

ANÁLISIS DE ESFUERZOS EN JUNTA HOMOCINÉTICA COMO CASO DE ESTUDIO PARA LA INNOVACIÓN EDUCATIVA

STRESS ANALYSIS IN A HOMOKINETIC JOINT AS A CASE STUDY FOR EDUCATIONAL INNOVATION

J. P. Razón González¹
J. M. García Guzmán²
D. I. Gallardo Álvarez³
M. Cano Lara⁴

RESUMEN

La evolución de la industria 4.0 exige un replanteamiento de modelos de enseñanza-aprendizaje en la formación de ingenieros. En la actualidad el sector industrial presenta retos que deben abordarse de manera cotidiana durante el quehacer académico al interior de las aulas de las escuelas de ingeniería con enfoque en la resolución de problemas basados en casos reales y aplicaciones prácticas con orientación a la innovación de procesos con ayuda de las herramientas tecnológicas de vanguardia. El docente debe potenciar el desarrollo de competencias y habilidades que sean útiles tanto para la formación académica como para su inserción en el sector industrial, desde la conceptualización de la práctica docente se deben abordar casos de estudio basados en problemas reales que se puedan conceptualizar, analizar y solucionar de manera conjunta en el aula y en el laboratorio para conjugar de manera exitosa diferentes saberes para que el estudiante pueda aplicar de acuerdo a las demandas del sector industrial. En el presente trabajo se analiza el impacto del aprendizaje basado en proyectos (ABP) y la integración de herramientas de diseño y simulación como Solidworks® y ANSYS® sustentadas con el método de elementos finitos (MEF) y teorías tanto de diseño como de fatiga para la adquisición de competencias clave para la industria moderna. Los resultados destacan la importancia de la aplicación de estrategias innovadoras para fortalecer la formación de estudiantes y su inserción en el sector industrial.

ABSTRACT

The evolution of industry 4.0 calls for a rethinking of teaching-learning models in engineer training. The industrial sector now presents challenges that must be addressed on a daily basis during academic work in engineering schools, with a focus on problem solving based on real cases and practical applications with guidance Process innovation with the help of cutting-edge technological tools. The teacher must promote the development of skills and abilities which are useful both for academic training and for their insertion in the industrial sector, from the conceptualization of teaching practice, case studies based on real problems that can be conceptualized should be addressed, to analyses and solve jointly in the classroom and laboratory to successfully combine different knowledge so that the student can apply according to the demands of the industrial sector. This paper analyzes the impact of project-based learning (ABP) and the integration of design and simulation tools such as Solidworks® and ANSYS® supported by the finite element method (FEM) and theories of both design and fatigue for the acquisition of key competences for modern industry. The results highlight the importance of implementing innovative strategies to strengthen student training and their integration into the industrial sector.

¹ Profesor de tiempo completo. Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Irapuato. juan.rg@irapuato.tecnm.mx

² Profesor de tiempo completo. Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Irapuato. jose.gg@irapuato.tecnm.mx

³ Profesor de tiempo completo. Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Irapuato. dennise.ga@irapuato.tecnm.mx

⁴ Profesor de tiempo completo. Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Irapuato. miroslava.cl@irapuato.tecnm.mx

ANTECEDENTES

El sector automotriz en Guanajuato, específicamente en el corredor industrial del Bajío empezó a detonar desde hace casi 30 años con la llegada de la planta de General Motors en el municipio de Silao, cimentando sólidas bases para el desarrollo industrial de la región. De manera exponencial, el número de parques industriales ha incrementado con la atracción de inversiones por parte de los gobiernos municipales y estatales, presentando un acelerado crecimiento de empresas satélite que proveen materiales, suministros y servicios a los grandes corporativos que son los principales empleadores de los egresados de la carrera de Ingeniería Electromecánica (Razón-González, 2019).

