



Artículo de investigación

Control del mallado con FEM para caracterizar una junta mecánica en aplicaciones de investigación y prototipaje

Mesh control with FEM to characterize a mechanical joint in research and prototyping applications

Jesús Vicente González-Sosa , Enrique Ávila-Soler 

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, Av. San Pablo 420, Col. Nueva El Rosario, Alcaldía Azcapotzalco, C.P. 02128, Ciudad de México

Autor de correspondencia: Jesús Vicente González-Sosa, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, Av. San Pablo 420, Col. Nueva El Rosario, Alcaldía Azcapotzalco, C.P. 02128, Ciudad de México. E-mail: jvgs@azc.uam.mx.
ORCID: 0000-0002-1325-0266

Recibido: 17 de Agosto del 2023

Aceptado: 22 de Enero del 2024

Publicado: 5 de Febrero del 2024

Resumen. - Una de las características clave de los sellos mecánicos es lograr una estanqueidad efectiva entre dos piezas mecánicas para evitar el desplazamiento y las fugas de refrigerante en aplicaciones industriales. Actualmente la mayoría de estos elementos se producen utilizando neopreno, cartón comprimido, papel alquitranado, grafito laminado, por lo que buscamos producirlos utilizando materiales ABS y PLA. Para el diseño se utilizó software CAD con licencia educativa destinada a educadores e investigadores, posteriormente se realiza un análisis de elementos finitos según las especificaciones del producto. En este sentido, se ha identificado la importancia del FEM como herramienta de evaluación en el contexto de esta tendencia de utilizar tecnologías innovadoras para la investigación. Como parte de los resultados, los datos obtenidos permiten seleccionar tanto las variables como las propiedades físicas de la biela y pueden ser utilizados para desarrollar proyectos y estudios de esta naturaleza aplicables en casos de estudio relacionados con la Ingeniería mecánica, mecatrónica, industrial y electrónica. Finalmente, las variables Factor de Seguridad (FS), Von Mises Stress (VM) y YZ Stress, se analizan después de la simulación mediante FEM, proporcionando un rango de valores para su uso en aplicaciones de ingeniería con diferentes técnicas en las que se utilizan bielas, FS [0,55, 12,26], VM [1,63, 36,45], YZ [-1,36, 10,13]. En cuanto a los demás resultados presentados en este estudio, el coeficiente de correlación se utiliza como parte estadística con gráficos para evaluar la simulación, la dependencia de variables y parámetros relevantes para el estudio de caso, por lo que se observó una fuerte relación entre las variables; esfuerzo plano, deformación, desplazamiento y el esfuerzo de Von Mises, cuyos valores oscilan entre 0,87 y 0,99, mostrando una fuerte relación entre estas variables y, para las demás, se debe considerar mejorar la relación y aumentar el coeficiente.

Palabras clave: Caracterización; Elemento finito; Manufactura aditiva; Impresión 3D; Simulación computacional.

Abstract. One of the key features of mechanical seals is to achieve effective sealing between two mechanical parts to prevent displacement and coolant leakage in industrial applications. Currently most of these elements are produced using neoprene, compressed cardboard, tar paper, laminated graphite, so we sought to produce them using ABS and PLA materials. For the design we used CAD software with educational license intended for educators and researchers, then a finite element analysis is performed according to the specifications of the product. In this sense, the importance of FEM as an evaluation tool has been identified in the context of this trend of using innovative technologies for research. As part of the results, the data obtained allow the selection of both variables and physical properties of the connecting rod and can be used to develop projects and studies of this nature applicable in case studies related to mechanical, mechatronic, industrial and electronic engineering. Finally, the variables Factor of Safety (FS), Von Mises Stress (VM) and YZ Stress, are analyzed after simulation by FEM, providing a range of values for use in engineering applications with different techniques in which connecting rods are used, FS [0.55, 12.26], VM [1.63, 36.45], YZ [-1.36, 10.13]. As for the other results presented in this study, the correlation coefficient is used as a statistical part with graphs to evaluate the simulation, the dependence of variables and parameters relevant to the case study, so a strong relationship was observed between the variables; plane stress, deformation, displacement and Von Mises stress, whose values range between 0.87 and 0.99, showing a strong relationship between these variables and, for the others, it should be considered to improve the relationship and increase the coefficient.

Keywords: Characterization; Finite element; Additive manufacturing; 3D printing; Computational simulation.





1. Introducción

Una de las características que presentan las juntas mecánicas es la función que realizan al momento de ejecutar una acción en la aplicación determinada, por lo que en muchas ocasiones no se contemplan análisis previos a la fabricación de las juntas para una acción determinada, considerando su uso como parte elemento de unión. Con ello se plantea llevar a cabo un estudio con el Método de Elementos Finitos (FEM) para obtener los parámetros viables y diseño óptimo del elemento. Se analizará un diseño básico de una junta aplicando diferentes cargas en un punto de acción, para la junta mecánica, realizando las modificaciones pertinentes de acuerdo con el diseño, parámetros y variables en la simulación de FEM, con este análisis se obtendrán datos que se utilizarán para futuras investigaciones y aplicaciones de las juntas mecánicas en las áreas de investigación y prototipaje. En la fabricación de las juntas se utilizan equipos de manufactura aditiva con impresión 3D, utilizando materiales como el ABS y PLA.

En las simulaciones aplicando FEM, se obtienen modelos con variables modales que abordan mejoras cuando se aplican de forma adecuada en la optimización de las variables [1]. En el presente trabajo se identifican las variables pertinentes para el desarrollo de un análisis y simulación con mayor precisión en donde los resultados sean satisfactorios para la aportación de la ingeniería aplicada.

Una característica esencial de los FEM radica en ser modular el efecto de las cargas por medio de mejoras en la cantidad de nodos y elementos dentro de la simulación [2]. Con respecto a la impresión 3D, utilizada en este trabajo, es importante tomar en cuenta las propiedades mecánicas de cada uno de los materiales utilizados [3], para favorecer las condiciones de

simulación con los parámetros considerados al momento de realizar las simulaciones.

En cada estudio realizado con FEM se debe considerar si el modelo y su comportamiento es lineal o no lineal [4], para identificar la aplicación tanto teórica como de simulación. Al realizar los modelos en tres dimensiones y analizarlos con FEM, se puede modelar el efecto mecánico del espécimen de trabajo [5], reduciendo los tiempos de análisis comparándolo con los procesos experimentales y teóricos. Además, la importancia de analizar de manera específica el comportamiento de los materiales [6], mostrando el efecto de las variables físicas que se deben evaluar para los casos de estudio o especímenes de prueba [7]. Lo cual, proporciona perspectivas sustanciales del comportamiento mecánico de los modelos en estudio [8].

