



UNIVERSIDAD DE LA RIOJA

TESIS DOCTORAL

Título
Modelizado y optimización de problemas mecánicos no lineales mediante el Método de Elementos Finitos, RSM y ML
Autor/es
Saúl Íñiguez Macedo
Director/es
Ana González Marcos y Rubén Lostado Lorza
Facultad
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial
Titulación
Departamento
Ingeniería Mecánica
Curso Académico

Existen circunstancias excepcionales que impiden la difusión de la versión íntegra de esta tesis. Por este motivo se difunden únicamente los contenidos que no están sujetos a confidencialidad



Modelizado y optimización de problemas mecánicos no lineales mediante el Método de Elementos Finitos, RSM y ML, tesis doctoral de Saúl Íñiguez Macedo, dirigida por Ana González Marcos y Rubén Lostado Lorza (publicada por la Universidad de La Rioja), se difunde bajo una Licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 3.0 Unported.

Permisos que vayan más allá de lo cubierto por esta licencia pueden solicitarse a los titulares del copyright.

Universidad de La Rioja
Departamento de Ingeniería Mecánica

Tesis Doctoral
2023

Programa de Doctorado en Innovación en Ingeniería de Producto
y Procesos Industriales



**UNIVERSIDAD
DE LA RIOJA**

MODELIZADO Y OPTIMIZACIÓN DE PROBLEMAS
MECÁNICOS NO LINEALES MEDIANTE EL
MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS, RSM Y ML

Autor
Saúl Íñiguez Macedo

Directores
Dra. Ana González Marcos
Dr. Rubén Lostado Lorza

Resumen

Los materiales elastómeros presentan un comportamiento mecánico no lineal, pudiendo además asumir grandes deformaciones. Para conseguir modelar adecuadamente estos materiales no basta con la obtención de un módulo elástico junto con sus tensiones de límite elástico y de rotura. Estos materiales requieren una caracterización mucho más compleja, que debe realizarse mediante una serie de ensayos a los que les sigue un proceso de ajuste de diferentes funciones de energía de deformación. El mayor inconveniente en este tipo de ajuste es la imposibilidad de expresar de manera explícita los valores de fuerza en las funciones de energía. Por lo tanto, el único modo posible para ejecutar la caracterización es el uso de extensómetros que recojan los valores de deformación para así determinar las curvas tensión-deformación. El método de ajuste posterior consiste en un procedimiento iterativo que trata de reducir el error existente entre las curvas obtenidas en los ensayos y las generadas por medio de ciertos parámetros de entrada. La dificultad que ello implica, sumado al coste de los equipos necesarios, provoca que el proceso de caracterización de elastómeros incremente aún más la complejidad en su ejecución.

Esta tesis presenta una metodología de caracterización de elastómeros basada en el Método de Elementos Finitos (MEF) el *Machine Learning* (ML) y técnicas avanzadas de optimización. Mediante este procedimiento resulta posible caracterizar materiales elastómeros de un modo prácticamente inmediato mediante sus curvas fuerza-desplazamiento, fácilmente obtenibles mediante una máquina universal sin la necesidad de añadir equipos de extensometría. Diez materiales elastómeros de tipo NBR (*Acrylonitrile Butadiene Rubber*), SBR (*Styrene-Butadiene Rubber*), EVA (Etileno-Vinil-Acetato) y PU (Poliuretano) han sido ensayados para validar la metodología propuesta. Cada uno de los ensayos ejecutados sobre los materiales fue replicado mediante un modelo de elementos finitos. Estos modelos, fueron utilizados como una fuente de información de la que se extrajo una base de datos del comportamiento fuerza-desplazamiento. Se utilizaron para ello diferentes parámetros de entrada para cuatro funciones de energía diferentes (Mooney-Rivlin, Arruda-Boyce, Gent y Ogden). La última fase consistió en la aplicación de técnicas de optimización como el Método de Superficie de Respuesta Múltiple (RSM) y el método de Algoritmos Genéticos (AG) para obtener los parámetros óptimos en cada uno de los casos.

La metodología propuesta fue posteriormente validada mediante un sexto ensayo, conocido como ensayo de abombamiento o "*bulge test*". En este caso, un nuevo material de tipo NBR fue caracterizado y ensayado, replicando mediante MEF el proceso de la prueba ejecutada. Los resultados obtenidos pusieron de manifiesto la validez de la metodología desarrollada al haber conseguido obtener una buena aproximación frente al ensayo real. Alternativamente, y en vista de estos resultados, se propuso el uso del ensayo de abombamiento como método sustitutivo a los ensayos de equibiaxialidad o tensión plana en el set de ensayos de caracterización. Una vez establecida y validada, la metodología fue aplicada a tres problemas no lineales presentes en el sector del calzado.

El primer problema planteado fue la simulación y obtención de las zonas críticas de rotura de una membrana de conformado utilizada en la maquinaria de producción. Este tipo de membranas son utilizadas para presionar los componentes del calzado contra una horma, en un proceso cíclico de hinchado, que termina desencadenando en la rotura del componente. La simulación del problema se basa en la caracterización de los materiales mediante el método previamente definido y posteriormente el desarrollo de un modelo adecuado que permita determinar las zonas de afección.

El segundo caso consiste en la aplicación de la metodología en elastómeros impresos en 3D, con el objetivo final de su uso en la fabricación de órtesis personalizadas. Para ello se utilizaron tres tipos de material con dureza Shore variable, que además fueron impresos en diferentes configuraciones de patrón de relleno. Siempre que las deformaciones sean controladas, la metodología de ajuste permite tanto la caracterización de un material totalmente sólido, como la de

un material que presenta una estructura interna determinada. Este hecho hace posible que los modelos MEF utilizados en estos casos se simplifiquen, siendo de aplicación, como en este caso, en la simulación de órtesis plantares. Para ello, se propone la combinación de la metodología de ajuste junto con modelos anatómicos personalizados por paciente y provenientes de Tomografías Axiales Computarizadas (TAC). Esta herramienta puede ayudar tanto a mejorar significativamente los diagnósticos podológicos (resulta posible estudiar las tensiones en el interior del cuerpo) como a mejorar el diseño de soluciones correctoras, al poder validar el modo en que influyen sobre el pie sin la presencia del paciente.

Finalmente, el tercer problema estudiado consiste en el estudio del ensayo de deslizamiento de suelas para calzado de seguridad. Este ensayo constituye uno de los mayores problemas a la hora de obtener un nuevo diseño de suela, habiendo ocurrido en varias ocasiones que los moldes fabricados deben desecharse al no superar esta prueba. Para conseguir evitar este problema, la metodología de ajuste es aplicada a la caracterización de los materiales utilizados en una suela, junto con la caracterización del deslizamiento del material frente a diferentes estados de carga. Un modelo MEF global de suela que incluye toda esta información es capaz de determinar con precisión el coeficiente de rozamiento que presentará el componente real sin la necesidad de obtener un prototipo físico, sirviendo enormemente para agilizar tiempos de diseño y evitando costes innecesarios en el proceso.

Palabras clave: elastómeros, caracterización, método de los elementos finitos, machine learning, algoritmos genéticos, método superficie de respuesta.

Abstract

Elastomer materials have a non-linear mechanical behaviour, and can also admit large deformations. In order to correctly model these materials, it is not enough to obtain an elastic modulus and their elastic limit and rupture stresses. These materials require a more complex characterization, which must be carried out through a series of tests followed by a process of adjustment of different strain energy functions. The biggest drawback in this type of procedure is the impossibility of explicitly expressing force values in the energy functions. Therefore, the only possible way to carry out the characterization is the use of extensometers to collect the strain values in order to determine the stress-strain curves. The subsequent adjustment method consists of an iterative procedure that tries to reduce the existing error between the curves obtained in the tests and those generated by means of certain input parameters. The difficulty that this implies, added to the cost of the necessary equipment, causes the characterization process to increase, even more, the complexity in its execution.

This thesis presents an elastomer characterization methodology based on the Finite Element Method (FEM), Machine Learning (ML) and advanced optimization techniques. By means of this procedure it is possible to characterize elastomeric materials in a practically immediate way by means of their force-displacement curves. These curves are easily obtainable by means of a universal machine without the need to add any extensometry equipment. Ten elastomeric materials of the NBR (Acrylonitrile Butadiene Rubber), SBR (Styrene-Butadiene Rubber), EVA (Ethylene-Vinyl-Acetate) and PU (Polyurethane) types have been tested to validate the proposed methodology. Each of the tests carried out on the materials was replicated using a finite element model. These models were used as a source of information from which a force-displacement behavior database was extracted. Different input parameters were used in four different energy functions (Mooney-Rivlin, Arruda-Boyce, Gent and Ogden). The last step consisted in the application of optimization techniques such as the Multiple Response Surface Method (MSR) and the Genetic Algorithm (GA) method to obtain the optimal parameters in each of the cases.

The proposed methodology was subsequently validated through a sixth test, known as the bulge test. In this case, a new NBR-type material was characterized and tested, replicating the process of the test carried out using FEM. The obtained results revealed the validity of the developed methodology, having managed to obtain a good approximation compared to the real test. Alternatively, after the review of these results, the use of the bulging test was proposed as a substitute method for the equibiaxiality or planar stress tests in characterization tests set. Once established and validated, the methodology was applied to three non-linear problems present in the footwear sector.

The first problem was the simulation and the determination of the critical break zones of a forming membrane used in production machinery. These types of membranes are used to press footwear components against a last, in a cyclical inflation process, which ends up triggering the component breakage. The simulation of the problem is based on the characterization of the materials by means of the previously defined method and later the development of an adequate model that allows determining the affected areas.

The second problem consists on the application of the methodology to 3D printed elastomers, with the final objective of its use in the manufacture of personalized orthoses. Three types of material with variable Shore hardness were used, which were also 3D printed with different fill pattern configurations. Assuming that the deformations are controlled, the adjustment methodology allows both the characterization of a totally solid material, as well as that of a material that presents a concrete internal structure. This fact allows the FEM models used in these cases to be simplified, making it possible to use them, as in this case, in the simulation of plantar orthoses. The combination of the adjustment methodology together with anatomical models personalized by

patient obtained from Computed Axial Tomography (CT) is proposed. This tool can help both to significantly improve podiatric diagnoses (it is possible to study the stresses inside the body) and to improve the design of corrective solutions, by being able to validate the way in which they influence the foot without the presence of the patient.

Finally, the third problem consists of the study of the safety footwear soles slip test. This test is one of the biggest problems to overcome in the design process of a new sole. Several times, the manufactured sole molds must be discarded as the components do not pass this test. In order to avoid this problem, the adjustment methodology was applied to the characterization of the materials used in a sole. In addition to that, the slippage of the material was studied against different load states. A global FEM sole model that includes all this information is capable of accurately determine the coefficient of friction that the real component will have. By doing this, there is no need of obtaining a physical prototype, greatly serving to speed up design times and avoid unnecessary costs in the process.

Keywords: elastomers, characterization, finite element method, machine learning, genetic algorithms, response surface method.

Dedicatorias

*A mis padres,
porque con vuestro esfuerzo habéis conseguido que esto sea posible.*

*A María José,
por tus ánimos y tu cariño durante todos estos años.*

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a mis directores Ana González Marcos y Rubén Lostado Lorza por su dedicación durante todos estos años. Trabajar con vosotros es un privilegio, buenos docentes, ingenieros y mejores personas, no solo me habéis guiado hasta aquí, sino que habéis propiciado mi participación en el desarrollo de múltiples líneas de investigación. Vuestros conocimientos, valiosos consejos y apoyo constante han hecho posible el desarrollo de esta tesis.

A Rubén Escribano García, quien nos ayudó con el comienzo de la definición de los métodos de optimización multirrespuesta y sin quien no hubiese sido posible continuar con este desarrollo.

A Carlos Elvira Izurrategui y Angélica Torices Hernández por haber proporcionado los medios informáticos necesarios para desempeñar los cálculos de las bases de datos de materiales mediante MEF.

Agradecer también al Centro Tecnológico del Calzado de La Rioja (CTCR) el haber permitido el uso de sus instalaciones, desde el desarrollo de ensayos sobre materiales, hasta el aporte de los medios informáticos para ejecutar las simulaciones de mayor complejidad.

Sin vuestra ayuda esta tesis no hubiera sido posible.

¡Gracias!

