

Numerical simulation of three degrees of freedom ball joint crossed spherical gear for a robotic arm prosthesis

José L. Serna-Landivar, Br¹, Daniela M. Anticona-Valderrama, Ph.D¹, Pedro A. Flores, Msc¹
¹Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U18101283@utp.edu.pe, C18620@utp.edu.pe, C21111@utp.edu.pe

Abstract– The objective of this article is to evaluate, through the finite element method, the design of a crossed spherical gear with two different materials (polyether ether ketone - PEEK and titanium alloy - Ti-6Al-4V) for a robotic arm prosthesis. The software ANSYS Mechanical was used to simulate strains, stresses, natural frequencies and modes of vibration. The results obtained show that the maximum stresses occur on the same regions for both materials and have similar values. However, the titanium alloy (Ti-6Al-4V) has a higher safety factor compared to that of the PEEK. Therefore, the spherical crossed gear made of titanium has better dynamic behavior and a higher safety factor in the event of an overload of the robotic arm prosthesis.

Keywords-- Crossed spherical gear, Static analysis, Modal analysis, Transient analysis, Robotic arm prosthesis.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

Simulación numérica de engranaje esférico cruzado de rótula de tres grados de libertad para una prótesis de brazo robótico

José L. Serna-Landivar, Br¹, Daniela M. Anticona-Valderrama, Ph.D¹, Pedro A. Flores, Msc¹
¹Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U18101283@utp.edu.pe, C18620@utp.edu.pe, C21111@utp.edu.pe

Abstract— *El objetivo de este artículo es la evaluación, mediante el método de elementos finitos, del diseño de un engranaje esférico cruzado con dos diferentes materiales (poliéter éter cetona - PEEK y aleación de titanio - Ti-6Al-4V) para una prótesis de brazo robótico. Se utilizó el software ANSYS Mechanical para simular las deformaciones, esfuerzos, frecuencias naturales y modos de vibración. Los resultados obtenidos muestran que los máximos esfuerzos están en las mismas zonas para ambos materiales y tienen valores similares, sin embargo, el material de aleación de titanio (Ti-6Al-4V) tiene un mayor factor de seguridad en comparación con el del PEEK. Por lo tanto, el engranaje esférico cruzado de material base de aleación de titanio tiene mejor comportamiento dinámico y mayor factor de seguridad ante una eventual sobrecarga de la prótesis de brazo robótico.*

Keywords— *Engranaje esférico cruzado, Análisis estático, Análisis modal, Análisis transitorio, Prótesis de brazo robótico.*

I. INTRODUCCIÓN

La amputación de las extremidades superiores es una de las principales causas de discapacidad y puede ocurrir en cualquier nivel de la extremidad, esto es una problemática que se debe de abordar con urgencia y buscar soluciones para dar calidad de vida a las millones de personas que se encuentran en estas condiciones [1].

Existen diversas propuestas de diseño mecánico para solucionar el problema del movimiento rotacional esférico de una rótula de articulación. El movimiento esférico a menudo ocurre en sistemas mecánicos como muñecas robóticas, brazo robótico, mecanismos de orientación, exoesqueletos, etc. [2]–[5]. Los diversos materiales que existen para prótesis como por ejemplo, poliéter éter cetona (PEEK) se ha considerado durante mucho tiempo como uno de los materiales de elección para los sustitutos óseos, reemplazando a las aleaciones de titanio, materiales compuestos CFRP, al acero inoxidable en traumatismos ortopédicos, artroplastias y fusión ósea debido a sus propiedades mecánicas únicas y su estabilidad similar al tejido óseo natural [6], [7]. Las excelentes propiedades mecánicas de los polímeros PEEK los hacen eficaces para evitar los efectos de protección contra la tensión cuando se utilizan como materiales de carga en aplicaciones ortopédicas [8], [9]. La desventaja que tienen las prótesis metálicas con respecto al PEEK es que estos son más densos y pesados para estas aplicaciones, pero las metálicas también tienen ventaja ya que son más resistentes.

Los engranajes esféricos con múltiples grados de libertad es un campo emergente que se necesita desarrollar. El diseño propuesto por [10] en los engranajes esférico cambiaron los dientes cónicos discretos en dientes de arco circular, y el movimiento se transmite a través del engrane de dientes convexos de arco circular y dientes cóncavos de arco circular. Luego, [11] diseñó un par de engranajes esféricos con un perfil de dientes envolvente continuo en forma de tambor convexo-cóncavo. También propusieron un engranaje esférico con un perfil de diente envolvente anular discreto [12]. Otra investigación [13] propone un nuevo tipo de engranaje esférico, que se compone de una superficie de diente anular de involuta plana y una superficie de diente cónico esférico de involuta esférica con 3 grados de libertad.

De manera similar en las investigaciones [14][15] abordaron diseño de Abenics una rotula de 3 grados de libertad, esta comprendido por un engranaje esférico cruzado y dos engranajes monopolares, para las aplicaciones de articulación en brazo o muñeca, designaron material PEEK, pero también deberían de abordar el comportamiento estático y dinámico del engranaje esférico en otros materiales que se utilizan en la industria.