La comparación de las variables que se deben seleccionar para su uso en simulaciones tiene la importancia de lograr, a futuro, la optimización de los especímenes [9], ya sea para elegir otro material o modificar los diseños en un espécimen de prueba, los investigadores a la fecha trabajan en mejorar la teoría con los softwares de simulación [10], identificando las aplicaciones en ingeniería [11]. Es indudable que el FEM proporciona aproximaciones, por medio de sistemas computacionales, en el análisis de un espécimen o sistema [12], que se pueden comparar con la experimentación o modelos matemáticos para fortalecer la investigación en ingeniería [13].

Realizando el uso de las simulaciones por medio de FEM se logran desarrollar permutaciones [14], con el propósito de mejorar el aprovechamiento del software modificando el tipo de mallado y la cantidad de elementos para optimizar los resultados [15]. Es por ello que en [16] al igual que [17] mantienen latente el hecho



de mejorar las condiciones de procesamiento en las simulaciones para optimizar el resultado en cada uno de los casos de estudio que les compete.

Utilizar aplicaciones tangibles como parte de los casos de estudio, tiene un acercamiento, virtual, por lo que se ha encontrado un área de oportunidad en las simulaciones con FEM [18], fortaleciendo los conceptos experimentales para ofrecer alternativas de solución al problema que se presente en los requerimientos de los modelos de prueba, manteniendo la cercanía con las aplicaciones de la ingeniería [19].

El uso de algoritmos para la aplicación de FEM utiliza un sistema determinístico para optimizar las soluciones y eliminar en lo posible las incertidumbres presentes en las variables por analizar de acuerdo con [20], de aquí la importancia de fomentar el uso de las simulaciones con FEM para disminuir los incidentes al momento de realizar evaluaciones en modelos de prueba compartiendo opiniones con [21]. Los resultados que muestran las simulaciones de FEM son el reflejo de aplicar de forma clara los conceptos generales y específicos en cada acción para el análisis de los especímenes como lo menciona [22].

En la mayor cantidad de los estudios realizado con los simuladores FEM, se han encontrado parámetros físicos como lo es la deformación y las tensiones, que se observan en [23], tomando en consideración aplicaciones específicas como las estructuras identificadas por [24], partes del cuerpo humano, pies, tobillos, cadera, huesos, entre otros, como parte de los conceptos para la aplicación de las simulaciones [25]. Por lo mencionado se toma como una herramienta fundamental para el análisis de especímenes con aplicación en ingeniería.

En los siguientes apartados se menciona la forma en la cual se lleva a cabo el proceso para la evaluación con el simulador al espécimen de prueba y el respectivo análisis.

2. Metodología

En esta sección se describen las etapas del trabajo en cuestión, para la evaluación de la junta mecánica con FEM en la aplicación de prototipaje e investigación, obteniendo datos importantes para futuras aplicaciones en la ingeniería.

En la figura 1, se observa el procedimiento para realizar el análisis de la junta y la forma en la cual se estructura este trabajo de investigación.



Figura 1. Proceso para el desarrollo de la investigación y análisis de una junta mecánica con FEM.

En los siguientes párrafos se describe la metodología plasmada en la figura 1.



2.1 Etapa 1 del proceso en la metodología.

Caso de estudio: para este trabajo de investigación se utiliza como espécimen de prueba una junta mecánica, la cual tendrá aplicaciones de prototipaje e investigación y ofrecer información a la comunidad académica interesada en este ámbito. La junta mecánica es un elemento de unión, la cual debe ser resistente a efectos de impermeabilidad y esfuerzos en las diferentes áreas en donde se aplica una carga constante. La acción principal de la junta es generar un sello entre dos elementos.

Propiedades: las propiedades que caracterizan a las juntas mecánicas son la temperatura y la presión a la que son sometidas cuando están actuando en la aplicación determinada.

Variables: las variables que se analizan dependerán de la función que se ejecute al momento de utilizar la junta mecánica; algunas de las que se incluirán en este trabajo son: a) cargas o presión, b) nodos, c) elementos, d) geometría, entre otros, que se analizarán como parte de las tendencias de mejora en el espécimen de prueba, junta mecánica.

2.2 Etapa 2 del proceso en la metodología.

Modelado en CAD: para obtener el modelo de análisis, se parte de un bosquejo y posteriormente se lleva a cabo el dibujo en un modelador de CAD, que permite estructurar las variables desde el punto de vista paramétrico y con ello lograr las modificaciones pertinentes, cuando se requieren en las etapas posteriores de mejora.

Simulación FEM: la simulación mediante FEM permite establecer las condiciones de operabilidad o funcionalidad de un objeto, para este trabajo, una junta mecánica, en donde se obtienen datos para validar las sollicitaciones mecánicas del espécimen de prueba, con las condiciones previstas para su uso. En este caso se utilizarán 5 cargas de prueba para obtener los datos de la junta mecánica.

Aunado a esto se ha considerado el uso de los modelos matemáticos en función de un análisis de elasticidad plano, tomando en cuenta las ecuaciones (1) y (2).

$$u = \begin{Bmatrix} u(x, y) \\ v(x, y) \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$\delta = [U_1 \ V_1 \ U_2 \ V_2 \ \dots \ U_n \ V_n]^T \quad (2)$$

Considerando en todo momento las interpolaciones de las deformaciones de acuerdo con las ecuaciones (3), (4) y (5).

$$u = \sum N_i U_i \quad (3)$$

$$v = \sum N_i V_i \quad (4)$$

En donde, N_i son las funciones de interpolación de cada uno de los elementos para las

coordenadas x, y, analizados en los campos U y V.

Su expresión en forma matricial es:



$$u = N\delta = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & \dots & 0 & N_n & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & \dots & 0 & N_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

De esta manera se lleva a cabo la interpolación para realizar la mejora en cada una de las simulaciones con la herramienta computacional utilizada en el FEM involucrado con el caso de

estudio correspondiente a la junta mecánica, que a continuación se describe.

En la figura 2, se observa de manera general el mallado al aplicar FEM para la junta mecánica.

