ppal. máx., tensión ppal. med., tensión ppal. mín., tensión de Von Mises, tensión de Tresca. (c) Variables de deformación: Deformación ppal. máx., deformación ppal. med., deformación ppal. mín., def. octaédrica, distorsión angular octaédrica. (d) Variables de energéticas: Densidad de energía de deformación, densidad de energía de deformación para la grieta de Mars y Fatemi. -- Evolución de los parámetros de plano crítico según el ángulo de dicho plano con respecto a la dirección ppal. máxima, en el momento de máxima tensión principal máxima en la historia de carga. (e) Brown-Miller y Fatemi-Socie. (f) Findley y Wang-Brown. (g) Smith-Watson-Topper y McDiarmid. (h) Liu W y Liu WII.....	159
Figura 96: Resultado de la simulación mecánica del ensayo C1 en el punto de rotura de la probeta por fatiga: (a) Desplazamiento (mm) y giro (grados) impuesto a la probeta en un ciclo de carga. (b) Variables tensionales: Tensión ppal. máx., tensión ppal. med., tensión ppal. mín., tensión de Von Mises, tensión de Tresca. (c) Variables de deformación: Deformación ppal. máx., deformación ppal. med., deformación ppal. mín., def. octaédrica, distorsión angular octaédrica. (d) Variables de energéticas: Densidad de energía de deformación, densidad de energía de deformación para la grieta de Mars y Fatemi. -- Evolución de los parámetros de plano crítico según el ángulo de dicho plano con respecto a la dirección ppal. máxima, en el momento de máxima tensión principal máxima en la historia de carga. (e) Brown-Miller y Fatemi-Socie. (f) Findley y Wang-Brown. (g) Smith-Watson-Topper y McDiarmid. (h) Liu W y Liu WII.....	160
Figura 97: Resultado de la simulación mecánica del ensayo M1 en el punto de rotura de la probeta por fatiga: (a) Desplazamiento (mm) y giro (grados) impuesto a la probeta en un ciclo de carga. (b) Variables tensionales: Tensión ppal. máx., tensión ppal. med., tensión ppal. mín., tensión de Von Mises, tensión de Tresca. (c) Variables de deformación: Deformación ppal. máx., deformación ppal. med., deformación ppal. mín., def. octaédrica, distorsión angular octaédrica. (d) Variables de energéticas: Densidad de energía de deformación, densidad de energía de deformación para la grieta de Mars y Fatemi. -- Evolución de los parámetros de plano crítico según el	

ángulo de dicho plano con respecto a la dirección ppal. máxima, en el momento de máxima tensión principal máxima en la historia de carga. (e) Brown-Miller y Fatemi-Socie. (f) Findley y Wang-Brown. (g) Smith-Watson-Topper y McDiarmid. (h) Liu W y Liu WII..... 161

Figura 98: Resultado de la simulación mecánica del ensayo J1 en el punto de rotura de la probeta por fatiga: (a) Desplazamiento (mm) y giro (grados) impuesto a la probeta en un ciclo de carga. (b) Variables tensionales: Tensión ppal. máx., tensión ppal. med., tensión ppal. mín., tensión de Von Mises, tensión de Tresca. (c) Variables de deformación: Deformación ppal. máx., deformación ppal. med., deformación ppal. mín., def. octaédrica, distorsión angular octaédrica. (d) Variables de energéticas: Densidad de energía de deformación, densidad de energía de deformación para la grieta de Mars y Fatemi. -- Evolución de los parámetros de plano crítico según el ángulo de dicho plano con respecto a la dirección ppal. máxima, en el momento de máxima tensión principal máxima en la historia de carga. (e) Brown-Miller y Fatemi-Socie. (f) Findley y Wang-Brown. (g) Smith-Watson-Topper y McDiarmid. (h) Liu W y Liu WII..... 162

Figura 99: Resultado de la simulación mecánica del ensayo K1 en el punto de rotura de la probeta por fatiga: (a) Desplazamiento (mm) y giro (grados) impuesto a la probeta en un ciclo de carga. (b) Variables tensionales: Tensión ppal. máx., tensión ppal. med., tensión ppal. mín., tensión de Von Mises, tensión de Tresca. (c) Variables de deformación: Deformación ppal. máx., deformación ppal. med., deformación ppal. mín., def. octaédrica, distorsión angular octaédrica. (d) Variables de energéticas: Densidad de energía de deformación, densidad de energía de deformación para la grieta de Mars y Fatemi. -- Evolución de los parámetros de plano crítico según el ángulo de dicho plano con respecto a la dirección ppal. máxima, en el momento de máxima tensión principal máxima en la historia de carga. (e) Brown-Miller y Fatemi-Socie. (f) Findley y Wang-Brown. (g) Smith-Watson-Topper y McDiarmid. (h) Liu W y Liu WII..... 163

Figura 100: Resultado de la simulación mecánica del ensayo D1 en el punto de rotura de la probeta por fatiga: (a) Desplazamiento (mm) y giro (grados) impuesto a la probeta en un ciclo de carga. (b) Variables tensionales: Tensión ppal. máx., tensión ppal. med., tensión ppal. mín., tensión de Von Mises, tensión de Tresca. (c) Variables de deformación: Deformación ppal. máx., deformación ppal. med., deformación ppal. mín., def. octaédrica, distorsión angular octaédrica. (d) Variables de energéticas: Densidad de energía de deformación, densidad de energía de deformación para la grieta de Mars y Fatemi. -- Evolución de los parámetros de plano crítico según el ángulo de dicho plano con respecto a la dirección ppal. máxima, en el momento de máxima tensión principal máxima en la historia de carga. (e) Brown-Miller y Fatemi-Socie. (f) Findley y Wang-Brown. (g) Smith-Watson-Topper y McDiarmid. (h) Liu W y Liu WII..... 164

Figura 101: Resultado de la simulación mecánica del ensayo E1 en el punto de rotura de la probeta por fatiga: (a) Desplazamiento (mm) y giro (grados) impuesto a la probeta en un ciclo de carga. (b) Variables tensionales: Tensión ppal. máx., tensión ppal. med., tensión ppal. mín., tensión de Von Mises, tensión de Tresca. (c) Variables de deformación: Deformación ppal. máx., deformación ppal. med., deformación ppal. mín., def. octaédrica, distorsión angular octaédrica. (d) Variables de energéticas: Densidad de energía de deformación, densidad de energía de deformación para la grieta de Mars y Fatemi. -- Evolución de los parámetros de plano crítico según el

ángulo de dicho plano con respecto a la dirección ppal. máxima, en el momento de máxima tensión principal máxima en la historia de carga. (e) Brown-Miller y Fatemi-Socie. (f) Findley y Wang-Brown. (g) Smith-Watson-Topper y McDiarmid. (h) Liu W y Liu WII..... 165

Figura 102: Resultado de la simulación mecánica del ensayo F1 en el punto de rotura de la probeta por fatiga: (a) Desplazamiento (mm) y giro (grados) impuesto a la probeta en un ciclo de carga. (b) Variables tensionales: Tensión ppal. máx., tensión ppal. med., tensión ppal. mín., tensión de Von Mises, tensión de Tresca. (c) Variables de deformación: Deformación ppal. máx., deformación ppal. med., deformación ppal. mín., def. octaédrica, distorsión angular octaédrica. (d) Variables de energéticas: Densidad de energía de deformación, densidad de energía de deformación para la grieta de Mars y Fatemi. -- Evolución de los parámetros de plano crítico según el ángulo de dicho plano con respecto a la dirección ppal. máxima, en el momento de máxima tensión principal máxima en la historia de carga. (e) Brown-Miller y Fatemi-Socie. (f) Findley y Wang-Brown. (g) Smith-Watson-Topper y McDiarmid. (h) Liu W y Liu WII..... 166

Figura 103: Resultado de la simulación mecánica del ensayo L1 en el punto de rotura de la probeta por fatiga: (a) Desplazamiento (mm) y giro (grados) impuesto a la probeta en un ciclo de carga. (b) Variables tensionales: Tensión ppal. máx., tensión ppal. med., tensión ppal. mín., tensión de Von Mises, tensión de Tresca. (c) Variables de deformación: Deformación ppal. máx., deformación ppal. med., deformación ppal. mín., def. octaédrica, distorsión angular octaédrica. (d) Variables de energéticas: Densidad de energía de deformación, densidad de energía de deformación para la grieta de Mars y Fatemi. -- Evolución de los parámetros de plano crítico según el ángulo de dicho plano con respecto a la dirección ppal. máxima, en el momento de máxima tensión principal máxima en la historia de carga. (e) Brown-Miller y Fatemi-Socie. (f) Findley y Wang-Brown. (g) Smith-Watson-Topper y McDiarmid. (h) Liu W y Liu WII..... 167

Figura 104: Resultado de la simulación mecánica del ensayo G1 en el punto de rotura de la probeta por fatiga: (a) Desplazamiento (mm) y giro (grados) impuesto a la probeta en un ciclo de carga. (b) Variables tensionales: Tensión ppal. máx., tensión ppal. med., tensión ppal. mín., tensión de Von Mises, tensión de Tresca. (c) Variables de deformación: Deformación ppal. máx., deformación ppal. med., deformación ppal. mín., def. octaédrica, distorsión angular octaédrica. (d) Variables de energéticas: Densidad de energía de deformación, densidad de energía de deformación para la grieta de Mars y Fatemi. -- Evolución de los parámetros de plano crítico según el ángulo de dicho plano con respecto a la dirección ppal. máxima, en el momento de máxima tensión principal máxima en la historia de carga. (e) Brown-Miller y Fatemi-Socie. (f) Findley y Wang-Brown. (g) Smith-Watson-Topper y McDiarmid. (h) Liu W y Liu WII..... 168

Figura 105: Desplazamientos impuestos en las probetas para los ensayos de Ayoub 169

Figura 106: Simulación mecánica con el software de elementos finitos Abaqus [1] del ensayo D2 44 de Ayoub. 170

Figura 107: Resultado de la simulación mecánica del ensayo A 1 en el punto de rotura de la probeta por fatiga: (a) Desplazamiento (mm) y giro (grados) impuesto a la probeta en un ciclo de carga. (b) Variables tensionales: Tensión ppal. máx., tensión ppal. med., tensión ppal. mín., tensión de Von Mises, tensión de Tresca. (c) Variables de deformación: Deformación ppal. máx., deformación ppal. med., deformación ppal.

mín., def. octaédrica, distorsión angular octaédrica. (d) Variables de energéticas: Densidad de energía de deformación, densidad de energía de deformación para la grieta de Mars y Fatemi. -- Evolución de los parámetros de plano crítico según el ángulo de dicho plano con respecto a la dirección ppal. máxima, en el momento de máxima tensión principal máxima en la historia de carga. (e) Brown-Miller y Fatemi-Socie. (f) Findley y Wang-Brown. (g) Smith-Watson-Topper y McDiarmid. (h) Liu W y Liu WII..... 171

Figura 108: Resultado de la simulación mecánica del ensayo B 9 en el punto de rotura de la probeta por fatiga: (a) Desplazamiento (mm) y giro (grados) impuesto a la probeta en un ciclo de carga. (b) Variables tensionales: Tensión ppal. máx., tensión ppal. med., tensión ppal. mín., tensión de Von Mises, tensión de Tresca. (c) Variables de deformación: Deformación ppal. máx., deformación ppal. med., deformación ppal. mín., def. octaédrica, distorsión angular octaédrica. (d) Variables de energéticas: Densidad de energía de deformación, densidad de energía de deformación para la grieta de Mars y Fatemi. -- Evolución de los parámetros de plano crítico según el ángulo de dicho plano con respecto a la dirección ppal. máxima, en el momento de máxima tensión principal máxima en la historia de carga. (e) Brown-Miller y Fatemi-Socie. (f) Findley y Wang-Brown. (g) Smith-Watson-Topper y McDiarmid. (h) Liu W y Liu WII..... 172

Figura 109: Resultado de la simulación mecánica del ensayo C 22 en el punto de rotura de la probeta por fatiga: (a) Desplazamiento (mm) y giro (grados) impuesto a la probeta en un ciclo de carga. (b) Variables tensionales: Tensión ppal. máx., tensión ppal. med., tensión ppal. mín., tensión de Von Mises, tensión de Tresca. (c) Variables de deformación: Deformación ppal. máx., deformación ppal. med., deformación ppal. mín., def. octaédrica, distorsión angular octaédrica. (d) Variables de energéticas: Densidad de energía de deformación, densidad de energía de deformación para la grieta de Mars y Fatemi. -- Evolución de los parámetros de plano crítico según el ángulo de dicho plano con respecto a la dirección ppal. máxima, en el momento de máxima tensión principal máxima en la historia de carga. (e) Brown-Miller y Fatemi-Socie. (f) Findley y Wang-Brown. (g) Smith-Watson-Topper y McDiarmid. (h) Liu W y Liu WII..... 173

Figura 110: Resultado de la simulación mecánica del ensayo D1 34 en el punto de rotura de la probeta por fatiga: (a) Desplazamiento (mm) y giro (grados) impuesto a la probeta en un ciclo de carga. (b) Variables tensionales: Tensión ppal. máx., tensión ppal. med., tensión ppal. mín., tensión de Von Mises, tensión de Tresca. (c) Variables de deformación: Deformación ppal. máx., deformación ppal. med., deformación ppal. mín., def. octaédrica, distorsión angular octaédrica. (d) Variables de energéticas: Densidad de energía de deformación, densidad de energía de deformación para la grieta de Mars y Fatemi. -- Evolución de los parámetros de plano crítico según el ángulo de dicho plano con respecto a la dirección ppal. máxima, en el momento de máxima tensión principal máxima en la historia de carga. (e) Brown-Miller y Fatemi-Socie. (f) Findley y Wang-Brown. (g) Smith-Watson-Topper y McDiarmid. (h) Liu W y Liu WII..... 174

Figura 111: Resultado de la simulación mecánica del ensayo D2 44 en el punto de rotura de la probeta por fatiga: (a) Desplazamiento (mm) y giro (grados) impuesto a la probeta en un ciclo de carga. (b) Variables tensionales: Tensión ppal. máx., tensión ppal. med., tensión ppal. mín., tensión de Von Mises, tensión de Tresca. (c) Variables de deformación: Deformación ppal. máx., deformación ppal. med., deformación ppal.