Las empresas automotrices transnacionales se rigen con los más altos estándares de calidad internacional para mantener los niveles de competitividad en el mercado global. En la actualidad, la industria demanda que los egresados de Ingeniería Electromecánica puedan evidenciar y avalar que cuentan con las competencias y habilidades que les permitan insertarse de manera exitosa en el cada vez más exigente sector industrial. De acuerdo con la misión del Tecnológico Nacional de México (TecNM), de “Ofrecer servicios de educación superior tecnológica de calidad, con cobertura nacional, pertinente y equitativa, que coadyuve a la formación de una sociedad justa y humana, con una perspectiva de sustentabilidad” (TecNM, 2014).

En el clúster automotriz del corredor Bajío, la industria crece a pasos agigantados y demanda la aplicación de tecnologías innovadoras que optimicen los procesos de diseño, reduciendo de esta manera costos de manufactura, ofreciendo de esta manera productos competitivos en el mercado. Aunado a esto, los nuevos requerimientos están basados en estándares internacionales para los niveles de calidad; por ello, a través de una dinámica de colaboración y vinculación con instituciones y organismos que involucren a los profesores en el proceso de actualización para el logro de sus objetivos en Desarrollo Institucional y Académico (Hernández, 2018). A través de la incorporación de software ingenieril CAD/CAE/CAM durante las actividades de enseñanza-aprendizaje, se busca conectar el conocimiento teórico con la solución de problemas reales con la filosofía de la mentefactura.

Actualmente, el escuchar sobre la Mentefactura pudiera parecer que se trata de un concepto nuevo que llegó con los retos de la década actual, pero, en realidad no es así, al igual que la Industria 4.0, la concepción de la Mentefactura comenzó por 2012; el concepto fue promovido por Juan José Goñi Zabala en su libro “Mentefactura: el cambio de modelo productivo” (Goñi Zavala J. J., 2012). La llamada Industria 4.0 y también conocida como Smart Factory está creando sinergia con este nuevo paradigma y pareciera que van de la mano puesto que ambas trabajan con el poder de la información, transformación en conocimiento y el uso correcto del mismo, para mejorar la forma en que se realizan los procesos industriales (Granados, 2020).

El contexto industrial contemporáneo está marcado por la transición hacia la digitalización y la automatización, lo que demanda un perfil de egreso en ingeniería con capacidades avanzadas en resolución de problemas, uso de herramientas computacionales y metodologías activas de aprendizaje. La Industria 4.0 y la filosofía de la mentefactura han impulsado la necesidad de innovación educativa, favoreciendo estrategias que fomenten el aprendizaje basado en la práctica y el desarrollo de competencias transversales. El presente estudio

analiza un caso práctico de análisis de fatiga de una junta homocinética vehicular, destacando el uso de herramientas como Solidworks® y ANSYS®. A través de la implementación de metodologías activas, se propicia la capacidad de aplicación de conocimientos teóricos y en la solución de problemas reales de la industria automotriz.

En el sector industrial automotriz, el diseño está orientado a la seguridad y confiabilidad de los usuarios finales de los automóviles; esto implica el uso tanto de software de CAD y CAE para el diseño y análisis de las condiciones de esfuerzos, así como las condiciones de operación tanto cinéticas como cinemáticas. El análisis de esfuerzos predice el gradiente de esfuerzos que un componente mecánico es capaz de soportar, además de los ciclos de fatiga y el factor de seguridad de cada uno de los componentes que integran los sistemas de un automóvil.

La enseñanza de la ingeniería ha transitado de un modelo tradicional basado en la transmisión de conocimientos hacia enfoques centrados en el aprendizaje activo (Prince, 2004). Estrategias como el Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP) han demostrado mejorar el compromiso de los estudiantes y fortalecer el desarrollo de habilidades analíticas y creativas (Hmelo-Silver, 2004). Además, la integración de software de diseño y simulación permite la validación de modelos sin incurrir en altos costos experimentales, favoreciendo la eficiencia en los procesos de enseñanza-aprendizaje (Budyna & Nisbett, 2020).