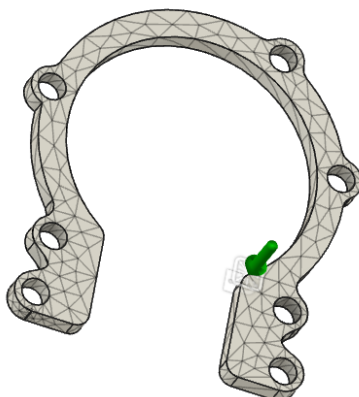


Figura 2. Mallado por medio de FEM

En la figura 3 se tienen las simulaciones correspondientes a las cargas designadas, 5, 10,15, 20 y 25 MPa.

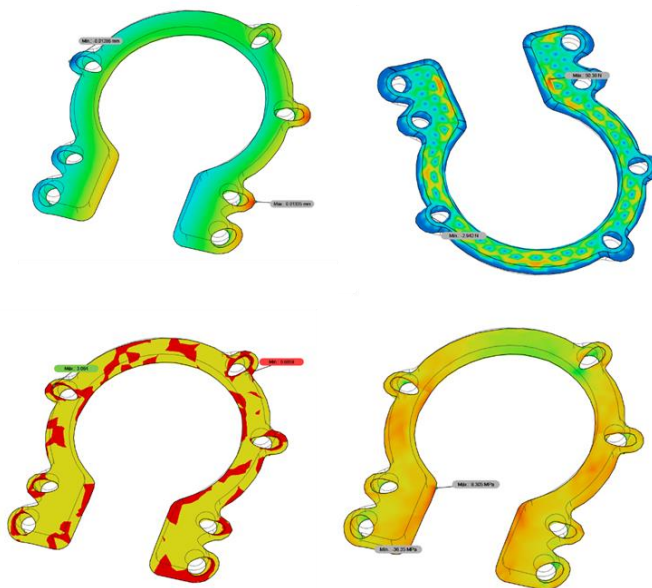


Figura 3. FEM para las cargas designadas.



Obtención de datos: los datos después de aplicar FEM para cada uno de los casos se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Datos obtenidos de la simulación con FEM

	Carga representada en Presión				
	5 MPa	10MPa	15MPa	20MPa	25MPa
Factor de seguridad	2.743	1.372	0.9145	0.6859	0.5487
	12.26	6.129	4.086	3.064	2.452
Von Mises [MPa]	1.632	3.263	4.895	6.526	8.158
	7.29	14.58	21.87	29.16	36.45
Deformación [%]	0.0008196	0.001639	0.002459	0.003278	0.004098
	0.005236	0.01047	0.01571	0.02094	0.02618
Desplazamiento [mm]	0	0	0	0	0
	0.009918	0.01984	0.02975	0.03967	0.04959
Esfuerzo plano [MPa]	-1.364	-2.729	-4.093	-5.458	-6.822
	2.026	4.052	6.078	8.105	10.13

La tabla 1 está mostrando desde el punto mínimo hasta el máximo de acuerdo con cada uno de los parámetros físicos analizados en la simulación FEM.

2.3 Etapa 3 del proceso en la metodología

Optimización: esta parte de la etapa consiste en mejorar las condiciones en la simulación FEM

para la junta mecánica y con ello mostrar las nuevas alternativas de evaluación y análisis de los especímenes de prueba.

Para la optimización de los especímenes, junta mecánica, se tienen diferentes variables a considerar para obtener la mejora, lo cual se identifica en la tabla 2.

Tabla 2. Variables de optimización.

Variables	Descripción	Efecto
Material	Cambiar y realizar juntas con diferentes materiales utilizados en la manufactura aditiva para enriquecer las simulaciones, obteniendo una mayor cantidad de datos en la evaluación del producto.	Un porcentaje mayor de variables y parámetros para mejorar las condiciones de funcionalidad en la aplicación de la junta mecánica.
Rediseño	Dimensionamiento en el área de la junta, cumpliendo con las mismas sollicitaciones físicas para su función.	Mejora sustancial en cantidad de material a utilizar, obteniendo los mismos resultados en las simulaciones de FEM.
Parámetros de simulación	Establecer nuevas cantidades de nodos y elementos dentro de las simulaciones para lograr un efecto satisfactorio en el análisis del espécimen.	El mallado que se obtiene en las simulaciones tendrá una dependencia con las variables mencionadas, permitiendo mejorar el proceso de simulación para FEM.



Tendencias: lo relacionado con trabajos a futuro en esta línea de investigación y desarrollo, se enfocan en contar con una mayor cantidad de productos, especímenes de prueba, y evaluarlos con FEM, con el propósito de establecer estudios concretos para la funcionalidad de un producto. Por otra parte, los datos obtenidos sirven para el diseño y rediseño de productos para un uso en específico dentro de la ingeniería y fomentar su uso como prototipos en aplicaciones de investigación.

Para generalizar la metodología y lograr la repetibilidad del proceso en simulaciones de otros especímenes de prueba en las diferentes áreas de la ingeniería, se muestra el diagrama de flujo en la figura 4, el cual contempla las tres etapas descritas como parte trascendental en esta investigación, mostrando tomas de decisión para la adquisición de datos, control de variables, ajuste de modelos 3D, identificación de mejoras en las simulaciones por FEM y asignación de nuevas alternativas para mejorar la condición física y experimental del espécimen.

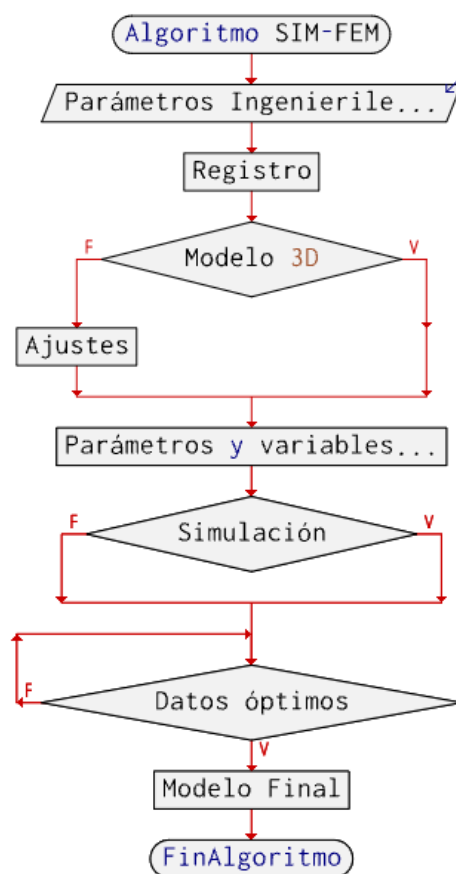


Figura 4. Diagrama de flujo del proceso para el desarrollo de las simulaciones.