Índice general

1. INTRODUCCIÓN	23
1.1 Motivación.....	23
1.2 Objetivos.....	24
1.3 Contribuciones de esta Tesis	24
1.3.1 Artículos con factor de impacto JCR	24
1.3.2 Artículos en revistas no indexadas	25
1.3.3 Congresos nacionales e internacionales	26
1.4 Descripción del documento	29
2. ESTADO DEL ARTE DE LA INVESTIGACIÓN	31
2.1 Método de los Elementos Finitos	31
2.2 Caracterización mecánica de elastómeros	32
2.3 Problemas de optimización basados en el método de los Elementos Finitos	33
2.3.1 Predicción en base a modelos regresores y optimización mediante el método de respuesta múltiple	34
2.3.2 Predicción en base a machine learning y optimización mediante algoritmos genéticos	34
2.4 Conclusiones.....	35
3. METODOLOGÍA.....	37
3.1 Introducción.....	37
3.2 Metodología propuesta	39
3.3 Ejecución de ensayos.....	41
3.3.1 Ensayo de tracción - UNE 53510	41
3.3.2 Ensayo de tensión plana	43
3.3.3 Ensayo de compresión - UNE 53536	44
3.3.4 Ensayo de compresión volumétrica.....	45
3.3.5 Ensayo de cizalladura - UNE 53630	46
3.4 Preparación de modelos basados en el método de los elementos finitos, cálculo y obtención de datos.....	47
3.4.1 Acotación del problema	48

3.4.2 Obtención de la base de datos	49
3.5 Generación de modelos de regresión.....	51
3.5.1 Obtención de modelos regresores.....	51
3.5.2 Obtención de modelos de red neuronal	52
3.6 Obtención de los parámetros más apropiados mediante optimización	54
3.6.1 Método de superficie de respuesta múltiple	54
3.6.2 Algoritmos Genéticos.....	56
4. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES ELASTÓMEROS.....	59
4.1 Procedimiento experimental	59
4.1.1 Preparación de probetas	60
4.1.2 Caracterización mecánica.....	64
4.2 Ecuaciones constitutivas.....	73
4.2.1 Modelo de Mooney	73
4.2.2 Modelo de Rivlin.....	75
4.2.3 Modelo de Ogden	78
4.2.4 Modelo de Yeoh.....	79
4.2.5 Modelo de Arruda-Boyce.....	79
4.2.6 Modelo de Gent.....	80
4.2.7 Modelo de Kilian.....	80
4.2.8 Modelo de Blatz-Ko	81
4.3 Simulación y obtención de datos	82
4.3.1 Preparación de modelos de elementos finitos	82
4.3.2 Análisis de sensibilidad de malla	87
4.3.3 Obtención de la base de datos	91
4.4 Optimización mediante el método de la superficie de respuesta múltiple.....	95
4.5 Optimización mediante redes neuronales y algoritmos genéticos	101
4.6 Conclusiones.....	112
5. VALIDACIÓN DEL MÉTODO Y PROPUESTA DE ENSAYOS ALTERNATIVOS.....	117
5.1 Definición del método de validación.....	117
5.1.1 Ensayo de abombamiento “Bulge Test”.....	118
5.2 Caracterización de materiales	123
5.3 Simulación MEF del ensayo de abombamiento	128
5.4 Conclusiones.....	136
6. DETERMINACIÓN DE ZONAS DE ROTURA EN MEMBRANA DE CONFORMADO DE CALZADO	139
6.1 El conformado en la producción de calzado.....	139
6.2 Validación de modelos de elementos finitos	142
6.3 Simulación MEF de membrana de conformado	144
6.3.1 Obtención de geometrías	144
6.3.2 Preparación del modelo de elementos finitos.....	147
6.4 Instrumentación y validación de deformaciones	152
6.5 Conclusiones.....	159
7. CARACTERIZACIÓN DE ELASTÓMEROS IMPRESOS EN 3D PARA SU USO EN LA FABRICACIÓN DE ÓRTESIS PERSONALIZADAS	161
7.1 Diseño de órtesis personalizadas	161
7.1.1 Adquisición de datos	164
7.1.2 Simulación y obtención de la órtesis optima.....	166
7.2 Caracterización de materiales impresos.....	168
7.2.1 Caracterización de probetas macizas.....	171
7.2.2 Estudio de patrones de relleno.....	179
7.2.3 Caracterización de material al 24%.....	185
7.3 Simulación de órtesis personalizadas	198
7.3.1 Cálculo y estudio de presiones plantares.....	203

7.4 Conclusiones.....	211
8. DETERMINACIÓN DE COEFICIENTE DE ROZAMIENTO EN SUELA DE CALZADO DE SEGURIDAD	213
8.1 Ensayo de deslizamiento en calzado.....	213
8.1.1 Método de ensayo conforme ISO 13287.....	214
8.2 Determinación experimental.....	217
8.3 Simulación MEF del deslizamiento.....	220
8.3.1 Modelos de fricción.....	220
8.3.2 Validación MEF de ensayos de deslizamiento.....	224
8.3.3 Simulación de suela completa.....	229
8.3.4 Validación de suela completa.....	235
8.4 Conclusiones.....	237
9. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	239
9.1 Conclusiones.....	239
9.2 Líneas futuras	241
10. GLOSARIO	243
11. REFERENCIAS	245

Índice de figuras

Figura 3.1. Representación esquemática de la metodología planteada.....	40
Figura 3.2. Probeta para ensayo de tracción en forma de halterio.....	41
Figura 3.3. Tipologías de diseño de experimentos [32].....	50
Figura 3.4. Estructura interna de una neurona artificial	52
Figura 3.5. Esquema típico del perceptrón multicapa	53
Figura 3.6. Superficie respuesta de modelo polinómico a maximizar.....	56
Figura 3.7. Diagrama de funcionamiento básico de un algoritmo genético	57
Figura 4.1. Curvas características en reometría de elastómeros	61
Figura 4.2. Prensa hidráulica utilizada junto con planchas de 12mm.....	62
Figura 4.3. Troqueles utilizados para el corte de probetas	63
Figura 4.4. Utillajes y probetas utilizados, ensayo de tracción.....	65
Figura 4.5. Utillajes (2) y probetas (1), utilizados en ensayo de tensión plana	66
Figura 4.6. Utillajes (2) y probetas (1), utilizados en ensayo de compresión.....	67
Figura 4.7. Utillajes (2, 3, 4) y probetas (1), utilizados en ensayo de c. volumétrica	68
Figura 4.8. Utillajes (2) y probetas (1), utilizados en ensayo de cizalladura.....	69
Figura 4.9. Curvas tensión-deformación obtenidas para el material Ejército.....	70
Figura 4.10. Curvas fuerza-desplazamiento ensayo de tracción, material Ejército	71
Figura 4.11. Curvas fuerza-desplazamiento ensayo de compresión, material Ejército	71
Figura 4.12. Curvas fuerza-desplazamiento ensayo de compresión volumétrica, material Ejército	72
Figura 4.13. Curvas fuerza-desplazamiento ensayo cizalladura, material Ejército	72
Figura 4.14. Curvas fuerza-desplazamiento ensayo tensión plana, material Ejército	72
Figura 4.15. Estados tensionales puros.....	74
Figura 4.16. Elemento diferencial de Arruda-Boyce.....	79
Figura 4.17. Modelo MEF planteado para ensayo de tracción	82
Figura 4.18. Deformación modelo MEF y ensayo real de tracción.....	83
Figura 4.19. Modelo MEF planteado para ensayo tensión plana. Utillaje (2) y probeta (1)	83
Figura 4.20. Deformación modelo MEF y ensayo real de tensión plana.....	84

Figura 4.21. Modelo MEF planteado para ensayo de compresión	84
Figura 4.22. Deformación modelo MEF y ensayo real de compresión	85
Figura 4.23. Modelo MEF planteado para ensayo de compresión volumétrica	85
Figura 4.24. Modelo MEF planteado para ensayo de cizalladura	86
Figura 4.25. Deformación modelo MEF y ensayo real de cizalladura	86
Figura 4.26. Elementos Hex84 (Izda.) y Hex35 (Dcha.)	87
Figura 4.27. Fuerza según número de nodos, ensayo de compresión.....	88
Figura 4.28. Deformación y tensiones de los modelos de compresión.....	89
Figura 4.29. Fuerza según número de nodos, ensayo de cizalladura.....	89
Figura 4.30. Deformación y tensiones de los modelos de cizalladura.....	90
Figura 4.31. Fuerza según número de nodos, ensayo de tracción	91
Figura 4.32. Haz de curvas obtenidas para ensayo de tracción, Mooney-Rivlin.....	92
Figura 4.33. Haz de curvas obtenidas para ensayo de tensión plana, Mooney-Rivlin	92
Figura 4.34. Haz de curvas obtenidas para ensayo de compresión, Mooney-Rivlin.....	92
Figura 4.35. Haz de curvas obtenidas para ensayo de comp. Vol., Mooney-Rivlin.....	93
Figura 4.36. Haz de curvas obtenidas para ensayo de cizalladura, Mooney-Rivlin.....	93
Figura 4.37. Gráficos de dispersión de errores de testeo para los cinco modelos de Arruda-Boyce	103
Figura 4.38. Diagrama de ejecución del algoritmo de optimización	104
Figura 4.39. Operador de cruce basado en un punto	106
Figura 4.40. Máscara de cruce aplicada en la reproducción.....	107
Figura 4.41. Operador de mutación	107
Figura 4.42. Convergencia del AG para NBR-D57, Mooney-Rivlin	109
Figura 4.43. Convergencia del AG para T-Amarilla, Mooney-Rivlin.....	110
Figura 5.1. Representación esquemática del ensayo de abombamiento	119
Figura 5.2. Medidas propuestas para los utillajes de amarre	120
Figura 5.3. Diferentes tipos de ensayo equibiaxial.....	120
Figura 5.4. Banco de ensayos de abombamiento.....	121
Figura 5.5. Diseño y fabricación de utillaje de amarre.....	121
Figura 5.6. Representación esquemática del montaje para banco de ensayo	123
Figura 5.7. Probetas troqueladas y vista seccionada del utillaje de amarre.....	123
Figura 5.8. Curvas ajustadas para el material de membrana - Compresión.....	125
Figura 5.9. Curvas ajustadas para el material de membrana - Tracción.....	125
Figura 5.10. Curvas ajustadas para el material de membrana - Comp. Vol.	126
Figura 5.11. Curvas ajustadas para el material de membrana - Cizalladura.....	126
Figura 5.12. Curvas ajustadas para el material de membrana - Tensión Plana	127
Figura 5.13. Curva presión-desplazamiento obtenida en ensayo de abombamiento	128
Figura 5.14. Condiciones de contorno y cargas aplicadas.....	129
Figura 5.15. Disposición de mallas definidas junto con evolución de tamaño.....	131
Figura 5.16. Evolución de distribución de tensiones, modelos de malla radial Shell.....	131
Figura 5.17. Tensión en punto de máximo desplazamiento en modelos tipo Shell.....	132
Figura 5.18. Tensiones existentes en el punto de máximo desplazamiento	132
Figura 5.19. Distribución de tensiones sobre modelos de 4mm	133
Figura 5.20. Modelo MEF planteado para ensayo de abombamiento	134
Figura 5.21. Distribución de tensiones en modelos MEF calculados.....	135
Figura 5.22. Curvas presión - desplazamiento para todos los modelos calculados	136
Figura 5.23. Curvas presión - desplazamiento modelos Ogden vs ensayo real.....	138
Figura 6.1. Máquina de conformado de traseras.....	140
Figura 6.2. Posiciones de la camisa de conformado.....	141
Figura 6.3. Etapas del proceso de conformado.....	141

Figura 6.4. Detalle de membrana en máquina de conformado y banco de ensayos	142
Figura 6.5. Comportamiento de ensayo de abombamiento para probeta goma-cuero.....	143
Figura 6.6. Modelo MEF para ensayo de abombamiento, membrana de composite.....	143
Figura 6.7. Comportamiento de ensayo de abombamiento y respuesta modelo MEF	144
Figura 6.8. Reconstrucción de horma	145
Figura 6.9. Proceso de obtención de geometría interna.....	146
Figura 6.10. Digitalizado de modelo de silicona con escáner de luz estructurada	146
Figura 6.11. Reconstrucción de membrana	147
Figura 6.12. Modelo planteado para membrana y horma.....	148
Figura 6.13. Distribución de deformaciones - Horma en zona central	149
Figura 6.14. Distribución de deformaciones - Horma en zona delantera	150
Figura 6.15. Distribución de deformaciones - Horma en zona trasera	150
Figura 6.16. Distribución de tensiones de Von Mises, (A) Horma en zona delantera, (B) Horma en zona central, (C) Horma en zona trasera.....	151
Figura 6.17. Zonas de rotura en membrana conformada.....	151
Figura 6.18. Circuito electrónico amplificador para acondicionamiento de señal	153
Figura 6.19. Diferentes puntos de colocación del sensor (A) Centro de membrana, (B) Radial en extremo, (C) Tangencial en extremo.....	154
Figura 6.20. Medidas sensores PVDF según posición	154
Figura 6.21. Acumulada de valores de tensión respecto al tiempo según posición.....	155
Figura 6.22. Deformación en función de la tensión acumulada según posición	155
Figura 6.23. Instrumentación de membrana, montaje final sobre máquina.....	156
Figura 6.24. Medidas sensores PVDF en posiciones laterales	157
Figura 6.25. Medidas sensor PVDF en posición central	157
Figura 6.26. Acumulada de valores de tensión respecto al tiempo según posición.....	158
Figura 7.1. Espuma fenólica, moldes de escayola y plantillas	163
Figura 7.2. Imagen reconstruida mediante segmentación automática	165
Figura 7.3. Capas de tejido del modelo MEF. (A) Esqueleto + fascia. (B) Esqueleto + músculo / ligamentos. (C) Esqueleto + tejido blando + suelo	166
Figura 7.4. Condiciones de contorno para el modelo MEF propuesto (A) modelo completo apoyado en superficie rígida. (B) Aplicación de las fuerzas sobre el modelo MEF.....	166
Figura 7.5. (A) Modelo MEF de pie muscular y complejo de tobillo, que incorpora tejido blando interno, estructuras esqueléticas, ligamentos, fascia plantar y unidades tendinosas musculares. (B) Cambios en la distribución de la presión plantar del antepié en respuesta a la reducción de la fuerza muscular del gastrocnemio.....	167
Figura 7.6. Proceso de construcción del modelo MEF con elementos hexaédricos: (A) imagen 2D (TAC médico de partida (B) modelo MEF 3D obtenido. (C) Presión plantar obtenida a partir del modelo MEF propuesto y validación experimental	168
Figura 7.7. Escalas de dureza Shore.....	170
Figura 7.8. Juego de probetas impresas.....	171
Figura 7.9. Curva fuerza-desplazamiento a compresión para ajuste N°1- 60A	173
Figura 7.10. Curva fuerza-desplazamiento a compresión según ajuste N°2 - 60A.....	175
Figura 7.11. Curva fuerza-desplazamiento a compresión según ajuste N°3 - 60A.....	176
Figura 7.12. Curva fuerza-desplazamiento a compresión según ajuste a compresión - 60A	179
Figura 7.13. Vista seccionada de patrones de relleno estudiados.....	180
Figura 7.14. Detalle de probetas ensayadas seccionadas 20% relleno	180
Figura 7.15. Curva fuerza-desplazamiento a compresión según patrón de relleno al 20%.....	181
Figura 7.16. Curva fuerza-desplazamiento a compresión según patrón de relleno gasto cte.	183
Figura 7.17. Paredes exteriores en probetas “zigzag” (Izda.) y “cruz” (Dcha.)	183
Figura 7.18. Evolución de módulo compresión según patrón y espesor de paredes	185
Figura 7.19. Curva fuerza-desplazamiento según el tipo de patrón para el material 60A.....	185