El análisis de elementos finitos ayuda a predecir y verificar el comportamiento de los materiales de ingeniería y las piezas mecánicas en diversas aplicaciones. Diversas investigaciones han demostrado que el modelado de elementos finitos es fundamental para la difusión de materiales de ingeniería de diseño, ya que el comportamiento de los materiales especiales se puede predecir con precisión antes de la validación experimental, eliminando así los costos asociados con la prueba y el error [16], además de Predecir las propiedades mecánicas y vibratorias de materiales fabricados en laboratorio. Por lo tanto, el propósito de este trabajo es validar numéricamente el diseño de engranajes esféricos cruzados con de tres grados de libertad y comparar su comportamiento estático y dinámicos con dos tipos de materiales PEEK y Ti-6Al-4V.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Modelo 3D de la prótesis robótica con la rotula

La prótesis robótica con rotula de tres grados de libertad simplificada está conformado por la prótesis, la base del sistema de engranajes esféricos, engranaje esférico cruzado y los engranajes monopolares (ver Fig.1). La prótesis sirve para reemplazar las partes faltantes del cuerpo o haga que las partes del cuerpo funcionen mejor.

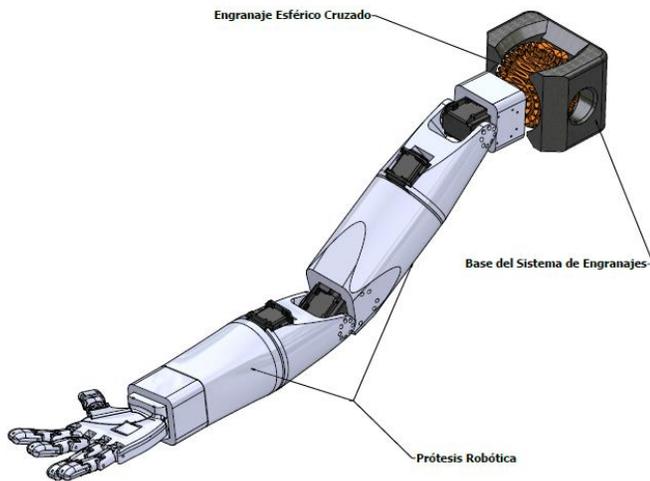


Fig. 1. Prótesis Robótica con rótula de tres grados de libertad.

En la Fig.2, se observa a detalle el modelo 3D de la rótula con tres grados de libertad, con servomotores de precisión permite rotar los dos engranajes monopolares, es decir son los conductores, por lo que el engranaje esférico es el conducido. Esta rota permite girar rotacionalmente y es ideal para simular una articulación (rótula) de un hombro. Sin embargo, tiene sus límites de rotación y giro y las restricciones es la base que soporta el engranaje esférico cruzado.

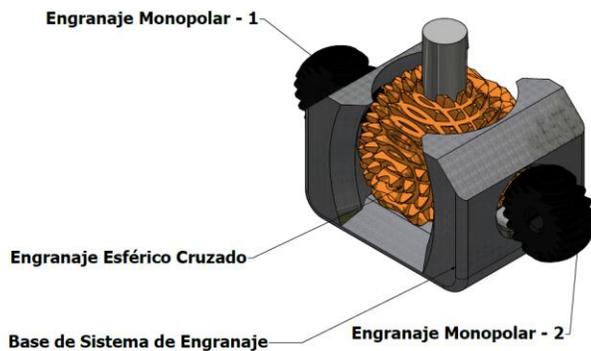


Fig. 2. Modelo 3D de rótula tres grados de libertad.

El modelado de la rótula se hizo en el software CAD INVENTOR, para el modelado del engranaje esférico se tomó en cuenta en referencia a la investigación de los autores Abe et al, de su diseño del modelo ABENICS [14][17], el engranaje esférico cruzado se obtiene del principio del engranaje de dientes rectos con el número de dientes es de 30, el módulo es 3 mm y los engranajes monopolares tienen 15 dientes con el mismo módulo (ver figura 3). Luego se revoluciona a 360° en un plano y después en otro plano ortogonal se realiza otra revolución de corte en los dientes generados en la primera revolución. Además, consta de un acople de la prótesis al engranaje esférico. Las dimensiones y detalles del engranaje esférico cruzado se visualizan en el Fig.4. El material designado para el material son PEEK (Poliéter Éter Cetona), aleación de titanio Ti-6Al-4 V, las propiedades mecánicas se detallan en la tabla 1.

