

Artículo de Investigación

Herramientas virtuales para el diagnóstico clínico: modelos 3D de elementos finitos en biomecánica

Virtual tools for clinical diagnosis: 3D finite element models in biomechanics

Lourdes Segovia García¹: Universidad Nacional de Educación a Distancia, España.

lsegovia23@alumno.uned.es

Miryam Beatriz Sánchez Sánchez: Universidad Nacional de Educación a Distancia, España.

msanchez@ind.uned.es

Fecha de Recepción: 21-05-2024

Fecha de Aceptación: 02-07-2024

Fecha de Publicación: 05-07-2024

Cómo citar el artículo (APA 7^a):

Segovia García, L. y Sánchez Sánchez, M. B. (2024). Herramientas virtuales para el diagnóstico clínico: modelos 3D de elementos finitos en biomecánica [Virtual tools for clinical diagnosis: 3D finite element models in biomechanics]. *European Public & Social Innovation Review*, 9, 01-21. <https://doi.org/10.31637/epsir-2024-300>

Resumen:

Introducción: Este artículo aborda el potencial de los modelos tridimensionales de elementos finitos como herramientas de diagnóstico clínico que ayudan a los cirujanos a planificar y practicar intervenciones de manera virtual, minimizando riesgos y mejorando la precisión durante las cirugías reales. **Metodología:** Se detalla la estrategia utilizada para implementar una metodología práctica que permita generar modelos tridimensionales de elementos finitos, a través de un ejemplo de una articulación de la rodilla con malformación de menisco lateral discoideo. **Resultados:** la implementación de un conjunto de procesos ordenados ha permitido la obtención de una herramienta de análisis adecuada para efectuar simulaciones por el método de elementos finitos. **Discusión:** Se discute el potencial de los modelos tridimensionales de elementos finitos para el diagnóstico clínico y la necesidad de implementar estas prácticas en entornos educativos y de investigación para lograr experiencias de aprendizaje innovadoras al aplicar conceptos teóricos en entornos prácticos y realistas. **Conclusiones:** Los modelos tridimensionales de elementos finitos son herramientas

¹ Lourdes Segovia García: Universidad Nacional de Educación a Distancia. (España).

de análisis con gran potencial para comprender la evolución y el comportamiento biomecánico de tejidos biológicos beneficiando el diagnóstico clínico, la toma de decisiones, y la formación en materia de equipos interdisciplinares.

Palabras clave: Modelos 3D; elementos finitos; biomecánica; tejidos biológicos, herramienta de análisis; distribución de tensiones; articulación de la rodilla; menisco lateral discoideo.

Abstract:

Introduction: This article explores the potential of three-dimensional finite element models as clinical diagnostic tools, aiding surgeons in virtual intervention planning and practice, thereby minimizing risks and enhancing precision during surgical procedures. **Methodology:** the methodology details the strategy employed to develop practical approaches for generating three-dimensional finite element models, using a case study of a knee joint with lateral discoid meniscus malformation. **Results:** the implementation of structured processes has yielded a suitable analysis tool for finite element method simulations. **Discussions:** The discussion emphasizes the potential of three-dimensional finite element models for clinical diagnostics and underscores the importance of integrating these practices into educational and research environments to foster innovative learning experiences that bridge theoretical concepts with practical, real-world scenarios. **Conclusions:** three-dimensional finite element models represent robust analytical tools with significant potential for elucidating the evolution and biomechanical dynamics of biological tissues, thereby benefiting clinical diagnostics, decision-making processes, and healthcare professional training.

Keywords: 3D models; finite elements; biomechanics; biological tissues; analytical tools; stress distribution; knee joint; lateral discoid meniscus.

1. Introducción

La biomecánica está estrechamente relacionada con la ingeniería ya que a menudo utiliza ciencias de la ingeniería tradicionales para analizar sistemas biológicos (Carvalho *et al.*, 2015). El avance de las nuevas tecnologías permite abordar desafíos complejos en el campo de la biomecánica, que no pueden ser fácilmente resueltos mediante métodos tradicionales de cálculo. Las limitaciones inherentes a los estudios experimentales, como la imposibilidad de llevar a cabo ensayos directamente en humanos, el alto costo asociado, y la dificultad para recrear situaciones realistas en órganos biológicos con problemas patológicos o degenerativos, han resaltado la necesidad de adoptar enfoques matemáticos avanzados. El uso de técnicas de modelado numérico está cada vez más extendido como una herramienta esencial para analizar de manera detallada y comprender la evolución y el comportamiento biomecánico en diversos órganos (Peña *et al.*, 2005).

La creación de modelos tridimensionales (3D) precisos que representen fielmente las estructuras biológicas de interés, junto con la aplicación de análisis mediante el método de elementos finitos (MEF), se convierte en una herramienta poderosa para la investigación biomecánica (Peña *et al.*, 2006). Este enfoque ofrece la posibilidad de obtener información detallada y precisa sobre el comportamiento mecánico de tejidos y estructuras biológicas, algo que sería difícil de lograr mediante métodos puramente experimentales. Comprender el funcionamiento de organismos desde una perspectiva mecánica, la capacidad para simular condiciones específicas o establecer procedimientos quirúrgicos antes de aplicarlos en pacientes proporciona a los cirujanos una herramienta visual que permite diagnosticar, planificar y practicar intervenciones de manera virtual (Kim *et al.*, 2023), minimizando riesgos y mejorando la precisión durante las cirugías reales.

La integración de herramientas de modelado 3D y análisis por elementos finitos en el estudio biomecánico representa un enfoque clave en la investigación contemporánea. Al superar las limitaciones de los métodos tradicionales y ofrecer una perspectiva detallada de los fenómenos biomecánicos, estos métodos computacionales emergen como pilares fundamentales en el desarrollo de soluciones innovadoras y efectivas en el campo médico y de la ingeniería. Estas simulaciones desempeñan un papel fundamental en el desarrollo de nuevos dispositivos y como herramienta de apoyo a las actividades de formación, educación y planificación operativa del personal clínico (Antonini *et al.*, 2023), contribuyendo así al avance continuo de la práctica médica y la ingeniería biomédica.

Los temas de investigación en biomecánica que implican el uso de modelos 3D y simulaciones MEF abarcan diversos campos, algunos ejemplos son la biomecánica dental y maxilofacial, la biomecánica cardiovascular con el diseño de endoprótesis vasculares, la biomecánica del cerebro y neurociencia, así como la biomecánica de tejidos blandos y del sistema musculoesquelético. Otros campos relevantes incluyen la biomecánica de articulaciones, así como la investigación relacionada con prótesis y dispositivos médicos, entre otros aspectos de interés científico y clínico. En los últimos años han proliferado investigaciones que ofrecen soluciones a diversos casos de estudio partiendo del análisis de elementos finitos y modelos 3D. Berton *et al.* (2018) diseñaron un modelo 3D de elementos finitos de vertebroplastia profiláctica en la columna metastásica para medir la estabilidad vertebral y distribución de la tensión en las vértebras adyacentes, siendo una opción interesante para mejorar la fuerza vertebral de la columna. Grassi *et al.* (2021) investigaron si los modelos 3D de elementos finitos del fémur proximal simulados pueden predecir el resultado de fracturas laterales de cadera, obteniendo como resultado una buena precisión de la cinética de un impacto de caída lateral. Además, Grassi *et al.* (2023) afirman que los modelos 3D de elementos finitos ofrecieron una mejor predicción de fracturas de cadera en comparación con los exámenes de densidad mineral ósea.

La distribución de tensiones y el análisis de la presión de contacto son factores relevantes en estudios de biomecánica porque proporcionan información crucial sobre cómo se comportan las estructuras biológicas y artificiales bajo cargas mecánicas. Estos estudios permiten evaluar la respuesta de tejidos y materiales a diferentes fuerzas, lo que es fundamental para comprender su rendimiento, durabilidad y posibles fallas. (Tauviqirrahman *et al.*, 2023) utilizaron modelos 3D de elementos finitos para estudiar la presión de contacto en prótesis de cadera de doble movilidad durante el ciclo de marcha. Proporcionaron una solución para determinar el diámetro óptimo de la cabeza femoral que minimice la presión de contacto antes de ser implantadas. El estrés por contacto es uno de los factores importantes que afectan a la tasa de supervivencia de las prótesis de rodilla en pacientes con osteoartritis (Chatellard *et al.*, 2013), una enfermedad común y frecuente en ancianos (Siddiq *et al.*, 2022). Es necesario diseñar estructuras que minimicen las concentraciones de tensión y maximice la resistencia utilizando la menor cantidad de material (Norli *et al.*, 2024). En este sentido, los modelos de elementos finitos preoperatorios y posoperatorios han permitido analizar razonablemente la tensión de contacto de las articulaciones, proporcionando un método de referencia para investigaciones posteriores (Yuan *et al.*, 2023).