mín., def. octaédrica, distorsión angular octaédrica. (d) Variables de energéticas: Densidad de energía de deformación, densidad de energía de deformación para la grieta de Mars y Fatemi. -- Evolución de los parámetros de plano crítico según el ángulo de dicho plano con respecto a la dirección ppal. máxima, en el momento de máxima tensión principal máxima en la historia de carga. (e) Brown-Miller y Fatemi-Socie. (f) Findley y Wang-Brown. (g) Smith-Watson-Topper y McDiarmid. (h) Liu W y Liu WII..... 175

Figura 112: Resultado de la simulación mecánica del ensayo D3 53 en el punto de rotura de la probeta por fatiga: (a) Desplazamiento (mm) y giro (grados) impuesto a la probeta en un ciclo de carga. (b) Variables tensionales: Tensión ppal. máx., tensión ppal. med., tensión ppal. mín., tensión de Von Mises, tensión de Tresca. (c) Variables de deformación: Deformación ppal. máx., deformación ppal. med., deformación ppal. mín., def. octaédrica, distorsión angular octaédrica. (d) Variables de energéticas: Densidad de energía de deformación, densidad de energía de deformación para la grieta de Mars y Fatemi. -- Evolución de los parámetros de plano crítico según el ángulo de dicho plano con respecto a la dirección ppal. máxima, en el momento de máxima tensión principal máxima en la historia de carga. (e) Brown-Miller y Fatemi-Socie. (f) Findley y Wang-Brown. (g) Smith-Watson-Topper y McDiarmid. (h) Liu W y Liu WII..... 176

Figura 113: Resultado de la simulación mecánica del ensayo D4 62 en el punto de rotura de la probeta por fatiga: (a) Desplazamiento (mm) y giro (grados) impuesto a la probeta en un ciclo de carga. (b) Variables tensionales: Tensión ppal. máx., tensión ppal. med., tensión ppal. mín., tensión de Von Mises, tensión de Tresca. (c) Variables de deformación: Deformación ppal. máx., deformación ppal. med., deformación ppal. mín., def. octaédrica, distorsión angular octaédrica. (d) Variables de energéticas: Densidad de energía de deformación, densidad de energía de deformación para la grieta de Mars y Fatemi. -- Evolución de los parámetros de plano crítico según el ángulo de dicho plano con respecto a la dirección ppal. máxima, en el momento de máxima tensión principal máxima en la historia de carga. (e) Brown-Miller y Fatemi-Socie. (f) Findley y Wang-Brown. (g) Smith-Watson-Topper y McDiarmid. (h) Liu W y Liu WII..... 177

Figura 114: Resultado de la simulación mecánica del ensayo D5 68 en el punto de rotura de la probeta por fatiga: (a) Desplazamiento (mm) y giro (grados) impuesto a la probeta en un ciclo de carga. (b) Variables tensionales: Tensión ppal. máx., tensión ppal. med., tensión ppal. mín., tensión de Von Mises, tensión de Tresca. (c) Variables de deformación: Deformación ppal. máx., deformación ppal. med., deformación ppal. mín., def. octaédrica, distorsión angular octaédrica. (d) Variables de energéticas: Densidad de energía de deformación, densidad de energía de deformación para la grieta de Mars y Fatemi. -- Evolución de los parámetros de plano crítico según el ángulo de dicho plano con respecto a la dirección ppal. máxima, en el momento de máxima tensión principal máxima en la historia de carga. (e) Brown-Miller y Fatemi-Socie. (f) Findley y Wang-Brown. (g) Smith-Watson-Topper y McDiarmid. (h) Liu W y Liu WII..... 178

Figura 115: Resultado de la simulación mecánica del ensayo D6 73 en el punto de rotura de la probeta por fatiga: (a) Desplazamiento (mm) y giro (grados) impuesto a la probeta en un ciclo de carga. (b) Variables tensionales: Tensión ppal. máx., tensión ppal. med., tensión ppal. mín., tensión de Von Mises, tensión de Tresca. (c) Variables de deformación: Deformación ppal. máx., deformación ppal. med., deformación ppal.

mín., def. octaédrica, distorsión angular octaédrica. (d) Variables de energéticas: Densidad de energía de deformación, densidad de energía de deformación para la grieta de Mars y Fatemi. -- Evolución de los parámetros de plano crítico según el ángulo de dicho plano con respecto a la dirección ppal. máxima, en el momento de máxima tensión principal máxima en la historia de carga. (e) Brown-Miller y Fatemi-Socie. (f) Findley y Wang-Brown. (g) Smith-Watson-Topper y McDiarmid. (h) Liu W y Liu WII..... 179

Figura 116: Resultado de la simulación mecánica del ensayo E1 77 en el punto de rotura de la probeta por fatiga: (a) Desplazamiento (mm) y giro (grados) impuesto a la probeta en un ciclo de carga. (b) Variables tensionales: Tensión ppal. máx., tensión ppal. med., tensión ppal. mín., tensión de Von Mises, tensión de Tresca. (c) Variables de deformación: Deformación ppal. máx., deformación ppal. med., deformación ppal. mín., def. octaédrica, distorsión angular octaédrica. (d) Variables de energéticas: Densidad de energía de deformación, densidad de energía de deformación para la grieta de Mars y Fatemi. -- Evolución de los parámetros de plano crítico según el ángulo de dicho plano con respecto a la dirección ppal. máxima, en el momento de máxima tensión principal máxima en la historia de carga. (e) Brown-Miller y Fatemi-Socie. (f) Findley y Wang-Brown. (g) Smith-Watson-Topper y McDiarmid. (h) Liu W y Liu WII..... 180

Figura 117: Resultado de la simulación mecánica del ensayo E2 87 en el punto de rotura de la probeta por fatiga: (a) Desplazamiento (mm) y giro (grados) impuesto a la probeta en un ciclo de carga. (b) Variables tensionales: Tensión ppal. máx., tensión ppal. med., tensión ppal. mín., tensión de Von Mises, tensión de Tresca. (c) Variables de deformación: Deformación ppal. máx., deformación ppal. med., deformación ppal. mín., def. octaédrica, distorsión angular octaédrica. (d) Variables de energéticas: Densidad de energía de deformación, densidad de energía de deformación para la grieta de Mars y Fatemi. -- Evolución de los parámetros de plano crítico según el ángulo de dicho plano con respecto a la dirección ppal. máxima, en el momento de máxima tensión principal máxima en la historia de carga. (e) Brown-Miller y Fatemi-Socie. (f) Findley y Wang-Brown. (g) Smith-Watson-Topper y McDiarmid. (h) Liu W y Liu WII..... 181

Figura 118: Resultado de la simulación mecánica del ensayo E3 96 en el punto de rotura de la probeta por fatiga: (a) Desplazamiento (mm) y giro (grados) impuesto a la probeta en un ciclo de carga. (b) Variables tensionales: Tensión ppal. máx., tensión ppal. med., tensión ppal. mín., tensión de Von Mises, tensión de Tresca. (c) Variables de deformación: Deformación ppal. máx., deformación ppal. med., deformación ppal. mín., def. octaédrica, distorsión angular octaédrica. (d) Variables de energéticas: Densidad de energía de deformación, densidad de energía de deformación para la grieta de Mars y Fatemi. -- Evolución de los parámetros de plano crítico según el ángulo de dicho plano con respecto a la dirección ppal. máxima, en el momento de máxima tensión principal máxima en la historia de carga. (e) Brown-Miller y Fatemi-Socie. (f) Findley y Wang-Brown. (g) Smith-Watson-Topper y McDiarmid. (h) Liu W y Liu WII..... 182

Figura 119: Resultado de la simulación mecánica del ensayo E4 107 en el punto de rotura de la probeta por fatiga: (a) Desplazamiento (mm) y giro (grados) impuesto a la probeta en un ciclo de carga. (b) Variables tensionales: Tensión ppal. máx., tensión ppal. med., tensión ppal. mín., tensión de Von Mises, tensión de Tresca. (c) Variables de deformación: Deformación ppal. máx., deformación ppal. med., deformación ppal.

mín., def. octaédrica, distorsión angular octaédrica. (d) Variables de energéticas: Densidad de energía de deformación, densidad de energía de deformación para la grieta de Mars y Fatemi. -- Evolución de los parámetros de plano crítico según el ángulo de dicho plano con respecto a la dirección ppal. máxima, en el momento de máxima tensión principal máxima en la historia de carga. (e) Brown-Miller y Fatemi-Socie. (f) Findley y Wang-Brown. (g) Smith-Watson-Topper y McDiarmid. (h) Liu W y Liu WII..... 183

Figura 120: Resultado de la simulación mecánica del ensayo E5 114 en el punto de rotura de la probeta por fatiga: (a) Desplazamiento (mm) y giro (grados) impuesto a la probeta en un ciclo de carga. (b) Variables tensionales: Tensión ppal. máx., tensión ppal. med., tensión ppal. mín., tensión de Von Mises, tensión de Tresca. (c) Variables de deformación: Deformación ppal. máx., deformación ppal. med., deformación ppal. mín., def. octaédrica, distorsión angular octaédrica. (d) Variables de energéticas: Densidad de energía de deformación, densidad de energía de deformación para la grieta de Mars y Fatemi. -- Evolución de los parámetros de plano crítico según el ángulo de dicho plano con respecto a la dirección ppal. máxima, en el momento de máxima tensión principal máxima en la historia de carga. (e) Brown-Miller y Fatemi-Socie. (f) Findley y Wang-Brown. (g) Smith-Watson-Topper y McDiarmid. (h) Liu W y Liu WII..... 184

Figura 121: Resultado de la simulación mecánica del ensayo E6 119 en el punto de rotura de la probeta por fatiga: (a) Desplazamiento (mm) y giro (grados) impuesto a la probeta en un ciclo de carga. (b) Variables tensionales: Tensión ppal. máx., tensión ppal. med., tensión ppal. mín., tensión de Von Mises, tensión de Tresca. (c) Variables de deformación: Deformación ppal. máx., deformación ppal. med., deformación ppal. mín., def. octaédrica, distorsión angular octaédrica. (d) Variables de energéticas: Densidad de energía de deformación, densidad de energía de deformación para la grieta de Mars y Fatemi. -- Evolución de los parámetros de plano crítico según el ángulo de dicho plano con respecto a la dirección ppal. máxima, en el momento de máxima tensión principal máxima en la historia de carga. (e) Brown-Miller y Fatemi-Socie. (f) Findley y Wang-Brown. (g) Smith-Watson-Topper y McDiarmid. (h) Liu W y Liu WII..... 185

Figura 122: Resultado de la simulación mecánica del ensayo E7 124 en el punto de rotura de la probeta por fatiga: (a) Desplazamiento (mm) y giro (grados) impuesto a la probeta en un ciclo de carga. (b) Variables tensionales: Tensión ppal. máx., tensión ppal. med., tensión ppal. mín., tensión de Von Mises, tensión de Tresca. (c) Variables de deformación: Deformación ppal. máx., deformación ppal. med., deformación ppal. mín., def. octaédrica, distorsión angular octaédrica. (d) Variables de energéticas: Densidad de energía de deformación, densidad de energía de deformación para la grieta de Mars y Fatemi. -- Evolución de los parámetros de plano crítico según el ángulo de dicho plano con respecto a la dirección ppal. máxima, en el momento de máxima tensión principal máxima en la historia de carga. (e) Brown-Miller y Fatemi-Socie. (f) Findley y Wang-Brown. (g) Smith-Watson-Topper y McDiarmid. (h) Liu W y Liu WII..... 186

Figura 123: Representación de la vida de una probeta en función del parámetro de fatiga calculado. 187

Figura 124: Ajuste analítico de las curvas Parámetro de fatiga ($\Delta\sigma_1$) - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos realizados con Santoprene. Valor del coeficiente de

	correlación $R^2=0,795$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-0,134$ $B=3,784$ $C=-0,858$	189
Figura 125:	Ajuste analítico de las curvas Parámetro de fatiga ($\text{Max}_\sigma1$) - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos realizados con Santoprene. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,713$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-0,118$ $B=3,052$ $C=0,000$	190
Figura 126:	Ajuste analítico de las curvas Parámetro de fatiga ($\Delta\sigma\text{VM}$) - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos realizados con Santoprene. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,795$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-0,134$ $B=3,784$ $C=-0,858$	191
Figura 127:	Ajuste analítico de las curvas Parámetro de fatiga ($\text{Max}_\sigma\text{VM}$) - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos realizados con Santoprene. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,713$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-0,118$ $B=3,052$ $C=0,000$	192
Figura 128:	Ajuste analítico de las curvas Parámetro de fatiga ($\Delta\tau_{\text{max}}(\text{Tresca})$) - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos realizados con Santoprene. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,795$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-0,067$ $B=1,892$ $C=-0,858$	193
Figura 129:	Ajuste analítico de las curvas Parámetro de fatiga ($\text{Max}_\tau_{\text{max}}(\text{Tresca})$) - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos realizados con Santoprene. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,713$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-0,059$ $B=1,526$ $C=0,000$	194
Figura 130:	Ajuste analítico de las curvas Parámetro de fatiga ($\Delta\epsilon1$) - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos realizados con Santoprene. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,802$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-0,104$ $B=1,863$ $C=-0,325$	195
Figura 131:	Ajuste analítico de las curvas Parámetro de fatiga ($\text{Max}_\epsilon1$) - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos realizados con Santoprene. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,759$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-0,075$ $B=1,333$ $C=0,000$	196
Figura 132:	Ajuste analítico de las curvas Parámetro de fatiga ($\Delta\epsilon_{\text{oct}}$) - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos realizados con Santoprene. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,799$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-0,029$ $B=0,498$ $C=-0,395$	197
Figura 133:	Ajuste analítico de las curvas Parámetro de fatiga ($\text{Max}_\epsilon_{\text{oct}}$) - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos realizados con Santoprene. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,752$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-0,021$ $B=0,353$ $C=0,000$	198
Figura 134:	Ajuste analítico de las curvas Parámetro de fatiga ($\Delta\gamma_{\text{oct}}$) - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos realizados con Santoprene. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,804$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-0,106$ $B=1,953$ $C=-0,298$	199
Figura 135:	Ajuste analítico de las curvas Parámetro de fatiga ($\text{Max}_\gamma_{\text{oct}}$) - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos realizados con Santoprene. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,762$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-0,077$ $B=1,402$ $C=0,000$	200
Figura 136:	Ajuste analítico de las curvas Parámetro de fatiga (ΔW) - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos realizados con Santoprene. Valor del coeficiente de	