Figura 7.20. Curva fuerza-desplazamiento según el tipo de patrón para el material 70A.....	186
Figura 7.21. Curva fuerza-desplazamiento según el tipo de patrón para el material 82A.....	186
Figura 7.22. Curva fuerza-desplazamiento para el patrón rejilla según material.....	187
Figura 7.23. Mapa de presiones obtenido mediante plataforma baropodométrica.....	190
Figura 7.24. Ajuste de la curva fuerza-desplazamiento del ensayo de compresión para patrón de líneas – 60A.....	190
Figura 7.25. Modelo MEF para probeta de compresión impresa.....	192
Figura 7.26. Definición de pares de contacto en estructura interna.....	192
Figura 7.27. Curva fuerza-desplazamiento para compresión 60A al 100%, resultados ensayo, AG y MEF.....	193
Figura 7.28. Curva fuerza-desplazamiento para compresión 60A y patrón de rejilla al 24%, resultados ensayo, AG y MEF sólido.....	194
Figura 7.29. Curva fuerza-desplazamiento para compresión 60A y patrón de rejilla al 24%, resultados ensayo, AG y MEF patrón.....	195
Figura 7.30. Curva fuerza-desplazamiento de compresión 60A y patrón de líneas al 24%, resultados ensayo, AG y MEF patrón.....	196
Figura 7.31. Distribución de tensiones de Von Mises sobre modelo deformado.....	197
Figura 7.32. Deformaciones producidas en los cuatro modelos estudiados.....	197
Figura 7.33. Compresión 60A líneas y rejilla al 24%, probeta 6mm altura.....	198
Figura 7.34. Modelo MEF de pie completo, sin plantilla (Izda.) y con plantilla (Dcha.).....	199
Figura 7.35. Distribución de huesos en el modelo MEF.....	200
Figura 7.36. Huesos sin cartílagos (Izda.) y tras generación de los mismos (Dcha.).....	201
Figura 7.37. Ligamentos incluidos en el modelo MEF para la parte delantera del pie.....	202
Figura 7.38. Generación de geometría de plantilla personalizada.....	203
Figura 7.39. Distribución de fuerzas en contacto (A) Superficie rígida, (B) Plantilla 60A, (C) Plantilla 70A y (D) Plantilla 82A.....	204
Figura 7.40. Áreas de contacto (A) Superficie rígida, (B) Plantilla 60A, (C) Plantilla 70A y (D) Plantilla 82A.....	205
Figura 7.41. Distribución de tensiones de Von Mises (A) Superficie rígida, (B) Plantilla 60A, (C) Plantilla 70A y (D) Plantilla 82A.....	206
Figura 7.42. Distribución de tensiones de Von Mises sobre huesos (A) Superficie rígida, (B) Plantilla 60A.....	207
Figura 7.43. Diseños de plantilla con dos durezas (A) Plantilla 1, (B) Plantilla 2.....	208
Figura 7.44. Distribución de fuerzas en contacto (A) Plantilla 1, (B) Plantilla 2.....	209
Figura 7.45. Áreas de contacto (A) Plantilla 1, (B) Plantilla 2.....	210
Figura 7.46. Distribución de tensiones de Von Mises (A) Plantilla 1, (B) Plantilla 2.....	210
Figura 8.1. Representación esquemática del ensayo de deslizamiento.....	214
Figura 8.2. Esquema básico de pie articulado propuesto.....	215
Figura 8.3. Vista en planta de las zonas de aplicación de presión.....	215
Figura 8.4. Comportamiento de deslizamiento típico.....	216
Figura 8.5. Probetas y montaje para ejecución de ensayos de deslizamiento.....	217
Figura 8.6. Deslizamiento inversamente proporcional a la carga.....	218
Figura 8.7. Deslizamiento constante e inversamente proporcional a la carga.....	218
Figura 8.8. Deslizamiento constante frente a la carga.....	219
Figura 8.9. Coeficiente de rozamiento frente a dureza para carga de 500N.....	219
Figura 8.10. Modelo de fricción de Coulomb lineal frente a comportamiento real.....	220
Figura 8.11. Aproximaciones del modelo de Coulomb.....	221
Figura 8.12. Aproximación mediante diferentes valores de RVCNST.....	221
Figura 8.13. Modelo Stick-Slip.....	222
Figura 8.14. Modelo Bilineal.....	223
Figura 8.15. Modelo MEF para ensayo de deslizamiento sobre probeta.....	225

Figura 8.16. Condiciones de contorno para modelo de probeta	225
Figura 8.17. Resultado de modelos de fricción TET (Izda.) y HEX (Dcha.) de 1 mm	226
Figura 8.18. Diferencias de tensión según tamaño de malla	226
Figura 8.19. Formulación Coulomb Arcotangente, diferentes tamaños de elemento.....	226
Figura 8.20. Formulación Shear Arcotangente, diferentes tamaños de elemento	227
Figura 8.21. Análisis de sensibilidad de malla, formulación Coulomb Arcotangente	227
Figura 8.22. Suela elegida para modelo completo.....	229
Figura 8.23. Geometría final de suela en 3D.....	230
Figura 8.24. Detalle de materiales existentes en el modelo.....	230
Figura 8.25. Modelo MEF de deslizamiento en suela completa.....	231
Figura 8.26. Resultados modelo MEF para ensayo de deslizamiento sobre suela talla 41.....	232
Figura 8.27. Evolución de zonas de contacto, (A) $t=0,5$ s, (B) $t=0,58$ s, (C) $t=1,5$ s	233
Figura 8.28. Tensión normal en el contacto a un tiempo de 0,58 s	233
Figura 8.29. Evolución de desplazamientos en eje X. (A) $t=0,5$ s, (B) $t=0,58$ s	234
Figura 8.30. Ensayo real sobre suela estudiada	235
Figura 8.31. Resultados ensayo real de deslizamiento sobre suela talla 41.....	236
Figura 8.32. Resultados MEF y ensayo real de deslizamiento sobre suela talla 41	236

Índice de tablas

Tabla 3.1. Medidas según tipo de probeta [mm]	42
Tabla 4.1. Nomenclatura y tipos de elastómeros estudiados	60
Tabla 4.2. Tiempos de permanencia en molde según espesor del material	62
Tabla 4.3. Resistencia a la tracción en rotura [MPa]	65
Tabla 4.4. Alargamiento en rotura [%] para ensayo de tracción.....	65
Tabla 4.5. Fuerza para extensión de 40 mm, ensayo de Tensión Plana.....	66
Tabla 4.6. Módulo de compresión al 10 y al 20% [MPa]	67
Tabla 4.7. Módulo de compresibilidad volumétrica [MPa]	68
Tabla 4.8. Esfuerzo y módulo de elasticidad en cizalla [MPa].....	69
Tabla 4.9. Intervalos de desplazamiento para ajuste de curvas según ensayo	70
Tabla 4.10. Restricciones Mooney Rivlin [46].....	76
Tabla 4.11. Constantes de Mooney-Rivlin utilizadas en análisis de sensibilidad de malla [52] ..	87
Tabla 4.12. Fuerza según tipo y tamaño de elemento, ensayo de compresión	88
Tabla 4.13. Fuerza según tipo y tamaño de elemento, ensayo de cizalladura	89
Tabla 4.14. Fuerza según tipo y tamaño de elemento, ensayo de tracción	90
Tabla 4.15. Rangos de valores definidos para cada función de energía	91
Tabla 4.16. Fragmento de la BD generada para ensayo de cizalladura, (Mooney-Rivlin Izda. y Arruda-Boyce Dcha.).....	94
Tabla 4.17. Valores límite de fuerza para acotación de BD	94
Tabla 4.18. Errores de entrenamiento y testeo de polinomios para material Ejército, Mooney-Rivlin	96
Tabla 4.19. Valores óptimos para modelo de Mooney-Rivlin mediante RSM.....	97
Tabla 4.20. Errores de entrenamiento y testeo de polinomios para material Ejército, Arruda-Boyce	98
Tabla 4.21. Valores óptimos para modelo de Arruda-Boyce mediante RSM.....	98
Tabla 4.22. Errores de entrenamiento y testeo de polinomios para material Ejército, Gent.....	99
Tabla 4.23. Valores óptimos para modelo de Gent mediante RSM.....	99
Tabla 4.24. Errores de entrenamiento y testeo de polinomios para material Ejército, Ogden....	100

Tabla 4.25. Valores óptimos para modelo de Ogden mediante RSM.....	100
Tabla 4.26. Modelos de comportamiento óptimos por elastómero mediante RSM.....	101
Tabla 4.27. Resultados obtenidos en el entrenamiento de modelos ANN.....	102
Tabla 4.28. Número de generaciones y tiempos de cálculo según elastómero y función de energía	109
Tabla 4.29. Valores óptimos para modelo de Mooney-Rivlin mediante ANN-AG.....	110
Tabla 4.30. Valores óptimos para modelo de Arruda-Boyce mediante ANN-AG	111
Tabla 4.31. Valores óptimos para modelo de Gent mediante ANN-AG	111
Tabla 4.32. Valores óptimos para modelo de Ogden mediante ANN-AG	112
Tabla 4.33. Modelos de comportamiento óptimos por elastómero mediante ANN-AG	112
Tabla 4.34. Comparativa óptimos Mooney-Rivlin RSM y ANN-AG	113
Tabla 4.35. Comparativa óptimos Arruda-Boyce RSM y ANN-AG.....	113
Tabla 4.36. Comparativa óptimos Gent RSM y ANN-AG.....	114
Tabla 4.37. Comparativa óptimos Ogden RSM y ANN-AG	114
Tabla 4.38. Comparativa óptimos global RSM y ANN-AG.....	115
Tabla 5.1. Características de los sensores utilizados	122
Tabla 5.2. Constantes de material para el elastómero NBR utilizado.....	124
Tabla 5.3. Tensiones pto. máx. desplazamiento según modelo y nº de elementos.....	132
Tabla 5.4. Tensiones en punto de máximo desplazamiento según modelo MEF	135
Tabla 5.5. Comparativa tensiones MEF vs tensiones teóricas MEF.....	136
Tabla 5.6. Comparativa tensiones MEF vs tensiones ensayo real	137
Tabla 5.7. Comparativa tensiones teóricas MEF vs tensiones ensayo real.....	137
Tabla 5.8. Errores MAE y RMSE entre respuestas MEF y ensayo real	137
Tabla 6.1. Constantes de material NBR utilizado en la membrana - Ogden	142
Tabla 6.2. Valores de deformación máxima según punto, predicción y MEF	158
Tabla 6.3. Valores de deformación mínima según punto, predicción y MEF	158
Tabla 7.1. Dimensiones utilizadas para impresión de probetas	171
Tabla 7.2. Intervalos de desplazamiento para ajuste de curvas en mm	172
Tabla 7.3. Parámetros de comportamiento para ajuste N°1	173
Tabla 7.4. Errores de ajuste N°1 por ensayo para material 70A	174
Tabla 7.5. Parámetros de comportamiento según ajuste N°2.....	174
Tabla 7.6. Parámetros de comportamiento según ajuste N°3.....	176
Tabla 7.7. Comparativa de errores de ajuste N°2 y 3 para material 60A.....	177
Tabla 7.8. Parámetros de comportamiento según ajuste N°4.....	177
Tabla 7.9. Parámetros de comportamiento según ajuste de curva fuerza-desplazamiento a compresión.....	178
Tabla 7.10. Datos de impresión y módulo de compresión según el patrón de relleno seleccionado	181
Tabla 7.11. Datos de impresión y módulo de compresión, longitud filamento cte.	182
Tabla 7.12. Porcentajes de relleno y módulo de compresión según espesor de pared.....	184
Tabla 7.13. Parámetros de comportamiento para rango completo, Arruda-Boyce.....	188
Tabla 7.14. Parámetros característicos del paciente estudiado	189
Tabla 7.15. Datos obtenidos mediante plataforma baropodométrica.....	189
Tabla 7.16. Parámetros de comportamiento para rango ajustado, Arruda-Boyce	191
Tabla 7.17. Errores de ajuste y validación MEF para material 60A 100%.....	193
Tabla 7.18. Errores ajuste y validación MEF para material 60A 24% como sólido.....	194
Tabla 7.19. Errores validación MEF para material 60A rejilla según ajuste	195
Tabla 7.20. Errores validación MEF para material 60A líneas según ajuste	196
Tabla 7.21. Propiedades de materiales utilizadas en la definición del modelo MEF.....	202

Tabla 7.22. Valores de presión plantar, fuerza máxima y tensión según superficie	206
Tabla 7.23. Valores de tensión máxima en cada hueso según superficie, [MPa]	208
Tabla 7.24. Valores de presión plantar, fuerza máxima y tensión según superficie	211
Tabla 7.25. Valores de tensión máxima en cada hueso según superficie, [MPa]	211
Tabla 8.1. Dimensiones de apoyos y brazo para pie articulado	215
Tabla 8.2. Requisitos mínimos de rozamiento	216
Tabla 8.3. Valores de dureza Shore y coeficientes de rozamiento obtenidos	218
Tabla 8.4. Valores de tensión [MPa] y rozamiento para cada material estudiado	228
Tabla 8.5. Valores de rozamiento en suela estudiada	235
Tabla 8.6. Valores de rozamiento en intervalo de cálculo para MEF y ensayo real	236

Capítulo 1

Introducción

1.1 Motivación

Los problemas mecánicos que incluyen materiales con comportamientos no lineales pueden encontrarse fácilmente en nuestro alrededor, ejemplos de ello son el funcionamiento de la suela de un zapato durante la marcha o el comportamiento de las ruedas de un automóvil. Resulta posible incluso encontrar estos elementos en nuestro interior, como es el caso de los ligamentos de nuestro cuerpo. Enfrentarse a este tipo de problemas desde un punto de vista teórico no siempre es sencillo, puesto que entran en juego muchos condicionantes, que serían inabordables desde el punto de vista analítico. Es aquí donde el Método de los Elementos Finitos (MEF) entra en juego, como un modo de resolver problemas complejos, que pueden estar compuestos por multitud de no linealidades, desde las propiedades de los materiales al tipo de contacto entre los componentes, sus condiciones de deslizamiento y trabajos en grandes deformaciones.