Los estudios de elementos finitos bien establecidos se han utilizado con éxito para evaluar y desarrollar dispositivos médicos para prótesis de extremidades inferiores (Plesec y Harih, 2023), también han sido fundamentales a la hora de ofrecer soluciones confortables para prótesis en pacientes con amputaciones de miembros inferiores que informaron de una peor calidad de vida y mayores problemas de integración en la sociedad (Norli *et al.*, 2024), obteniendo resultados numéricos de alta calidad en términos de tensiones, deformaciones y presión de contacto (Plesec y Harih, 2023). El diseño de elementos protésicos es crítico en

medicina y biomecánica debido a su impacto directo en la funcionalidad, durabilidad y biocompatibilidad de las prótesis. Un diseño adecuado garantiza la correcta adaptación al paciente, evitando incomodidades y permitiendo una movilidad óptima. Un aspecto fundamental es la resistencia estructural para soportar las fuerzas biomecánicas, distribuyendo la carga de manera uniforme para prevenir lesiones. El análisis por elementos finitos en las pruebas de simulación ha posibilitado el diseño de prótesis personalizadas para cada paciente, siendo especialmente útiles para reparar defectos óseos en cirugías de revisión de articulaciones (Mao *et al.*, 2023). Estas herramientas ayudaron a estimar la estabilidad mecánica de las prótesis de la articulación del hombro y ofrecieron una solución para proteger los tornillos y el material de fijación (Schaffarzick *et al.*, 2022). También permitieron comprender mejor las características biomecánicas de fijadores internos para artrodesis de tobillo (Feng *et al.*, 2023), o identificar las áreas de mayor tensión en la interfaz prótesis-hueso-cemento y evaluar las condiciones de trabajo de mayor desgaste (Nalbone *et al.*, 2023), entre otras soluciones.

En los últimos años, la impresión 3D ha revolucionado el campo biomecánico al ofrecer avances significativos en varias áreas clave. La tecnología de impresión de objetos 3D es un recurso cada vez más utilizado en medicina, incorporado principalmente en áreas quirúrgicas como la ortopedia. Los modelos elaborados mediante tecnología de impresión 3D proporcionan a los cirujanos un análisis preciso de estructuras anatómicas complejas, permitiendo la planificación, el entrenamiento y la simulación de la cirugía (Mendonça *et al.*, 2023). En este aspecto el papel de los modelos 3D de elementos finitos también ha sido muy relevante. Zhu *et al.* (2023) diseñaron modelos de prótesis impresas en 3D para la reconstrucción de tumores óseos periacetabulares, donde el papel de las simulaciones de elementos finitos fue crucial para evaluar comparativamente parámetros como la tensión máxima, la distribución de la tensión, la densidad de energía de deformación (SED) y el micromovimiento relativo de las prótesis. Kim *et al.* (2023) diseñaron soluciones para grandes implantes craneales y piezas de fijación, simulando con elementos finitos la estructura de implantación (presión intracraneal y fuerza externa).

Los modelos 3D de elementos finitos también han sido determinantes en biomecánica dental y maxilofacial. Estos han permitido analizar la capacidad de carga (Chiari *et al.*, 2023) y distribución de tensiones (Desai *et al.*, 2023) de las prótesis dentales, el comportamiento de las partes de una prótesis dental en la mandíbula trasera cuando están hechas de diferentes materiales (Aboelfadl *et al.*, 2024) o el impacto de los diámetros y diseños de rosca en la biomecánica de implantes cortos colocados en hueso (Alqahtani *et al.*, 2023). También han sido decisivos a la hora de analizar soluciones previas a la cirugía por ejemplo, evaluando la tensión sobre el hueso y los tornillos protésicos según la influencia de las diferentes posiciones de los implantes en una prótesis mandibular (Gupta *et al.*, 2024) o mediante el diseño de métodos de análisis 3D para evaluar planificación de cirugía ortodóncica virtual en comparación con los resultados reales después de la cirugía (Badiali *et al.*, 2022).

Los procedimientos quirúrgicos modernos buscan ser personalizados y menos invasivos, considerando las características únicas de cada paciente. Sin embargo, esto requiere una planificación preoperatoria meticulosa y un profundo conocimiento de los aspectos biomecánicos involucrados (Aubert *et al.*, 2021). Uno de los aspectos más importantes de los modelos 3D de elementos finitos es su potencial en el diagnóstico preoperatorio, ya que proporcionan una visualización detallada de la anatomía específica del paciente, ayudan a evaluar la integridad estructural de los diferentes tejidos biológicos y brindan a los cirujanos la capacidad de planificar con precisión la cirugía antes de ser realizada (Wang *et al.*, 2020; Michaud *et al.*, 2024), lo que puede mejorar la seguridad y los resultados para el paciente. En este sentido Wang *et al.* (2020) emplearon la capacidad de estos modelos para estudiar la

planificación preoperatoria específica de un paciente con patología de tuberculosis espinal torácica; Liu *et al.* (2022) estudiaron la cantidad adecuada de menisco que se debe resear en una meniscectomía parcial en un paciente con menisco lateral discoideo; Zhu *et al.* (2023) pudieron investigar la dinámica del flujo de aire y la mecánica sólida de la reconstrucción de la tráquea con el periostio clavicular, obteniendo buenas referencias para la evaluación biomecánica de la cirugía de reconstrucción, entre otros estudios destacables.

El trabajo que se presenta a continuación tiene como objetivo desarrollar una metodología práctica aplicable en ambientes educativos y de equipos investigación interdisciplinarios para la creación de modelos 3D de elementos finitos de tejidos biológicos, a través de un ejemplo de una articulación de la rodilla con malformación de menisco lateral discoideo utilizando diseño asistido por ordenador y análisis de elementos finitos. Como objetivos específicos se establece:

- a) Diseñar herramientas de análisis que posibilitaran la exploración de patologías y la planificación de intervenciones quirúrgicas, con el fin de mejorar los procesos médicos previos a su implementación en pacientes reales.
- b) Facilitar la comprensión de conceptos técnicos fundamentales en ingeniería mecánica y biomecánica a través de la aplicación práctica de modelos tridimensionales y simulaciones por elementos finitos en entornos virtuales.

2. Metodología

El desarrollo de nuevas tecnologías permite avanzar de forma continuada en áreas de investigación como la ingeniería biomédica o la biomecánica. El desarrollo de pruebas diagnósticas no invasivas como la resonancia magnética (RM) o la tomografía Axial computarizada (TAC) han permitido la detección de enfermedades a través del estudio de las imágenes médicas de diferentes partes del cuerpo. A su vez, el desarrollo de programas de ingeniería de diseño asistido por computadora (CAD) permite modelar piezas en tres dimensiones (3D) y ensamblarlas para obtener un sistema más complejo. Actualmente la interconexión entre esas diferentes tecnologías nos permite usar las imágenes médicas para la construcción de modelos 3D realistas de diferentes partes del cuerpo humano. El primer paso para procesar las imágenes médicas de la articulación de la rodilla fue conocer los diferentes software que existen en el mercado, entre los que cabe destacar: 3DSlicer, Invesalius ITK-SNAP que ofrecen una solución de software libre o Intellispace Portal 10 software propietario de Philips, Materialise Mimics: software propietario de Materialise, entre otros. Estas herramientas permiten importar y transformar las imágenes médicas con diferentes formatos como DICOM 3.0, BMP, TIFF, JPG, en modelos 3D, a través de procesos de umbralizado y segmentación de tejidos.

2.1. Importación de imágenes médicas

Para la obtención del modelo 3D de la articulación de rodilla con malformación de menisco lateral discoideo se usaron las imágenes médicas provenientes de un TAC y una RM. La muestra consistió en un conjunto de 298 imágenes médicas en formato DICOM. Cada una de las imágenes representó un corte transversal de la rodilla, con un incremento de 0.4 mm, que permitió la construcción del volumen completo de la articulación. El conjunto de imágenes fue importado al software Materialise Mimics para su procesamiento.