	correlación $R^2=0,806$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-0,168$ $B=2,919$ $C=-0,341$	201
Figura 137:	Ajuste analítico de las curvas Parámetro de fatiga (Max_W) - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos realizados con Santoprene. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,762$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-0,12$ $B=2,073$ $C=0,000$	202
Figura 138:	Ajuste analítico de las curvas Parámetro de fatiga (Brown-Miller) - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos realizados con Santoprene. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,414$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-0,028$ $B=0,476$ $C=0,000$	203
Figura 139:	Ajuste analítico de las curvas Parámetro de fatiga (Findley) - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos realizados con Santoprene. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,562$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-0,043$ $B=1,032$ $C=0,000$	204
Figura 140:	Ajuste analítico de las curvas Parámetro de fatiga (Wang-Brown) - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos realizados con Santoprene. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,446$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-0,303$ $B=5$ $C=0,000$	205
Figura 141:	Ajuste analítico de las curvas Parámetro de fatiga (Fatemi Socie) - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos realizados con Santoprene. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,417$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-0,029$ $B=0,495$ $C=0,000$	206
Figura 142:	Ajuste analítico de las curvas Parámetro de fatiga (SWT) - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos realizados con Santoprene. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,497$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-0,143$ $B=2,137$ $C=0,000$	207
Figura 143:	Ajuste analítico de las curvas Parámetro de fatiga (Liu WI) - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos realizados con Santoprene. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,475$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-0,256$ $B=3,787$ $C=0,000$	208
Figura 144:	Ajuste analítico de las curvas Parámetro de fatiga (Liu WII) - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos realizados con Santoprene. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,470$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-0,401$ $B=5,975$ $C=0,000$	209
Figura 145:	Ajuste analítico de las curvas Parámetro de fatiga (McDiarmid) - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos realizados con Santoprene. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,710$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-0,303$ $B=7,839$ $C=0,000$	210
Figura 146:	Comparación de los coeficientes de correlación R^2 para cada uno de los parámetros críticos de fatiga aplicados a los ensayos realizados con Santoprene.	211
Figura 147:	Ajuste analítico de las curvas $\Delta\sigma_1$ - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos de Mars y Fatemi. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,708$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-1,239$ $B=18,348$ $C=-0,571$	212
Figura 148:	Ajuste analítico de las curvas Max_σ_1 - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos de Mars y Fatemi. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,708$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-1,454$ $B=21,490$ $C=0,000$	213

Figura 149: Ajuste analítico de las curvas $\Delta\tau_{max}$ (Tresca) - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos de Mars y Fatemi. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,810$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-0,619$ $B=9,606$ $C=-0,639$.	214
Figura 150: Ajuste analítico de las curvas $Max_{\tau_{max}}$ (Tresca) - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos de Mars y Fatemi. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,812$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=0,740$ $B=11,514$ $C=0,000$.	215
Figura 151: Ajuste analítico de las curvas $\Delta\sigma_{VM}$ - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos de Mars y Fatemi. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,787$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-1,162$ $B=17,842$ $C=-0,722$.	216
Figura 152: Ajuste analítico de las curvas $Max_{\sigma_{VM}}$ - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos de Mars y Fatemi. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,798$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-1,430$ $B=21,930$ $C=0,000$.	217
Figura 153: Ajuste analítico de las curvas $\Delta\epsilon_1$ - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos de Mars y Fatemi. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,828$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-0,110$ $B=1,737$ $C=-0,469$.	218
Figura 154: Ajuste analítico de las curvas Max_{ϵ_1} - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos de Mars y Fatemi. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,813$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-0,126$ $B=2,000$ $C=0,000$.	219
Figura 155: Ajuste analítico de las curvas $\Delta\gamma_{oct}$ - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos de Mars y Fatemi. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,862$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-0,067$ $B=1,080$ $C=-0,301$.	220
Figura 156: Ajuste analítico de las curvas $Max_{\gamma_{oct}}$ - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos de Mars y Fatemi. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,823$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-0,073$ $B=1,199$ $C=0,000$.	221
Figura 157: Ajuste analítico de las curvas $\Delta\epsilon_{oct}$ - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos de Mars y Fatemi. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,732$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-0,016$ $B=0,233$ $C=-1,581$.	222
Figura 158: Ajuste analítico de las curvas $Max_{\epsilon_{oct}}$ - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos de Mars y Fatemi. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,665$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-0,277$ $B=3,937$ $C=-2,234$.	223
Figura 159: Ajuste analítico de las curvas ΔW - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos de Mars y Fatemi. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,665$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-0,277$ $B=3,937$ $C=-2,234$.	224
Figura 160: Ajuste analítico de las curvas Max_W - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos de Mars y Fatemi. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,795$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-0,578$ $B=8,050$ $C=0,000$.	225

Figura 161: Ajuste analítico de las curvas ΔW_c - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos de Mars y Fatemi. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,606$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-0,252$ $B=3,541$ $C=-2,295$	226
Figura 162: Ajuste analítico de las curvas Max_W_c - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos de Mars y Fatemi. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,755$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-0,541$ $B=7,461$ $C=0,000$	227
Figura 163: Ajuste analítico de las curvas Brown-Miller - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos de Mars y Fatemi. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,682$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-0,743$ $B=10,791$ $C=0,000$	228
Figura 164: Ajuste analítico de las curvas Findley - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos de Mars y Fatemi. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,741$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-1,327$ $B=19,227$ $C=0,000$	229
Figura 165: Ajuste analítico de las curvas Wang-Brown - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos de Mars y Fatemi. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,732$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-0,752$ $B=11,103$ $C=0,000$	230
Figura 166: Ajuste analítico de las curvas Fatemi Socie - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos de Mars y Fatemi. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,550$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-1,629$ $B=20,632$ $C=0,000$	231
Figura 167: Ajuste analítico de las curvas SWT - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos de Mars y Fatemi. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,620$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-5,695$ $B=73,174$ $C=0,000$	232
Figura 168: Ajuste analítico de las curvas Liu WI - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos de Mars y Fatemi. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,643$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-7,439$ $B=97,615$ $C=0,000$	233
Figura 169: Ajuste analítico de las curvas Liu WII - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos de Mars y Fatemi. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,707$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-7,109$ $B=96,090$ $C=0,000$	234
Figura 170: Comparación de los coeficientes de correlación R^2 para cada uno de los parámetros críticos de fatiga aplicados a los ensayos de Mars y Fatemi.	235
Figura 171: Ajuste analítico de las curvas $\Delta\sigma_1$ - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos de Ayoub. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,663$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-0,120$ $B=1,874$ $C=1,381$	236
Figura 172: Ajuste analítico de las curvas $Max_σ_1$ - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos de Ayoub. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,361$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: $A=-0,114$ $B=2,047$ $C=0,000$	237
Figura 173: Ajuste analítico de las curvas $\Delta\tau_{Max_Tresca}$ - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos de Ayoub. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,561$. Valor de	

los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: A=-0,062 B=1,005 C=1,341.....	238
Figura 174: Ajuste analítico de las curvas $\text{Max}_\tau\text{Max}_{\text{(Tresca)}} - \text{Vida}$ y su capacidad de predicción para los ensayos de Ayoub. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,312$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: A=-0,059 B=1,118 C=0,000.	239
Figura 175: Ajuste analítico de las curvas $\Delta\sigma_{VM} - \text{Vida}$ y su capacidad de predicción para los ensayos de Ayoub. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,580$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica:	240
Figura 176: Ajuste analítico de las curvas $\text{Max}_\sigma_{VM} - \text{Vida}$ y su capacidad de predicción para los ensayos de Ayoub. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,319$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: A=-0,112 B=2,083 C=0,000.	241
Figura 177: Ajuste analítico de las curvas $\Delta\epsilon_1 - \text{Vida}$ y su capacidad de predicción para los ensayos de Ayoub. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,604$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica:	242
Figura 178: Ajuste analítico de las curvas $\text{Max}_\epsilon_1 - \text{Vida}$ y su capacidad de predicción para los ensayos de Ayoub. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,403$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: A=-0,041 B=0,826 C=0,000.	243
Figura 179: Ajuste analítico de las curvas $\Delta\gamma_{oct} - \text{Vida}$ y su capacidad de predicción para los ensayos de Ayoub. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,553$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica:	244
Figura 180: Ajuste analítico de las curvas $\text{Max}_\gamma_{oct} - \text{Vida}$ y su capacidad de predicción para los ensayos de Ayoub. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,365$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: A=-0,029 B=0,602 C=0,000.	245
Figura 181: Ajuste analítico de las curvas $\Delta\epsilon_{oct} - \text{Vida}$ y su capacidad de predicción para los ensayos de Ayoub. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,005$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: A=0,000 B=0,000 C=2,000.	246
Figura 182: Ajuste analítico de las curvas $\text{Max}_\epsilon_{oct} - \text{Vida}$ y su capacidad de predicción para los ensayos de Ayoub. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,120$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: A=0,000 B=0,000 C=0,000.	247
Figura 183: Ajuste analítico de las curvas $\Delta W - \text{Vida}$ y su capacidad de predicción para los ensayos de Ayoub. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,636$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica:	248
Figura 184: Ajuste analítico de las curvas $\text{Max}_W - \text{Vida}$ y su capacidad de predicción para los ensayos de Ayoub. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,324$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: A=-0,060 B=0,974 C=0,000.	249
Figura 185: Ajuste analítico de las curvas $\Delta W_c - \text{Vida}$ y su capacidad de predicción para los ensayos de Ayoub. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,704$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica:	250
Figura 186: Ajuste analítico de las curvas $\text{Max}_W_c - \text{Vida}$ y su capacidad de predicción para los ensayos de Ayoub. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,354$. Valor de los	

parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: A=-0,056 B=0,882 C=0,000.	251
Figura 187: Ajuste analítico de las curvas Brown-Miller - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos de Ayoub. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,516$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: A=-0,068 B=1,152 C=0,000.	252
Figura 188: Ajuste analítico de las curvas Findley1 - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos de Ayoub. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,501$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: A=-0,055 B=0,958 C=0,000.	253
Figura 189: Ajuste analítico de las curvas Wang-Brown - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos de Ayoub. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,399$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: A=-0,048 B=0,861 C=0,000.	254
Figura 190: Ajuste analítico de las curvas Fatemi Socie - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos de Ayoub. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,595$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: A=-0,076 B=1,114 C=0,000.	255
Figura 191: Ajuste analítico de las curvas SWT - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos de Ayoub. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,432$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica:	256
Figura 192: Ajuste analítico de las curvas Liu WI - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos de Ayoub. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,491$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica:	257
Figura 193: Ajuste analítico de las curvas Liu WII - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos de Ayoub. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0,438$. Valor de los parámetros de la regresión lineal en escala logarítmica: A=-0,418 B=7,079 C=0,000.	258
Figura 194: Comparación de los coeficientes de correlación R^2 para cada uno de los parámetros críticos de fatiga aplicados a los ensayos de Ayoub.....	259
Figura 195 :Ajuste analítico de las curvas Parámetro de fatiga propuesto - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos de Santoprene. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0.853$. Valor de los parámetros de la curva: A=-0.162 B=3.526. El valor de las constantes del parámetro de fatiga propuesto es: $\gamma_1=-7,505$, $\gamma_2=33,078$, $\gamma_3=17,572$, $\alpha_1=0,001$, $\alpha_2=-0,641$, $\alpha_3=1,139$, $\beta_1=0,284$, $\beta_2=1,739$, $\beta_3=-0,799$	262
Figura 196 :Ajuste analítico de las curvas Parámetro de fatiga propuesto - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos de Mars y Fatemi. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0.899$. Valor de los parámetros de la curva: A=-0.169 B=2.645. El valor de las constantes del parámetro de fatiga propuesto es: $\gamma_1=2,545$, $\gamma_2=-0,531$, $\gamma_3=-1,146$, $\alpha_1=0,058$, $\alpha_2=-0,696$, $\alpha_3=0,147$, $\beta_1=-0,229$, $\beta_2=3,388$, $\beta_3=0,006$	263
Figura 197 :Ajuste analítico de las curvas Parámetro de fatiga propuesto - Vida y su capacidad de predicción para los ensayos de Ayoub. Valor del coeficiente de correlación $R^2=0.894$. Valor de los parámetros de la curva: A=-0,131 B=2,1266. El valor de las constantes del parámetro de fatiga propuesto es: $\gamma_1=0,005$, $\gamma_2=0,004$, $\gamma_3=0,041$, $\alpha_1=-73,079$, $\alpha_2=-61,685$, $\alpha_3=103,543$, $\beta_1=36,854$, $\beta_2=31,196$, $\beta_3=-51,879$	264
Figura 198: Portada del software Profatigue [260]	265
Figura 199: Representación de (a) la probabilidad del parámetro de regresión V y (b) el campo "Parámetro de fatiga propuesto-Vida" probabilístico generalizado para los ensayos	