El uso de los algoritmos, como el diagrama de flujo mostrado en la figura 4, tiene la característica de ser robusto y permitir la retroalimentación para aplicar de manera correcta los modelos matemáticos inmersos en

las simulaciones realizadas con FEM, compaginando con la información que ofrecen los investigadores en el trabajo [26], sin embargo, es necesario asimilar que los modelos matemáticos son el resultado de identificar de



manera correcta las propiedades físicas que permiten conocer las sollicitaciones de los ensayos mecánicos, reflejados en la parte experimental, traducido a la simulación con FEM como se ha identificado con [27].

3. Resultados y Discusiones

Como parte de los resultados habrá que resaltar que los datos obtenidos permiten generar una serie de gráficas para identificar la tendencia de mejora para el caso de estudio y ser utilizado de manera satisfactoria como prototipo en investigación y aplicaciones académicas. La mayor cantidad de investigaciones de esta índole ofrecen diagramas y gráficas con los datos obtenidos a partir de llevar a cabo las simulaciones, por ejemplo, [28] establece que la

carga límite de extracción en un espécimen aumenta con el incremento de la relación de esbeltez y la densidad relativa. Por otro lado, como valor agregado se tiene la experiencia de [29], indicando que un parámetro importante en los desarrollos experimentales y por ende en las simulaciones, es la velocidad en la ejecución de las simulaciones con cada uno de los especímenes. Las simulaciones tienen la importancia de ofrecer información en dos y tres dimensiones con una gama de colores que favorecen la interpretación de los fenómenos físicos, cuando se aplican cargas a los especímenes de prueba [30]. En la tabla 3 se observan los resultados representativos de las simulaciones aplicadas a la junta mecánica, con los valores óptimos en el caso de estudio.

Tabla 3. Valores óptimos extraídos de la simulación con FEM para la junta mecánica.

	Factor de seguridad	Von Mises	Deformación	Desplazamiento	Esfuerzo Plano
5 [kN]	-----	-----	0.0008196	0.009918	-----
10 [kN]	-----	-----	-----	-----	-----
15 [kN]	0.9145	-----	-----	-----	-----
20 [kN]	-----	-----	-----	-----	8.105
25 [kN]	-----	36.45	-----	-----	-----

La interpretación que se da a la tabla 3, es sobre los valores óptimos que ofrece la simulación al momento de hacer coincidir las variables predominantes de la junta mecánica, como lo es el mallado, el tiempo de ejecución de la simulación y niveles de convergencia. Se observa en la tabla 3 que los valores representativos los tiene la simulación con 5 kN para el

desplazamiento y la deformación, para el esfuerzo plano son 20 kN, Von Mises 25 kN y Factor de seguridad con 15 kN.

En la figura 5 se tienen gráficas representando los datos obtenidos en la simulación por medio de FEM.

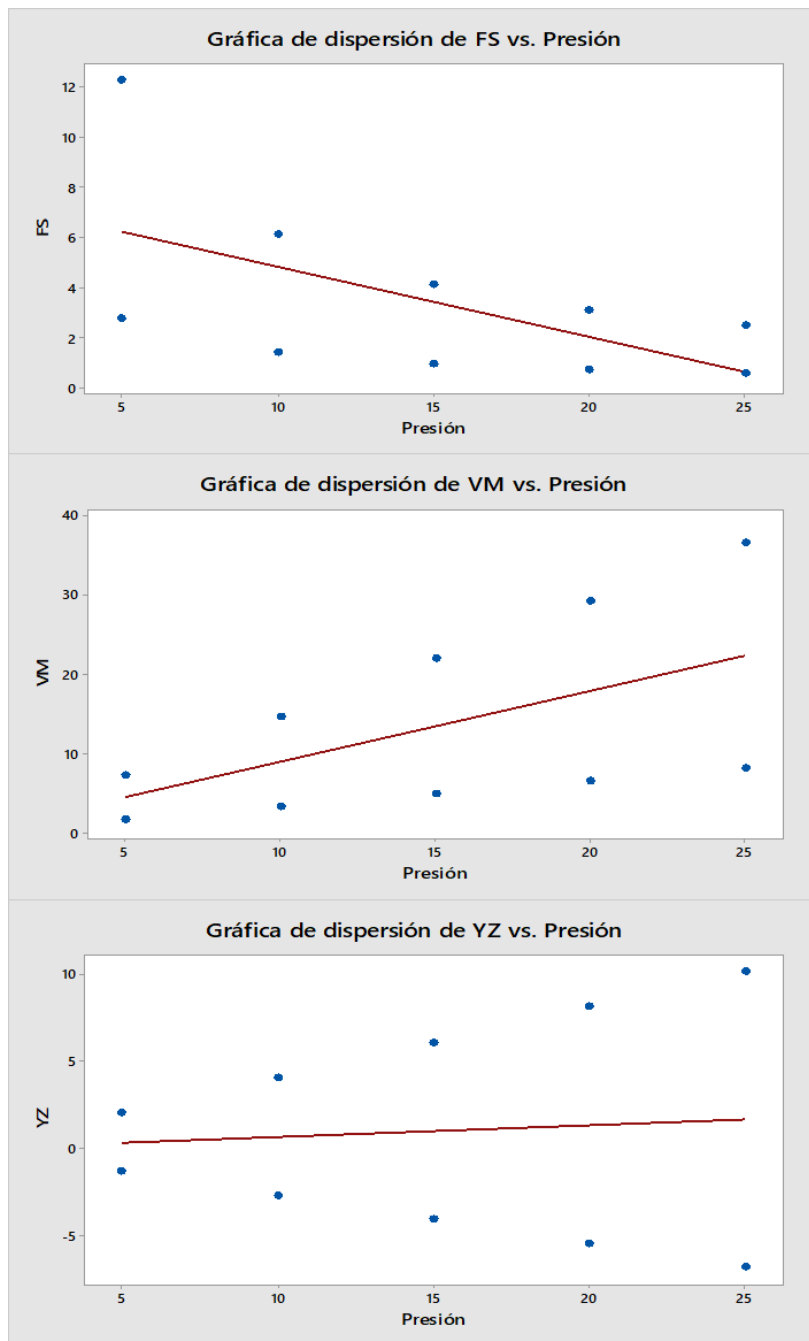


Figura 5. Gráficos de dispersión como resultados

En la figura 5 se tienen representadas los datos de las simulaciones que relacionan la presión ejercida sobre la junta mecánica, con respecto al factor de seguridad (FS), esfuerzo Von Mises (VM) y esfuerzo en el plano de aplicación de acuerdo con el modelador de CAD (YZ).