2.2. Procesos de umbralizado y segmentación

Cada tejido tiene un nivel de absorción de radiación diferente, lo cual se refleja en el amortiguamiento de los rayos X que lo atraviesan generando imágenes en escala de grises de acuerdo al nivel de intensidad recibida. Este fenómeno es cuantificado por el tomógrafo y luego convertido en escala Hounsfield (HU), que toma valores en un rango de -1,024 a 3,071, siendo cero el valor para el agua (Patiño *et al.*, 2013). El proceso de umbralizado permitió variar la escala HU para seleccionar el rango de grises adecuado para cada tejido y con la herramienta *región-grow* se consiguió generar máscaras independientes de los diferentes tejidos, permitiendo así la segmentación de las diferentes partes que componen la articulación así como, la eliminación del ruido de las imágenes.

2.3. Modelo tridimensional y acabado superficial

Las piezas segmentadas corresponden a máscaras de tejidos en 2 dimensiones (2D), sin embargo, la interface del software mostró un avance del prototipo del modelo 3D que permitió su observación y revisión previa a la creación de los tejidos en 3D. A partir de las máscaras de tejido en 2D se crearon los objetos en 3D agregando cada uno de ellos como *New Part* en el panel de *Project Management*. Todas las partes fueron calculadas con los parámetros de calidad recomendados por el sistema para una calidad óptima.

Se ajustó la reducción de defectos (*shell Reduction*) a 1 unidad, se seleccionó el máximo rango de cortes (*slices*) transversales para obtener la pieza completa y se estableció un suavizado superficial inicial (*Smoothing*) de 2 iteraciones con un factor de suavizado de 0,3.

2.4. Tratamiento de superficies en 3D

La obtención de modelos 3D de tejidos biológicos supone un desafío a la hora de obtener modelos adecuados para ser discretizados, debido a que los tejidos biológicos contienen irregularidades e imperfecciones superficiales. Estas imperfecciones deben ser corregidas ya que pueden influir en la calidad del mallado superficial y producir falsos picos de tensión en las simulaciones de elementos finitos. Antes de proceder con la construcción del modelo tridimensional (3D), se llevó a cabo un proceso de suavizado superficial en dos dimensiones (2D), que implicó repasar los contornos de la máscara generada durante el proceso de segmentación. Esta etapa inicial de suavizado permitió corregir los contornos superficiales de la estructura. Sin embargo, debido a que las superficies no alcanzaron un suavizado completo en este proceso, se realizó un segundo proceso de suavizado en el modelo 3D resultante. Para eliminar todas las imperfecciones MIMICS cuenta con un menú de herramientas 3D. Las principales funciones de este menú se muestran en la tabla 1.

Tabla 1.

Menú de herramientas para modelado 3D

Icono	Función
 Rescale	Reescala partes o STL y coloca el resultado en la lista de objetos.
 Boolean	Realiza operaciones booleanas (Resta, Unión o Intersección) entre partes, STL o geometrías específicas

 Mirror	Refleja partes completas o divididas con la verificación mediante planos en 3D y 2D.
 Split	Divide una región de un objeto 3D en una nueva parte diferenciada.
 Merge	Fusiona dos objetos en uno solo para su tratamiento conjunto como un único objeto.
 Wrap	Crea una superficie de ajuste útil para filtrar inclusiones, cerrar agujeros pequeños o generar una superficie envolvente para análisis de elementos finitos.
 Reduce	Reduce triángulos en objetos 3D según puntos, bordes o bordes avanzados de los objetos 3D
 Smooth	Aplica un suavizado a objetos 3D con parámetros definidos.
 Edit Contours	Facilita ajustar el modelo 3D editando contornos en imágenes 2D mediante grab, magnet y smooth de forma manual.

Fuente: Elaboración propia

La combinación de las diferentes herramientas para el tratamiento superficial de las piezas dio lugar a un modelo 3D realista de la articulación de rodilla con malformación de menisco lateral discoideo que supondrá la herramienta base para el desarrollo de estudios tensionales a través de simulaciones de elementos finitos.

2.5. Modelo de elementos Finitos

Las restricciones cognitivas de la mente humana impiden comprender completamente el comportamiento de entornos y creaciones complejas en una sola instancia. Por consiguiente, la estrategia de descomponer todos los sistemas en sus elementos individuales o "componentes", cuyo comportamiento es más comprensible, y luego reconstruir el sistema original, se convierte en un enfoque natural para ingenieros, científicos e incluso economistas (Zienkiewicz *et al.*, 2013). El método de elementos finitos (MEF) es una técnica fundamental en la modelización matemática de sistemas físicos complejos. Consiste en la discretización de un dominio continuo en elementos finitos interconectados por nodos, permitiendo así la formulación de ecuaciones diferenciales parciales asociadas al problema físico real. La esencia radica en dividir el dominio en partes más pequeñas para obtener soluciones aproximadas que converjan hacia la solución real a medida que se aumenta el número de elementos y nodos. La idoneidad del MEF se refleja en su capacidad para resolver problemas con geometrías complejas y condiciones de contorno específicas, siempre y cuando se realicen estudios de convergencia y se implementen métodos de adaptabilidad y refinamiento de malla para asegurar una aproximación óptima y convergente hacia la solución real. Este enfoque resulta crucial en la modelización de sistemas continuos en el ámbito de la ingeniería, la biomecánica y otras disciplinas que requieren análisis detallados y precisos de fenómenos físicos complejos.

2.6. Discretización del modelo

La discretización del modelo fue implementada con Materialise 3-matic. En primer lugar, se verificó la calidad y validez de las piezas, a través del módulo Fix Wizard, para garantizar superficies y volúmenes adecuados para ser mallados. El diagnóstico de esta de verificación de calidad arrojó imperfecciones del tipo; “orientación de triángulos con normales invertidas”, “ruido de imágenes”, “superposiciones” o “intersección de triángulos” en el fémur y el Cartílago femoral. Las imperfecciones fueron eliminadas mediante las herramientas de tratamiento de superficies que ofrece el programa. Se filtraron triángulos y ejes pequeños y se realizó un nuevo suavizado superficial. En segundo lugar, se realizó el mallado de cada una de las piezas que componen la articulación de rodilla. Todos los tejidos fueron discretizados con una malla superficial homogénea con una longitud de triángulo de 1.5mm. En los tejidos óseos, cartílagos y meniscos se implementó una malla volumétrica con elementos tetraédricos de cuatro nodos (C3D4) y para los ligamentos se implementó una malla volumétrica con elementos tetraédricos de 10 nodos (C3D10MH). En tercer lugar, cada una de las partes de la articulación de la rodilla fue exportada como archivos “.inp”

2.7 Modelo 3D para análisis de simulaciones de elementos finitos

Los archivos “.inp” fueron importados al software de elementos finitos Abaqus con el propósito de configurar el análisis mediante simulaciones basadas en el método de elementos finitos (MEF). Durante este proceso, se abordaron meticulosamente los siguientes aspectos cruciales para la simulación: a. La caracterización de las propiedades mecánicas de los tejidos y su integración en el modelo, b. La definición rigurosa de las superficies de contacto entre las distintas estructuras articulares, c. La configuración precisa de las condiciones de contacto entre las superficies previamente definidas, d. El establecimiento de las condiciones de contorno necesarias para replicar fielmente el comportamiento biomecánico de la rodilla, e. La aplicación de condiciones de carga pertinentes para simular escenarios clínicos específicos, f. La implementación de otras configuraciones requeridas para la ejecución y análisis exhaustivo de las simulaciones. Estos pasos metodológicos son esenciales para garantizar la precisión, validez y relevancia clínica de las simulaciones biomecánicas realizadas en el contexto de este estudio.

El módulo de *Property* en Abaqus permite la asignación precisa de propiedades físicas y mecánicas a los componentes de un modelo de elementos finitos. Esta herramienta es esencial para definir características como el tipo de material, módulos de elasticidad, coeficientes de Poisson y otras propiedades específicas que influyen significativamente en el comportamiento del material durante la simulación. En este módulo se estableció el siguiente flujo de trabajo: a. Crear Material, b. Definir sección, c. Asignar sección. Cada sección se definió para sólidos homogéneos asignando los materiales creados para cada tejido y se asociaron de manera correspondiente a cada una de las partes que componen la articulación de la rodilla.