El Aprendizaje Basado en Casos (ABC) se ha consolidado como una metodología efectiva para fomentar el pensamiento crítico y aplicar el conocimiento teórico en contextos reales. Este trabajo presenta un estudio de caso en el que estudiantes de ingeniería electromecánica analizaron los esfuerzos y deformaciones en flechas de velocidad constante a través de herramientas de Diseño Asistido por Computadora (CAD) y simulaciones en ANSYS Workbench. Se expone el proceso metodológico seguido en el aula, desde la identificación del problema hasta la interpretación de los resultados, demostrando el impacto del ABC en el desarrollo de habilidades de análisis y solución de problemas técnicos. Los resultados indican que esta metodología promueve una comprensión más profunda de los conceptos de ingeniería y mejora la capacidad de los estudiantes para abordar problemas reales.

La educación en ingeniería requiere estrategias didácticas innovadoras que permitan a los estudiantes aplicar conocimientos teóricos en escenarios prácticos. El Aprendizaje Basado en Casos (ABC) facilita la comprensión de problemas complejos a través del análisis de situaciones reales, incentivando la investigación y el trabajo colaborativo. En este contexto, el presente estudio explora el impacto del ABC en la enseñanza de la mecánica de materiales, utilizando como caso el análisis de esfuerzos y deformaciones en flechas de velocidad constante.

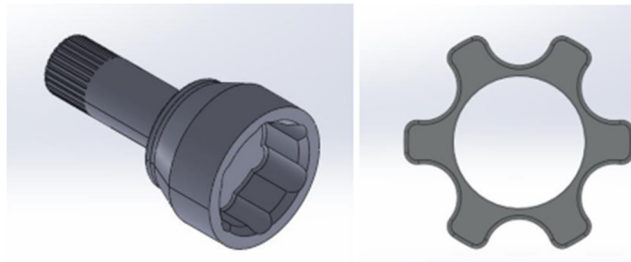
METODOLOGÍA

Este estudio desarrollado por los estudiantes tiene como objetivo el diseño, análisis y evaluación de la fatiga en una junta homocinética, un componente esencial en la transmisión de potencia de vehículos. Dado que esta pieza está sometida a esfuerzos cíclicos constantes debido a la torsión y las cargas dinámicas del sistema de tracción, su falla representa un riesgo crítico para la seguridad del vehículo y sus ocupantes. A través del análisis de fatiga, se busca identificar los puntos de mayor concentración de esfuerzos y proponer mejoras en el diseño

o en los materiales empleados, con el fin de aumentar la durabilidad y confiabilidad del sistema de transmisión. Este estudio surge de la necesidad de prevenir fallos prematuros en la junta homocinética, especialmente en condiciones de operación exigentes, donde una falla inesperada podría comprometer la estabilidad y el control del vehículo.

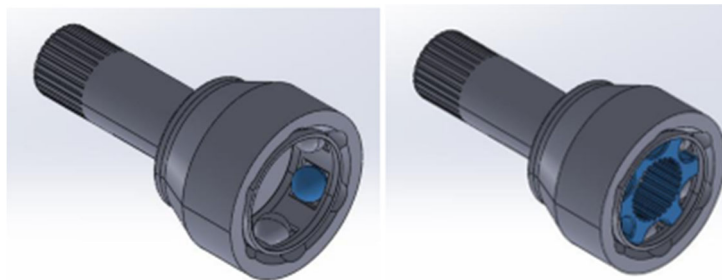
En el software Solidworks®, se realizó el modelo 3D de la junta homocinética con dimensiones reales de acuerdo con datos del fabricante que investigaron los alumnos de la carrera de ingeniería electromecánica. Se los alumnos modelaron cada uno de los componentes por separado en archivos en formato sldprt que es el tipo de archivo nativo de las piezas de Solidworks®, se dibujaron tanto el acoplamiento del lado rueda denominado como campana, los rodamientos de esfera, la jaula y el núcleo guía que evita la interferencia cinemática entre los elementos una vez que son ensamblados. En la Figura 1, se pueden apreciar la campana y el núcleo como componentes esenciales de la junta homocinética.

Figura 1. Campana y núcleo de la junta homocinética.