con Santoprene. Parámetros del modelo probabilístico: $\beta=5.08$; $B=0$; $C=-1.2$; $\delta=16.06$; $\lambda=2.59$	266
Figura 200: Representación de (a) la probabilidad del parámetro de regresión V y (b) el campo "Parámetro de fatiga propuesto-Vida" probabilístico generalizado para los ensayos de Mars y Fatemi. Parámetros del modelo probabilístico: $\beta=10.21$; $B=0$; $C=-4.6$; $\delta=46.81$; $\lambda=0$	267
Figura 201: Representación de (a) la probabilidad del parámetro de regresión V y (b) el campo "Parámetro de fatiga propuesto-Vida" probabilístico generalizado para los ensayos de Ayoub. Parámetros del modelo probabilístico: $\beta=4.6$; $B=0$; $C=-2.4$; $\delta=6.93$; $\lambda=14.95$	268
Figura 202: Pantalla principal del software de elementos finitos y el menú de acceso a la herramienta implementada.....	269
Figura 203: Herramienta de predicción determinista de fallo por fatiga.....	270
Figura 204: Herramienta de predicción de probabilidad de fallo.....	270
Figura 205: Resultados de la herramienta de fatiga determinista.....	271
Figura 206: Resultados de la herramienta de fatiga probabilista.....	271
Figura 207: Componente fabricado por Mann-Hummel Ibérica S.A.U.....	272
Figura 208: Simulación por elementos finitos para el análisis de malla del componente real.....	273
Figura 209: Esquema de condiciones de desplazamiento impuesto en la simulación del componente completo.....	275
Figura 210: Deformada final en la zona de ondas del modelo.....	275
Figura 211: Mapa de tensiones de von Mises en el modelo para desplazamiento prescrito en salida de tubo de -20mm.....	276
Figura 212: Mapa de tensiones de von Mises en el modelo para desplazamiento prescrito en salida de tubo de +20mm.....	276
Figura 213: Mapa de tensiones de von Mises en el modelo para desplazamiento prescrito en salida de tubo de -20mm (vista en sección).....	277
Figura 214: Mapa de tensiones de von Mises en el modelo para desplazamiento prescrito en salida de tubo de +20mm (vista en sección).....	277
Figura 215: Mapa de desplazamientos en el modelo para desplazamiento prescrito en salida de tubo de +20mm.....	278
Figura 216: Mapa de desplazamientos en el modelo para desplazamiento prescrito en salida de tubo de -20mm.....	278
Figura 217: Mapa de desplazamientos en el modelo para desplazamiento prescrito en salida de tubo de -20mm (vista en sección).....	279
Figura 218: Mapa de desplazamientos en el modelo para desplazamiento prescrito en salida de tubo de +20mm (vista en sección).....	279
Figura 219: Mapa de deformaciones en el modelo para desplazamiento prescrito en salida de tubo de -20mm (vista en sección).....	280
Figura 220: Mapa de deformaciones en el modelo para desplazamiento prescrito en salida de tubo de -20mm (vista en sección).....	280
Figura 221: Mapa de Tensiones de Von Mises en el elemento de mayor tensión y mayor deformación.....	281
Figura 222: Mapa de deformaciones en el elemento de mayor tensión y mayor deformación	281
Figura 223: Punto de mayor sollicitación en tensiones y deformaciones.....	282
Figura 224: Resultado de la ponderación de tensiones y deformaciones en el punto más solicitado.....	282

Figura 225: Simulación a fatiga de un componente para Mann-Hummel Ibérica	283
Figura 226: Resultados de fatiga para el modelo completo de tubo	284

Capítulo 1: Introducción

1.1 Introducción y motivación

Esta tesis está dedicada al estudio del fenómeno de fatiga mecánica bajo cargas cíclicas en polímeros y más en concreto en elastómeros termoplásticos.

Dependiendo del comportamiento termomecánico, existen tres clases principales de polímeros: termoplásticos, termoestables y elastómeros. En esta Tesis Doctoral se estudian tres tipos de elastómeros termoplásticos.

Los elastómeros termoplásticos están formados por cadenas más o menos lineales unidas entre sí por las fuerzas de van der Waals. Dependiendo de la regularidad de las cadenas, estos polímeros pueden cristalizar (semicristalinos) o no (amorfos).

Los elastómeros son polímeros amorfos formados por cadenas poco compactas (a temperatura ambiente) y muy móviles. Para reducir su tendencia a la fluencia y evitar una excesiva flexibilidad, las cadenas que forman los elastómeros suelen estar unidas entre sí por enlaces primarios y estables. Los principales elastómeros son el caucho natural "NR" y el estireno-butadieno "SBR".

En la actualidad, los materiales elastómeros están cobrando un gran protagonismo en la industria. Tales son sus aplicaciones y propiedades que muchos son los sectores donde este tipo de materiales encuentra un sitio relevante. Por ejemplo, en el sector de la construcción diversos componentes fabricados con estos materiales se utilizan como amortiguadores en casos de terremotos y en el sector de los electrodomésticos son usados para juntas aislantes e impermeables como en el caso de lavadoras y frigoríficos. Su uso está aún más extendido en sectores como la aeronáutica o la automoción. Además del uso de estos materiales para componentes tan relevantes como son los neumáticos, estos sectores también se plantean como reto aumentar la eficiencia de los motores reduciendo el consumo de combustible y el tamaño de los mismos de forma progresiva. Con ello, no sólo el bloque motor debe reducir su tamaño, sino también el resto de componentes, generando nuevos retos ingenieriles al requerir diseños más compactos y flexibles mediante el uso de materiales alternativos a los metales como son los elastómeros (Figura 1).

Las razones por las que estos materiales son ampliamente utilizados son sus propiedades mecánicas como su facilidad de deformación, durabilidad, reciclabilidad, y su relación precio/peso. Estos polímeros son capaces de alcanzar grandes deformaciones a tracción y compresión, y poseen unas muy buenas características de amortiguación, haciéndolos adecuados para el empleo en la disipación de energía cinética asociada a impactos, golpes y vibraciones.



Figura 1: Usos de materiales elastómeros

Los padres de estos materiales son los cauchos tradicionales. Se cree que los primeros cauchos fueron utilizados por los Mayas en la antigua Mesoamérica alrededor del 1600 a. de C. Esta civilización mezclaba el látex (material producido por la savia de algunos árboles de la zona) con el jugo de otras plantas y calentaban la mezcla hasta obtener un producto elástico con el que fabricaban, entre otras cosas, pelotas que botaban, suelas de sandalias, adhesivos, etc.

A partir del descubrimiento de América fue cuando la civilización Europea tuvo conocimiento de este material, pero no fue hasta 1735 cuando el francés Charles de la Condamine lo redescubrió, haciendo publicidad en Europa de sus magníficas propiedades como su elasticidad y su impermeabilidad. Surgió entonces un interés en la comunidad científica que llevó a muchos de sus miembros a realizar diferentes estudios. Durante el siglo XVIII se descubrieron multitud de aplicaciones nuevas, como la goma de borrar o la impermeabilización de algunos productos textiles.

A pesar de todos los estudios y avances realizados, la aplicación de este material no tuvo mucho éxito, debido a que tenía poca durabilidad, era pegajoso y en ocasiones sufría putrefacción liberando malos olores debido a que no estaba bien curado. Fue entonces cuando entre 1839 y 1853 surgió el proceso de vulcanización. Dependiendo de las referencias bibliográficas consultadas el primero en usar este proceso fue Charles GoodYear o Thomas Hancock. El proceso de vulcanización consistió en calentar la mezcla de caucho en presencia de azufre con el fin de volverlo más duro y resistente. Fue a partir del descubrimiento de este proceso que la aplicación del material en los diferentes campos de la industria no ha dejado de crecer hasta nuestros días.

Por norma general, el uso de este tipo de materiales se centra en componentes que experimentan a lo largo de su vida útil no solo grandes deformaciones sino cargas cíclicas. Es por ello que es importante poder entender cuáles son los mecanismos de fallo resistente para poder así desarrollar diseños más seguros y competitivos.

Para asegurar la durabilidad de los componentes es indispensable centrarse en el fenómeno de fatiga. Este se describe como el fallo que experimenta un material cuando es sometido a cargas cíclicas de amplitud máxima inferior a su carga de rotura estática, y suele ser un punto

crítico en el proceso de diseño de nuevos productos. La historia está repleta de catástrofes debidas a fallos por fatiga y es por ello que multitud de autores han investigado sobre el tema, siendo los materiales metálicos los más estudiados.

A lo largo de la segunda mitad del siglo XIX, con la Revolución Industrial y el desarrollo de nuevas máquinas, se destaparon los primeros problemas ocasionados por la fatiga de materiales. En concreto, en el sector del ferrocarril, las roturas en los raíles trabajando por debajo de su límite de rotura centraron la atención sobre las consecuencias de las cargas cíclicas.

Los primeros estudios sobre fatiga se atribuyen al ingeniero irlandés W. J. Rankine y al ingeniero alemán A. Wöhler. Este último desarrolló una metodología sobre ensayos a fatiga en componentes e introdujo el concepto del límite de fatiga y una serie de gráficos que con el tiempo han terminado llamándose diagramas de Wöhler. Estos gráficos consisten en una representación de la relación entre tensión máxima y número de ciclos de vida. Así pues, estos gráficos presentan un límite inferior, que pasaría a llamarse límite de fatiga, por debajo del cual no existen roturas por fatiga y se puede decir que el componente tendrá una duración o vida infinita.

Durante todo el siglo XX el fenómeno de fatiga ha sido ampliamente estudiado desde diferentes puntos de vista, pero el desarrollo de los sectores aeronáuticos y de automoción ha hecho que el fenómeno se siga estudiando, intentado comprender cuáles son los mecanismos reales que lo ocasionan. Un mayor desarrollo del estudio de la fatiga en materiales a lo largo de la historia puede verse en [1].

Aunque existe una amplia bibliografía sobre el fenómeno de fatiga en metales, el número de publicaciones se reduce drásticamente para el estudio de la fatiga aplicada a materiales poliméricos y más concretamente a materiales elastómeros. Una de las principales razones de ello es que los elastómeros que se industrializan a día de hoy tienen poca antigüedad ya que empezaron a desarrollar en las décadas de 1970 y 1980. Otra razón principal es la compleja relación tensión-deformación que presentan estos materiales, que raramente es lineal (elástico lineal) presentando un comportamiento no lineal incluso para pequeñas deformaciones. Además de que el comportamiento del material es no lineal, debido a que son utilizados para grandes deformaciones también suelen darse no linealidades geométricas. Por si no fuera suficiente, estos materiales son sensibles a la velocidad de deformación, teniendo propiedades viscoelásticas, y también son sensibles a agentes ambientales como puedan ser la temperatura, el ozono, el envejecimiento, etc.

En este contexto, las principales motivaciones de esta Tesis Doctoral son:

1. Las ventajas que supone tener un amplio conocimiento sobre el comportamiento mecánico de los materiales elastómeros, así como el desarrollo de un modelo constitutivo como base para el desarrollo de modelo de predicción de vida a fatiga de cara a su aplicación en el diseño de componentes mecánicos.
2. El ahorro económico y la ventaja competitiva que supone un buen conocimiento del comportamiento de los materiales elastómeros frente al fenómeno de la fatiga, ya que los daños por fatiga siguen siendo de los más elevados en el diseño ingenieril al igual que las inversiones realizadas para su prevención.

1.2 Objetivos de la Tesis

El objeto principal de esta Tesis Doctoral consiste en poder predecir de la forma más precisa posible la vida a fatiga de componentes fabricados con materiales elastómeros cuando son sometidos a una historia de cargas cíclica.

Este objetivo general se apoya en los siguientes antecedentes que fortalecen la investigación planteada:

- El creciente uso y desarrollo de componentes industriales con materiales elastómeros, así como las posibilidades mecánicas que estos ofrecen.
- Las necesidades actuales del sector industrial de conocer el comportamiento mecánico de este tipo de materiales frente a cargas cíclicas para asegurar la durabilidad de los componentes.
- El interés técnico y científico en profundizar en el conocimiento del comportamiento de los materiales elastómeros.

Los objetivos específicos que se marcan para la realización de esta Tesis son:

- Realizar un estudio intensivo del estado del arte para la fatiga mecánica en materiales elastómeros.
- Caracterizar el comportamiento a fatiga de tres materiales distintos. Para ello se hará uso de un material utilizado en la fabricación de componentes reales de automoción con el que se realizarán ensayos, diseñarán utillajes y se fabricarán probetas. También se utilizarán otros dos materiales caracterizados por otros autores, cuyos ensayos están publicados en la literatura y referenciados en la bibliografía.
- Estudio de los modelos constitutivos de material existentes en la bibliografía capaces de reproducir el comportamiento mecánico de los materiales elastómeros.
- Propuesta y validación de un modelo constitutivo de material para elastómeros capaz de reproducir las no linealidades del comportamiento de este tipo de materiales, así como otros efectos como el ablandamiento o la dependencia de la velocidad de deformación.
- Estudio de todas las variables de fatiga expuestas en la literatura capaces de predecir la vida útil en componentes fabricados con estos materiales.
- Estudiar y establecer la mejor correlación de las variables de fatiga más destacadas en la bibliografía con la vida útil obtenida en cada uno de los ensayos para cada uno de los materiales.
- Estudio de un modelo adecuado de fatiga probabilista capaz de arrojar como resultado una probabilidad de rotura del componente a partir de una estimación de vida útil.

- Propuesta de un modelo de fatiga unificado en el que una variable multiparámetro sea capaz de mejorar las predicciones realizadas por el resto de variables de fatiga existentes en la bibliografía.
- Implementación de los modelos de fatiga propuestos en un software comercial de elementos finitos con el objeto de poder realizar los análisis de fatiga en una herramienta comercial de forma rápida y sobre los resultados de una simulación numérica.
- Simulación y estimación de vida a fatiga y probabilidad de rotura para un componente real de automoción.

Capítulo 7: Conclusiones y futuras líneas de investigación

7.1 Conclusiones

El objetivo principal de este trabajo fue poder predecir la vida a fatiga de componentes fabricados con materiales elastómeros cuando son sometidos a una historia de cargas cíclica.

En primer lugar, se realizó el estudio del estado del arte para la fatiga mecánica en materiales elastómeros. En esta fase del trabajo se aclaró el fenómeno físico buscado. Como se ha explicado a lo largo del trabajo, en este, se consideró como fallo del material la simple nucleación de una grieta, dejando así de lado la Teoría de la Mecánica de la Fractura. Una vez aclarado el enfoque, se profundizó en la bibliografía orientada en dicho enfoque sobre fenómeno de fatiga en elastómeros sirviendo de base para esta Tesis Doctoral los trabajos de Mars y Fatemi [53] y Ayoub [69].