Aun haciendo uso del MEF, las soluciones encontradas carecerán de valor si el problema no se encuentra rigurosamente definido. Esta correcta definición incluye un amplio conocimiento de las condiciones de contorno impuestas, siendo fundamental la definición de cada una de las interacciones existentes entre componentes y, sobre todo, la definición de unas propiedades de material que los haga comportarse como sus homólogos en el mundo real.

Por todo esto, los materiales deben caracterizarse correctamente y posteriormente validar su comportamiento mediante simulaciones simples previa inclusión en un modelo completo. Resulta innegable que la caracterización de ciertos materiales, es muy sencilla, incluso existe la posibilidad de extraer la información de la bibliografía existente para los casos más comunes. Sin embargo, no

ocurre lo mismo con materiales poco conocidos, o con comportamientos no lineales, como es el caso de los elastómeros.

Estos materiales son capaces de soportar estados de grandes deformaciones sin llegar a su zona de rotura, y su comportamiento a lo largo de esta deformación presenta claras no-linealidades, resultando muy complejo establecer los parámetros que definen su comportamiento.

A lo largo de los años, se han desarrollado métodos de caracterización basados en las funciones de energía de deformación presentes en la formulación elástica en grandes deformaciones. No obstante, estos métodos no son accesibles a la mayoría de investigadores, debido a que para su ejecución precisan de equipamiento específico, generalmente con un gran coste económico asociado. Por estos motivos, en esta tesis se presenta una metodología de caracterización basada en la combinación del MEF con técnicas de modelizado y optimización, como una alternativa para la obtención de parámetros y, en general, para la optimización de problemas no lineales.

1.2 Objetivos

El objetivo principal con esta tesis es el planteamiento de un método de caracterización de materiales elastómeros alternativo al tradicional. Para ello se definirá una metodología basada en la combinación entre MEF y técnicas avanzadas de análisis de datos como el Método de la Superficie de la Respuesta Múltiple (RSM, *Response Surface Methodology*) y *Machine Learning* (ML).

La metodología propuesta será validada y entonces aplicada a la resolución de tres casos prácticos en la industria del calzado.

En el primero de ellos, se tratará de resolver un problema con membranas de goma utilizadas para el conformado del calzado. En el segundo se aplicará la metodología a la caracterización de materiales impresos y su uso en la simulación de plantillas personalizadas obtenidas mediante fabricación aditiva, y, por último, se utilizarán las propiedades del material para la simulación de un problema de deslizamiento de suelas.

1.3 Contribuciones de esta Tesis

Se recogen en este punto las publicaciones realizadas gracias al trabajo desarrollado en la elaboración de la presente tesis. Se han enumerado en cuanto a su tipología, según sean artículos con factor de impacto o presentaciones a congresos.

1.3.1 Artículos con factor de impacto JCR

Las siguientes publicaciones se encuentran indexadas en bases de datos internacionales (JCR, *Journal Citation Reports* de Thomsom-Reuters) y con alto factor de impacto.

Artículo 1. “Bulge Test Application in the Characterization Process of Elastomer Materials Membranes”

Autores: Saúl Íñiguez-Macedo; Alfonso Pascual-Martínez; Jesús Miguel Laliena-Martínez; Ruben Lostado-Lorza; Fátima Somovilla-Gómez; Marina Corral-Bobadilla (2023).

Revista: DYNA, 98(1)

Indicadores de calidad:

- Factor de Impacto JCR (Journal Citation Reports-2021): 2,07
- Factor de Impacto JCR en los últimos 5 años: 2,069
- Clasificación “Engineering, multidisciplinary”: 51/92 -Q3

Contribuciones en este artículo: La contribución en este trabajo consistió en la ejecución de ensayos de caracterización de elastómeros, aplicación de la metodología de ajuste propuesta en la presente tesis y simulación MEF del ensayo de abombamiento.

Artículo 2. “Comparative Analysis of Healthy and Cam-Type Femoroacetabular Impingement (FAI) Human Hip Joints Using the Finite Element Method”

Autores: Rubén Lostado Lorza; Fátima Somovilla Gómez; Marina Corral Bobadilla; Saúl Íñiguez Macedo; Asier Rodríguez San Miguel; Enrique Fernández Martínez; Manuel Rubio Sampedro; Álvaro Pérez Sala; Rafael Peláez Cristóbal; Ignacio M. Larráyoiz (2021).

Revista: Applied Sciences

Indicadores de calidad:

- Factor de Impacto JCR (Journal Citation Reports-2021): 2,838
- Factor de Impacto JCR en los últimos 5 años: 2,921
- Clasificación “Engineering, multidisciplinary”: 39/92-Q2

Contribuciones en este artículo: En este caso se contribuyó en la elaboración de los modelos de elementos finitos, así como en el tratamiento y análisis de los resultados.

Artículo 3. “Finite Element Model Updating Combined with Multi-Response Optimization for Hyper-Elastic Materials Characterization”

Autores: Saúl Íñiguez-Macedo; Ruben Lostado-Lorza; Rubén Escribano-García; María Ángeles Martínez-Calvo (2019).

Revista: Materials, 12(7)

Indicadores de calidad:

- Factor de Impacto JCR (Journal Citation Reports-2019): 3,057
- Factor de Impacto JCR en los últimos 5 años: 3,424
- Clasificación “Materials science, multidisciplinary”: 132/314-Q2

Contribuciones en este artículo: En este artículo se ha desarrollado parte de la metodología propuesta en esta tesis, contribuyendo en la definición y ejecución de ensayos experimentales, preparación y simulación de elementos finitos, así como aplicación de las técnicas de optimización.

1.3.2 Artículos en revistas no indexadas

Artículo 4. “The process of designing a rotating platform artificial knee prosthesis with posterior stabilizers by finite element analysis”

Autores: Saúl Íñiguez Macedo; Fátima Somovilla Gómez; Rubén Lostado Lorza; Marina Corral Bobadilla; María Ángeles Martínez Calvo; Félix Sanz Adán (2017).

Revista: International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)

Contribuciones en este artículo: El aporte en este trabajo consistió en el montaje del modelo MEF tanto sano como con prótesis, búsqueda de propiedades mecánicas adecuadas a cada tipo de material y análisis de resultados.

1.3.3 Congresos nacionales e internacionales

Trabajos relacionados con esta tesis se han presentado en los siguientes **congresos internacionales**.

Título del Trabajo: “Polyvinylidene fluoride film-based sensors for fault detection in leather and rubber membranes used in footwear manufacturing”.

Nombre del congreso: 3rd International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME 2023)

Ciudad de celebración: Tenerife, Islas Canarias, España.

Fecha de celebración: 19/07/2023

Fecha de finalización: 21/07/2023

Entidad organizadora: Universidad de La Laguna.

Autores: Eduardo Hernando, Irene Pérez Alfaro, Daniel Gil Hernández, Jesús López de Ipiña, Alfonso Pascual Martínez, Saúl Iñiguez Macedo, Antonio Sáenz Martínez Losa

DOI:

Título del Trabajo: “Using the Finite Element Method for design an intervertebral disc prosthesis for lumbar vertebrae”.

Nombre del congreso: 31 Congreso Internacional INGEGRAF.

Ciudad de celebración: Málaga, Andalucía, España.

Fecha de celebración: 29/06/2022

Fecha de finalización: 01/07/2022

Entidad organizadora: INGEGRAF Asociación Española de Ingeniería Gráfica.

Autores: Fátima Somovilla Gómez; Rubén Lostado Lorza; Marina Corral Bobadilla; Saúl Iñiguez Macedo; Alfonso Pascual Martínez; Jesús Miguel Laliena Martínez.

DOI: 10.1007/978-3-031-20325-1_44

Título del Trabajo: “Finite Element Model Proposed for Determine the Rotational Equilibrium Around of the Subtalar Joint Axis (SJA)”.

Nombre del congreso: Second International Conference on Design Tools and Methods in Industrial Engineering, ADM 2021.

Ciudad de celebración: Roma, Italia.

Fecha de celebración: 09/09/2021

Fecha de finalización: 10/09/2021

Entidad organizadora: Italian Association of Design Methods and Tools for Industrial Engineering.

Autores: Ruben Lostado Lorza; Fátima Somovilla Gómez; Saúl Iñiguez Macedo; Marina Corral Bobadilla; María Ángeles Martínez Calvo; Álvaro Pérez Sala; Ignacio M. Larráyoiz.

DOI: 10.1007/978-3-030-91234-5_65

Título del Trabajo: “Adjustment of Friction Models in Elastomers Using the Finite Element Method and Model Updating Techniques”.

Nombre del congreso: XXX International Congress INGEGRAF.

Ciudad de celebración: Valencia, España.

Fecha de celebración: 24/06/2021

Fecha de finalización: 25/07/2021

Entidad organizadora: INGEGRAF Asociación Española de Ingeniería Gráfica.

Autores: Saúl Íñiguez Macedo; Asier Rodríguez San Miguel; Enrique Fernández Martínez; Manuel Rubio Sampedro; Álvaro Pérez Sala; Ignacio M. Larráyoz; Rafael Peláez Cristóbal; Fátima Somovilla Gómez; María Ángeles Martínez Calvo; Marina Corral Bobadilla; Ruben Lostado Lorza.

DOI: 10.1007/978-3-030-92426-3_15

Título del Trabajo: “Semiautomatic Modeling of Bone Tissue from Medical Image for Finite Element Method Based Biomechanical Studies”.

Nombre del congreso: XXX International Congress INGEGRAF.

Ciudad de celebración: Valencia, España.

Fecha de celebración: 24/06/2021

Fecha de finalización: 25/07/2021

Entidad organizadora: INGEGRAF Asociación Española de Ingeniería Gráfica.

Autores: Álvaro Pérez Sala; Ignacio M. Larráyoz; Rafael Peláez Cristóbal; Fátima Somovilla Gómez; María Ángeles Martínez Calvo; Marina Corral Bobadilla; Saúl Íñiguez Macedo; Asier Rodríguez San Miguel; Enrique Fernández Martínez; Manuel Rubio Sampedro; Ruben Lostado Lorza.

DOI: 10.1007/978-3-030-92426-3_23

Título del Trabajo: “Estudio mediante el MEF y validación experimental de la displasia de cadera en pelvis caninas”.

Nombre del congreso: XXIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica.

Ciudad de celebración: Jaén, Andalucía, España.

Fecha de celebración: 20/10/2021

Fecha de finalización: 22/10/2021

Entidad organizadora: Universidad de Jaén.

Autores: Fátima Somovilla Gómez; Marina Corral Bobadilla; Saúl Íñiguez Macedo; María Ángeles Martínez Calvo; Rubén Lostado Lorza; Carmen Díaz-Bertrana Sánchez.

ISSN: 0212-5072

Título del Trabajo: “Estudio mediante el MEF y validación experimental de placas de fijación para fracturas de tibias caninas”.

Nombre del congreso: XXIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica.

Ciudad de celebración: Jaén, Andalucía, España.

Fecha de celebración: 20/10/2021

Fecha de finalización: 22/10/2021

Entidad organizadora: Universidad de Jaén.

Autores: Fátima Somovilla Gómez; Saúl Íñiguez Macedo; Marina Corral Bobadilla; María Ángeles Martínez Calvo; Carmen Díaz-Bertrana Sánchez; Rubén Lostado Lorza.

ISSN: 0212-5072

Título del Trabajo: “The Importance of 3D Scanned Mesh Processing in FEM Simulation Results”.

Nombre del congreso: XXIX International Congress INGEGRAF.

Ciudad de celebración: Logroño, La Rioja, España.

Fecha de celebración: 20/06/2019

Fecha de finalización: 21/06/2019

Entidad organizadora: INGEGRAF Asociación Española de Ingeniería Gráfica.

Autores: Saúl Íñiguez-Macedo; Eduardo Jiménez-Ruiz; Fátima Somovilla-Gómez; José Manuel Valle-Melón; Marina Corral-Bobadilla; María Ángeles Martínez-Calvo; Rubén Lostado-Lorza.
DOI: 10.1007/978-3-030-41200-5_16

Título del Trabajo: “3D-Printed Canine Tibia Model from Clinical Computed Tomography Data”.

Nombre del congreso: XXIX International Congress INGEGRAF.

Ciudad de celebración: Logroño, La Rioja, España.

Fecha de celebración: 20/06/2019

Fecha de finalización: 21/06/2019

Entidad organizadora: INGEGRAF Asociación Española de Ingeniería Gráfica.

Autores: Fátima Somovilla Gómez; Saúl Íñiguez Macedo; Eduardo Jiménez Ruiz; Laura Muro Fraguas; Gonzalo Gañán Catalina; Álvaro Leciñana Soldevilla; Marina Corral Bobadilla; Carmen Díaz-Bertrana Sánchez; Rubén Lostado Lorza.