En la Figura 2 se puede observar el detalle del ensamble de la campana con la jaula y los rodamientos de esfera y el ensamble completo de la junta homocinética con el núcleo incluido.

Figura 2. Junta homocinética a) con jaula y rodamientos de esfera y b) completa.



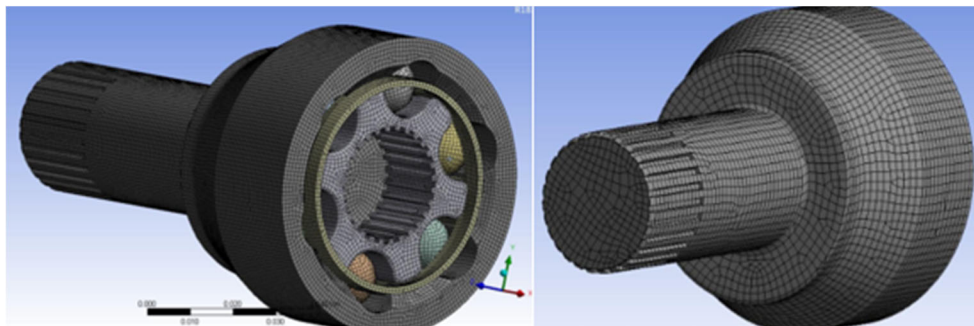
El uso del CAE es fundamental para realizar el análisis de los componentes de la junta homocinética por el método de elemento finito (MEF), el cual a partir de su análisis permite obtener un seccionamiento de diferentes zonas para posteriormente ejercer una fuerza o carga sobre cada sección, debido a esto, el CAE realiza el análisis del comportamiento individual

de cada uno de esos elementos e integra los efectos de esfuerzos y deformaciones en un resultado global de cada componente pero considerando los detalles de cada una de las secciones en las que se dividió por el método de elemento finito.

ANSYS® Workbench es un software CAE que ayuda a visualizar por medio de simulaciones varios tipos de análisis como eventos mecánicos, sistemas de control, acústicos, térmicos, fluidos, tensión, torsión, compresión, dinámica y cinemática de mecanismos, sistemas mecatrónicos, procesos de fabricación y optimización de productos partiendo del Método de Elemento Finito mencionado anteriormente. ANSYS® Workbench es utilizado para optimizar el tiempo y costo de pruebas de validación de piezas y prototipos, ya que al ser un software tan avanzado permite comprender aquellas fallas que puede presentar el material o la composición geométrica de la pieza sin necesidad de realizar pruebas físicas, para posteriormente, obtener una pieza que al cumplir con los parámetros exigidos pueda llegar a su manufactura real de manera confiable de acuerdo a las teorías de diseño.

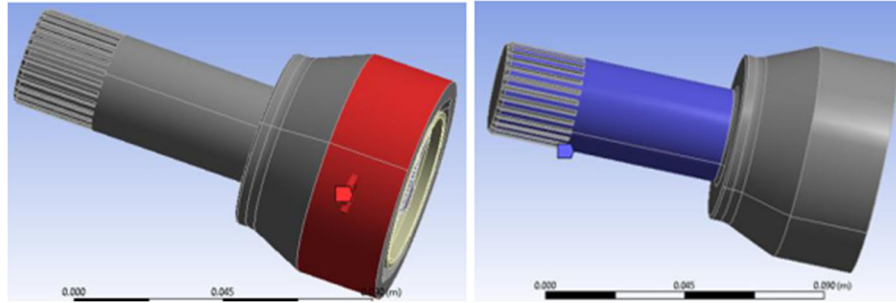
Una vez que se finalizó el modelado individual de los componentes de la junta homocinética y se conjuntaron todas las piezas en un archivo sldasm que es la denominación del formato nativo de Solidworks® para los ensamblajes, se guardó y fue exportado para empezar con el análisis por el Método de Elementos Finitos (MEF) en ANSYS® Workbench. Una vez que se importó el ensamblaje en el programa de análisis, lo primero que se hizo fue parametrizar el material con módulo de elasticidad de 210GPa y módulo de Poisson de 0.3 para el acero 4045 empleado, definir pares de contacto entre componentes del ensamblaje y por último seleccionar el tipo de elemento para el análisis. Se caracterizó un elemento basado en la formulación de tetraedros con control de tamaño de 1mm, en la Figura 3 se muestran 2 vistas de la malla o conjuntos de elementos que se usarán para el análisis de la junta homocinética

Figura 3. Malla compuesta de elementos tetraédricos con tamaño de arista de 1mm.