Para este modelo de análisis se crearon diferentes materiales en función de las características mecánicas de cada tejido biológico. Los tejidos óseos se configuraron como componentes rígidos con un comportamiento elástico lineal (Peña *et al.*, 2006), con un módulo de elasticidad de 7300 MPa y un coeficiente de Poisson de 0.3. Por otro lado, los meniscos fueron tratados como materiales isotrópicos lineales monofásicos, con un módulo de elasticidad de 120 MPa y un coeficiente de Poisson de 0.45. De manera similar, se consideraron los cartílagos articulares como materiales isotrópicos lineales monofásicos, caracterizados por un módulo de elasticidad de 15 MPa y un coeficiente de Poisson de 0.475 (Zhang *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2020). Respecto a

los ligamentos, se abordaron como elementos no lineales, modelados como materiales neo-hookeanos transversalmente isotrópicos casi incompresibles, basándose en la función de energía de deformación propuesta por estudios anteriores (Peña *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2020).

En el módulo de *Assembly* se combinaron las diferentes partes de la articulación de la rodilla en un único modelo de simulación. Esto es fundamental para simular el comportamiento de sistemas complejos que constan de varias piezas interconectadas. En este caso se mantuvo la posición relativa entre las diferentes partes y al ensamblarlas no hubo que recolocarlas ya que mantuvieron la posición adecuada.

El módulo de *Part* en Abaqus se utiliza para trabajar la geometría de las piezas dentro del entorno de modelado. Permite definir y generar sólidos, superficies y líneas que representan componentes físicos o partes de un sistema en el modelo de elementos finitos. En este entorno se definieron todas las superficies articulares necesarias para establecer los pares de contacto. Por otro lado, el módulo de *Interaction* se utiliza para definir y controlar cómo interactúan las diferentes partes o componentes en un modelo 3D.

En la teoría de elementos finitos, cada nodo de la malla está conectado a sus nodos vecinos mediante ecuaciones que describen el sistema físico. Abaqus gestiona estas interacciones definiendo condiciones de contacto y métodos de iteración entre ellas. Las condiciones de contacto especifican cómo interactúan las superficies en contacto (fricción, adherencia, etc.), mientras que la iteración resuelve el sistema de ecuaciones de manera iterativa hasta converger en una solución estable que refleje el comportamiento real del sistema. Para el modelo de la articulación de la rodilla se establecieron lo siguiente pares de contacto: fémur-cartílago articular, cartílago articular-meniscos, meniscos-cartílagos tibiales y cartílagos tibiales-tibia (Halonen *et al.*, 2014; Kedgley *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2020).

Las condiciones de contacto implementadas fueron las siguientes: a. Se estableció una unión rígida entre todos los cartílagos articulares y ligamentos con sus respectivos huesos, b. Se definieron condiciones de contacto superficie a superficie (contacto estándar) entre los cartílagos articulares y los meniscos y c. Se especificó una propiedad de contacto normal entre las superficies, exenta de fricción, con el fin de asegurar una óptima transmisión de carga.

Las condiciones de contorno son especificaciones que se aplican a un modelo de elementos finitos para representar cómo interactúa con su entorno físico. Estas condiciones definen cómo se comporta el modelo en sus límites o fronteras, ya sea restringiendo movimientos, aplicando fuerzas externas o estableciendo relaciones de contacto con otros componentes. A través del módulo *Load* se establecieron las siguientes condiciones de contorno: a. Se restringió el movimiento de la tibia y la fíbula en todos sus grados de libertad, b. En el fémur se restringieron todas las rotaciones a excepción de la rotación sobre el eje transversal, que permite la flexión y extensión de la articulación, c. También se restringieron todos los desplazamientos en el fémur a excepción del desplazamiento en el eje longitudinal y en el eje anteroposterior (Li *et al.*, 2020).

La carga aplicada fue una fuerza distribuida en la superficie superior del fémur de 0.45N/mm^2 que corresponde al 43% del peso corporal del paciente, que es soportado por cada articulación en una posición de equilibrio con rodilla en extensión.

2.8. Configuración del Step

El módulo step permite definir el tipo de problema que queremos resolver: estático general, dinámico implícito o explícito, transferencia de calor, etc. Es importante tener en cuenta que

solo se puede definir un tipo de análisis en cada paso. A su vez permite definir tantos pasos como requiera el problema para ser resuelto, es decir, nos permite realizar divisiones del problema y en cada división, *step*, o paso se definen unas condiciones de contacto, de contorno, de carga, etc. En el análisis de este problema se ha definido un *Step-1* con un tipo de paso estático general. Entre las opciones de configuración del *step* se estableció el periodo de tiempo el número máximo de incrementos, el tamaño del incremento, el tipo de ecuación a resolver, y se activó el parámetro *Nlgeom* dadas las características no lineales de los ligamentos. Finalmente en el *field output manager* se configuraron todos los parámetros de salida de mayor interés para este estudio como: las tensiones, las fuerzas, el contacto o los desplazamientos.

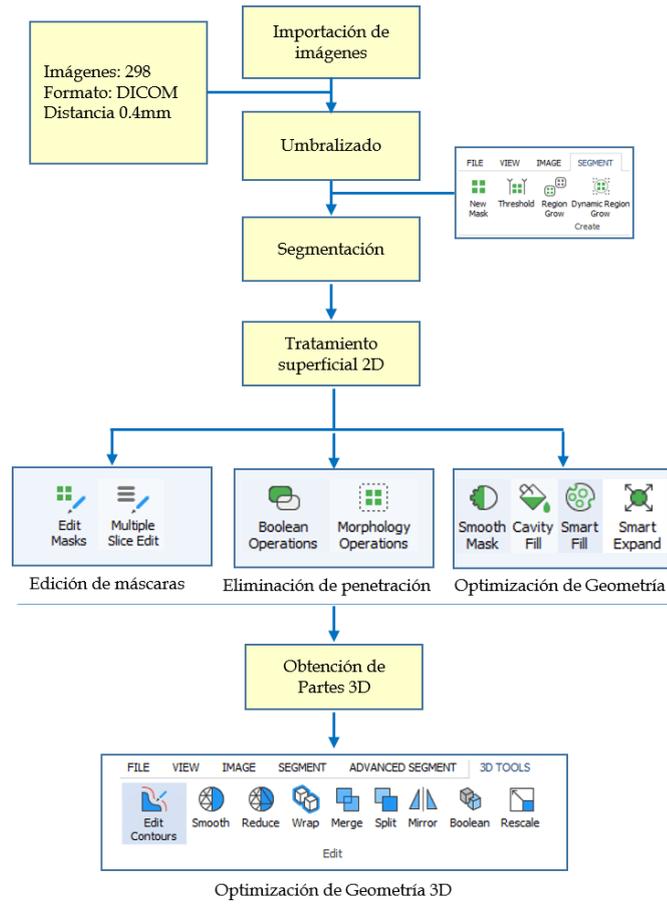
3. Resultados

El resultado final fue la obtención de una herramienta de análisis a través de un conjunto de procesos de trabajo para el diseño de modelos 3D realistas de tejidos biológicos y su configuración para el desarrollo de simulaciones por el método de elementos finitos. Estos procesos forman parte de una metodología que pretende ser una guía de aplicación práctica en entornos educativos. El objetivo fue desarrollar herramientas de análisis para examinar patologías o planificar intervenciones quirúrgicas, con el propósito de mejorar los procedimientos médicos previos a su ejecución en pacientes reales. Además, busca simplificar la comprensión de conceptos técnicos esenciales en ingeniería mecánica dentro de este contexto específico.

3.1. Proceso 1: Obtención del modelo 3D

El tratamiento de imágenes médicas obtenidas de TAC y RM a través del software MIMICS involucró procedimientos de umbralizado, segmentación y suavizado superficial. Estos pasos permitieron generar un prototipo tridimensional (3D) que representa fielmente la articulación real del paciente.