DOI: 10.1007/978-3-030-41200-5_28

Título del Trabajo: “Fatigue Behavior Prediction by Finite-Element-Trained Data Mining Models”.

Nombre del congreso: 8th International Conference on Computer Science and Information Technology (CSIT).

Ciudad de celebración: Ammán, Jordania.

Fecha de celebración: 11/07/2018

Fecha de finalización: 12/07/2018

Entidad organizadora: Applied Sciences Private University.

Autores: Saúl Íñiguez-Macedo; Rubén Lostado-Lorza; Roberto Fernández-Martínez.

DOI: 10.1109/CSIT.2018.8486152

Título del Trabajo: “FEM study on vertebrae and ligaments human spine. Influence of the age, height and weight”.

Nombre del congreso: QUAESTI-Virtual Multidisciplinary Conference.

Ciudad de celebración: Žilina, Eslovaquia.

Fecha de celebración: 09/12/2017

Fecha de finalización: 16/12/2017

Entidad organizadora: The-Science.com; Publishing Society.

Autores: Fátima Somovilla Gómez; Rubén Lostado Lorza; Marina Corral Bobadilla; Roberto Fernández Martínez; Saúl Íñiguez Macedo; Ignacio Eguía Cambero.

DOI: 10.18638/quaesti.2017.5.1.333

Título del Trabajo: “Finite Element Method application to solve biomechanical problems. Simulating the non-linear behavior of biomechanical problems”.

Nombre del congreso: QUAESTI-Virtual Multidisciplinary Conference.

Ciudad de celebración: Žilina, Eslovaquia.

Fecha de celebración: 09/12/2017

Fecha de finalización: 16/12/2017

Entidad organizadora: The-Science.com; Publishing Society.

Autores: Rubén Lostado Lorza; Fátima Somovilla Gómez; Marina Corral Bobadilla; Roberto Fernández Martínez; Saúl Íñiguez Macedo; Ignacio Eguía Cambero.

DOI: 10.18638/quaesti.2017.5.1.334

Título del Trabajo: “Shaft fatigue optimization through finite element method and classic fatigue theories. A comparative between theoretical and computational methods”.

Nombre del congreso: QUAESTI-Virtual Multidisciplinary Conference.

Ciudad de celebración: Žilina, Eslovaquia.

Fecha de celebración: 09/12/2017

Fecha de finalización: 16/12/2017

Entidad organizadora: The-Science.com; Publishing Society.

Autores: Saúl Íñiguez-Macedo; Ignacio Eguía-Camero; Fátima Somovilla-Gómez; Rubén Lostado-Lorza; Marina Corral-Bobadilla; María Ángeles Martínez-Calvo.

DOI: 10.18638/quaesti.2017.5.1.332

1.4 Descripción del documento

Esta tesis se encuentra estructurada en nueve capítulos que en este punto son presentados de forma resumida. Tras la introducción inicial se da paso a la exposición de la metodología a seguir, así como a su desarrollo y validación práctica posterior. Una vez asentadas estas bases, los resultados obtenidos son aplicados en la resolución de tres problemas no lineales mediante MEF.

Capítulo 2. Estado del arte de la investigación

Sirva este capítulo como resumen de resultados producidos por otras investigaciones en el ámbito de estudio de esta tesis. Se realiza un análisis desde el punto de vista general en la aplicación del MEF junto con técnicas de optimización y más concretamente en el estudio de materiales elastómeros.

Capítulo 3. Metodología

El Capítulo 3 define los pasos a seguir para la aplicación de una nueva metodología de caracterización de elastómeros a partir de ensayos reales, el uso del MEF, métodos de predicción y técnicas de optimización como RSM o AG.

Capítulo 4. Caracterización de materiales elastómeros

Este capítulo se basa en la metodología definida y pone en práctica su aplicación. Se parte de una serie de materiales elastómeros que son ensayados obteniendo cinco curvas de comportamiento. Una vez ensayados, se procede a la creación de una base de datos formada por resultados provenientes del MEF y que es utilizada para el entrenamiento de modelos regresores y de ANN. Finalmente, los modelos se utilizan para optimizar los parámetros de diversas funciones de energía mediante RSM y AG.

Capítulo 5. Validación del método y propuesta de ensayos alternativos

Una vez caracterizados los elastómeros se considera necesaria su validación mediante un sexto ensayo no incluido en el set de ensayos iniciales (utilizados para su caracterización). De esta forma se define el ensayo de abombamiento como método a utilizar, creando un banco de ensayo y poniendo a prueba un nuevo elastómero en una configuración de membrana. El ensayo es validado teóricamente y mediante MEF.

Capítulo 6. Determinación de zonas de rotura en membrana de conformado de calzado

El conocimiento desarrollado en la simulación de materiales de tipo membrana, así como el método de caracterización de elastómeros desarrollado, es aplicado en este capítulo a la simulación de una membrana de conformado. El modelo MEF es comparado con el componente real, pudiendo conocer los puntos de mayor afección y tomando las medidas necesarias para alargar la vida del componente.

Capítulo 7. Caracterización de elastómeros impresos en 3D para su uso en la fabricación de órtesis personalizadas

La metodología de ajuste es aplicada en diferentes elastómeros impresos en 3D. No solamente se estudia el comportamiento del material compacto, sino que se incluye la posibilidad de caracterizar diferentes patrones de impresión para la futura simplificación de modelos MEF. Como aplicación práctica se plantea su uso en la fabricación de órtesis personalizadas mediante una metodología basada en la reproducción total del pie del paciente.

Capítulo 8. Determinación de coeficiente de rozamiento en suela de calzado de seguridad

El Capítulo 8 aborda un problema existente en el sector del calzado de seguridad, como es la superación del ensayo de deslizamiento según UNE-EN ISO 13287 en nuevos diseños de suela. Se plantea un método de simulación que basa su funcionamiento en una correcta caracterización de los elastómeros. Un modelo específico de suela es simulado y validado experimentalmente demostrando la posibilidad de uso de este método en lugar de fabricar costosos moldes de inyección en etapas iniciales del diseño.

Capítulo 9. Conclusiones y líneas futuras

Se exponen las conclusiones sobre la metodología propuesta, su aplicación a diferentes problemas y los resultados obtenidos. Se recogen además las diferentes líneas de investigación derivadas de esta tesis que se encuentran en ejecución en la actualidad o en un futuro próximo.

Capítulo 2

Estado del arte de la investigación

2.1 Método de los Elementos Finitos

El método de elementos finitos (MEF) comenzó su aplicación a partir de la década de 1950, a pesar de que su formulación había sido desarrollada con anterioridad. Esta formulación, basada en el en el proceso utilizado para el cálculo de celosías, no pudo ponerse en práctica hasta los años 50 ya que no se disponía de la capacidad de cómputo que tiempo después traerían los ordenadores. Mediante la aplicación del MEF es posible encontrar la solución de un problema complejo mediante su sustitución por un problema de mayor simplicidad. Para que esto sea posible, el problema original planteado en ecuaciones diferenciales (formulación fuerte) se sustituye por otro, donde resulta más sencillo encontrar la solución mediante métodos numéricos (formulación integral o débil), aunque de forma aproximada. [1]

El MEF se basa en la discretización del medio continuo en subregiones llamadas elementos, cuyas propiedades son conocidas. A partir de estos elementos, se calcula la matriz de rigidez del modelo, obteniendo en primer lugar, las incógnitas nodales (desplazamientos en los nodos) para finalmente determinar las deformaciones, y mediante la ley de Hooke (pequeñas deformaciones), las tensiones en los nodos. El uso del MEF produce un conjunto de resultados mucho más detallado que el que puede obtenerse mediante procedimientos experimentales, siendo generalmente más rápido y menos costoso. Las áreas de aplicación del MEF son muy diversas, siendo útil desde la resolución de problemas mecánicos, eléctricos y electromagnéticos, al estudio de estructuras, aeronáutica, conducción de calor, dinámica de fluidos, ingeniería nuclear, ingeniería biomédica, etc.

De un modo muy general, los problemas mecánicos estudiados se pueden clasificar como lineales o no lineales. Este comportamiento no lineal puede tener origen en causas de tipo geométrico, como pueden darse en una estructura que experimenta grandes deformaciones. Aparte de esto, otra causa común que favorece la aparición de no linealidades se encuentra en modelos complejos, que pueden presentar cambios durante su cálculo, provocando que elementos que inicialmente no se encontraban en contacto, sí que lo estén al final de la simulación.

Pero no solo la geometría influye en la no linealidad, también lo hace el material utilizado, contando con una gran influencia, sobre todo cuando es llevado a su región plástica o bien cuando cuenta con propiedades viscoelásticas o hiperelásticas. Por último, un fenómeno que también es causa de no linealidades es el nacimiento y muerte de elementos. Comúnmente el nacimiento de elementos se utiliza en problemas donde se necesita que la malla se vea refinada localmente, como ocurre en procesos térmicos tales como el estudio de soldaduras. Mientras que, por otro lado, la muerte de elementos se utiliza en aquellas simulaciones donde existen elementos que ya no son necesarios dentro del proceso de cálculo como por ejemplo el estudio de impacto de proyectiles, donde los fragmentos desprendidos dejan de tenerse en cuenta.

La presencia de no linealidades en un modelo provoca que no sea posible hacer uso del principio de superposición. Con una fuerte dependencia de la trayectoria seguida durante la deformación, resulta de vital importancia el orden en el que las cargas son aplicadas, ya que de ello puede depender el correcto desempeño del modelo.

Aplicaciones que generalmente presentan no linealidades son el estudio de conformado de metales, el análisis de choques e impactos, los problemas mecánicos con contactos, y por supuesto el análisis de materiales elastómeros.

2.2 Caracterización mecánica de elastómeros

Los materiales elastómeros presentan un comportamiento hiperelástico, lo cual implica que pueden asumir grandes deformaciones sin entrar en la región plástica. Estos materiales presentan no linealidades que complican en gran medida su caracterización. Este comportamiento provoca que la formulación utilizada para su cálculo deba modificarse, dejando a un lado la hipótesis de pequeñas deformaciones y adoptando una nueva formulación, en grandes deformaciones, donde las funciones elásticas son representadas en base a la energía de deformación.

Los modelos de comportamiento que definen el modo en que un elastómero es deformado, se basan en dar la mejor explicación posible a la función de energía de deformación. Multitud de autores han desarrollado modelos que tratan de explicar este fenómeno, habiendo sido adoptados algunos de ellos como principales, y estando disponibles hoy en día para su uso en la mayoría de los programas informáticos de simulación. Algunos de los modelos de comportamiento más utilizados como Mooney-Rivlin y Ogden datan de las décadas de 1940 y 1970 respectivamente, aunque existen desarrollos posteriores como Yeoh (1993) o Arruda-Boyce (2000). Estos modelos, abordados de forma más extensa en el Capítulo 4, se encuentran definidos por una serie de términos, siendo necesario en el proceso de ajuste la obtención de diversas constantes o parámetros constitutivos que dependen de cada material.

Para conseguir un buen comportamiento del elastómero (curvas fuerza-desplazamiento), ha de desarrollarse un conjunto de ensayos sobre el material. Cada uno de estos ensayos trata de recoger un estado tensional diferente, por lo que generalmente se cuenta con los ensayos de tracción, compresión, tensión plana, equibiaxial, compresión volumétrica y cizalladura, entre otros. Algunos autores, incluso han propuesto el uso de ensayos biaxiales y uniaxiales basados en métodos ópticos [2].

En cada caso debe decidirse cuales de estos ensayos son los más representativos, teniendo siempre en mente el modo en que el material se encontrará solicitado en su aplicación final, es decir, cuando forme parte del componente que será estudiado mediante modelos MEF.

Una vez obtenida la información que aportan los ensayos, las constantes que definen el modo en que el modelo MEF representa el comportamiento del material, se obtienen mediante el ajuste de curvas tensión-deformación [3], [4]. En cualquier caso, la obtención de curvas tensión-deformación no siempre resulta sencillo, por lo que la aplicación del método de ajuste se complica si no se dispone del equipamiento necesario.

Otros autores han propuesto la obtención de los parámetros del material mediante la simulación de componentes finales y el uso de la técnica *Model Updating* [5]. Sin embargo, debido al propio funcionamiento del método, esto solamente resulta válido para el estudio de un determinado componente, debiendo fabricarse y testarse adecuadamente. La actualización del modelo consiste en la variación iterativa de ciertos parámetros de entrada, en este caso las propiedades del material, verificando si la respuesta se comporta como el componente real. La gran desventaja es que el proceso de ajuste mediante *Model Updating* resulta lento ya que requiere varias iteraciones hasta obtener resultados aproximados.

Sin embargo, un procedimiento basado en la combinación de resultados procedentes de modelos MEF junto con algoritmos de predicción y técnicas avanzadas de optimización puede ayudar a solventar este problema, motivo por el que se desarrolla esta tesis.

2.3 Problemas de optimización basados en el método de los Elementos Finitos

Desde la aparición del MEF se ha contado con una herramienta muy versátil que ha permitido un avance significativo de muchas áreas de la ingeniería. La facilidad con la que puede darse solución a problemas complejos ha llevado a que sea utilizado, en ocasiones de forma iterativa, para obtener diseños lo más acertados posible.

Cada problema estudiado cuenta con un tipo de requisitos, en algunos casos se primará la funcionalidad, mientras que en otros la obtención de un producto con el menor coste de producción posible. Estas hipótesis pueden evaluarse a partir de los resultados que ofrecen los modelos MEF sin la necesidad de fabricar ningún prototipo, lo cual acelera enormemente los tiempos de diseño y consecuente de llegada a mercado. Sin embargo, incluso el MEF puede resultar lento a medida que los problemas estudiados aumentan su complejidad, tal es el caso de los problemas no lineales que implican la presencia de materiales elásticos. Es por esto por lo que algunos autores han combinado su uso junto con técnicas de predicción y optimización. De este modo, el MEF pasa a ser una fuente de información, que aporta resultados utilizados para el entrenamiento de modelos predictores.