Posteriormente, los estudiantes definieron las condiciones de frontera (Border Conditions), mismas que consisten en definir las zonas que serán restringidas de movimiento y en las que estarán aplicadas las cargas; para este caso se restringieron las caras cilíndricas correspondientes al estriado y mientras que el momento fue aplicado en otro par de caras cilíndricas para simular el efecto del par de torsión del sistema de tracción del vehículo. En la Figura 4 se presentan las condiciones de frontera de la siguiente manera: soporte fijo en color azul y el momento o par de torsión en color rojo para una identificación más precisa.

Figura 4. Condiciones de frontera: Soporte fijo (color azul) y momento (color rojo).



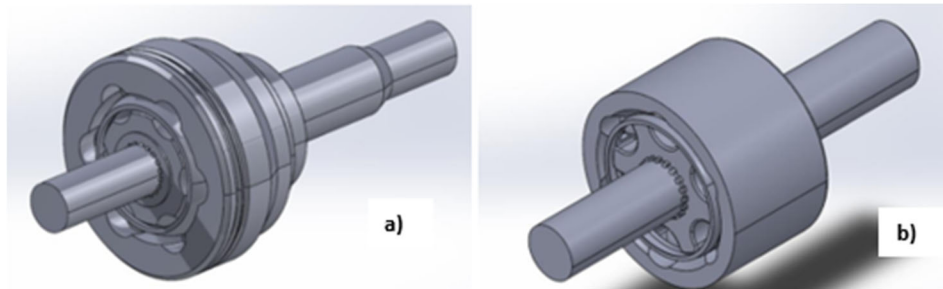
Los alumnos realizaron el modelado de la contraparte de la junta homocinética, el acoplamiento del lado de la transmisión, también conocido como “tulipán” y posteriormente lo importaron al ANSYS® Workbench para caracterizar sus propiedades de material, definir sus condiciones de frontera y simular su comportamiento de acuerdo con los parámetros de operación real. El tulipán y la campana van conectados a través de un eje o barra con los extremos estriados y en conjunto conforman la junta homocinética. En la Figura 5 se muestran los 3 componentes principales de la flecha de velocidad constante: la junta homocinética lado rueda, el eje y la junta homocinética lado caja:

Figura 5. Partes principales de la flecha de velocidad constante.



Cada uno de los fue modelado por los alumnos en el software de CAD Solidworks® para posteriormente importarse al programa ANSYS® Workbench. Una vez que se encontraron importados en un formato compatible, se definieron los pares de contacto y se comprobaron las tolerancias para evitar inconsistencias tanto en el “bonded” como en el “target”. La pieza denominada “bonded” es la pieza que hace contacto con la pieza “target” que es el objetivo y recibe dicho contacto; cabe mencionar que el sentido del par de contacto es importante para la caracterización de los esfuerzos Hertzianos o de contacto, mismos que son relevantes para el análisis de fatiga (Budyna & Nisbett, 2020). En la Figura 6 se muestran los modelos de CAD de la junta homocinética lado rueda (a) y la junta homocinética lado caja (b)

Figura 6. *Ensamble de juntas homocinéticas, a) lado rueda, b) lado caja.*



En la Figura 7 se describe la información detallada de los pares de contacto, siendo importante determinar cuál será el sentido de la superficie de contacto (bonded y target); la mayoría de los contactos mantienen una estructura predeterminada por el programa, exceptuando la formulación en la sección avanzada, para estas simulaciones la formulación requerida es la de Lagrange aumentada y la definición del tipo de contacto es “bonded”.