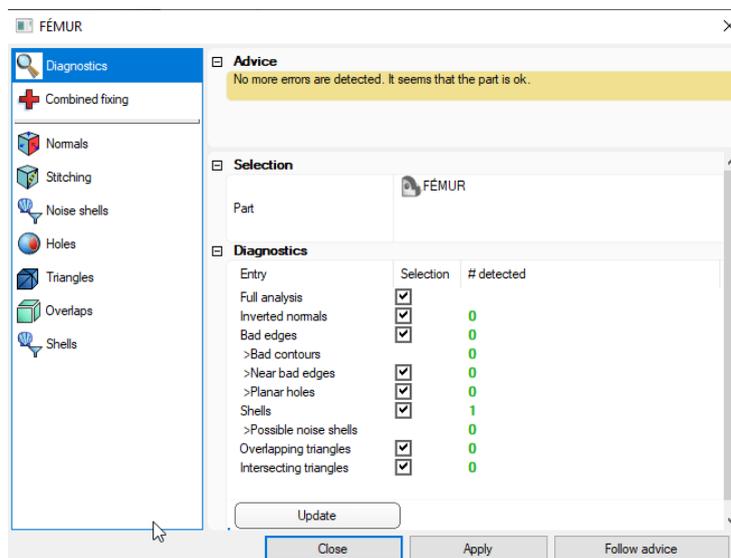
Figura 1: Diagrama de flujo: Proceso 1. Obtención del modelo 3D



3.2. Procesos 2: Discretización del modelo 3D

El entorno de verificación de la calidad de las piezas en 3-Matic arrojo resultados positivos en todos los tejidos a excepción de cartílago articular y el fémur los cuales fue sometidos a un postprocesado para eliminar malos contornos, irregularidades superficiales y solapamientos. Esto garantizó un mallado superficial y volumétrico adecuado.

Figura 2: Entorno de Verificación de la calidad superficial de las piezas



3.3. Proceso 3: Configuración del modelo de elementos finitos

La obtención de la herramienta de análisis se completó con la configuración de las propiedades mecánicas del modelo. Se programaron las propiedades de los materiales y se definieron las condiciones de contacto, de contorno y de carga así como, el ensamblaje de las piezas.

Figura 3: Diagrama de flujo: Proceso 2. Obtención del modelo 3D discretizado

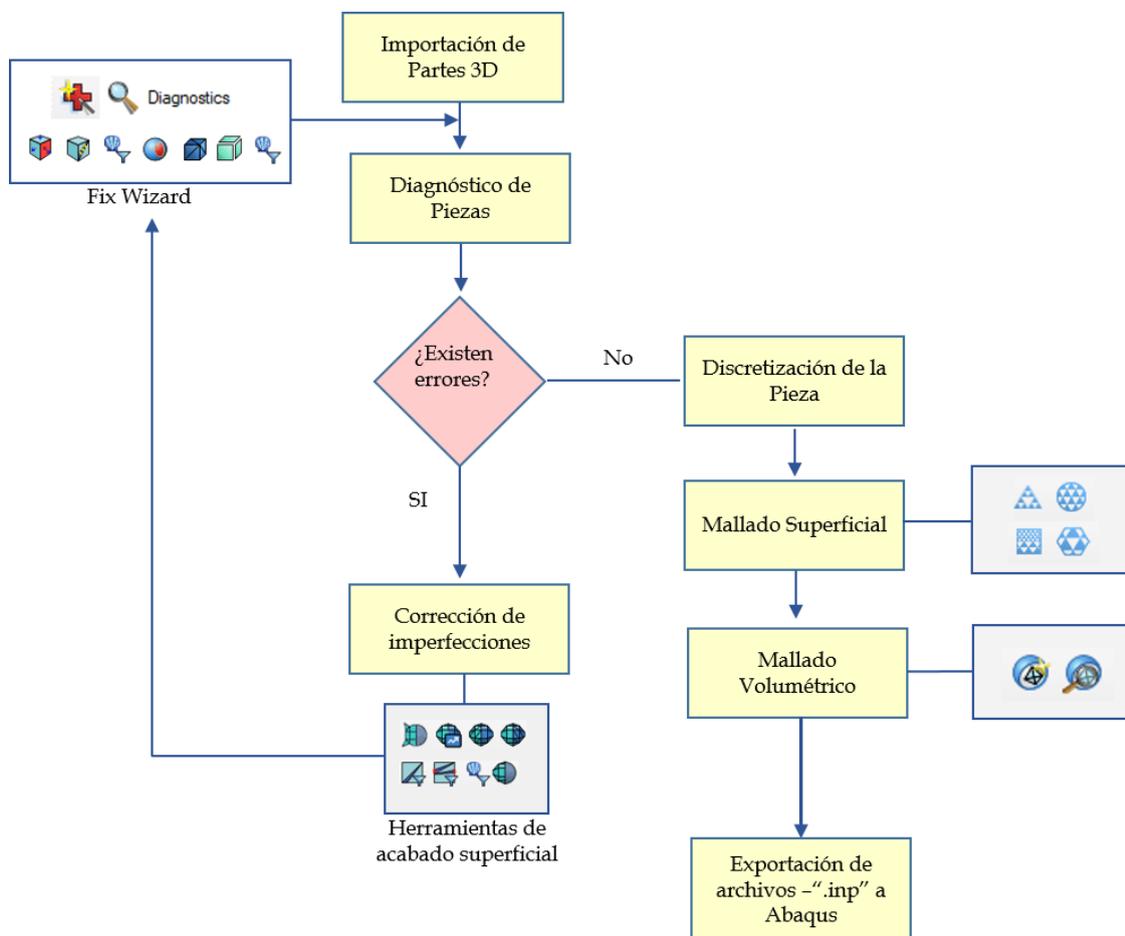
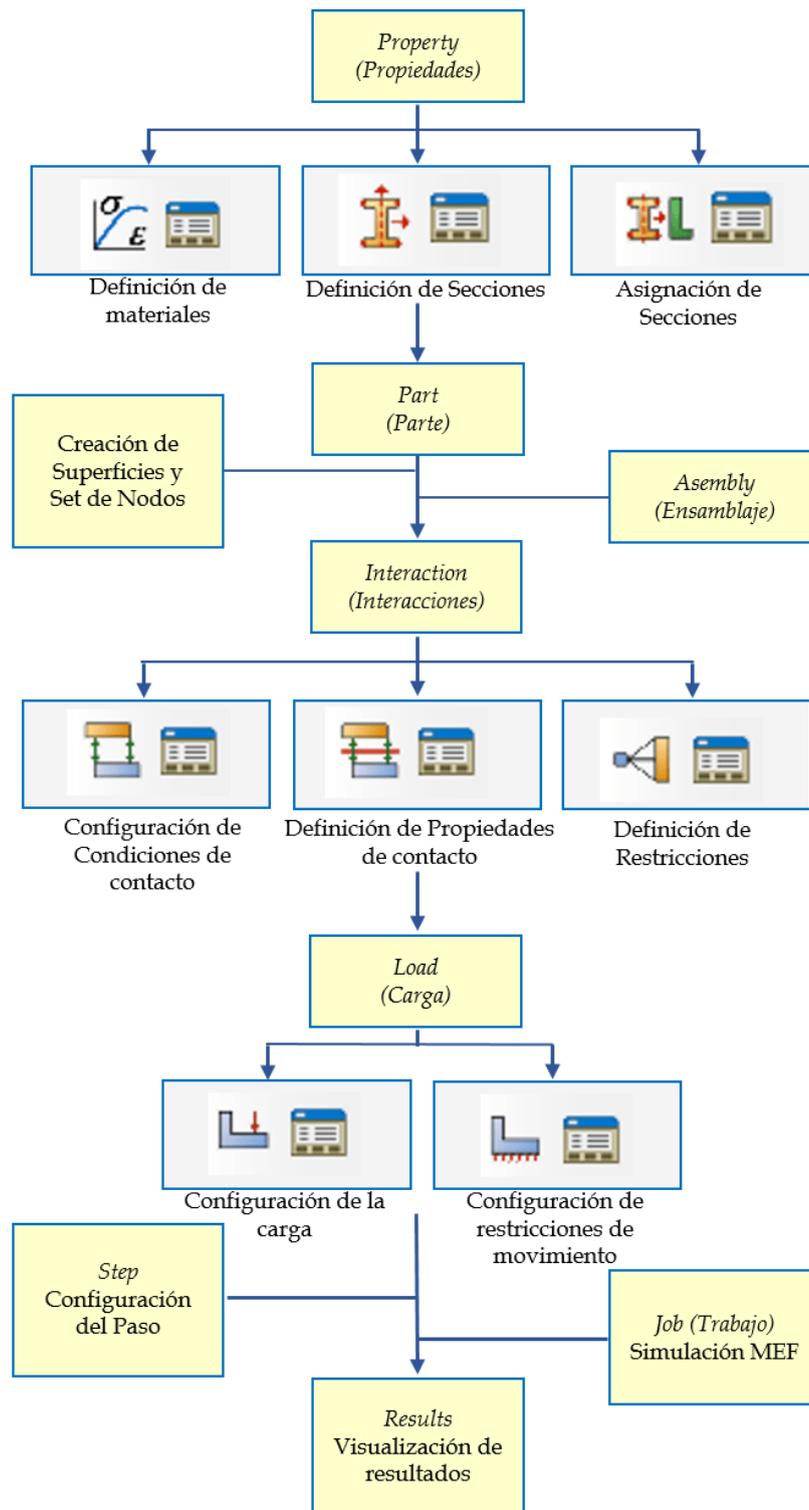