Los resultados muestran que el FS es satisfactorio con la línea de tendencia mientras que las demás gráficas tienen mayor dispersión con respecto a la línea de mejora, indicando que se deben desarrollar nuevas simulaciones con



parámetros cuya sollicitación mostrara la optimización de los especímenes de prueba.

En la tabla 4, se muestran los valores del coeficiente de correlación, con la finalidad de establecer la relación que existe con cada una de las variables identificadas en la figura 5.

Tabla 4. Valores del coeficiente de correlación para las variables en los resultados de las simulaciones con FEM.

	Presión	FS	VM	DZ	DF
FS	-0.582	----	----	----	----
VM	0.558	0.028	----	----	----
DZ	0.392	0.163	0.982	----	----
DF	0.505	0.073	0.998	0.992	----
YZ	0.083	0.376	0.873	0.949	0.902

Con resultados observados en la tabla 4, se identifican las relaciones fuertes entre las variables, indicando con ello los puntos críticos de estudio para futuras investigaciones, las relaciones más fuertes se ubican entre DZ-VM, DF-VM, DF-DZ, YZ-DZ, YZ-DF y YZ-VM, cuyo valor esta entre 0.873 y 0.998, posteriormente se tiene FS-Presión, VM-Presión, DF-Presión, con relación moderada, con valores entre 0.505 y -0.582, considerada como área de oportunidad para realizar nuevas simulaciones y mejorar el coeficiente para estos casos. Las demás relaciones por el momento se descartan dado el valor menor en donde no existe relación entre las variables.

El trabajo [31], demuestra el uso eficiente de FEM como herramienta para la valoración de la rigidez en elementos de unión, lo que se interpreta como una aplicación con éxito para conformar el estudio de parámetros con las técnicas de simulación. Por ejemplo, para [32] se tiene la característica de que los modelos se deben resolver de forma lineal en cada uno de los pasos en el tiempo, demostrando que la solución es discreta y convergente en su caso de estudio, ello permite estimar las tendencias en otros casos de estudio relacionadas con las variables utilizadas en cada simulación. En esta investigación se formuló un proceso para mejorar las condiciones de una junta mecánica y obtener

datos para la mejora continua del espécimen, el cual se modifica de acuerdo con las nuevas técnicas aplicables en cada una de las simulaciones, presentadas igualmente por los autores de [33], cuyo parámetro primordial es la convergencia. En el caso de [34], se logra apreciar que los parámetros de mejora se interpretan cada vez que se lleva a cabo una iteración en la simulación por lo que es interesante utilizar las condiciones óptimas para el caso de estudio.

Una característica que se observa en la evaluación de modelos 3D, es la incertidumbre de la aplicación de las cargas y su efecto en todo el entorno, por lo que se ha considerado como un problema en las simulaciones por medio de FEM como se observa en el trabajo [35], aunado a esto [36] que los modelos de aprendizaje automáticos como lo son las simulaciones permiten resolver problemas con valores límites, a su vez fortalece el proceso que permite mejorar las restricciones para análisis a futuro, en este caso, la junta mecánica tiene la opción de anidar variables físicas en la aplicación de las simulaciones para obtener los valores límite que se observaron en los datos obtenidos por el análisis. En la tabla 5, se describen las características físicas beneficiadas con el proceso de la simulación con FEM, lo cual permite estructurar áreas de oportunidad.



Tabla 5. Características físicas beneficiadas al aplicar simulación con FEM.

Característica	Descripción
Resistencia a la tracción	Implica mejorar las condiciones para aplicar una mayor cantidad de cargas que se asimilen al efecto que sufre el espécimen al someterse a la deformación plástica.
Dureza	La simulación permite utilizar el control de diferentes materiales en donde se puede aplicar, en su momento, recubrimientos protectores y mejorar los resultados del procesamiento.
Tolerancia a la temperatura	Analizar materiales especiales que se consideren estables y resistentes a los cambios de temperatura.
Flexibilidad	Incorporar el análisis de materiales con una condición robusta de elasticidad.
Estanqueidad	Capacidad de sellado para evitar fugas, controlando las cargas aplicadas en cada una de las simulaciones.

Llevar a cabo un proceso de modelado y simulación por FEM da pauta a dar pasos dentro de la optimización de estos mismos con sistemas computacionales que son empleados en diferentes áreas de la ingeniería e industria por lo que es de gran interés el formular líneas de investigación enfocadas con este tipo de herramientas para evaluar, en este caso, una junta mecánica, como cualquier otro espécimen de prototipaje, se concuerda con [37] y [38], identificando que los FEM tienen gran coincidencia con procesos experimentales y que deben utilizarse de la mano para reducir los errores en los resultados que se encuentran dentro del 10%. En referencia a [39], la estructura de una junta puede evaluarse con FEM en subestructuras para focalizar las secciones de mayor incidencia hacia la falla, lo cual representa una tendencia a utilizar el este caso de estudio y orientar la línea de investigación de acuerdo con los resultados obtenidos en las simulaciones de este trabajo de investigación.

En el trabajo en cuestión, simulación FEM para junta mecánica, se encontró que las precisiones de simulación en el desplazamiento son similares en cada una de los ensayos, lo cual tienen

coincidencias con otras aplicaciones de FEM en procesos de manufactura, en donde las tensiones tienen que validarse con experimentación teórica [40], [41], y asimismo intensificar la coincidencia en resultados de esta índole para las aplicaciones de ingeniería, en conjunto con la simulación desarrollada en esta investigación.

La mayor cantidad de los resultados que se muestran en este trabajo, al igual que otras investigación se optimizan los sistemas de ecuaciones polinómicas que se presentan en la simulación, como lo reportan [42], las cuales caracterizan de manera precisa el fenómeno experimental, que ya se ha mencionado, forma parte primordial para compaginar los resultados de las simulaciones en cada caso de estudio[43], además, se ha observado que conforme se optimiza el espécimen de prueba aumenta la probabilidad de obtener aplicaciones exitosas con los casos de estudio, ello lo presentan en [44], lo cual tiene razón de ser para realizar las mejoras en este trabajo.