En segundo lugar, se caracterizó el comportamiento a fatiga de tres materiales distintos. Por un lado, un material utilizado en la fabricación de componentes reales de automoción llamado Santoprene. Una de las conclusiones importantes obtenidas fue que se encontraron grandes diferencias de comportamiento entre el material virgen sin manufacturar y el material manufacturado extraído de un componente real. Con este material en sus dos estados, se realizaron ensayos y se caracterizaron a fatiga. También se obtuvieron los datos experimentales para los ensayos de Mars y Fatemi [53] y Ayoub [69], los cuales están publicados en la literatura y referenciados en la bibliografía.

Posteriormente, se realizó un estudio profundo de cuales son todos los modelos constitutivos de material existentes en la bibliografía capaces de reproducir el comportamiento mecánico de los materiales elastómeros. Como se puede observar en el Capítulo 4, existe una gran cantidad de modelos hiperelásticos que pueden ser enriquecidos con un modelo de ablandamiento capaz de reproducir el efecto Mullins que experimentan estos materiales o incluso con modelos que tengan en cuenta la parte visco-elástica del material. Como conclusión a esta parte del trabajo se dedujo que, aunque existen modelos constitutivos capaces de reproducir de forma aproximada el comportamiento mecánico del Santoprene, no existe en la bibliografía ningún modelo capaz de reproducirlo con cierta exactitud.

Por este motivo, el siguiente objetivo que se planteó fue el de la propuesta y validación de un modelo constitutivo de material para elastómeros capaz de reproducir las no linealidades del comportamiento de este tipo de materiales, así como otros efectos como el ablandamiento o la dependencia de la velocidad de deformación. Para ello se formuló un nuevo modelo visco-hiperelástico con daño capaz de mejorar los resultados de simulación para el Santoprene

aunque solo ante cargas uniaxiales. Este modelo fue objeto de publicación y puede consultarse en [261].

A continuación, se estudiaron las principales variables de fatiga expuestas en la literatura capaces de predecir la vida útil en componentes fabricados con materiales elastómeros. De todos los estudiados se eligieron veinte variables de fatiga con el fin de estudiar y establecer la mejor correlación de estas con la vida útil obtenida en cada uno de los ensayos para cada uno de los materiales. Se concluyó que, para cada uno de los materiales, la variable de fatiga que mejor caracteriza la vida útil de las probetas variaba, siendo en algunos casos más característica las variables energéticas mientras que en otros eran las variables de deformación.

También se describió un modelo de fatiga probabilista capaz de arrojar como resultado una probabilidad de rotura del componente a partir de una estimación de vida útil que posteriormente se aplicó a los resultados de cada uno de los materiales. Otra de las conclusiones obtenidas a lo largo de este trabajo es que en el fenómeno de fatiga existe una gran cantidad de factores que pueden alterar la vida útil del material. Es por ello que, aunque se obtengan modelos matemáticos precisos, existe una componente aleatoria en el problema. Por esta razón se recurre a modelos de fatiga que puedan proporcionar una probabilidad de rotura.

Debido a que los modelos de fatiga estudiados daban como resultado cierta dispersión en la predicción de vida a fatiga para cada uno de los materiales, se propuso un modelo de fatiga unificado en el que una variable multiparámetro fuera capaz de mejorar las predicciones realizadas por el resto de variables de fatiga existentes en la bibliografía. El desarrollo de esta variable multiparámetro ha quedado expuesta en el Capítulo 6 y como puede verse, es capaz de mejorar las predicciones en los tres materiales. El modelo propuesto no es sino un modelo del que pueden derivarse muchos otros modelos ya existentes en la bibliografía. Es un modelo que pretende no despreciar variables aun cuando se considera que es la más característica en la vida a fatiga. Por ejemplo, si los ensayos y cálculos proporcionan la mejor correlación de la vida a fatiga con una variable tensional, tener en cuenta más variables y asignarles pesos a todas ellas puede conducir a una mejor predicción de la vida a fatiga.

Todos los modelos de fatiga estudiados y propuestos fueron implementados en un software comercial de elementos finitos con el objeto de poder realizar los análisis de fatiga en una herramienta comercial de forma rápida y sobre los resultados de una simulación numérica. Para ello, el autor tuvo que aprender a programar en lenguaje Python e implementar las rutinas mediante programación en el software Abaqus [262].

Por último, se realizó la simulación numérica y estimación de vida a fatiga y probabilidad de rotura para un componente real de automoción. El componente fue un tubo de admisión de aire al motor fabricado con Santoprene. Como ya se explicó en el Capítulo 6, los resultados no fueron respaldados por los ensayos reales debido a que la simulación numérica tuvo que realizarse con un modelo constitutivo de material no adecuado y a que, para este material, todos los parámetros del modelo de fatiga fueron ajustados con ensayos uniaxiales. El estado tensional en el tubo fue multiaxial y es por ello que los parámetros del modelo no son aplicables.

7.2 Futuras líneas de investigación

Para poder predecir el comportamiento mecánico del Santoprene 101-73 teniendo en cuenta efectos de no linealidad, ablandamiento y dependencia de la velocidad de deformación se ha desarrollado un nuevo modelo constitutivo de material [261]. Debido a que el desarrollo de este modelo constitutivo se realizó únicamente para estados uniaxiales de tensión, como futura línea de investigación, se propone en primer lugar la generalización de la formulación del modelo para estados tensiones más complejos (multiaxiales).

La obtención de datos de vida en probetas sometidas a estados de carga multiaxiales suele ser muy complicado. La causa es que resulta necesario tener disponibilidad de una máquina cara y compleja que en este trabajo no ha sido posible obtener. Para nutrir el trabajo de esta Tesis con este tipo de datos se ha tenido que recurrir a los ensayos de Mars y Fatemi y a los de Ayoub. Sin embargo, para el Santoprene 101-73 solo ha sido posible obtener datos de fatiga uniaxial. Por ello, otra futura y posible línea de investigación sería el desarrollo de un tipo de probeta y utillaje capaz de generar esfuerzos multiaxiales con una máquina de fatiga uniaxial. Con los datos obtenidos podrán obtenerse los parámetros del modelo de fatiga propuesto para estados tensionales complejos, lo que hará que la predicción de la vida a fatiga de un componente como el tubo sea más precisa.

La vida a la fatiga en los elastómeros se ve afectada por la temperatura. Por lo tanto, la caracterización del efecto de la temperatura en la vida a la fatiga es otra posible futura línea de investigación.

Con el fin de comprobar la capacidad de los modelos desarrollados para diferentes tipos de elastómeros, el estudio de diferentes tipos de materiales y probetas podría demostrar de forma más completa lo desarrollado en esta Tesis Doctoral.

Bibliografía

1. Schütz, W. A history of fatigue. *Eng. Fract. Mech.* **1996**, *54*, 263–300.
2. Wöhler, A. *Versuche über die Festigkeit der Eisenbahnwagenachsen*; Zeitschrift für Bauwesen, 1860; Vol. 10;.
3. Wöhler, A. *Ueber die Festigkeits-Versuche mit Eisen und Stahl*; Zeitschrift für Bauwesen, 1870; Vol. XX;
4. Mars, W. V Identifying the damaging events in a multiaxial duty cycle. *Const. Model. Rubber VI* **2010**, *5*, 261–267.
5. Dowling, N. E. *Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue*; Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1999;
6. Dowling, N. E. *Mean Stress Effects in Stress-Life and Strain-Life Fatigue*; Society of Automotive Engineers, Inc., 2004;
7. Goodman, J. Mechanics Applied to Engineering. *Longmans, Green Co., London* **1919**, 631–636.
8. Smith, J. O. The Effect of Range of Stress on the Fatigue Strength of Metals. *Univ. Illinois, Eng. Exp. Station. Urbana*, **1942**, *334*, 631–636.
9. Smith K. N., P. W.; Topper, T. H. A Stress-Strain Function for the Fatigue of Metals. *J. Mater. ASTM* **1970**, *5*, 767–778.
10. E1049-85(2011), A. *Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis*; ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011;
11. Matsuishi, M.; Endo, T. Fatigue of metals subjected to varying stress. *Japan Soc. Mech. Eng. Fukuoka, Japan* **1968**, 37–40.
12. Richards, F. D.; LaPointe, N. R.; Wetzell, R. M. *A cycle counting algorithm for fatigue damage analysis*; 1974;
13. Amzallag, C.; Gerey, J. P.; Robert, J. L.; Bahuaud, J. Standardization of the rainflow counting method for fatigue analysis. *Int. J. Fatigue* **1994**, *16*, 287–293.
14. Fatemi, A.; Socie, D. F. A Critical Plane Approach to Multiaxial Fatigue Damage Including out-of-Phase Loading. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* **1988**, *11*, 149–165.
15. Rivlin, R. S.; Thomas, A. G. Rupture of rubber. I. Characteristic energy for tearing. *J. Polym. Sci.* **1953**, *10*, 291–318.
16. Griffith, A. A. The phenomena of rupture and flow in solids. *Philos. Trans. R. Soc. London. Ser. A, Contain. Pap. a Math. or Phys. character* **1921**, *221*, 163–198.
17. Greensmith, H. W. Rupture of rubber. X. The change in stored energy on making a small cut in a test piece held in simple extension. *J. Appl. Polym. Sci.* **1963**, *7*, 993–1002.

18. Lake, G. J. Application of fracture mechanics to failure in rubber articles, with particular reference to groove cracking in tyres. In *Int. Conf. Yield, Deformation and fracture of polymers, Cambridge*; 1970; Vol. 47.
19. Lindley, P. B. Energy for crack growth in model rubber components. *J. Strain Anal. Eng. Des.* **1972**, 7, 132–140.
20. Naït-Abdelaziz, M.; Ghfiri, H.; Mesmacque, G.; Nevière, R. G. The J Integral as a Fracture Criterion of Robber-Like Materials: A Comparative Study Between a Compliance Method and an Energy Separation Method. In *Fracture Mechanics: 25th Volume*; ASTM International, 1995.
21. Thomas, A. G. Rupture of rubber. V. Cut growth in natural rubber vulcanizates. *J. Polym. Sci.* **1958**, 31, 467–480.
22. Lake, G. J.; Lindley, P. B. The mechanical fatigue limit for rubber. *J. Appl. Polym. Sci.* **1965**, 9, 1233–1251.
23. Gent, A. N.; Lindley, P. B.; Thomas, A. G. Cut growth and fatigue of rubbers. I. The relationship between cut growth and fatigue. *J. Appl. Polym. Sci.* **1964**, 8, 455–466.
24. Lake, G. J.; Lindley, P. B. Cut growth and fatigue of rubbers. II. Experiments on a noncrystallizing rubber. *J. Appl. Polym. Sci.* **1964**, 8, 707–721.
25. Lindley, P. B. Relation between hysteresis and the dynamic crack growth resistance of natural rubber. *Int. J. Fract.* **1973**, 9, 449–462.
26. Lake, G. J.; Thomas, A. G. The strength of highly elastic materials. In *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*; 1967; Vol. 300, pp. 108–119.
27. Hess, W. M.; Burgess, K. A. Reagglomeration as a Cause of Tread Groove Cracking. *Rubber Chem. Technol.* **1963**, 36, 754–776.
28. Smith, R. W.; Black, A. L. Service-Induced Diffusion and Nodule Formation in Rubber Stocks. *Rubber Chem. Technol.* **1964**, 37, 338–347.
29. Mars, W. V; Fatemi, A. Fatigue crack nucleation and growth in filled natural rubber. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* **2003**, 26, 779–789.
30. Ostoja-Kuczynski, E.; Charrier, P.; Verron, E.; Gornet, L.; Marckmann, G. Influence of mean stress and mean strain on fatigue life of carbon black filled natural rubber. In *Constitutive Models for Rubber-Proceedings*; 2005; Vol. 4, p. 15.
31. Mars, W. V; Fatemi, A. A literature survey on fatigue analysis approaches for rubber. *Int. J. Fatigue* **2002**, 24, 949–961.
32. Mars, W. V; Fatemi, A. Multiaxial fatigue of rubber: Part I: equivalence criteria and theoretical aspects. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* **2005**, 28, 515–522.
33. Lu, C. Etude du comportement mécanique et des mécanismes d'endommagement des élastomères en fatigue et en fissuration par fatigue, 1991.
34. Bathias, C.; Houel, P.; Berete, Y. N.; Legorju, K. Damage characterization of elastomeric composites using X-ray attenuation. *Prog. Durab. Anal. Compos. Syst. Reifsnider Cardon, Balkema* **1998**, 103–109.
35. Abraham, F.; Alshuth, T.; Jerrams, S. The effect of minimum stress and stress amplitude on the fatigue life of non strain crystallising elastomers. *Mater. Des.* **2005**, 26, 239–245.