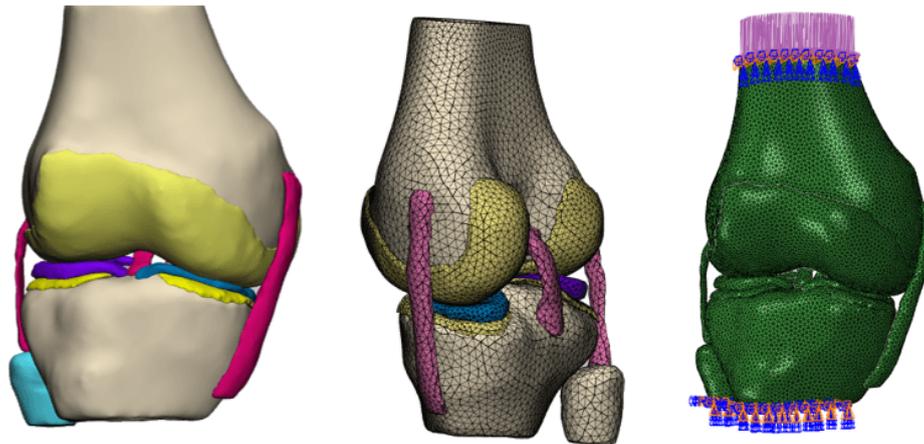
Figura 4: Diagrama de flujo: Proceso 3. Configuración del modelo de elementos finitos



3.4. Proceso 5: Verificación y Ejecución de la simulación

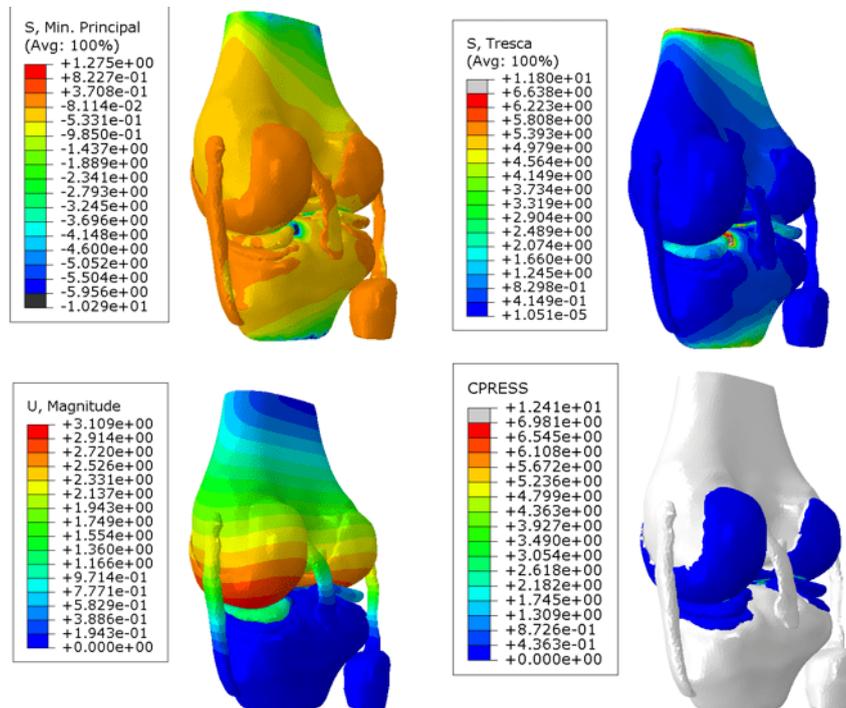
Finalmente, se validó la capacidad del modelo 3D configurado para realizar análisis por el método de los elementos finitos mediante la ejecución de una simulación con una carga distribuida en la superficie superior del fémur, manteniendo la rodilla en una posición de equilibrio y extensión.

Figura 5: Modelo 3D para análisis de simulaciones de elementos finitos



Los resultados obtenidos incluyeron diversos parámetros de análisis, como la tensión de contacto, la tensión de compresión, la tensión cortante y la deformación. Este proceso demostró la eficacia del modelo en la evaluación de comportamientos biomecánicos relevantes para el estudio de la articulación de la rodilla.

Figura 6: Simulación de elementos finitos. Resultados



4. Discusión

Existen numerosas patologías que afectan a la biomecánica del cuerpo humano que requieren de un análisis profundo, en lugar de ser directamente abordadas con métodos experimentales. Las restricciones intrínsecas de los estudios experimentales, han subrayado la necesidad de emplear métodos matemáticos de vanguardia combinados con la recreación de los tejidos biológicos en modelos tridimensionales virtuales, con la suficiente capacidad para recrear situaciones reales y abordar la problemática desde un escenario seguro y que han supuesto un gran avance en la investigación biomecánica (Peña *et al.*, 2006). Algunos ejemplos que demuestran la necesidad de utilizar estas herramientas para el diagnóstico clínico y que ponen de manifiesto el gran potencial en entornos educativos y de investigación son los estudios desarrollados para el análisis y predicción del comportamiento biomecánico de los tejidos biológicos antes de ser sometidos a una intervención quirúrgica, (Wang *et al.*, 2020; Aubert *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2022; Zhu *et al.*, 2023; Michaud *et al.*, 2024), el diseño de elementos protésicos ofreciendo soluciones personalizadas para cada paciente garantizando la confiabilidad y confortabilidad del paciente (Norli *et al.*, 2024) como prótesis de miembros amputados (Plesec y Harih, 2023), impresiones 3D de implantes craneales (Kim *et al.*, 2023) o prótesis dentales (Chiari *et al.*, 2023; Desai *et al.*, 2023; Gupta *et al.*, 2024) entre otros ejemplos de relevantes interés.

El presente trabajo representa un avance significativo al abrir nuevas posibilidades para las instituciones educativas y los entornos de investigación en el campo médico de equipos interdisciplinarios. La metodología presentada facilita la adopción prácticas confiables para la obtención de herramientas de análisis, que combina modelos 3D virtuales con métodos matemáticos como el MEF.

En este sentido, este trabajo se presenta como una guía práctica para la creación de herramientas de análisis capaces de simular situaciones reales, que permite a los investigadores y cirujanos comprender el funcionamiento de organismos afectados por patologías concretas. La secuencia de procesos y pasos seguidos en este trabajo se han desarrollado para la obtención de un modelo 3D de elementos finitos de una articulación de rodilla con malformación de menisco lateral discoideo, obteniendo una herramienta con capacidad para efectuar simulaciones de elementos finitos que arrojan resultados específicos para la representación de situaciones realistas. La herramienta permite observar el comportamiento biomecánico de los tejidos a través del análisis esfuerzos y deformaciones, así como simular condiciones específicas que es fundamental para abordar soluciones satisfactorias.

La implementación modelos 3D de elementos finitos permite la exploración detallada de datos relevantes para obtener diagnósticos precisos antes de las intervenciones quirúrgicas. Esta capacidad no solo mejora la efectividad de las intervenciones, sino que también actúa como un sólido apoyo durante la planificación y ejecución de procedimientos quirúrgicos en escenarios virtuales simulados (Kim *et al.*, 2023). Al analizar una amplia gama de condiciones, parámetros e indicadores, se recrean situaciones realistas que reflejan la complejidad de los casos clínicos. Los modelos 3D de elementos finitos constituyen las bases de estas herramientas de análisis, ofreciendo una visión detallada y precisa de los escenarios biomecánicos y patológicos que son cruciales para una toma de decisiones informada y efectiva en el ámbito médico y quirúrgico.