Figura 7. *Definición del tipo de contacto.*

Details of "Multiple Selection"	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
[-] Definition	
Type	Bonded
Scope Mode	Automatic
Behavior	Program Controlled
Trim Contact	Program Controlled
Trim Tolerance	7.916e-004 m
Suppressed	No
[-] Advanced	
Formulation	Augmented Lagrange
Detection Method	Program Controlled
Penetration Tolerance	Program Controlled
Elastic Slip Tolerance	Program Controlled
Normal Stiffness	Program Controlled
Update Stiffness	Program Controlled
Pinball Region	Program Controlled
[-] Geometric Modification	
Contact Geometry Correction	None
Target Geometry Correction	None

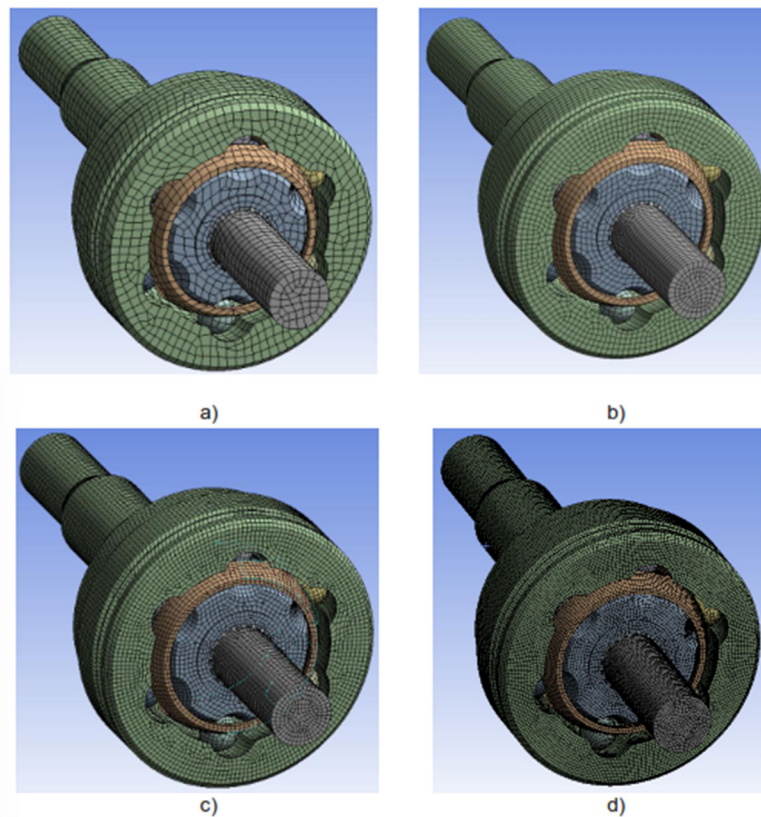
El material seleccionado para las piezas es un acero caracterizado a partir del acero estructural base que se proporciona en la librería de materiales (Engineering Data) y se parametriza de acuerdo a las propiedades mecánicas de la aleación empleada en la manufactura del conjunto completo de las juntas homocinéticas; las propiedades que se modificaron son el módulo de elasticidad o de Young (Young’s modulus), resistencia a la tensión y resistencia a la compresión (tensile yield strength, compressive yield strength), estas modificaciones se pueden apreciar a detalle en la Figura 8

Figura 8. Caracterización de las propiedades del material.

1	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	7.85E-06	kg mm ⁻³		
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
4	Coefficient of Thermal Expansion	1.2E-05	C ⁻¹		
5	Zero-Thermal-Strain Reference Temperature	22	C		
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's Modulus and Po...			
8	Young's Modulus	2E+05	MPa		
9	Poisson's Ratio	0.3			
10	Bulk Modulus	1.6667E+11	Pa		
11	Shear Modulus	7.6923E+10	Pa		
12	Alternating Stress Mean Stress	Tabular			
13	Interpolation	Log-Log			
14	Scale	1			
15	Offset	0	Pa		
16	Strain-Life Parameters				
17	Display Curve Type	Strain-Life			
18	Strength Coefficient	920	MPa		
19	Strength Exponent	-0.106			
20	Ductility Coefficient	0.213			
21	Ductility Exponent	-0.47			
22	Cyclic Strength Coefficient	1000	MPa		
23	Cyclic Strain Hardening Exponent	0.2			
24	Tensile Yield Strength	1950	MPa		
25	Compressive Yield Strength	1950	MPa		
26	Tensile Ultimate Strength	2300	MPa		
27	Compressive Ultimate Strength	2300	MPa		