36. André, N.; Cailletaud, G.; Piques, R.; others Haigh diagram for fatigue crack initiation prediction of natural rubber components. *Kautschuk Gummi Kunststoffe* **1999**, *52*, 120–123.
37. Andre, N. Critère local d'amorçage de fissure en fatigue dans un élastomère de type NR, 1998.
38. Saintier, N. Fatigue multiaxiale dans un élastomère de type NR chargé: mécanismes d'endommagement et critère local d'amorçage de fissure, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2001.
39. Saintier, N.; Cailletaud, G.; Piques, R. Crack initiation and propagation under multiaxial fatigue in a natural rubber. *Int. J. Fatigue* **2006**, *28*, 61–72.
40. Saintier, N.; Cailletaud, G.; Piques, R. Multiaxial fatigue life prediction for a natural rubber. *Int. J. Fatigue* **2006**, *28*, 530–539.
41. Sines, G. Behavior of metals under complex static and alternating stresses. *Met. fatigue* **1959**, *1*, 145–169.
42. Crossland, B. No Title. *Inst. Mech. Eng. Conf. Fatigue Met.* **1956**, 138–149.
43. Findley, W. N. *Fatigue of metals under combinations of stresses*; Division of Engineering, Brown University, 1956;
44. McDiarmid, D. L. A general criterion for high cycle multiaxial fatigue failure. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* **1991**, *14*, 429–453.
45. Dang-Van, K. Macro-micro approach in high-cycle multiaxial fatigue. In *Advances in multiaxial fatigue*; ASTM International, 1993.
46. Papadopoulos, I. V; Davoli, P.; Gorla, C.; Filippini, M.; Bernasconi, A. A comparative study of multiaxial high-cycle fatigue criteria for metals. *Int. J. Fatigue* **1997**, *19*, 219–235.
47. Morel, F. A critical plane approach for life prediction of high cycle fatigue under multiaxial variable amplitude loading. *Int. J. Fatigue* **2000**, *22*, 101–119.
48. Cadwell, S. M.; Merrill, R. A.; Sloman, C. M.; Yost, F. L. Dynamic fatigue life of rubber. *Ind. Eng. Chem. Anal. Ed.* **1940**, *12*, 19–23.
49. Fielding, J. H. Flex life and crystallization of synthetic rubber. *Ind. Eng. Chem.* **1943**, *35*, 1259–1261.
50. Beatty, J. R. Fatigue of rubber. *Rubber Chem. Technol.* **1964**.
51. Roberts, B. J.; Benzies, J. B. The relationship between uniaxial and equibiaxial fatigue in gum and carbon black filled vulcanizates. *Proc. rubbercon* **1977**, *77*, 1–2.
52. Robisson, A. Comportement visco-hyperelastique endommageable d'élastomères(SBR et PU): prevision de la duree de vie en fatigue, 2000.
53. Fatemi, A.; Mars, W. V Multiaxial fatigue of rubber: Part II: experimental observations and life predictions. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* **2005**, 523–538.
54. Brown, M. W.; Miller, K. J. A theory for fatigue failure under multiaxial stress-strain conditions. *Proc. Inst. Mech. Eng.* **1973**, *187*, 745–755.
55. Wang, C. H.; Brown, M. W. Life prediction techniques for variable amplitude multiaxial

- fatigue—part 1: theories. *J. Eng. Mater. Technol.* **1996**, *118*, 367–370.
56. Greensmith, H. W.; Mullins, L.; Thomas, A. G. The Chemistry and Physics of Rubber like substances. *Maclaren, London* **1963**, 262.
 57. Mars, W. V; Fatemi, A. Criteria for fatigue crack nucleation in rubber under multiaxial loading. *Const. Model. Rubber* **2001**, *2*, 213–222.
 58. Mars, W. V Multiaxial fatigue of rubber, University of Toledo, Toledo, Ohio, USA, 2001.
 59. Verron, E. Prediction of fatigue crack initiation in rubber with the help of configurational mechanics. In *Constitutive Models for Rubber-Proceedings*; 2005; Vol. 4, p. 3.
 60. Verron, E.; Le Cam, J.-B.; Gornet, L. A multiaxial criterion for crack nucleation in rubber. *Mech. Res. Commun.* **2006**, *33*, 493–498.
 61. Liu, K. C. A method based on virtual strain-energy parameters for multiaxial fatigue life prediction. In *Advances in multiaxial fatigue*; ASTM International, 1993.
 62. Findley, W. N.; Mathur, P. N. *Modified theories of fatigue failure under combined stress*; 1954;
 63. Brown, M. W.; Miller, K. J. *Proc. of the Inst. of Mechanical Engineers*; 1973;
 64. Chu, C.-C.; Conle, F. A.; Bonnen, J. J. F. Multiaxial stress-strain modeling and fatigue life prediction of SAE axle shafts. In *Advances in multiaxial fatigue*; ASTM International, 1993.
 65. Glinka, G.; Shen, G.; Plumtree, A. A multiaxial fatigue strain energy density parameter related to the critical fracture plane. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* **1995**, *18*, 37–46.
 66. Exxon Mobil Technical Datasheet: Santoprene 101-73 Thermoplastic Vulcanizate 2014.
 67. MTS System Corporation 2017.
 68. GOM mbH ARAMIS User Manual-Software. **2011**.
 69. Ayoub, G.; Naït-Abdelaziz, M.; Zaïri, F.; Gloaguen, J. M.; Charrier, P. Fatigue life prediction of rubber-like materials under multiaxial loading using a continuum damage mechanics approach: Effects of two-blocks loading and R ratio. *Mech. Mater.* **2012**, doi:10.1016/j.mechmat.2012.03.012.
 70. Treloar, L. R. G. The elasticity of a network of long-chain molecules. I. *Trans. Faraday Soc.* **1943**, *39*, 36–41.
 71. Ogden, R. W. Large Deformation Isotropic Elasticity—On the Correlation of Theory and Experiment for Incompressible Rubberlike Solids. *Rubber Chem. Technol.* **1972**, *46*, 565–584, doi:10.5254/1.3542910.
 72. Olivella, X. O.; de Saracibar Bosch, C. A. *Mecánica de medios continuos para ingenieros*; Univ. Politèc. de Catalunya, 2002;
 73. Mooney, M. A theory of large elastic deformation. *J. Appl. Phys.* **1940**, *11*, 582–592, doi:10.1063/1.1712836.
 74. Rivlin, R. S.; Saunders, D. W. Large elastic deformations of isotropic materials. VII. Experiments on the deformation of rubber. *Philos. Trans. R. Soc. London A Math. Phys. Eng. Sci.* **1951**, *243*, 251–288.

75. Gent, A. N.; Thomas, A. G. Forms for the stored (strain) energy function for vulcanized rubber. *J. Polym. Sci.* **1958**, *28*, 625–628.
76. Hart-Smith, L. J. Elasticity parameters for finite deformations of rubber-like materials. *Zeitschrift für Angew. Math. und Phys. ZAMP* **1966**, *17*, 608–626.
77. Fung, Y. C. Elasticity of soft tissues in simple elongation. *Am. J. Physiol. Content* **1967**, *213*, 1532–1544.
78. Veronda, D. R.; Westmann, R. A. Mechanical characterization of skin—finite deformations. *J. Biomech.* **1970**, *3*, 111–124.
79. Ogden, R. W. Large Deformation Isotropic Elasticity - On the Correlation of Theory and Experiment for Incompressible Rubberlike Solids. *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* **1972**, *326*, 565–584, doi:10.1098/rspa.1972.0026.
80. Liu, C.; Cady, C. M.; Lovato, M. L.; Orlor, E. B. Uniaxial tension of thin rubber liner sheets and hyperelastic model investigation. *J. Mater. Sci.* **2015**, *50*, 1401–1411, doi:10.1007/s10853-014-8700-7.
81. Horgan, C. O. The remarkable Gent constitutive model for hyperelastic materials. *Int. J. Non. Linear. Mech.* **2015**, *68*, 9–16, doi:10.1016/j.ijnonlinmec.2014.05.010.
82. Hariharaputhiran, H.; Saravanan, U. A new set of biaxial and uniaxial experiments on vulcanized rubber and attempts at modeling it using classical hyperelastic models. *Mech. Mater.* **2016**, *92*, 211–222, doi:10.1016/j.mechmat.2015.09.003.
83. Peng, T. J.; Landel, R. F. Stored energy function of rubberlike materials derived from simple tensile data. *J. Appl. Phys.* **1972**, *43*, 3064–3067.
84. Knowles, J. K. The finite anti-plane shear field near the tip of a crack for a class of incompressible elastic solids. *Int. J. Fract.* **1977**, *13*, 611–639.
85. Kilian, H.-G. Equation of state of real networks. *Polymer (Guildf)*. **1981**, *22*, 209–217.
86. Humphrey, J. D.; Yin, F. C. P. On constitutive relations and finite deformations of passive cardiac tissue: I. A pseudostrain-energy function. *J. Biomech. Eng.* **1987**, *109*, 298–304.
87. Edwards, S. F.; Vilgis, T. The stress—strain relationship in polymer glasses. *Polymer (Guildf)*. **1987**, *28*, 375–378.
88. Takamizawa, K.; Hayashi, K. Strain energy density function and uniform strain hypothesis for arterial mechanics. *J. Biomech.* **1987**, *20*, 7–17.
89. Yeoh, O. H. Characterization of elastic properties of carbon-black-filled rubber vulcanizates. *Rubber Chem. Technol.* **1990**, *63*, 792–805.
90. Arruda, E. M.; Boyce, M. C. A three-dimensional constitutive model for the large stretch behavior of rubber elastic materials. *J. Mech. Phys. Solids* **1993**, *41*, 389–412, doi:10.1016/0022-5096(93)90013-6.
91. Yamashita, Y.; Kawabata, S. Approximated form of the strain energy-density function of carbon black filled rubbers for industrial applications. *Int. Polym. Sci. Technol.* **1993**, *20*, T--52.
92. Davies, C. K. L.; De, D. K.; Thomas, A. G. Characterization of the behavior of rubber for engineering design purposes. 1. Stress-strain relations. *Rubber Chem. Technol.* **1994**, *67*, 716–728.

93. Gregory, I. H.; Muhr, A. H.; Stephens, I. J. Engineering applications of rubber in simple extension. *Plast. rubber Compos. Process. Appl.* **1997**, *26*, 118–122.
94. Yeoh, O. H.; Fleming, P. D.; others A new attempt to reconcile the statistical and phenomenological theories of rubber elasticity. *J. Polym. Sci. Phys. Ed.* **1997**, *35*, 1919–1932.
95. Martins, J. A. C.; Pires, E. B.; Salvado, R.; Dinis, P. B. A numerical model of passive and active behavior of skeletal muscles. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* **1998**, *151*, 419–433.
96. Pucci, E.; Saccomandi, G. A note on the Gent model for rubber-like materials. *Rubber Chem. Technol.* **2002**, *75*, 839–852.
97. Amin, A. F.; Wiraguna, S. I.; Bhuiyan, A. R.; Okui, Y. Hyperelasticity model for finite element analysis of natural and high damping rubbers in compression and shear. *J. Eng. Mech.* **2006**, *132*, 54–64.
98. Hartmann, S.; Neff, P. Polyconvexity of generalized polynomial-type hyperelastic strain energy functions for near-incompressibility. *Int. J. Solids Struct.* **2003**, *40*, 2767–2791.
99. Horgan, C. O.; Saccomandi, G. Constitutive models for compressible nonlinearly elastic materials with limiting chain extensibility. *J. Elast.* **2004**, *77*, 123–138.
100. Bechir, H.; Chevalier, L.; Chaouche, M.; Boufala, K. Hyperelastic constitutive model for rubber-like materials based on the first Seth strain measures invariant. *Eur. J. Mech.* **2006**, *25*, 110–124.
101. Blatz, P. J.; Ko, W. L. Application of finite elastic theory to the deformation of rubbery materials. *Trans. Soc. Rheol.* **1962**, *6*, 223–251.
102. Al-Huniti, N.; Al-Faqs, F.; Zaid, O. A. Finite element dynamic analysis of laminated viscoelastic structures. *Appl. Compos. Mater.* **2010**, *17*, 405–414.
103. Mottahedi, M.; Dadalau, A.; Hafila, A.; Verl, A. Numerical analysis of relaxation test based on Prony series material model. In *Integrated Systems, Design and Technology 2010*; Springer, 2011; pp. 79–91.
104. Dorigato, A.; Fambri, L. Thermo-mechanical behavior of polyamide 12—polyamide 66 recycled fiber composites. *Polym. Compos.* **2011**, *32*, 786–795.
105. Bernstein, B.; Kearsley, E. A.; Zapas, L. J. A study of stress relaxation with finite strain. *Trans. Soc. Rheol.* **1963**, *7*, 391–410.
106. Simo, J. C. On a fully three-dimensional finite-strain viscoelastic damage model: formulation and computational aspects. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* **1987**, *60*, 153–173.
107. Bardenhagen, S. G.; Stout, M. G.; Gray, G. T. Three-dimensional, finite deformation, viscoplastic constitutive models for polymeric materials. *Mech. Mater.* **1997**, *25*, 235–253.
108. Bergström, J. S.; Boyce, M. C. Constitutive modeling of the large strain time-dependent behavior of elastomers. *J. Mech. Phys. Solids* **1998**, *46*, 931–954.
109. Quintavalla, S. J.; Johnson, S. H. Extension of the Bergstrom-Boyce model to high strain rates. *Rubber Chem. Technol.* **2004**, *77*, 972–981.
110. Huber, N.; Tsakmakis, C. Finite deformation viscoelasticity laws. *Mech. Mater.* **2000**, *32*,

- 1–18, doi:10.1016/S0167-6636(99)00045-9.
111. Amin, A.; Alam, M. S.; Okui, Y. An improved hyperelasticity relation in modeling viscoelasticity response of natural and high damping rubbers in compression: experiments, parameter identification and numerical verification. *Mech. Mater.* **2002**, *34*, 75–95.
 112. Lion, A. A physically based method to represent the thermo-mechanical behaviour of elastomers. *Acta Mech.* **1997**, *123*, 1–25.
 113. Miehe, C.; Keck, J. Superimposed finite elastic--viscoelastic--plastoelastic stress response with damage in filled rubbery polymers. Experiments, modelling and algorithmic implementation. *J. Mech. Phys. Solids* **2000**, *48*, 323–365.
 114. Lubliner, J. *Plasticity theory*; Courier Corporation, 2008;
 115. Septanika, E. G.; Ernst, L. J. Application of the network alteration theory for modeling the time-dependent constitutive behaviour of rubbers. Part I. General theory. *Mech. Mater.* **1998**, *30*, 253–263.
 116. Septanika, E. G.; Ernst, L. J. Application of the network alteration theory for modeling the time-dependent constitutive behaviour of rubbers.: Part II. Further evaluation of the general theory and experimental verification. *Mech. Mater.* **1998**, *30*, 265–273.
 117. Mullins, L. Softening of Rubber by Deformation. *Rubber Chem. Technol.* **1969**, *42*, 339–362, doi:10.5254/1.3539210.
 118. Mullins, L. Effect of stretching on the properties of rubber. *Rubber Chem. Technol.* **1948**, *21*, 281–300.
 119. Harwood, J. A. C.; Mullins, L.; Payne, A. R. Stress softening in natural rubber vulcanizates. Part II. Stress softening effects in pure gum and filler loaded rubbers. *J. Appl. Polym. Sci.* **1965**, *9*, 3011–3021.
 120. Dorfmann, A. Stress softening of elastomers in hydrostatic tension. *Acta Mech.* **2003**, *165*, 117–137.
 121. Mars, W. V; Fatemi, A. Observations of the constitutive response and characterization of filled natural rubber under monotonic and cyclic multiaxial stress states. *J. Eng. Mater. Technol.* **2004**, *126*, 19–28.
 122. Li, J.; Mayau, D.; Lagarrigue, V. A constitutive model dealing with damage due to cavity growth and the Mullins effect in rubber-like materials under triaxial loading. *J. Mech. Phys. Solids* **2008**, *56*, 953–973.
 123. Németh, I.; Schleinzer, G.; Ogden, R. W.; Holzapfel, G. A. On the modelling of amplitude and frequency-dependent properties in rubberlike solids. In *constitutive Models for Rubber-Proceedings*; 2005; Vol. 4, p. 285.
 124. Kakavas, P. A. Mechanical properties of bonded elastomer discs subjected to triaxial stress. *J. Appl. Polym. Sci.* **1996**, *59*, 251–261.
 125. Diani, J.; Brieu, M.; Vacherand, J. M. A damage directional constitutive model for Mullins effect with permanent set and induced anisotropy. *Eur. J. Mech.* **2006**, *25*, 483–496.
 126. Diani, J.; Brieu, M.; Gilormini, P. Observation and modeling of the anisotropic visco-hyperelastic behavior of a rubberlike material. *Int. J. Solids Struct.* **2006**, *43*, 3044–3056.