El análisis de la junta mecánica con FEM, se debe comparar con datos experimentales en donde exista una variación de la fuerza o presión axial,



como se realizó en este trabajo, con la finalidad de obtener datos que permitan una mayor durabilidad en la junta con respecto a la fatiga [45], [46], además, de extrapolar las tensiones e identificar los puntos críticos en la aplicación de las cargas. Durante las simulaciones con FEM, se toma la decisión de establecer una sola área de acción y con ello garantizar que se aplican de manera precisa en el espécimen, con esto se puede dar indicios a nuevas evaluaciones con uniones mecánicas, como lo son las juntas, para las aplicaciones en investigación y prototipaje, como parte del objetivo de este trabajo.

Parte de las limitaciones que existen en este tipo de investigaciones es la diversidad de aplicaciones para la junta mecánica, la cual depende del proyecto el cual se deben utilizar estos elementos para las uniones correspondientes, con respecto a la parte económica para la elaboración de las juntas en materiales plásticos, los autores cuentan con el equipamiento necesario, los consumibles para desarrollar las variantes de los especímenes de prueba que se deben simular para las futuras tendencias de análisis con FEM y experimentalmente.

Es evidente, desde el inicio de esta investigación, que este trabajo esta direccionado hacia las comunidades académicas de investigación y desarrollo de proyectos, en donde se involucra el prototipaje para cumplir con las solicitudes de sistemas aplicables a la ingeniería.

Por último, mantener la mejora continua con las simulaciones y los experimentos para lograr la sinergia de lo teórico con lo práctico, desarrollando a futuro líneas de investigación con las herramientas computacionales. Por otro lado, contar con nuevos casos de estudio que den la sinergia con los elementos, parámetros y variables inmersas en la tecnología e innovación en ingeniería.

4. Conclusiones

Cabe recalcar que el uso del FEM como herramienta de análisis de productos con aplicaciones de ingeniería siempre promueve la comprensión de diversos temas, tales como: materiales, diseño, fabricación, etc., de ahí la importancia e interés de desarrollar trabajos e investigaciones en este campo esencialmente en la ingeniería aplicada.

Los resultados obtenidos en este trabajo, como el rango de valores de desplazamiento cuando se aplica carga, de 0.009 a 0.09 mm, proporcionan una guía para seguir avanzando en los estudios de simulación con FEM y el uso de diferentes módulos de mejora que pueden intervenir en la optimización, entre los cuales se tiene: aplicación de diferentes cargas y modificación de elementos en conjunto con el mallado.

El uso de un método en cada simulación permite controlar el proceso y alcanzar tendencias desarrolladas por la comunidad académica en diferentes campos de la ingeniería, entendidas como mejoras en el uso de materiales con base a resultados obtenidos en simulación y con valores mínimos y máximos en propiedades físicas, como los obtenidos en este trabajo y que se mostraron en la tabla 1 y 3.

Una característica importante de la simulación con FEM es que permite ahorrar tiempo realizando el análisis correspondiente, ya que implementarlo mediante pruebas reales conllevaría mayores costos y retrasos excesivos. Se sabe que el FEM, a través de simuladores es un acercamiento visual a los efectos físicos que sufre una probeta al realizar un ensayo, un experimento o una prueba mecánica.

Después de analizar los resultados se tiene la convicción de seguir trabajando en esta línea, para obtener mejoras en las simulaciones cuyos valores permitieron destacar que se debe mejorar



la relación del factor de seguridad (FS) con la deformación (DF) y el desplazamiento (DZ) debido a que la relación, extraída del coeficiente de correlación, es débil con un rango en los valores, -0.058 a 0.0505, que para estudios estadísticos no es funcional y debe mejorarse.

En este estudio se pretende, a futuro, modificar algunos de los parámetros de diseño en la junta, como lo es la geometría, espesor y material, con la finalidad de ir mejorando las características de aplicación de las juntas y obtener una mayor cantidad de datos que puedan utilizar otros investigadores en conjunto con las comunidades académicas para seguir trabajando en esta área de oportunidad.

Como se mencionó en los resultados, la variable que mejor se comportó en las simulaciones fue el factor de seguridad con un valor de 0.91 para el caso de 15 kN y posteriormente el desplazamiento con valor 0.009, mostrando que se deben realizar nuevos estudios en la junta mecánica para mejorar el proceso de simulación y la aplicación de FEM.

Asimismo, se espera aumentar y disminuir la malla en los nodos y elementos de la simulación, con el objetivo de enriquecer los resultados para nuevas aplicaciones en ingeniería.

4. Agradecimientos

Se agradece al proyecto PRODEP clave 22711711, denominado “Fabrica 4.0 para la innovación de productos industriales basado en prototipaje 3D para la formulación de la mejora continua”, con el cual se obtuvieron los modelos de prototipaje para realizar la simulación con FEM.

5. Reconocimiento de autoría

Jesús Vicente González Sosa: Conceptualización; Metodología; Software; Validación; Análisis formal; Investigación; Recursos; Curación de datos; Borrador original; Revisión y edición; Visualización; Supervisión; Administración del proyecto; Adquisición de fondos. *Enrique Ávila Soler*: Metodología; Validación; Análisis formal; Curación de datos; Revisión y edición; Adquisición de fondos.

Referencias

- [1] W. Vélez, D. Gómez and P. Thomson, “Ajuste de modelos de elementos finitos”, *Dyna*, vol. 76, no. 158, pp. 177-189, 2009. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/10257/10775>
- [2] J. O. Dávalos Ramírez, U. Caldiño Herrera, S. Tilvaldyev, D. Cornejo Monroy and D. Luviano Cruz, “Modelado por elemento finito de la fatiga en engranes de reductores de velocidad con desalineamiento radial y axial”, *Rev. De Ciencias Tecnológicas*, vol. 3, no. 2, pp. 87-95, 2020. <https://doi.org/10.37636/recit.v328795>
- [3] A. Lanzotti, M. Grasso, G. Staiano and M. Martorelli, “The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer”, *Rapid Prototyping Journal*, vol. 25, no. 5, pp. 604-617, 2015. <https://doi.org/10.1108/rpj-09-2014-0135>
- [4] A. Kumar, M. Shukla and A. Kumar, “3D thermal simulation of powder bed fusion additive manufacturing of stainless steel”, *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, vol. 17, pp. 517-524, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12008-023-01234-7>
- [5] J. H. Castorena-González, F. Almeraya-Calderon, J. L. Almaral-Sánchez, J. A. Calderón-Guillén, C. Gaona-Tiburcio and A. Martínez-Villafañe, “Análisis con elemento finito de los esfuerzos expansivos por corrosión en las estructuras de concreto reforzado”, *Ingeniería Investigación y Tecnología*, vol. 12, no. 1, pp. 1-7, 2011. <https://doi.org/10.22201/ii.25940732e.2011.12n1.001>
- [6] C. Pyo, E. Ha, Y. Kim and J. Kim, “Study on the Estimation of Mechanical Properties with Porous