La secuencia de procesos y pasos seguidos en este trabajo para la obtención de un modelo 3D de una articulación de rodilla con malformación de menisco lateral discoideo ha dado como resultado una herramienta con capacidad para efectuar simulaciones de elementos finitos que

arrojan resultados específicos para la representación de situaciones realistas. Estas herramientas, según Antonini *et al.* (2023), ofrecen soporte en actividades de formación, educación y planificación operativa del personal clínico. De este modo, podrá aplicarse para afrontar los desafíos más significativos relacionados con la cirugía de menisco lateral discoideo.

5. Conclusiones

En este artículo se expone una metodología desarrollada para la generación y configuración de modelos 3D utilizando elementos finitos, empleando como caso de estudio una articulación de rodilla con menisco lateral discoideo. Este proceso ha permitido la obtención de una herramienta de análisis y diagnóstico, la cual permite examinar el comportamiento de distintos tejidos biológicos a través de la evaluación de tensiones y deformaciones.

Esta solución propuesta facilita la integración de conocimientos y técnicas provenientes de la ingeniería mecánica y la medicina, y puede servir como orientación para profesionales en ingeniería, cirugía e investigación para implementar nuevos modelos 3D.

Estas herramientas tienen un gran potencial en el diagnóstico clínico gracias a su capacidad recrear escenarios reales personalizados de estructuras anatómicas y patológicas. Esta capacidad permite a los profesionales de la salud visualizar y analizar patologías de manera más precisa y comprender mejor las condiciones de los pacientes.

Estos modelos no solo respaldan decisiones médicas informadas, sino que también son valiosos para la educación médica al permitir prácticas virtuales y mejorar la formación de profesionales de la salud. Esto beneficia la formación de profesionales de la salud al ofrecer entornos simulados para la práctica y el aprendizaje, preparándolos de manera más efectiva para situaciones reales en el campo médico.

6. Referencias

- Aboelfadl, A., Keilig, L., Ebeid, K., Ahmed, M. A. M., Nouh, I., Refaie, A. y Bourauel, C. (2024). Biomechanical behavior of implant retained prostheses in the posterior maxilla using different materials: a finite element study. *BMC Oral Health*, 24(1). <https://doi.org/10.1186/s12903-024-04142-8>
- Alqahtani, A. R., Desai, S. R., Patel, J. R., Alqhtani, N. R., Alqahtani, A. S., Heboyan, A., De Oliveira Fernandes, G. V., Mustafa, M. y Karobari, M. I. (2023). Investigating the impact of diameters and thread designs on the Biomechanics of short implants placed in D4 bone: a 3D finite element analysis. *BMC Oral Health*, 23(1). <https://doi.org/10.1186/s12903-023-03370-8>
- Antonini, L., Poletti, G., Pennati, G. y Petrini, L. (2023). A review on the use of finite element simulations for structural analyses of coronary stenting: What can we do nowadays and what do we need to move forward? *European Journal Of Mechanics. A, Solids/European Journal Of Mechanics, A, Solids*, 101, 105071. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2023.105071>
- Aubert, K., Germaneau, A., Rochette, M., Ye, W., Severyns, M., Billot, M., Rigoard, P. y Vendevre, T. (2021). Development of Digital Twins to Optimize Trauma Surgery and Postoperative Management. A Case Study Focusing on Tibial Plateau Fracture.

- Badiali, G., Bevini, M., Gulotta, C., Lunari, O., Parenti, S. I., Pironi, M., Bianchi, A., Felice, P. y Marchetti, C. (2022). Three-dimensional cephalometric outcome predictability of virtual orthodontic-surgical planning in surgery-first approach. *Progress In Orthodontics*, 23(1). <https://doi.org/10.1186/s40510-022-00448-x>
- Berton, A., Salvatore, G., Giambini, H., Ciuffreda, M., Longo, U. G., Denaro, V., Thoreson, A. y An, K. (2018). A 3D finite element model of prophylactic vertebroplasty in the metastatic spine: Vertebral stability and stress distribution on adjacent vertebrae. *The Journal Of Spinal Cord Medicine/Journal Of Spinal Cord Medicine*, 43(1), 39-45. <https://doi.org/10.1080/10790268.2018.1432309>
- Carvalho, L., Roriz, P., Simões, J. y Frazão, O. (2015). New Trends in Dental Biomechanics with Photonics Technologies. *Applied Sciences*, 5(4), 1350-1378. <https://doi.org/10.3390/app5041350>
- Chatellard, R., Sauleau, V., Colmar, M., Robert, H., Raynaud, G. y Brillhault, J. (2013). Medial unicompartmental knee arthroplasty: Does tibial component position influence clinical outcomes and arthroplasty survival? *Orthopaedics y Traumatology: Surgery y Research*, 99(4), S219-S225. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2013.03.004>
- Chiari, A., Mantovani, S., Berzaghi, A., Bellucci, D., Bortolini, S. y Cannillo, V. (2023). Load bearing capability of three-units 4Y-TZP monolithic fixed dental prostheses: An innovative model for reliable testing. *Materials y Design*, 227, 111751. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111751>
- Desai, S. R., Koulgikar, K. D., Alqhtani, N. R., Alqahtani, A. R., Alqahtani, A. S., Alenazi, A., Heboyan, A., Fernandes, G. V. O. y Mustafa, M. (2023). Three-Dimensional FEA Analysis of the Stress Distribution on Titanium and Graphene Frameworks Supported by 3 or 6-Implant Models. *Biomimetics*, 8(1), 15. <https://doi.org/10.3390/biomimetics8010015>
- Feng, B., Gao, Q., Dai, G., Niu, K., Jiang, W., Wang, Z. y Zheng, H. (2023). Comparison of different internal fixation models in ankle arthrodesis using 3D finite-element analysis. *European Journal Of Medical Research*, 28(1). <https://acortar.link/mb3zyk>
- Grassi, L., Fleps, I., Sahlstedt, H., Väänänen, S. P., Ferguson, S. J., Isaksson, H. y Helgason, B. (2021). Validation of 3D finite element models from simulated DXA images for biofidelic simulations of sideways fall impact to the hip. *Bone*, 142, 115678. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2020.115678>
- Grassi, L., Väänänen, S. P., Jehpsson, L., Ljunggren, Ö., Rosengren, B., Karlsson, M. K. y Isaksson, H. (2023). 3D Finite Element Models Reconstructed From 2D Dual-Energy X-Ray Absorptiometry (DXA) Images Improve Hip Fracture Prediction Compared to Areal BMD in Osteoporotic Fractures in Men (MrOS) Sweden Cohort. *Journal Of Bone And Mineral Research*, 38(9), 1258-1267. <https://doi.org/10.1002/jbmr.4878>
- Gupta, R. K., Malhotra, P., Bhargava, A., Singh, M., Paul, A. y Dua, B. (2024). Stress Transmission on Bone and Prosthetic Screws Influenced by Implant Position: A Finite