127. Flamm, M.; Steinweger, T.; Spreckels, J.; Bruger, T. Mechanical properties of epdm. In *Constitutive models for rubber-proceedings*; 2008; Vol. 5, p. 233.
128. Boyce, M. C.; Kear, K.; Socrate, S.; Shaw, K. Deformation of thermoplastic vulcanizates. *J. Mech. Phys. Solids* **2001**, *49*, 1073–1098.
129. Qi, H. J.; Boyce, M. C. Stress–strain behavior of thermoplastic polyurethanes. *Mech. Mater.* **2005**, *37*, 817–839.
130. Mullins, L.; Tobin, N. R. Theoretical model for the elastic behavior of filler-reinforced vulcanized rubbers. *Rubber Chem. Technol.* **1957**, *30*, 555–571.
131. Gent, A. N. Crystallization and the relaxation of stress in stretched natural rubber vulcanizates. *Trans. Faraday Soc.* **1954**, *50*, 521–533.
132. Treloar, L. R. G. Crystallization Phenomena in Raw Rubber. *Rubber Chem. Technol.* **1942**, *15*, 251–264.
133. Albouy, P.-A.; Marchal, J.; Rault, J. Chain orientation in natural rubber, Part I: The inverse yielding effect. *Eur. Phys. J. E* **2005**, *17*, 247–259.
134. Rault, J.; Marchal, J.; Judeinstein, P.; Albouy, P. A. Stress-induced crystallization and reinforcement in filled natural rubbers: 2H NMR study. *Macromolecules* **2006**, *39*, 8356–8368.
135. Trabelsi, S.; Albouy, P.-A.; Rault, J. Crystallization and melting processes in vulcanized stretched natural rubber. *Macromolecules* **2003**, *36*, 7624–7639.
136. Trabelsi, S.; Albouy, P.-A.; Rault, J. Effective local deformation in stretched filled rubber. *Macromolecules* **2003**, *36*, 9093–9099.
137. Mullins, L.; Tobin, N. R. Stress softening in rubber vulcanizates. Part I. Use of a strain amplification factor to describe the elastic behavior of filler-reinforced vulcanized rubber. *J. Appl. Polym. Sci.* **1965**, *9*, 2993–3009.
138. Mullins, L. Permanent set in vulcanized rubber. *Rubber Chem. Technol.* **1949**, *22*, 1036–1044.
139. Dorfmann, A.; Ogden, R. W. A constitutive model for the Mullins effect with permanent set in particle-reinforced rubber. *Int. J. Solids Struct.* **2004**, *41*, 1855–1878.
140. Laraba-Abbes, F.; Ienny, P.; Piques, R. A new ‘Tailor-made’ methodology for the mechanical behaviour analysis of rubber-like materials: II. Application to the hyperelastic behaviour characterization of a carbon-black filled natural rubber vulcanizate. *Polymer (Guildf)*. **2003**, *44*, 821–840.
141. Hanson, D. E.; Hawley, M.; Houlton, R.; Chitanvis, K.; Rae, P.; Orler, E. B.; Wroblewski, D. A. Stress softening experiments in silica-filled polydimethylsiloxane provide insight into a mechanism for the Mullins effect. *Polymer (Guildf)*. **2005**, *46*, 10989–10995.
142. Harwood, J. A. C.; Payne, A. R. Stress softening in natural rubber vulcanizates. Part III. Carbon black-filled vulcanizates. *J. Appl. Polym. Sci.* **1966**, *10*, 315–324.
143. Harwood, J. A. C.; Payne, A. R. Stress softening in natural rubber vulcanizates. Part IV. Unfilled vulcanizates. *J. Appl. Polym. Sci.* **1966**, *10*, 1203–1211.
144. Kachanov, L. M. Time of the rupture process under creep conditions. *Isv. Akad. Nauk. SSR. Otd Tekh. Nauk* **1958**, *8*, 26–31.

145. Miehe, C. Discontinuous and continuous damage evolution in Ogden-type large-strain elastic materials. *Eur. J. Mech. A. Solids* **1995**, *14*, 697–720.
146. Lin, R. C.; Schomburg, U. A finite elastic--viscoelastic--elastoplastic material law with damage: theoretical and numerical aspects. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* **2003**, *192*, 1591–1627.
147. Besdo, D.; Ihlemann, J. A phenomenological constitutive model for rubberlike materials and its numerical applications. *Int. J. Plast.* **2003**, *19*, 1019–1036.
148. Lion, A. A constitutive model for carbon black filled rubber: experimental investigations and mathematical representation. *Contin. Mech. Thermodyn.* **1996**, *8*, 153–169.
149. Ernst, L. J.; Septanika, E. G. Hysteresis and time-dependent constitutive modelling of filled vulcanised rubber. *Le J. Phys. IV* **1999**, *9*, Pr9--63.
150. Beatty, M. F.; Krishnaswamy, S. A theory of stress-softening in incompressible isotropic materials. *J. Mech. Phys. Solids* **2000**, *48*, 1931–1965.
151. Laiarinandrasana, L.; Piques, R.; Robisson, A. Visco-hyperelastic model with internal state variable coupled with discontinuous damage concept under total Lagrangian formulation. *Int. J. Plast.* **2003**, *19*, 977–1000.
152. Chagnon, G.; Verron, E.; Gornet, L.; Marckmann, G.; Charrier, P. On the relevance of continuum damage mechanics as applied to the Mullins effect in elastomers. *J. Mech. Phys. Solids* **2004**, *52*, 1627–1650.
153. Ogden, R. W.; Roxburgh, D. G. A pseudo-elastic model for the Mullins effect in filled rubber. *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* **1999**, *455*, 2861–2877, doi:10.1098/rspa.1999.0431.
154. Zúñiga, A. E.; Beatty, M. F. A new phenomenological model for stress-softening in elastomers. *Zeitschrift für Angew. Math. und Phys. ZAMP* **2002**, *53*, 794–814.
155. Horgan, C. O.; Ogden, R. W.; Saccomandi, G. A theory of stress softening of elastomers based on finite chain extensibility. In *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*; 2004; Vol. 460, pp. 1737–1754.
156. Elías-Zúñiga, A. A phenomenological energy-based model to characterize stress-softening effect in elastomers. *Polymer (Guildf)*. **2005**, *46*, 3496–3506.
157. Kazakevičiūtė-Makovska, R. Experimentally determined properties of softening functions in pseudo-elastic models of the Mullins effect. *Int. J. Solids Struct.* **2007**, *44*, 4145–4157.
158. Qi, H. J.; Boyce, M. C. Constitutive model for stretch-induced softening of the stress--stretch behavior of elastomeric materials. *J. Mech. Phys. Solids* **2004**, *52*, 2187–2205.
159. Blanchard, A. F.; Parkinson, D. Breakage of carbon-rubber networks by applied stress. *Ind. Eng. Chem.* **1952**, *44*, 799–812.
160. Bueche, F. Molecular basis for the Mullins effect. *J. Appl. Polym. Sci.* **1960**, *4*, 107–114.
161. Houwink, R. Slipping of molecules during the deformation of reinforced rubber. *Rubber Chem. Technol.* **1956**, *29*, 888–893.
162. Alexendrov, A. P.; Lazurkin, J. S. Strength of amorphous and crystallizing rubber polymers. In *Doklady Akad. Nauk SSSR*; 1944; Vol. 45, pp. 291–294.

163. Dannenberg, E. M.; Brennan, J. J. Strain energy as a criterion for stress softening in carbon-black-filled vulcanizates. *Rubber Chem. Technol.* **1966**, *39*, 597–608.
164. Govindjee, S.; Simo, J. A micro-mechanically based continuum damage model for carbon black-filled rubbers incorporating Mullins' effect. *J. Mech. Phys. Solids* **1991**, *39*, 87–112.
165. Göktepe, S.; Miehe, C. A micro--macro approach to rubber-like materials. Part III: The micro-sphere model of anisotropic Mullins-type damage. *J. Mech. Phys. Solids* **2005**, *53*, 2259–2283.
166. Kilian, H. G.; Strauss, M.; Hamm, W. Universal properties in filler-loaded rubbers. *Rubber Chem. Technol.* **1994**, *67*, 1–16.
167. Klüppel, M.; Schramm, J. A generalized tube model of rubber elasticity and stress softening of filler reinforced elastomer systems. *Macromol. theory simulations* **2000**, *9*, 742–754.
168. Kraus, G.; Childers, C. W.; Rollmann, K. W. Stress softening in carbon black reinforced vulcanizates. Strain rate and temperature effects. *Rubber Chem. Technol.* **1966**, *39*, 1530–1543.
169. Marckmann, G.; Verron, E.; Gornet, L.; Chagnon, G.; Charrier, P.; Fort, P. A theory of network alteration for the Mullins effect. *J. Mech. Phys. Solids* **2002**, *50*, 2011–2028.
170. Meissner, B.; Matějka, L. Description of the tensile stress--strain behavior of filler-reinforced rubber-like networks using a Langevin-theory-based approach. Part I. *Polymer (Guildf)*. **2000**, *41*, 7749–7760.
171. Gent, A. N. A new constitutive relation for rubber. *Rubber Chem. Technol.* **1996**, *69*, 59–61.
172. Holzapfel, G. A.; Gasser, T. C. A viscoelastic model for fiber-reinforced composites at finite strains: Continuum basis, computational aspects and applications. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* **2001**, *190*, 4379–4403, doi:10.1016/S0045-7825(00)00323-6.
173. Tobajas, R.; Ibartz, E.; Gracia, L. A comparative study of hyperelastic constitutive models to characterize the behavior of a polymer used in automotive engines. *Proc. 2nd Int. Electron. Conf. Mater.* **2016**, doi:10.3390/ecm-2-A002.
174. Anani, Y.; Rahimi, G. Modeling of visco-hyperelastic behavior of transversely isotropic functionally graded rubbers. *Polym. Eng. Sci.* **2016**, *56*, 342–347, doi:10.1002/pen.24259.
175. Fahimi, S.; Baghani, M.; Zakerzadeh, M.-R.; Eskandari, A. Developing a visco-hyperelastic material model for 3D finite deformation of elastomers. *Finite Elem. Anal. Des.* **2018**, *140*, 1–10, doi:https://doi.org/10.1016/j.finel.2017.10.009.
176. Setiyana, B.; Wichahyo, F. D.; Ismail, R.; Jamari, J.; Schipper, D. J. Investigation on the Elastic Modulus of Rubber-like Materials by Straight Blade Indentation Using Numerical Analysis. *Adv. Mater. Res.* **2015**, *1123*, 55–58.
177. Fatemi, A.; Yang, L. Cumulative fatigue damage and life prediction theories: a survey of the state of the art for homogeneous materials. *Int. J. Fatigue* **1998**, *20*, 9–34.
178. Palmgren, A. Die lebensdauer von kugellagern. *Zeitschrift des Vereins Dtsch. Ingenieure* **1924**, *68*, 339–341.