Una vez que los modelos son importados al software ANSYS® Workbench, se procede a generar la malla. El mallado básicamente discretiza o divide las geometrías complejas de los componentes de la junta homocinética en elementos de geometría regular como hexaedros y tetraedros para analizarlos por separado como cuerpos con geometrías regulares y posteriormente analizar todos esos elementos como un único cuerpo e integrar los resultados de esfuerzos, deformaciones, factor de seguridad, entre otros. En la Figura 9 se puede visualizar la malla empleada para la junta homocinética del lado rueda, así como la variación en el tamaño de los elementos empleados

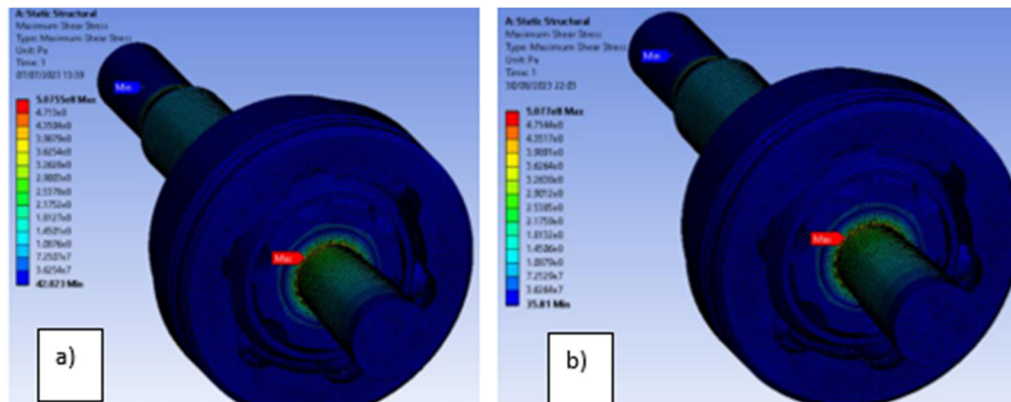
Figura 9. Variación del tamaño de elementos de mallado en la junta homocinética lado rueda a) 3mm, b) 2mm, c) 1.5mm y d) 1mm.



RESULTADOS

El concepto “punto de convergencia” se refiere al punto de equilibrio entre la precisión de los resultados cotejada contra la cantidad de elementos empleados en la simulación y la variación que puede presentar de acuerdo con el incremento de dichos elementos de la malla. De los resultados más relevantes se encontró que el punto de convergencia tanto para esfuerzos como para deformaciones se encontró en 1.5mm en el tamaño de arista de los elementos. El esfuerzo equivalente de Von-Mises se usa para predecir la falla y fractura de la estructura base de acuerdo con el valor crítico de la tensión de corte máxima de la estructura debido al límite de fluencia del material; de igual manera se presenta la gráfica del esfuerzo cortante tal como se puede apreciar en la Figura 10

Figura 10. Esfuerzo a) de Von-Mises y b) cortante dentro del rango permisible seguro.



CONCLUSIONES

Al realizar el análisis de esfuerzos se puede observar que se encuentra dentro de parámetros seguros y que los elementos de la junta homocinética están en la zona elástica del material, lo que se interpreta como piezas confiables ante las condiciones de esfuerzo mostradas. Se realizaron diferentes simulaciones con variación del tamaño de elemento, esto buscando el punto de convergencia para validar que la solución y el modelo de Lagrange aumentado es el adecuado para este caso de estudio. Los resultados de los esfuerzos equivalentes de Von-Mises y cortante máximo presentan un comportamiento similar en sus resultados, si bien la magnitud de ambos tipos de esfuerzos no es igual, el patrón de comportamiento presentado es similar y en ambos casos está en una condición segura.