- Element Analysis. *International Journal Of Prosthodontics And Restorative Dentistry*, 14(1), 45-49. <https://doi.org/10.5005/jp-journals-10019-1444>
- Halonen, K., Mononen, M. E., Jurvelin, J. S., Töyräs, J., Salo, J. y Korhonen, R. K. (2014). Deformation of articular cartilage during static loading of a knee joint – Experimental and finite element analysis. *Journal Of Biomechanics*, 47(10), 2467-2474. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2014.04.013>
- Kedgley, A. E., Saw, T., Segal, N., Hansen, U., Bull, A. M. J. y Masouros, S. D. (2018). Predicting meniscal tear stability across knee-joint flexion using finite-element analysis. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 27(1), 206-214. <https://doi.org/10.1007/s00167-018-5090-4>
- Kim, C. N. T., Binh, C. X., Dung, V. T. y Toan, T. V. (2023). Design and mechanical evaluation of a large cranial implant and fixation parts. *Interdisciplinary Neurosurgery*, 31, 101676. <https://doi.org/10.1016/j.inat.2022.101676>
- Li, L., Yang, L., Zhang, K., Zhu, L., Wang, X. y Jiang, Q. (2020). Three-dimensional finite-element analysis of aggravating medial meniscus tears on knee osteoarthritis. *Journal Of Orthopaedic Translation*, 20, 47-55. <https://doi.org/10.1016/j.jot.2019.06.007>
- Liu, W., Sun, X., Liu, W., Liu, H., Zhai, H., Zhang, D., y Tian, F. (2022). Finite element study of a partial meniscectomy of a complete discoid lateral meniscus in adults. *Medical Engineering y Physics*, 107, 103855. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2022.103855>
- Mao, S., Yang, L., Wang, F., He, P., Wu, X., Ma, X. y Luo, Y. (2023). Design and biomechanical analysis of patient-specific porous tantalum prostheses for knee joint revision surgery. *International Journal Of Bioprinting*, 9(4), 735. <https://doi.org/10.18063/ijb.735>
- Mendonça, C. J. A., Da Rocha Guimarães, R. M., Pontim, C. E., Gasoto, S. C., Setti, J. A. P., Soni, J. F. y Schneider, B. (2023). An Overview of 3D Anatomical Model Printing in Orthopedic Trauma Surgery. *Journal Of Multidisciplinary Healthcare*, 16, 875-887. <https://doi.org/10.2147/jmdh.s386406>
- Michaud, F., Luaces, A., Mouzo, F. y Cuadrado, J. (2024). Use of patellofemoral digital twins for patellar tracking and treatment prediction: comparison of 3D models and contact detection algorithms. *Frontiers In Bioengineering And Biotechnology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1347720>
- Nalbone, L., Monac, F., Nalbone, L., Ingrassia, T., Ricotta, V., Nigrelli, V., Ferruzza, M., Tarallo, L., Porcellini, G. y Camarda, L. (2023). Study of a constrained finite element elbow prosthesis: the influence of the implant placement. *Journal Of Orthopaedics And Traumatology*, 24(1). <https://doi.org/10.1186/s10195-023-00690-x>
- Norli, M. H. M., Sukimi, A. K. A., Ramlee, M. H., Mahmud, J. y Abdullah, A. H. (2024). Static Structural Analysis on Different Topology Optimization Transtibial Prosthetic Socket Leg. *International Journal Of Technology*, 15(2), 455. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v15i2.6711>
- Patiño, J. F. R., Isaza, J. A., Mariaka, I. y Zea, J. A. V. (2013). Unidades Hounsfield como instrumento para la evaluación de la desmineralización ósea producida por el uso de

- exoprótesis. *Revista Facultad de Ingenieria-universidad de Antioquia*, 66(66), 159-167.
<http://www.redalyc.org/pdf/430/43027041012.pdf>
- Peña, E., Calvo, B., MartíNez, M. Á. y Doblaré, M. (2006). A three-dimensional finite element analysis of the combined behavior of ligaments and menisci in the healthy human knee joint. *Journal Of Biomechanics*, 39(9), 1686-1701.
<https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2005.04.030>
- Plesec, V. y Harih, G. (2023). Development of a Generic Numerical Transtibial Model for Limb-Prosthesis System Evaluation. *Applied Sciences*, 13(4), 2339.
<https://doi.org/10.3390/app13042339>
- Schaffarzick, D., Entacher, K., Rafolt, D. y Schuller-Götzburg, P. (2022). Temporary Protective Shoulder Implants for Revision Surgery with Bone Glenoid Grafting. *Materials*, 15(18), 6457. <https://doi.org/10.3390/ma15186457>
- Siddiq, A. B., Clegg, D., Jansen, T. y Rasker, J. J. (2022). Emerging and New Treatment Options for Knee Osteoarthritis. *Current Rheumatology Reviews*, 18(1), 20-32.
<https://doi.org/10.2174/157339711766621116111738>
- Tauviqirrahman, M., Ammarullah, M. I., Jamari, J., Saputra, E., Winarni, T. I., Kurniawan, F. D., Shiddiq, S. A. y Van Der Heide, E. (2023). Analysis of contact pressure in a 3D model of dual-mobility hip joint prosthesis under a gait cycle. *Scientific Reports*, 13(1).
<https://doi.org/10.1038/s41598-023-30725-6>
- Wang, B., Ke, W., Hua, W., Zeng, X. y Yang, C. (2020). Biomechanical Evaluation and the Assisted 3D Printed Model in the Patient-Specific Preoperative Planning for Thoracic Spinal Tuberculosis: A Finite Element Analysis. *Frontiers In Bioengineering And Biotechnology*, 8. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00807>
- Webb, J. D., Blemker, S. S. y Delp, S. L. (2012). 3D finite element models of shoulder muscles for computing lines of actions and moment arms. *Computer Methods In Biomechanics And Biomedical Engineering*, 17(8), 829-837.
<https://doi.org/10.1080/10255842.2012.719605>
- Yuan, B., Mo, Z., Zhang, K., Xu, Z., Yan, S. y Zeng, J. (2023). The effect of different posterior inclinations of tibial component on tibiofemoral contact pressures after unicompartmental knee arthroplasty. *Journal Of Orthopaedic Surgery And Research*, 18(1). <https://doi.org/10.1186/s13018-023-04222-5>
- Zhang, K., Li, L., Yang, L., Shi, J., Zhu, L., Liang, H., Wang, X., Yang, X. y Jiang, Q. (2019). The biomechanical changes of load distribution with longitudinal tears of meniscal horns on knee joint: a finite element analysis. *Journal Of Orthopaedic Surgery And Research*, 14(1). <https://doi.org/10.1186/s13018-019-1255-1>
- Zhu, J., Hu, J., Zhu, K. Y., Ma, X., Wang, Y., Xu, E., Huang, Z., Zhu, Y. y Zhang, C. (2023). Design of 3D-printed prostheses for reconstruction of periacetabular bone tumors using topology optimization. *Frontiers In Bioengineering And Biotechnology*, 11.
<https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1289363>

Zhu, X., Sun, K., Xia, X., Chen, Y., Sun, A. y Chen, X. (2023). A preliminary biomechanical study on trachea reconstruction surgery using the clavicular periosteum. *Frontiers In Bioengineering And Biotechnology*, 11. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1117483>

Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L. y Zhu, J. (2013). *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. Butterworth-Heinemann.

CONTRIBUCIONES DE AUTORES/AS, FINANCIACIÓN Y AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos: El presente texto nace de los estudios desarrollados en el programa de doctorado de Investigación en Tecnologías Industriales por la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED). En agradecimiento a Miryam B. Sánchez Sánchez y María Teresa Carrascal Morillo así como a la ETSI de la UNED por el apoyo a la acción 2024-ETSII-UNED-04: “Engranajes y Biomecánica”.

AUTORAS:**Lourdes Segovia-García**

Universidad Nacional de Educación a Distancia.

Graduada en Ingeniera Técnica Industrial especialidad de Mecánica y Licenciada en Ingeniería Industrial por la Universidad de Salamanca. Tiene un Máster en Investigación en Tecnologías Industriales por la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED). Es miembro del grupo de investigación Sinergia Digital de la Corporación Universitaria de Asturias. Actualmente colabora como docente online en la Corporación Universitaria de Asturias y en el Instituto Europeo de Posgrado. Desempeña el cargo de directora académica en el Instituto Europeo de Posgrado. Actualmente, es postulante a Doctorado en Investigación en Tecnologías Industriales en la línea de investigación de biomecánica, por la UNED y postulante al Doctorado en Educación en la línea de investigación de Educación y TIC por la Universidad Europea de Monterrey.

lsegovia23@alumno.uned.es

Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0001-9549-440X>

Google Scholar: <https://scholar.google.es/citations?user=8QJMeSQAAAAJ&hl=es>

Miryam Beatriz Sánchez Sánchez

Universidad Nacional de Educación a Distancia.

Ingeniera Técnico Industrial (1998-2001) y Superior en Automática y Electrónica Industrial (2001-2003) por ICAI. Máster en Investigación en Tecnologías Industriales y Doctor en Tecnologías Industriales (2013) con sobresaliente "cum laude" y premio extraordinario de doctorado por la UNED. Experto en desarrollo de modelos de cálculo de engranajes cilíndricos. Experiencia profesional como Ingeniero en I+D en SAC MAKER, S.A. (2003-2004) y en EADS ASTRIUM CRISA (2004-2008). Experiencia en gestión educativa como Secretaria del Máster en Investigación en Tecnologías Industriales (2014-2017), del Máster en Ingeniería Industrial (2019-actualidad), y Secretaria adjunta de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales en la UNED (2019-actualidad).

msanchez@ind.uned.es

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5476-6018>

Google Scholar: <https://scholar.google.es/citations?user=pQOrsGwAAAAJ&hl=es>

Scopus: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55303561300>