El uso de modelos predictores, bien basados en regresión mediante modelos polinómicos o en técnicas de *Machine Learning* (ML), permiten la obtención de diferentes resultados de un modo casi instantáneo, eliminando la necesidad de volver a calcular los modelos basados en el MEF.

2.3.1 Predicción en base a modelos regresores y optimización mediante el método de respuesta múltiple

La combinación del MEF junto con el método de la superficie de respuesta múltiple (RSM, *Response Surface Methodology*) ha sido planteada por varios autores y aplicada a diferentes problemas lineales y no lineales en el ámbito de la ingeniería.

Ejemplos de ello son los estudios de Alaswad et al. [6] quienes desarrollaron un estudio para la optimización de los parámetros geométricos de componentes metálicos hidroconformados. Aplicado a otro problema, en este caso el proceso de diseño de rodamientos, Lostado et al. [7] enfocaron la metodología RSM hacia la optimización de los parámetros de funcionamiento de rodamientos de doble hilera de rodillos cónicos. La ventaja de contar con modelos de regresión capaces de obtener una serie de respuestas en función de ciertas entradas permitió disminuir los costes de simulación, permitiendo obtener parámetros óptimos para diferentes escenarios.

Sadeghifar et al. aplicaron esta metodología para conseguir determinar los parámetros de corte óptimos en el mecanizado de acero 300M [8]. Mientras que Corral-Bobadilla et al. lograron optimizar el proceso de fabricación de biodiesel a partir de aceite reciclado [9]. Estudios más recientes como el de Hernández et al. [10] han aplicado RSM para la optimización de transformadores, aumentando su eficiencia a la vez que se disminuye su coste de producción.

2.3.2 Predicción en base a machine learning y optimización mediante algoritmos genéticos

Además de modelos regresores, el ML se ha combinado con el MEF basando su entrenamiento en datos obtenidos mediante simulación de problemas complejos que no podrían ser medidos de cualquier otro modo. Escribano et al. [11] desarrollaron modelos de minería de datos para predecir variables de este tipo presentes el proceso de laminación por rodillos. En ocasiones estos modelos pueden lograr que resulte posible obtener diversas propiedades a nivel interno que no pueden determinarse de otro modo, debido a la imposibilidad física para su medición.

Otra aplicación de modelos de predicción alimentados por datos provenientes del MEF se enfocó a la determinación de las condiciones óptimas de funcionamiento de un rodamiento de doble hilera de rodillos cónicos [12].

Siguiendo este tipo de procedimientos, se han desarrollado estudios sobre la caracterización de materiales metálicos. Diversos autores han utilizado modelos de red neuronal (ANN, *Artificial Neural Network*) para la obtención de propiedades como el módulo elástico y el módulo de rotura a través de únicamente un ensayo de indentación. [13], [14].

Mankovits et al. [15] utilizaron el MEF para generar los datos necesarios con los que entrenar modelos de tipo regresión vector soporte (SVR, *Support Vector Regression*) y predecir el estado deformado de un componente de goma.

Otros trabajos como los de Kim & Hong [16] hicieron lo propio con el comportamiento de componentes destinados a la unión de tuberías mediante modelos de máquina vector soporte (SVM, *Support Vector Machine*).

Además de estos modelos, las redes neuronales también son ampliamente utilizadas. Zhao et al. [17] modelaron con ANN el comportamiento de metamateriales a base de acero que contaban con un comportamiento similar a un elastómero.

Los modelos predictores consiguen reducir el tiempo de cálculo del MEF, haciendo posible la obtención de resultados prácticamente de forma inmediata. Este hecho fue utilizado por Huri & Mankovits [18] para, mediante SVM, predecir el comportamiento de componentes de goma y lograr un diseño óptimo de forma iterativa.

En cuanto a la caracterización de elastómeros pueden encontrarse estudios donde se utilizan ANN en la predicción de parámetros de material. Hou et al. [19] entrenaron una red neuronal para la predicción de dos parámetros del modelo de Mooney Rivlin a partir de la respuesta de un ensayo sobre probetas de material. Por otro lado, otros investigadores [20] proponen algo similar, con la única variación del tipo de ensayo utilizado, que termina recayendo en el estudio de un componente final, en este caso un anillo de goma. Sin embargo, esta metodología, a pesar de que pueda resultar útil para el estudio de un único ensayo o componente cuenta con varias desventajas. La primera de ellas es que no resulta fácilmente generalizable si existen cambios en el componente bajo estudio, debiendo entrenar nuevos modelos de red neuronal. La segunda gran desventaja es la dificultad a la hora de añadir nuevas restricciones al problema, como puede ser la necesidad de ajuste a dos ensayos simultáneos. Esto haría necesario el entrenamiento de una nueva red neuronal adecuada a la nueva situación.

En cuanto a las técnicas de optimización, diversos autores plantean el uso de algoritmos genéticos (AG), que se utilizan en combinación con el MEF. Así, se recogen en los trabajos de Lostado et al. [21], [22], [23] donde el MEF fue utilizado para evaluar los diferentes individuos en una combinación que iteraba sobre modelos de soldadura de forma que sus parámetros fuesen ajustados obteniendo los valores óptimos. Otras aplicaciones como la optimización de rodamientos a partir de modelos clasificadores fueron también abordadas por Fernández et. al [24].

La predicción de valores mediante modelos de ML es una herramienta que ayuda a agilizar los cálculos, mientras que las técnicas de optimización consiguen determinar las mejores soluciones para diferentes tipos de problema. Por lo tanto, combinando ambas técnicas, puede lograrse una metodología de optimización que puede ser aplicada a diversos problemas de todo ámbito de la ciencia.

2.4 Conclusiones

La caracterización de elastómeros es un proceso complejo para el que resulta necesario un equipamiento costoso y en ocasiones de difícil acceso. Además, generalmente se necesita el apoyo de software comercial, donde se incluyen los módulos de ajuste de curvas mediante reducción de errores. Como ha podido comprobarse, el uso del MEF junto con métodos de predicción, bien basados en modelos regresores o en ML ha sido ampliamente aplicado a multitud de campos. Sin embargo, no se ha planteado el problema de caracterización de materiales desde esta perspectiva.

Debido a la dificultad para obtener los parámetros de un material hiperelástico mediante los métodos tradicionales, esta tesis propone una metodología de ajuste basada en el MEF, el RSM, ML, AG y técnicas de *Model Updating*. La metodología es desarrollada y aplicada a la caracterización de diferentes materiales de uso común en el sector del calzado. Una vez debidamente validada, se aplican sus resultados a la resolución de diferentes problemas del sector.

- Modelizado de la deformación de una membrana de conformado formada por láminas de goma y cuero.
- Caracterización de elastómeros impresos en 3D y aplicación a la obtención de órtesis personalizadas.
- Modelizado del comportamiento a deslizamiento de una suela según el ensayo normalizado UNE-EN ISO 13287.

Capítulo 9

Conclusiones y líneas futuras

9.1 Conclusiones

El proceso de ajuste de elastómeros lleva implícitas una serie de dificultades debidas principalmente a su comportamiento no lineal. Para conseguir determinar adecuadamente el modo en que estos materiales se comportan, es necesario utilizar una serie de ensayos que tratan de obtener su respuesta bajo diferentes esfuerzos puros. Durante la ejecución de los ensayos las curvas tensión-deformación deben ser registradas, para posteriormente ser tratadas mediante programas específicos para el ajuste de los parámetros de diferentes funciones de energía.

Como se expuso inicialmente, una de las situaciones más habituales es la de no contar con medios para recoger estas deformaciones (extensómetros de contacto de gran recorrido o video extensómetros), ya que es un equipamiento que tiene un alto coste económico. Tratando de solucionar este impedimento, esta tesis plantea una metodología de ajuste basada en el MEF y técnicas de optimización como RSM y AG. Con esta metodología, desarrollada por completo en el Capítulo 4, se consiguieron caracterizar diferentes materiales que posteriormente fueron utilizados en la resolución de problemas presentes en el sector del calzado.

Esta tesis da solución al problema de caracterización de elastómeros mediante un método de ajuste que una vez entrenado, solamente necesita como entradas las curvas de fuerza-desplazamiento de los materiales. Mediante esta metodología se entrenaron diferentes tipos de materiales de uso común en la fabricación de suelas, mediante diferentes funciones de energía y técnicas de optimización (RSM, AG), dando como resultado los parámetros óptimos en cada caso.

Como elemento validador, en el Capítulo 5 se desarrolló un ensayo adicional a los utilizados durante el proceso de entrenamiento, quedando totalmente verificada la validez de las técnicas utilizadas.

Tras la validación de los parámetros obtenidos en cada uno de los materiales, así como de la propia metodología, ésta se tomó como base para la resolución de tres problemas existentes en el sector del calzado. Los medios (materiales y profesionales) disponibles en las empresas dedicadas al sector del calzado, no pueden habitualmente hacer frente a situaciones de este calado, dado el carácter tradicional con el que, aun a día de hoy, cuenta esta industria.

El primer problema tratado (Capítulo 6) consistió en el estudio de las zonas de rotura de una membrana de conformado de calzado. Estas membranas se utilizan en procesos cíclicos de hinchado que se repiten para cada unidad fabricada, existiendo por lo tanto un componente de fatiga que finalmente las hace fallar. Poder contar con los medios para caracterizar los materiales de la membrana permitió su simulación mediante MEF, dando como resultado un modelo capaz de predecir las zonas de rotura al encontrarse situadas en los puntos de máxima deformación. Los modelos de este tipo permitirán por lo tanto el rediseño de los elementos en base a la reducción de los valores pico, alargando por lo tanto la vida de estos y otros componentes.

El segundo problema abordado (Capítulo 7) fue el de simulación de órtesis personalizadas obtenidas mediante elastómeros impresos en 3D. Para ello se definió una metodología basada, por un lado, en la caracterización de materiales impresos en 3D y por otro, en la obtención de modelos MEF a partir de TAC del pie los pacientes. De nuevo, este problema constituía un reto ya que los materiales impresos no cuentan habitualmente con una estructura maciza en su interior, existiendo multitud de patrones de relleno. Estos patrones fueron estudiados, determinando el valor máximo de desplazamiento hasta el que diferentes probetas podrían llegar sin que sus modelos de comportamiento defirieran de su comportamiento real. De nuevo, la metodología de ajuste permitió obtener parámetros optimizados para cada material y patrón de relleno, considerando siempre los componentes como si de materiales macizos se trataran. De este modo, pudieron definirse órtesis personalizadas sencillas, ya que no resultaba necesario la inclusión de las geometrías internas presentes en el material. Finalmente, se simuló un modelo anatómico de pie que incluía huesos, ligamentos y tejidos blandos, junto con la órtesis personalizada, obteniendo los resultados de presiones de pisada, tensiones en los huesos y áreas de contacto que pudieran ser de interés para un estudio podológico.

Por último, se abordó un problema muy importante en el sector del calzado de seguridad, el deslizamiento de las suelas de calzado, regulado por UNE-EN ISO 20345 (Capítulo 8). Esta norma fija que los diferentes calzados de seguridad deben cumplir unos valores mínimos de coeficiente de fricción frente a diferentes condiciones. El problema que encuentran los fabricantes es la necesidad de fabricar las suelas para poder ejecutar el ensayo. Esto supone un problema, ya que la fabricación de un nuevo diseño de suela implica el desarrollo de costosos moldes de vulcanizado o inyección, los cual, si el ensayo no llega a superarse, puede que queden inservibles.

Tratando de evitar la fabricación de las suelas, se utilizó el conocimiento desarrollado en la caracterización de materiales para la obtención de las propiedades de los componentes que formaban parte de un modelo de suela. Paralelamente, el coeficiente de rozamiento del material de la suela fue estudiado frente a diferentes condiciones de presión, hasta obtener una relación tensión de contacto-coeficiente de rozamiento. Toda esta información sirvió para alimentar un modelo MEF de suela completa, que consiguió predecir el comportamiento de deslizamiento con un 6,66% de error. Se consiguió por tanto el desarrollo de un método que permitirá un ahorro significativo, al mismo tiempo que reducirá los tiempos de diseño y por tanto de llegada a mercado de los nuevos productos.

En resumen, la caracterización de elastómeros ha sido un campo de difícil acceso debido a las complejidades que implica. Con esta tesis se ha dado un paso facilitando y simplificando el proceso, haciéndolo más accesible a sectores que no cuentan con la totalidad de medios necesarios. En cuanto al desarrollo de los problemas posteriores, puede verse cómo el contar con una metodología de caracterización simplificada, produce un gran avance en todos los sentidos. La gran cantidad de

componentes con comportamiento hiperelástico utilizada tanto en los productos como en las cadenas de producción pueden ser ahora estudiados, mejorando por tanto sus propiedades y contribuyendo al avance técnico y económico del sector.

9.2 Líneas futuras

La metodología aplicada en el Capítulo 4 a la caracterización de elastómeros permite su desarrollo en multitud de problemas de optimización. Tal y como pudo verse en el Capítulo 2, diversos autores han aplicado estas técnicas a diferentes problemas de la industria. El desarrollo de esta tesis deja por tanto abiertas varias líneas de investigación para el desempeño de trabajos futuros.

Por un lado, se encuentra la aplicación de las técnicas de optimización sobre problemas que se encuentran contruidos en base a la metodología desarrollada. Esto es, problemas donde se utilizan las propiedades de un elastómero obtenidas con una metodología de ajuste basada en MEF y ML (Capítulos 6 a 8).