El talento humano es quien detona el potencial de las organizaciones, otorgando valor a sus procesos y es el protagonista de cualquier éxito empresarial; además de que, es un factor trascendental en las necesidades de la Cuarta Revolución Industrial. Si se ignora el efecto revulsivo del capital humano en las consideraciones de la Industria 4.0, la empresa corre el riesgo de desaparecer o quedarse fuera de las tendencias de la industria actual, el trabajar desde el aula en problemas basados en casos de estudio permite vincular y conectar los problemas reales con el conocimiento teórico y también permea a los estudiantes de problemas reales de la industria que se resuelven con el conocimiento teórico potenciado por las herramientas computacionales de vanguardia.

La flecha de velocidad constante cumple con los parámetros necesarios para garantizar el buen desempeño y la confiabilidad al operar de manera segura en las condiciones de operación aproximadas a la realidad, sin embargo, no se debe olvidar que sin importar el potencial de los programas computacionales de CAD/CAE se debe fundamentar con bases teóricas de la formación tradicional de la ingeniería para tener la capacidad de plantear, diseñar, simular, analizar, interpretar y rediseñar sistemas mecánicos a partir de casos reales en un entorno didáctico para gradualmente introducir a los estudiantes a la problemática de la industria moderna.

BIBLIOGRAFÍA

- Budyna, R., Nisbett, J. (2020). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. CDMX: McGraw-Hill. <https://www.mheducation.com/highered/product/shigleys-mechanical-engineering-design-nisbett.html?>
- CACEI. (2017). *Consejo de Acreditación de la Enseñanza en Ingeniería A.C.* Obtenido de <https://cacei.org.mx/>
- Goñi Zavala J. J. (2012). *Mentefactura: El cambio del modelo productivo. Innovar sobre intangibles del trabajo y la empresa*. CDMX: Ediciones Díaz de Santos. <https://www.editdiazdesantos.com/libros/goni-zabala-juan-jose-mentefactura-L27000790301.html?>
- Granados, G. (10 de Agosto de 2020). *Visión Industrial*. Obtenido de <https://www.anfei.mx/revista/index.php/revista/article/view/904?>
- Hernández, G. D. (2018). *Procedimiento para la obtención de modelos de convenios*. Obtenido de https://itcampeche.edu.mx/wp-content/uploads/2016/09/PIID_2013-2018_TECNM.pdf
- Hmelo-Silver, C. E. (2004). Problem-based learning: What and how do students learn? *Educational Psychology Review*, 16(3), 235-266. <https://doi.org/10.1023/B:EDPR.0000034022.16470.f3>
- Penagos, J. A. (2000). Creatividad, una aproximación. *Revista Psicología*, 6. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/320627379_Creatividad_una_aproximacion
- Prince, M. (2004). Does active learning work? *Journal of Engineering Education*, 93(3), 223-231.
- Razón-González, J. P.-H.-L. (1 de Ene de 2019). Impacto de la gestión de certificaciones internacionales en la inserción laboral de los ingenieros electromecánicos. (ANFEI, Ed.) *ANFEI Digital*, 1(10), 1-5. Recuperado el 08 de Febrero de 2023
- TecNM. (2014). *Tecnológico Nacional de México*. Obtenido de TecNM: http://www.tecnm.mx/images/areas/planeacion/2014/PIID_2013-2018_TECNM_Final.pdf
- TecNM. (Octubre de 2015). *Tecnológico Nacional de México*. Obtenido de https://www.tecnm.mx/images/areas/docencia01/Libre_para_descarga/Manual_Lineamientos_TecNM_2015/Manual_de_Lineamientos_TecNM.pdf
- Tecnológico Nacional de México campus Irapuato. (2022). *Ingeniería Electromecánica - Plan de estudios*. Obtenido de <https://irapuato.tecnm.mx/#>