179. Miner, M. A. Cumulative damage in fatigue *Journal of Applied Mechanics* 12 (1945), 3, S. A159-A164.
180. Machlin, E. S. Dislocation theory of the fatigue of metals. **1949**.
181. Coffin Jr, L. F. Design aspects of high-temperature fatigue with particular reference to thermal stresses. *Trans. Am. Soc. Mech. Engrs.* **1956**, 78.
182. Topper, T. H.; Biggs, W. D. The cyclic straining of mild steel. *Appl Mater Res* **1966**, 5, 202–209.
183. Miller, K. J. An experimental linear cumulative-damage law. *J. Strain Anal. Eng. Des.* **1970**, 5, 177–184.
184. Richart, F. E.; Newmark, N. M. An hypothesis for the determination of cumulative damage in fatigue. In *Selected Papers By Nathan M. Newmark@ sCivil Engineering Classics*; 1948; pp. 279–312.
185. Marco, S. M.; Starkey, W. L. A concept of fatigue damage. *Trans. ASME* **1954**, 76, 627–632.
186. Manson, S. S.; Halford, G. R. Practical implementation of the double linear damage rule and damage curve approach for treating cumulative fatigue damage. *Int. J. Fract.* **1981**, 17, 169–192.
187. Manson, S.; Freche, J.; Ensign, C. Application of a double linear damage rule to cumulative fatigue. In *Fatigue Crack Propagation*; ASTM International, 1967.
188. Langer, B. F. Fatigue failure from stress cycles of varying amplitude. *J. Appl. Mech.* **1937**, 59, A160–A162.
189. Grover, H. An observation concerning the cycle ratio in cumulative damage. In *Symposium on Fatigue of Aircraft Structures*; 1960.
190. Hwang, W.; Han, K. S. Cumulative damage models and multi-stress fatigue life prediction. *J. Compos. Mater.* **1986**, 20, 125–153.
191. Kamiński, M. On probabilistic fatigue models for composite materials. *Int. J. Fatigue* **2002**, 24, 477–495.
192. Henry, D. L. *A theory of fatigue damage accumulation in steel*; 1953;
193. Kommers, J. B. The effect of overstress in fatigue on the endurance life of steel. In *Proceedings-American Society For Testing And Materials*; 1945; Vol. 45, pp. 532–541.
194. Bennett, J. A. A study of the damaging effect of fatigue stressing on x4130-steel. In *Proceedings-American Society For Testing And Materials*; 1946; Vol. 46, pp. 693–714.
195. Gatts, R. R. Cumulative fatigue damage with random loading. *J. Basic Eng.* **1962**, 84, 403–408.
196. Bluhm, J. A note on fatigue damage. *Mater. Res. Stand.* **1962**.
197. Corten, H. T.; Dolan, T. J. Cumulative fatigue damage. In *Proceedings of the international conference on fatigue of metals*; 1956; Vol. 1, p. 235.
198. Freudenthal, A. M. On Stress Interaction in Fatigue and a Cumulative Damage Rule: Part I. 2024 Aluminum and SAE 4340 Steel Alloys, Wright Air Development Center, Air Research and Development Command, United States Air Force, 1958.

199. Freudenthal, A. M. Physical and statistical aspects of cumulative damage. In *Colloquium on Fatigue/Colloque de Fatigue/Kolloquium über Ermüdungsfestigkeit*; 1956; pp. 53–62.
200. Spitzer, R.; Corten, H. T. *Effect of Loading Sequence on Cumulative Fatigue Damage of 7075-T6 Aluminum Alloy*; Department of Theoretical and Applied Mechanics, University of Illinois, 1961;
201. Manson, S. S.; Nachtigall, A. J.; Freche, J. C. A proposed new relation for cumulative fatigue damage in bending. In *Proc. ASTM*; 1961; Vol. 61, pp. 679–703.
202. Manson, S. S.; Nachtigall, A. J.; Ensign, C. R.; Freche, J. C. Further investigation of a relation for cumulative fatigue damage in bending. *J. Eng. Ind.* **1965**, *87*, 25–35.
203. Subramanyan, S. A cumulative damage rule based on the knee point of the SN curve. *J. Eng. Mater. Technol.* **1976**, *98*, 316–321.
204. Hashin, Z.; Rotem, A. A cumulative damage theory of fatigue failure. *Mater. Sci. Eng.* **1978**, *34*, 147–160.
205. Ben-Amoz, M. A cumulative damage theory for fatigue life prediction. *Eng. Fract. Mech.* **1990**, *37*, 341–347.
206. Leipholz, H. H. E. Lifetime prediction for metallic specimens subjected to loading with varying intensity. *Comput. Struct.* **1985**, *20*, 239–246.
207. Leipholz, H. H. E. On the modified sn curve for metal fatigue prediction and its experimental verification. *Eng. Fract. Mech.* **1986**, *23*, 495–505.
208. Leipholz, H. H. E.; Topper, T.; El Menoufy, M. Lifetime prediction for metallic components subjected to stochastic loading. *Comput. Struct.* **1983**, *16*, 499–507.
209. Shanley, F. R. *A theory of fatigue based on unbonding during reversed slip*; 1952;
210. Valluri, S. R. *A unified engineering theory of high stress level fatigue*; 1961;
211. Valluri, S. R. *A theory of cumulative damage in fatigue*; 1962;
212. Wheeler, O. E. Spectrum loading and crack growth. *J. basic Eng.* **1972**, *94*, 181–186.
213. Bui-Quoc, T. An interaction effect consideration in cumulative damage on a mild steel under torsion loading. In *ICF5, Cannes (France) 1981*; 2013.
214. Thang, B. Q.; Dubuc, J.; Bazergui, A.; Biron, A. Cumulative fatigue damage under strain controlled conditions. *J MATER* **1971**, *6*, 718–737.
215. Bui-Quoc, T. Unified Theory of Cumulative Damage in Metal Fatigue. *DScA thesis, Ec. Polytech. Montr. Canada* **1969**.
216. Gatts, R. R. Application of a cumulative damage concept to fatigue. *J. Basic Eng.* **1961**, *83*, 529–534.
217. Bui-Quoc, T. Cumulative damage with interaction effect due to fatigue under torsion loading. *Exp. Mech.* **1982**, *22*, 180–187.
218. Bui-Quoc, T. A Simplified Model for Cumulative Fatigue Damage with Interaction Effect. In *1982 Joint Conference on Experimental Mechanics, Part 1-2*; 1982; pp. 144–149.
219. Bui Quoc, T.; Biron, A. Cumulative damage concepts with interaction effect consideration for fatigue or creep: A perspective. In *Structural mechanics in reactor*

- technology. Vol. L; 1981.
220. Bernard-Conolly, M.; Bui-Quoc, T.; Biron, A. Multilevel strain controlled fatigue on a type 304 stainless steel. *J. Eng. Mater. Technol.* **1983**, *105*, 188–194.
221. Bui-Quoc, T. High-temperature fatigue-life estimation: Extension of a unified theory. *Exp. Mech.* **1975**, *15*, 219–225.
222. Bui-Quoc, T. An engineering approach for cumulative damage in metals under creep loading. *J. Eng. Mater. Technol.* **1979**, *101*, 337–343.
223. Bui-Quoc, T.; Biron, A. Cumulative Damage With Interaction Effect Due to Creep on a Cr-- Mo-- V Steel. In *International Conference on Engineering Aspects of Creep*; 1980; Vol. 1, pp. 121–125.
224. Bui-Quoc, T.; Biron, A. An Interaction Effect Consideration in Cumulative Damage in Metals Due to Creep. *J. Mech. Eng. Sci.* **1981**, *23*, 281–288.
225. Bui-Quoc, T. Evaluation of creep-rupture data using a new approach. In *Structural mechanics in reactor technology. Vol. L*; 1981.
226. Bui-Quoc, T. Recent developments of damage concepts applied to creep-fatigue combinations. In *3rd Int. Seminar on Inel. Anal, and Life Pred. In High Temp. Envi., Paper B*; 1981; Vol. 3.
227. Kam, T. Y.; Tsai, S. Y.; Chu, K. H. Fatigue reliability analysis of composite laminates under spectrum stress. *Int. J. Solids Struct.* **1997**, *34*, 1441–1461.
228. Kam, T. Y.; Chu, K. H.; Tsai, S. Y. Fatigue reliability evaluation for composite laminates via a direct numerical integration technique. *Int. J. Solids Struct.* **1998**, *35*, 1411–1423.
229. Miller, K. J.; Zachariah, K. P. Cumulative damage laws for fatigue crack initiation and stage I propagation. *J. Strain Anal. Eng. Des.* **1977**, *12*, 262–270.
230. Miller, K. J.; Mohamed, H. J.; De Los Rios, E. R. Fatigue damage accumulation above and below the fatigue limit. In *EGF1*; 2013.
231. Miller, K. The behaviour of short fatigue cracks and their initiation part I—a review of two recent books. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* **1987**, *10*, 75–91.
232. Mohamed, H. J. Cumulative fatigue damage under varying stress range conditions. *PhD Diss. Sheffield, Sheffield, UK* **1986**.
233. Ma, B.-T.; Laird, C. Overview of fatigue behavior in copper single crystals. I. Surface morphology and stage I crack initiation sites for tests at constant strain amplitude. *Acta Met.* **1989**, *37*, 325–336.
234. Vašek, A.; Polak, J. Low cycle fatigue damage accumulation in armco-iron. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* **1991**, *14*, 193–204.
235. Kujawski, D.; Ellyin, F. A cumulative damage theory for fatigue crack initiation and propagation. *Int. J. Fatigue* **1984**, *6*, 83–88.
236. Leis, B. N. A nonlinear history-dependent damage model for low cycle fatigue. In *Low Cycle Fatigue*; ASTM International, 1988.
237. Xiaode, N.; Guangxia, L.; Hao, L. Hardening law and fatigue damage of a cyclic hardening metal. *Eng. Fract. Mech.* **1987**, *26*, 163–170.

238. Bastenaire, F. A. New method for the statistical evaluation of constant stress amplitude fatigue-test results. In *Probabilistic aspects of fatigue*; ASTM International, 1972.
239. Castillo, E.; Fernández-Canteli, A. A general regression model for lifetime evaluation and prediction. *Int. J. Fract.* **2001**, *107*, 117–137.
240. Castillo, E.; Fernández-Canteli, A.; Ruiz-Ripoll, M. L. A general model for fatigue damage due to any stress history. *Int. J. Fatigue* **2008**, *30*, 150–164.
241. Castillo, E.; Galambos, J. Lifetime regression models based on a functional equation of physical nature. *J. Appl. Probab.* **1987**, 160–169.
242. Castillo, E.; Hadi, A. S. Modeling lifetime data with application to fatigue models. *J. Am. Stat. Assoc.* **1995**, *90*, 1041–1054.
243. Sobczyk, K. Stochastic models for fatigue damage of materials. *Adv. Appl. Probab.* **1987**, 652–673.
244. Liu, Y.; Mahadevan, S. Stochastic fatigue damage modeling under variable amplitude loading. *Int. J. Fatigue* **2007**, *29*, 1149–1161.
245. Shen, H.; Lin, J.; Mu, E. Probabilistic model on stochastic fatigue damage. *Int. J. Fatigue* **2000**, *22*, 569–572.
246. Wirsching, P. H.; Chen, Y.-N. Considerations of probability-based fatigue design for marine structures. *Mar. Struct.* **1988**, *1*, 23–45.
247. Albrecht, P. SN fatigue reliability analysis of highway bridges. In *Probabilistic Fracture Mechanics and Fatigue Methods: Applications for Structural Design and Maintenance*; ASTM International, 1983.
248. Wu, W. F.; Liou, H. Y.; Tse, H. C. Estimation of fatigue damage and fatigue life of components under random loading. *Int. J. Press. Vessel. Pip.* **1997**, *72*, 243–249.
249. Zaccone, M. A. Failure analysis of helical suspension springs under compressor start/stop conditions. *Pract. Fail. Anal.* **2001**, *1*, 51–62.
250. Wirsching, P. H. Probabilistic fatigue analysis. In *Probabilistic structural mechanics handbook*; Springer, 1995; pp. 146–165.
251. Wu, W.-F.; Huang, T.-H. Prediction of fatigue damage and fatigue life under random loading. *Int. J. Press. Vessel. Pip.* **1993**, *53*, 273–298.
252. Pascual, F. G.; Meeker, W. Q. Estimating fatigue curves with the random fatigue-limit model. *Technometrics* **1999**, *41*, 277–289.
253. Castillo, E.; Fernández Canteli, A. A Parametric Lifetime Model for the Prediction of High-Cycle Fatigue Based on Stress Level and Amplitude. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* **2006**, *29*, 1031–1038.
254. Castillo, E.; Fernández-Canteli, A.; Esslinger, V.; Thürlimann, B. Statistical model for fatigue analysis of wires, strands and cables. *Int. Assoc. Bridg. Struct. Eng. Proc.* **1985**, 82–85.
255. Castillo, E.; Fernández-Canteli, A.; Hadi, A. S. On fitting a fatigue model to data. *Int. J. Fatigue* **1999**, *21*, 97–106.
256. Castillo, E.; Fernández-Canteli, A.; Hadi, A. S.; López-Aenlle, M. A fatigue model with local sensitivity analysis. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* **2007**, *30*, 149–168.

257. Castillo, E.; Fernández-Canteli, A.; Koller, R.; Ruiz-Ripoll, M. L.; García, A. A statistical fatigue model covering the tension and compression Wohler fields. *Probabilistic Eng. Mech.* **2009**, *24*, 199–209.
258. Castillo, E.; Fernández Canteli, A.; López-Aenlle, M.; Ruiz Ripoll, M. L. Some fatigue damage measures for longitudinal elements based on the Wohler field. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* **2007**, *30*, 1063–1075.
259. Simulia, D. ABAQUS 6.11 analysis user's manual. *Abaqus* **2011**, *6*, 22.
260. Fernández-Canteli, A.; Przybilla, C.; Nogal, M.; Aenlle, M. L.; Castillo, E. Profatigue: A software program for probabilistic assessment of experimental fatigue data sets. In *Procedia Engineering*; 2014.
261. Tobajas, R.; Elduque, D.; Ibarz, E.; Javierre, C.; Canteli, A. F.; Gracia, L. Visco-hyperelastic model with damage for simulating cyclic thermoplastic elastomers behavior applied to an industrial component. *Polymers (Basel)*. **2018**, doi:10.3390/polym10060668.
262. Simulia, D. Abaqus 6.11 theory manual. *Provid. RI, USA DS SIMULIA Corp* **2011**.

En la actualidad los materiales elastómeros están cobrando un gran protagonismo en la industria. Son muchos los sectores donde este tipo de materiales está encontrando un sitio relevante gracias a sus propiedades mecánicas. Por ejemplo, en el sector de la construcción, estos materiales son utilizados para la fabricación de amortiguadores que actúan en caso de terremotos. En el sector de los electrodomésticos los elastómeros se usan para fabricar juntas aislantes e impermeables que luego serán montadas en lavadoras y frigoríficos. En sectores como la aeronáutica o la automoción su uso es todavía más extendido si cabe. Constituyen la principal materia prima para la fabricación de componentes tan relevantes como los neumáticos. Aumentar la eficiencia de los motores reduciendo el consumo de combustible y el tamaño de los mismos de forma progresiva es, a día de hoy, uno de los retos a los que se enfrenta el sector automotriz. Este desafío incluye otros como reducir el tamaño del resto de componentes. Todo ello exige diseños más compactos y flexibles mediante el uso de materiales alternativos a los metales como son los elastómeros.