- Rate using the Representative Volume Element Method”, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 22, no. 6, pp 76-81, 2023. <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2023.22.06.076>
- [7] S. Luo, Y. Zhang, J. Shen and Z. Li, “Finite Element Model Updating of Steel Arch Bridge Based on First-Order Mode Test Data”, *Shock and Vibration*, pp 1-11, 2023. <https://doi.org/10.1155/2023/9326195>
- [8] D. Maya-Anaya, G. Urriolagoitia-Sosa, B. Romero-Ángeles, M. Martínez-Mondragón, J. M. German-Carcaño, M. I. Correa-Corona, A. Trejo-Enríquez, A. Sánchez-Cervantes, A. Urriolagoitia-Luna and G. M. Urriolagoitia-Calderón, “Numerical Analysis Applying the Finite Element Method by Developing a Complex Three-Dimensional Biomechanical Model of the Biological Tissues of the Elbow Joint Using Computerized Axial Tomography”, *Applied Sciences*, Vol. 13, pp 2-18, 2023. <https://doi.org/10.3390/app13158903>
- [9] F. Djameluddin, “Finite element analysis and optimization of foam filled fender under quasi static and Dynamic responses”, *Frontiers in Mechanical Engineering*, pp 01-14, 2023. <https://doi.org/10.3389/fmech.2023.1091345>
- [10] M. Xie, F. Yao, L. Li and Y. Li, “Research status and development trend of energy finite element analysis: a review”, ISSN PRINT 1392-8716, ISSN ONLINE 2538-8460, DOI <https://doi.org/10.21595/jve.2022.22843>
- [11] S. H. Kim, J. W. Son, Y. Choi and J. Lee, “Performance Analysis of the Bottom Plate of a Smart Shoe Cleaner Base on FE Analysis”, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 22, no. 7, pp 70-77, 2023. <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2023.22.07.070>
- [12] A. Doicheva, “Finite Element Method for Analysis of Off-Center Connected Continuous Beams”, *The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics*, Vol. 18, pp 37-45, 2022. <https://doi.org/10.55549/epstem.1192323>
- [13] R. Sanhueza, I. Harnisch and S. Rojo, “Método de elementos finitos para el cálculo del campo electromagnético alrededor de una línea de transmisión eléctrica”, *Ingeniare*, Vol. 29, no. 3, pp 487-494, 2021. <https://doi.org/10.4067/s0718-33052021000300487>
- [14] M. W. Scroggs, J. S. Dokken, C. N. Richardson and G. N. Wells, “Construction of arbitrary order finite element degree-of-freedom maps on polygonal and polyhedral cell meshes”, *ACM Trans. Math. Softw.*, Vol. 1, no. 1, pp 1- 23, 2022. <https://doi.org/10.1145/nnnnnnn.nnnnnnn>
- [15] R. Pereira, L. J. Do Nascimento, P. M. Vieira, C. V. Chaves and J. Baptiste, “Finite Element Modal Analysis of Transient Water Flow in Aquifers”, *American Academic Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences*, Vol. 90, no. 1, pp 548-567, 2023. https://asrjetsjournal.org/index.php/American_Scientific_Journal/article/view/8290/2642
- [16] A. Nakamura, T. Shimojima and K. Ishizaka, “Finite-element simulation of photoinduced strain dynamics in silicon thin plates”, *Struct. Dyn.*, Vol. 8, 024103, 2021. <https://doi.org/10.1063/4.0000059>
- [17] O. F. Higuera-Cobos, A. Mendoza-Cuesta, Y. Suárez-Granados, L. C. Flores-García and C. M. Moreno-Téllez, “Finite Element Analysis of Constrained Groove Pressing on Strain Behavior of Armco Iron Sheets”, *Ingeniería y Competitividad*, Vol. 23, no. 2, pp 1-11, 2021. DOI: <https://doi.org/10.25100/iyv.v23i2.11262>
- [18] H. Sun, H. Zhang, T. Wang, K. Zheng, W. Zhang, W. Li, W. Zhang, Y. Xu and D. Geng, “Biomechanical and Finite-Element Analysis of Femoral Pin-Site Fractures Following Navigation-Assisted Total Knee Arthroplasty”, *The Journal of Bone & Joint Surgery JBJS.ORG*, Vol. 104, no. 19, pp 1738-1749, 2022. <http://dx.doi.org/10.2106/JBJS.21.01496>
- [19] H. H. Kwon, J. A. Shin and N. C. Cho, “Application of Finite Element Analysis for Structural Stability Evaluation of Modern and Contemporary Sculptures: Eve 58-1 by Man Lin Choi”, *Journal of Conservation Science*, Vol. 38, no. 4, pp 277-288, 2022. <https://doi.org/10.12654/jcs.2022.38.4.03>
- [20] Y. Kim and M. Hirabayashi, “A Numerical Approach Using a Finite Element Model to Constrain the Possible interior Layout of (16) Psyche”, *The Planetary Science Journal*, Vol. 3, no. 122, pp 1-15, 2022. <https://doi.org/10.3847/PSJ/ac6b39>