En el caso del estudio de la membrana de conformado, las técnicas de optimización permitirían obtener un diseño optimizado que alargase su vida útil. Esto podría conseguirse mediante la parametrización de variables como el espesor de la membrana, las propiedades del material, la geometría de los componentes, etc. Posteriormente un AG o bien modelos de RSM serían los encargados de, mediante una función objetivo adecuada, obtener las soluciones óptimas.

En el caso de las órtesis personalizadas, podrían conseguirse imprimir componentes con menor volumen de material, maximizando la comodidad del usuario. Al igual que en el caso anterior, deberían seleccionarse aquellas variables a maximizar o minimizar, siendo la presión plantar o la tensión en un determinado hueso factores que se encontrarían recogidos por el estudio.

Por último, en el caso del diseño de suelas se podría mejorar su coeficiente de rozamiento, minimizando, al igual que en el caso anterior, el gasto en material. Una serie de simulaciones variando los patrones del diseño de suela de forma automatizada permitiría además acelerar en gran medida el proceso de diseño y conseguir productos con mejores prestaciones.

Por otro lado, se plantea la continuación del estudio de diferentes aspectos que han quedado fuera de esta tesis y que se consideran de alto interés.

Estudio de fatiga en elastómeros y propagación de fisuras: el estudio del proceso de fatiga en metales resulta muy complejo, encontrándose basado en multitud de parámetros y constituyendo prácticamente un estudio estadístico según multitud de metodologías. En elastómeros el proceso se complica todavía más, no existiendo una única corriente en cuanto a su estudio y debiendo seleccionar las metodologías que mejor aproximen cada problema.

En este sentido, problemas como el estudio de la vida de componentes del tipo de la membrana utilizada en el Capítulo 6, pueden valerse de estas teorías para simular su envejecimiento. Se plantea el estudio de dos fenómenos, por un lado, la fatiga mecánica y por otro la fatiga térmica, la cual acelera enormemente los efectos de propagación de fisura, al rigidizar el material elastómero. Un modelo MEF que consiga recopilar toda la información permitirá determinar el número de ciclos de vida del componente, y no únicamente sus zonas de rotura. El sistema de monitorización de la membrana desarrollado permitiría la validación de la vida del componente, por lo que únicamente deberían diseñarse los ensayos necesarios para obtener las propiedades restantes y su implementación en el software de simulación.

Planteamiento de modelos de energía de deformación adaptados al comportamiento según patrones de impresión: como pudo verse en el Capítulo 7, resulta posible utilizar un ajuste de curvas sobre materiales que no sean macizos, es decir que cuenten con patrones de impresión internos. Esto es posible solamente si la deformación de los componentes utilizados no supera un determinado umbral, ya que como se recogió experimentalmente y posteriormente mediante el MEF, las curvas que se consiguen mediante las funciones de energía de deformación comienzan a separarse de las obtenidas en los ensayos reales.

En este sentido, una opción podría ser el desarrollo de funciones de energía que se adaptasen a la deformación de este tipo de materiales. Para ello, deberían introducirse estas funciones en el software de simulación (subrutinas programadas por usuario) obteniendo de este modo un comportamiento totalmente fiel, fuese cual fuese el grado de deformación. Esto permitiría una mejora sustancial de los modelos MEF ya que, se eliminaría la limitación a problemas con desplazamiento acotado en modelos que consideran como macizos materiales que realmente no lo son.

Estudio del deslizamiento desde el punto de vista del ML: el problema del deslizamiento en suelas requiere la preparación de modelos MEF de gran tamaño, incluyendo la totalidad de la suela bajo estudio. Estos modelos tienen un alto coste computacional, que podría verse reducido mediante el uso de técnicas de ML. Se plantea por tanto la creación de modelos que consigan predecir el coeficiente de rozamiento de una determinada suela basándose en variables como la dureza del material, la curva tensión-coeficiente de rozamiento, el área de contacto estática, etc.

Con esta metodología, únicamente sería necesario determinar, mediante un ensayo estático el área de contacto de la suela en estudio, obteniendo directamente los valores del coeficiente de deslizamiento. De esta forma, podría lograrse una aceleración del proceso de diseño, simulando únicamente de forma completa los mejores casos.

Glosario

ADC	Analog-to-Digital Converter (Conversor analógico-digital)
AG	Algoritmo Genético
ANN	Artificial Neural Network (Red neuronal artificial)
BBD	Box-Behnken Design (Diseño Box-Behnken)
BD	Base de Datos
CCD	Central Composite Design (Diseño Central Compuesto)
COF	Coefficient of Friction (Coeficiente de rozamiento)
DM	Data Mining (Minería de datos)
DOE	Design of Experiments (Diseño de experimentos)
ERP	Enterprise Resource Planning (Planificador de recursos empresariales)
EVA	Etileno-Vinil-Acetato
FDM	Fused Deposition Modeling (Deposición de material fundido)
HPC	High-Performance Computing (Computación de altas prestaciones)
MAE	Mean Absolute Error (Error medio absoluto)
MEF	Método de los Elementos Finitos
ML	Machine Learning (Aprendizaje automático)
MLP	MultiLayer Perceptron (Perceptrón multicapa)
NBR	Acrylonitrile Butadiene Rubber (Caucho de nitrilo butadieno)
PET	Positron emission tomography (Tomografía por emisión de positrones)
PU	Poliuretano
PVDF	Polyvinylidene Fluoride (Fluoruro de polivinilideno)
RAE	Relative Absolute Error (Error relativo absoluto)
RM	Resonancia Magnética
RMSE	Root Mean Square Error (Error cuadrático medio)
RNA	Red Neuronal Artificial
RRSE	Root Relative Squared Error (Error relativo cuadrático)
RSM	Response Surface Method (Método de la superficie de respuesta)
SBR	Styrene-Butadiene Rubber (Caucho estireno-butadieno)
SVM	Support Vector Machine (Máquina de vector soporte)
SVR	Support Vector Regression (Regresión vector soporte)
TAC	Tomografía Axial Computarizada
TPE	Thermoplastic Elastomer (Elastómeros termoplásticos)
TPU	Thermoplastic Polyurethane (Poliuretano termoplástico)
VBA	Visual Basic for Applications
ADC	Analog-to-Digital Converter (Conversor analógico-digital)
AG	Algoritmo Genético

Referencias

- [1] S. S. Rao, *The finite element method in engineering*, Miami: Elsevier Science, 2018.
- [2] M. Sasso, G. Palmieri, G. Chiappini y D. Amodio, «Characterization of hyperelastic rubber-like materials by biaxial and uniaxial stretching tests based on optical methods,» *Polymer Testing*, vol. 27, n° 8, pp. 995-1004, 2008.
- [3] D. J. Charlton, J. Yang y K. K. Teh, «A Review of Methods to Characterize Rubber Elastic Behavior for Use in Finite Element Analysis,» *Rubber Chemistry and Technology*, vol. 67, n° 3, pp. 481-503, 1994.
- [4] M. Shahzad, A. Kamran, M. Z. Siddiqui y M. Farhan, «Mechanical characterization and FE modelling of a hyperelastic material,» *Materials research*, pp. 918-924, 2015.
- [5] J. Zhao, J. Dong, Z. Liu y H. Xie, «Characterization method of mechanical properties of rubber materials based on in-situ stereo finite-element-model updating,» *Polymer Testing*, vol. 79, 2019.
- [6] A. Alaswad, K. Y. Benyounis y A. G. Olabi, «Employment of finite element analysis and Response Surface Methodology to investigate the geometrical factors in T-type bi-layered tube hydroforming,» *Advances in Engineering Software*, vol. 42, n° 11, pp. 917-926, 2011.
- [7] R. Lostado, R. Escribano García y R. Fernandez Martinez, «Optimization of operating conditions for a double-row tapered roller bearing,» vol. 12, n° 3, pp. 353-373, 2016.
- [8] M. Sadeghifar, R. Sedaghati, W. Jomaa y V. Songmene, «Finite element analysis and response surface method for robust multi-performance optimization of radial turning of hard 300M steel,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 94, pp. 2457-2474, 2018.
- [9] M. Corral-Bobadilla, R. Lostado-Lorza, F. Somovilla-Gómez y S. Íñiguez-Macedo, «Life cycle assessment multi-objective optimization for eco-efficient biodiesel production using waste cooking oil,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 359, p. 132113, 2022.
- [10] C. Hernandez, J. Lara, M. A. Arjona y E. Melgoza-Vazquez, «Multi-Objective Electromagnetic Design Optimization of a Power Transformer Using 3D Finite Element Analysis, Response Surface Methodology, and the Third Generation Non-Sorting Genetic Algorithm,» *Energies*, vol. 16, n° 5, p. 2248, 2023.
- [11] R. Escribano, R. Lostado, F. J. Martínez-de-Pisón, A. Pernía y E. Vergara, «Modelling a Skin-Pass Rolling Process by Means of Data Mining Techniques and Finite Element Method,» *Journal of Iron and Steel Research*, vol. 19, n° 5, pp. 43-49, 2012.
- [12] R. Lostado Lorza, R. Escribano García, R. Fernández Martínez, M. Illera Cueva y B. J. Mac Donald, «Using the finite element method and data mining techniques as an

- alternative method to determine the maximum load capacity in tapered roller bearings,» *Journal of Applied Logic*, p. 635, 2016.
- [13] K. K. Tho, S. Swaddiwudhipong, Z. S. Liu y J. Hua, «Artificial neural network model for material characterization by indentation,» *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, vol. 12, nº 5, p. 1055, 2004.
- [14] A. Muliana, R. M. Haj-Ali, R. Steward y A. Saxena, «Artificial neural network and finite element modeling of nanoindentation tests,» *Metallurgical and Materials Transactions*, vol. A, nº 33, pp. 1939-1947, 2002.
- [15] T. Mankovits, I. Kocsis, T. Portik, T. Szabó y I. Páczelt, «Shape design of rubber part using FEM,» *International Review of Applied Sciences and Engineering*, vol. 4, nº 1, pp. 85-94, 2013.
- [16] M. Kim, S. Yi y S. Hong, «Numerical Investigations on the Shape Optimization of Stainless-Steel Ring Joint with Machine Learning,» *Applied Sciences*, vol. 11, nº 1, p. 223, 2020.
- [17] Y. Zhao, H. Yan, Y. Wang, T. Jiang y H. Jiang, «Predicting Nonlinear and Anisotropic Mechanics of Metal Rubber Using a Combination of Constitutive Modeling, Machine Learning, and Finite Element Analysis,» *Materials*, vol. 14, nº 18, p. 5200, 2021.
- [18] D. Huri y T. Mankovits, «Automotive rubber part design using machine learning,» *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 659, nº 1, p. 012022, 2019.
- [19] J. Hou, X. Lu, K. Zhang, Y. Jing, Z. Zhang, J. You y Q. Li, «Parameters identification of rubber-like hyperelastic material based on general regression neural network,» *Materials*, vol. 15, nº 11, p. 3776, 2022.
- [20] B. Yenigun, E. Gkouti, G. Barbaraci y A. Czekanski, «Identification of Hyperelastic Material Parameters of Elastomers by Reverse Engineering Approach,» *Materials*, vol. 15, nº 24, p. 8810, 2022.
- [21] R. Lostado Lorza, M. Corral Bobadilla, M. Martínez Calvo y P. Villanueva Roldán, «Residual Stresses with Time-Independent Cyclic Plasticity in Finite Element Analysis of Welded Joints,» *Metals*, vol. 7, nº 4, p. 136, 2017.
- [22] R. Lostado Lorza, R. Escribano García, R. Fernandez Martinez y M. Martínez Calvo, «Using Genetic Algorithms with Multi-Objective Optimization to Adjust Finite Element Models of Welded Joints,» *Metals*, vol. 8, nº 4, p. 230, 2018.
- [23] R. Lostado, R. F. Martínez, B. J. Mac Donald y P. M. Villanueva, «Combining soft computing techniques and the finite element method to design and optimize complex welded products,» *Integrated Computer-Aided Engineering*, vol. 22, nº 2, pp. 153-170, 2015.
- [24] R. Fernández Martínez, R. Lostado Lorza, A. A. Santos Delgado y N. O. Piedra Pullaguari, «Optimizing presetting attributes by softcomputing techniques to improve tapered roller bearings working conditions,» *Advances in Engineering Software*, vol. 123, pp. 13-24, 2018.
- [25] J. Diani, B. Fayolle y P. Gilormini, «A review on the Mullins effect,» *European Polymer Journal*, vol. 45, nº 3, pp. 601-6012, 2009.
- [26] A. R. Payne, «Hysteresis in rubber vulcanizates,» *Journal of Polymer Science: Polymer Symposia*, vol. 48, nº 1, pp. 169-196, 1974.
- [27] UNE 53510, Madrid: AENOR, 2001.

- [28] UNE-ISO 5893, *Aparatos de ensayo para plásticos y caucho. Tipos para ensayos de tracción, flexión y compresión (a velocidad de desplazamiento constante). Especificaciones.*, Madrid: AENOR, 2012.
- [29] UNE 53536, Madrid: AENOR, 2001.
- [30] M. Shahzad, A. Kamran, M. Z. Siddiqui y M. Farhan, «Mechanical Characterization and FE Modelling of a Hyperelastic Material,» *Materials Research*, vol. 18, nº 5, pp. 918-924, Septiembre-Octubre 2015.
- [31] UNE 53630, Madrid: AENOR, 2010.
- [32] R. Escribano García, Tesis Doctoral, Universidad de La Rioja, 2014.
- [33] R. Lostado Lorza, R. Escribano García y R. Fernández Martínez, «Optimization of operating conditions for a double-row tapered roller bearing,» *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, vol. 12, nº 3, Septiembre 2016.
- [34] F. J. Martínez de Pisón Ascacibar, Grupo EDMANS (Engineering Data Mining And Numerical Simulation) Universidad de La Rioja (UR), 2016.
- [35] R. Lostado Lorza, R. Escribano García, M. Á. Martínez Calvo y R. Múgica Vidal, «Improvement in the Design of Welded Joints of EN235JR Low Carbon Steel by Multiple Response Surface Methodology,» *Metals*, vol. 6, nº 9, 30 Agosto 2016.
- [36] J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, MIT press, 1975.
- [37] D. E. Goldberg y J. H. Holland , «Genetic Algorithms and Machine Learning,» *Machine Learning*, nº 3, pp. 95-99, 1988.
- [38] L. Davis, *Handbook of Genetic Algorithms*, New York, 1991.
- [39] Z. Michalewicz, *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, New York: Springer-Verlag, 1992.
- [40] C. R. Reeves, *Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems*, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1993.
- [41] ASTM D2084-11, West Conshohocken, Pensilvania: ASTM International, 2016.
- [42] A. Hamdi, M. N. Abdelaziz, N. A. Hocine, P. Heuillet y N. Benseddiq, «A fracture criterion of rubber-like materials under plane stress conditions,» *Polymer Testing*, vol. 25, nº 8, pp. 994-1005, 2006.
- [43] T. Zarrin-Ghalami y A. Fatemi, «Material deformation and fatigue behavior characterization for elastomeric component life predictions,» *Polymer Engineering & Science*, vol. 52, nº 8, pp. 1795-1805, 2012.
- [44] L. R. G. Treloar, *The Physics of Rubber Elasticity*, Tercera ed., Oxford University Press, J. W. Arrowsmith Ltd, ISBN: 0198513550, 1975.
- [45] MSC Software Corporation, 2010.
- [46] N. Kumar y V. V. Rao, «Hyperelastic Mooney-Rivlin Model: Determination and Physical Interpretation of Material Constants,» *MIT International Journal of Mechanical Engineering*, vol. 6, nº 1, pp. 43-46, Enero 2016.
- [47] M. C. Boyce y E. M. Arruda, «Constitutive Models of Rubber Elasticity: A Review,» *Rubber Chemistry and Technology*, vol. 73, nº 3, pp. 504-523, Julio 2000.
- [48] Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, Rhode Island, 2014.
- [49] B. J. Mac Donald, *Practical Stress Analysis with Finite Elements*, Segunda ed., Glasnevin Publishing, ISBN: 0955578167, 2011.

- [50] C. O. Horgan, «Remarks on Ellipticity for the Generalized Blatz-Ko Constitutive Model for a Compressible Nonlinearly Elastic Solid,» *Journal of Elasticity*, n° 42, pp. 165-176, 1996.
- [51] O. Zienkiewicz, R. Taylor y J. Zhu, *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*, Elsevier, 2005.
- [52] A. N. Jadhav, S. Bahulikar y N. Sapate, «Comparative Study of Variation of Mooney-Rivlin Hyperelastic Material Models under Uniaxial Tensile Loading,» *International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education*, n° 2, 2016.
- [53] E. Frank, M. A. Hall y I. H. Witten, *The WEKA Workbench. Online Appendix for "Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques"*, Cuarta ed., 2016.
- [54] R Core Team, Viena, 2017.
- [55] R. V. Lenth, «Response-Surface Methods in R, Using rsm,» *Journal of Statistical Software*, vol. 32, n° 7, 21 Octubre 2009.
- [56] R Core Team, *R: A language and environment for statistical computing*, Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2022.
- [57] M. Kuhn, 2016.
- [58] E. Frank, 2016.
- [59] P. Reutemann, J. van Rijn y E. Frank, 2017.
- [60] G. Syswerda, «Schedule optimization using genetic algorithms,» de *Handbook of Genetic Algorithms*, New York, Van Nostrand Reinhold, 1991, pp. 332-349.
- [61] P. Larranaga y M. Poza, «Structure learning of Bayesian network by genetic algorithms,» *New Approaches in Classification and Data Analysis*, pp. 300-307, 1994.
- [62] J. Schaffer, . R. Caruna, . L. Eshelman y R. Das, «A study of control parameters affecting online performance of genetic algorithms for function optimization,» *Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms*, pp. 51-60, 1989.
- [63] D. Ackley, *A Connectionist Machine for Genetic Hillclimbing*, Kluwer Academic, 1987.
- [64] M. Bramlette, «Initialization, mutation and selection methods in genetic algorithms,» *Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms*, pp. 100-107, 1991.
- [65] T. Fogarty, «Varying the probability of mutation in the genetic algorithm,» *Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms*, pp. 104-109, 1989.
- [66] Z. Michalewicz y C. Janikow, «Handling constraints in genetic algorithms,» *Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms*, pp. 151-157, 1991.
- [67] K. De Jong, *Tesis doctoral*, University of Michigan, 1975.
- [68] L. R. G. Treloar, «Strains in an inflated rubber sheet, and the mechanism of bursting,» *Rubber Chemistry and Technology*, vol. 17, n° 4, pp. 957-967, 1994.
- [69] T. T. Xuan y D. Cirkl, «FEM model of pneumatic spring assembly,» *Vibroengineering PROCEDIA*, vol. 13, pp. 199-204, 2017.
- [70] C. Feichter, Z. Major y R. W. Lang, «Methods for measuring biaxial deformation on rubber and polypropylene specimens,» *Experimental Analysis of Nano and*

- Engineering Materials and Structures: Proceedings of the 13th International Conference on Experimental Mechanics*, pp. 273-274, 2007.
- [71] P. Bhavsar, B. Sharma, W. Moscoso-Kingsley y V. Madhavan, «Detecting first layer bond quality during FDM 3D printing using a discrete wavelet energy approach,» *Procedia Manufacturing*, vol. 48, pp. 718-724, 2020.
- [72] B. Ren y C. J. Lissenden, «PVDF multielement lamb wave sensor for structural health monitoring,» *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 63, n° 1, pp. 178-185, 2015.
- [73] P. Giannelli, A. Bulletti y L. Capineri, «Multifunctional piezopolymer film transducer for structural health monitoring applications,» *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, n° 14, pp. 4583-4586, 2017.
- [74] P. Saxena y P. Shukla, «A comprehensive review on fundamental properties and applications of poly (vinylidene fluoride)(PVDF),» *Advanced Composites and Hybrid Materials*, vol. 4, pp. 8-26, 2021.
- [75] S. Katzir, «The beginnings of piezoelectricity: a study in mundane physics,» *Dordrecht*, vol. 246, 2006.
- [76] E. Alnasser, «A novel low output offset voltage charge amplifier for piezoelectric sensors,» *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, n° 10, pp. 5360-5367, 2020.
- [77] A. Gandelli y R. Ottoboni, «Charge amplifiers for piezoelectric sensors,» *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, pp. 465-468, 1993.
- [78] J. Minase, T. Lu, B. Cazzolato y S. Grainger, «A review, supported by experimental results, of voltage, charge and capacitor insertion method for driving piezoelectric actuators,» *Precision Engineering*, vol. 34, n° 4, pp. 692-700, 2010.
- [79] A. Odon, «Probe with PVDF sensor for energy measurements of optical radiation,» *Measurement Science Review*, vol. 3, pp. 111-114, 2003.
- [80] M. Saito, K. Nakajima, C. Takano, Y. Ohta, C. Sugimoto, R. Ezo and K. Yamashita, "An in-shoe device to measure plantar pressure during daily human activity," *Medical engineering & physics*, vol. 33, no. 5, pp. 638-645, 2011.
- [81] K. Ito, K. Maeda, I. Fujiwara, K. Hosoda, T. Nagura, T. Lee and N. Ogihara, "Dynamic measurement of surface strain distribution on the foot during walking," *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, vol. 69, pp. 249-256, 2017.
- [82] Z. Li, D. Wang, N. Dey, A. S. Ashour, R. S. Sherratt and F. Shi, "Plantar pressure image fusion for comfort fusion in diabetes mellitus using an improved fuzzy hidden Markov model," *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, vol. 39, no. 3, pp. 742-752, 2019.
- [83] S. Pieper, M. Halle and R. Kikinis, "3D Slicer," *2004 2nd IEEE international symposium on biomedical imaging: nano to macro (IEEE Cat No. 04EX821)*, pp. 632-635, Abril 2004.
- [84] D. Stein, K. H. Fritzsche, M. Nolden, H. P. Meinzer and I. Wolf, "The extensible open-source rigid and affine image registration module of the Medical Imaging Interaction Toolkit (MITK)," *Computer methods and programs in biomedicine*, vol. 100, no. 1, pp. 79-86, 2010.
- [85] B. B. Avants, N. J. Tustison, M. Stauffer, G. Song, B. Wu and J. C. Gee, "The Insight ToolKit image registration framework," *Frontiers in neuroinformatics*, vol. 8, p. 44, 2014.

- [86] M. D. Hanwell, K. M. Martin, A. Chaudhary and L. S. Avila, "The Visualization Toolkit (VTK): Rewriting the rendering code for modern graphics cards," *SoftwareX*, no. 1, pp. 9-10, 2015.
- [87] L. Meng, Y. Tian and S. Bu, "Liver tumor segmentation based on 3D convolutional neural network with dual scale," *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 2019.
- [88] P. Bakhshayesh, O. Sandberg, V. Kumar, A. Ali and A. Enocson, "Volume fusion of CT images to measure femoral symmetry," *Surgical and Radiologic Anatomy*, pp. 1-5, 2019.
- [89] E. Mirpuri, A. Pérez-Sala, A. Setién, J. López Benito and E. Artetxe. España Patent ES2649789A1, 2016.
- [90] E. Morales-Orcajo, T. R. Souza, J. Bayod and E. B. de Las Casas, "Non-linear finite element model to assess the effect of tendon forces on the foot-ankle complex," *Medical engineering & physics*, vol. 49, pp. 71-78, 2017.
- [91] V. Filardi, "Finite element analysis of the foot: Stress and displacement shielding," *Journal of orthopaedics*, vol. 15, no. 4, pp. 974-979, 2018.
- [92] W. M. Chen, J. Park, S. B. Park, V. P. W. Shim and T. Lee, "Role of gastrocnemius-soleus muscle in forefoot force transmission at heel rise—A 3D finite element analysis," *Journal of biomechanics*, vol. 45, no. 10, pp. 1783-1789, 2012.
- [93] S. Telfer, A. Erdemir, J. Woodburn and P. R. Cavanagh, "Simplified versus geometrically accurate models of forefoot anatomy to predict plantar pressures: A finite element study," *Journal of biomechanics*, vol. 49, no. 2, pp. 289-294, 2016.
- [94] S. Li, Y. Zhang, Y. Gu and J. Ren, "Stress distribution of metatarsals during forefoot strike versus rearfoot strike: A finite element study," *Computers in biology and medicine*, vol. 91, pp. 38-46, 2017.
- [95] A. Pascual Martínez, *Procedimiento para la optimización de propiedades de elastómeros impresos en 3D*, Trabajo fin de máster, Universidad de La Rioja, 2022.
- [96] R. Iturbe Legasa, *Estudio del comportamiento biomecánico de una pierna humana mediante el método de elementos finitos (MEF)*, Trabajo fin de máster, Universidad de La Rioja, 2017.
- [97] K. A. Kirby, "Sistema de reparto de cargas del arco longitudinal del pie," *Revista española de podología*, vol. 28, no. 1, pp. 37-45, 2017.
- [98] J. A. Buckwalter, Articular cartilage: composition and structure. Injury and repair of the musculoskeletal soft tissues., 1991.
- [99] M. Ozen, O. Sayman and H. Havitcioglu, "Modeling and stress analyses of a normal foot-ankle and a prosthetic foot-ankle complex," *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, vol. 15, no. 3, 2013.
- [100] J. T. Celigüeta-Lizarza, Método de los elementos finitos para análisis estructural, Escuela Superior de Ingenieros Industriales, Universidad de Navarra, 2011.
- [101] K. A. Athanasiou, G. T. Liu, L. A. Lavery, D. R. Lanctot and R. C. Schenck Jr, "Biomechanical topography of human articular cartilage in the first metatarsophalangeal joint," *Clinical Orthopaedics and Related Research*, vol. 348, pp. 269-281, 1998.
- [102] S. Siegler, J. Block and C. D. Schneck, "The mechanical characteristics of the collateral ligaments of the human ankle joint," *Foot & ankle*, vol. 8, no. 5, pp. 234-142, 1988.
- [103] D. Wright and D. Rennels, "A study of the elastic properties of plantar fascia," *jbjs*, vol. 46, no. 3, pp. 482-492, 1964.

- [104] UNE-EN ISO 20345, Madrid: AENOR, 2022.
- [105] UNE-EN ISO 13287, Madrid: AENOR, 2020.
- [106] J. W. Bray y R. E. Goodman, «The theory of base friction models,» *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, vol. 18, nº 6, pp. 453-468, Diciembre 1981.
- [107] M. C. Gómez, E. A. Gallardo-Hernandez, M. V. Torres y A. P. Bautista, «Rubber steel friction in contaminated contacts,» *Wear*, Vols. %1 de %2302(1-2), pp. 1421-1425, 2013.
- [108] S. J. Cull y R. Tucker, «On the modelling of Coulomb friction,» *Journal of Physics A: Mathematical and General*, vol. 32, nº 11, p. 2103, 1999.
- [109] L. Marton y B. Lantos, «Modeling, identification, and compensation of stick-slip friction,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, nº 1, pp. 511-521, 2007.
- [110] Q. Q. Zhang, L. P. Li y Y. J. Chen, «Analysis of compression pile response using a softening model, a hyperbolic model of skin friction, and a bilinear model of end resistance,» *Journal of Engineering Mechanics*, nº 140, pp. 102-111, 2014.
- [111] P. M. Santos y E. N. Júlio, «A state-of-the-art review on shear-friction,» *Engineering Structures*, vol. 45, pp. 435-448, 2012.