- [21] B. Yang and A. Zhou, “Eigenfunction behavior and adaptive finite element approximations of nonlinear eigenvalue problems in quantum physics”, *ESAIM: Mathematical Modelling and Numerical Analysis*, Vol. 55, no. 1, pp 209-227, 2021. <https://doi.org/10.1051/m2an/2020078>
- [22] N. Pop, M. Marin and S. Vlase, “Mathematics in Finite element Modeling of Computational Friction Contact Mechanics 2021-2022”, *Mathematics*, Vol. 11, no. 255, pp 1-5, 2023. <https://doi.org/10.3390/math11010255>
- [23] W. D. Lestari and N. Adyono, “Analysis of Ankle-Foot Design for Transtibial Prosthesis Components to Increase The Flexibility using the Finite Element Method”, *TEKNIK*, Vol. 43, no. 3, pp 272-279, 2022. doi: 10.14710/teknik.v43i3.48653, <https://ejournal.undip.ac.id/index.php/teknik/article/view/48653>
- [24] B. Meskhi, D. Rudoy, Y. Lachuga, V. Pakhomov, A. Soloviev, A. Matrosov, I. Panfilov and T. Maltseva, “Finite Element and Applied Models of the Stem with Spike Deformation”, *Agriculture*, Vol. 11, no. 11, 1147, 2021. <https://doi.org/10.3390/agriculture11111147>
- [25] S. Dmitriev, I. Semenova and A. Shestov, “The numerical modeling of heterogeneities by the finite element method in 3D setting”, *Mechanics and Rock Engineering, from Theory to Practice, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 833, 012094, 2021. <https://doi.org/10.1088/1755-315/833/1/012094>
- [26] H. Li, “Multidimensional Information Network Big Data Mining Algorithm Relying on Finite Element Analysis”, *Computational Intelligence and Neuroscience*, pp 1-11, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/7156715>
- [27] E. Conde, E. Salet, J. Flores and A. Vargas, “Application of Finite Element Method to Create a Digital Elevation Model”, *Mathematics*, Vol. 11, 1522, 2023. <https://doi.org/10.3390/math11061522>
- [28] M. S. Al-Tememy, M. A. Al-Neami and M.F. Asswad, “Finite Element Analysis on Behavior of Single Battered Pile in Sandy Soil Under Pullout Loading”, *International Journal of Engineering*, Vol. 35, no. 6, pp 1127-1134, 2022. <https://doi.org/10.5829/ije.2022.35.06c.04>
- [29] A. Malciu, C. Pupaza, C.C. Puica and L.F. Pana, “Finite element model validation for a 14.5 mm armor piercing bullet impact on a multi-layered add-on armor plate”, *MATEC Web of Conferences*, Vol. 373, 00038, 2022. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202237300038>
- [30] D. Colombo, S. Drira, R. Frotscher and M. Staat, “An element-based formulation for ES-FEM and FS-FEM models for implementation in standard solid mechanics finite element codes for 2D and 3D static analysis”, *Int J Numer Methods Eng.* Vol. 124, pp 402-433, 2023. <https://doi.org/10.1002/nme.7126>
- [31] P.G. Morris, J. M.M. Silva and F.J. Carvalhal, “A Specialised Element for Finite Element Model Updating of Moveable Joints”, *Multibody System Dynamic*, Vol. 5, no. 4, pp. 375-386, 2001. <https://doi.org/10.1023/a:1011438711508>
- [32] Q. Ding, X. Long and S. Mao, “Convergence analysis of a fully discrete finite element method for thermally coupled incompressible mhd problems with temperature-dependent coefficients”, *ESAIM: Mathematical Modelling and Numerical Analysis*, Vol. 52, pp 969-1005, 2022. <https://doi.org/10.1051/m2an/2022028>
- [33] F. Ozcan and S. Ersoy, “Analysis of the vehicle: applying finite element method of 3D data”, *Mathematical Models in Engineering*, Vol. 7, no. 4, pp 63-69, 2021. <https://doi.org/10.21595/mme.2021.22328>
- [34] A.A. Alade and A. Ibrahim, “Application of Finite Element Method for Mechanical Characterization of Wood and Reconstituted Lignocellulosic-Based Composites-A Review”, *Recent Progress in Materials*, Vol. 5, no. 1, pp 1-37, 2023. <https://doi.org/10.21926/rpm.2301003>
- [35] D. Qin, C. Chen, Y. Ouyang, J. Wu and H. Zhang, “Finite element methods used in clinching process”, *The International Journal of Advance Manufacturing Technology*, vol. 116, pp. 2737-2776, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07602-5>
- [36] W. K. Liu, S. Li and H. S. Park, “Eighty years of the Finite Element Method: Birth, Evolution, and Future”, *Archives of Computational Methods in Engineering*, Vol. 29, no. 6, pp 4331-4453, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09740-9>
- [37] K. Kalita, D. Burande, R. K. Ghadai and S. Chakraborty, “Finite Element Modelling, Predictive Modelling and Optimization of Metal Inert Gas, Tungsten Inert Gas and Friction Stir Welding Processes: A Comprehensive Review”, *Archives of*



Computational Methods in Engineering, vol.30, pp 271-299, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09797-6>

[38] H. Tomobe, V. Sharma, H. Kimura and H. Morikawa, “An Energy-based Overset Finite Element Method for Pseudo-static Structural Analysis”, *Journal of Scientific Computing*, Vol. 94, no. 3, pp 26, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10915-023-02113-9>

[39] D. Lee, “Updating of the complete joint characteristics of finite element model via FRF-based substructuring of complex structures”, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 37, no. 7, pp 3437-3444, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12206-023-0609-0>

[40] M. Hirohata, S. Nozawa and Y. Tokumaru, “Verification of FEM simulation by using Shell elements for fillet welding process”, *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, vol. 16, pp 1601-1613, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12008-022-00858-5>

[41] C. Chen, D. Qin, X. Ren and Y. Ouyang, “Finite element analysis of the cylindrical Rivet used in flat clinch-rivet process”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 43, no. 12, pp 577, 2021. <https://doi.org/10.1007/s40430-021-03278-w>

[42] J. Cao and Z. Zhang, “Finite element analysis and mathematical characterization of contact pressure

distribution in bolted joints”, *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 33, no. 10, pp. 4715-4725, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12206-019-0913-x>

[43] R. E. Meethal, A. Kodakkal, M. Khalil, A. Ghantasala, B. Obst, K. Bletzinger and R. Wüchner, “Finite element method-enhanced neural network for forward and inverse problems”, *Advanced Modelling and Simulation i Engineering Sciences*, Vol. 10, no. 6, 2023. <https://doi.org/10.1186/s40323-023-00243-1>

[44] J. Furstoss, C. Petit, C. Ganino, M. Bernacki and D. Pino-Muñoz, “A new element approach to model microscale strain localization within olivine aggregates”, *Solid Earth*, Vol. 12, pp 2369-2385, 2021. <https://doi.org/10.5194/se-12-2369-2021>

[45] S. S. Cho, C. S. Shin, C. S. Lee, H. Chang and K. W. Lee, “Assessment of an engine cylinder head-block joint using finite element analysis”, *International Journal of Automotive Technology*, vol. 11, no. 1, pp. 75-80, 2010. <https://doi.org/10.1007/s12239-010-0010-8>

[46] P. P. Borah, S. Kashyap, S. Kirtania and S. Banerjee, “Finite element and numerical analysis for structural responses of natural fiber-based epoxy composites”, *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12008-022-00915-z>

Derechos de Autor (c) 2024 Jesús Vicente González-Sosa, Enrique Ávila-Soler



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)