TABLA I
PROPIEDADES MECÁNICAS DEL MATERIAL PEEK (POLIÉTER ÉTER CETONA) Y ALEACIÓN DE TITANIO Ti-6Al-4V

Material	Módulo de elasticidad (Mpa)	Resistencia a la fluencia (Mpa)	Ratio de Poisson	Densidad (kg/m ³)	Referencia
PEEK	3450	95	0.4	1300	[18]-[20]
Ti-6Al-4 V	114000	880	0.31	4500	[16], [21]-[25]

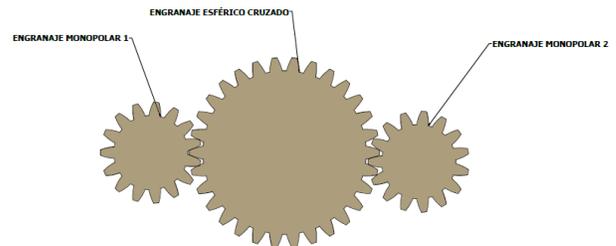


Fig. 3. Sección transversal del ensamble del conjunto engranaje esférico y los dos engranajes monopolares.

Modelo de elementos finitos del engranaje esférico cruzado

El modelo numérico del engranaje esférico cruzado se modela en software asistido por computador (CAD) llamado INVENTOR, posteriormente se exporta al ANSYS en formato step o igs, estos formatos son ideales para que el software de simulación ANSYS reconozca la geometría y medidas correspondientes. ANSYS es un potente y completo software de simulación que mediante el método de los elementos finitos nos permite resolver los problemas mecánico y de diseños complejos, Además, sus resultados son confiables y rápidos.

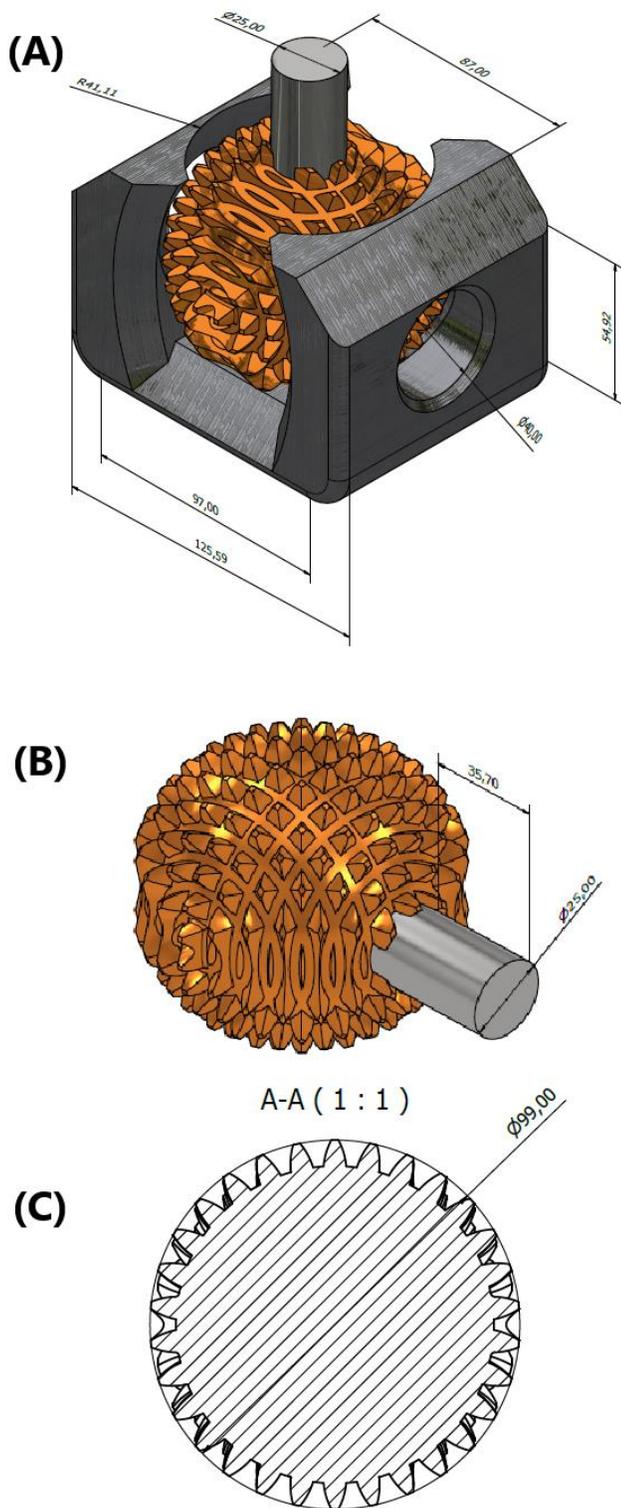


Fig. 4. Dimensiones del engranaje esférico cruzado. A) Dimensiones generales del soporte de rotula. B) Medidas generales del engranaje esférico cruzado. C) Sección transversal del engranaje esférico cruzado.

En la tabla I, se especifica las propiedades mecánicas del material PEEK que se ingresó en el módulo de “engineer data”, los valores ingresados son el módulo de elasticidad, resistencia a la fluencia, ratio de Poisson y la densidad, son las variables suficientes para realizar la simulación de manera correcta. Luego, el objeto de investigación se malla para hacer que la malla converja, de modo que la entidad se discretice y la malla se refine, de modo que el valor del resultado no tenga un valor de desviación significativa. El resultado son 48404 nodos con 26325 elementos, como se observa en la Fig. 5.

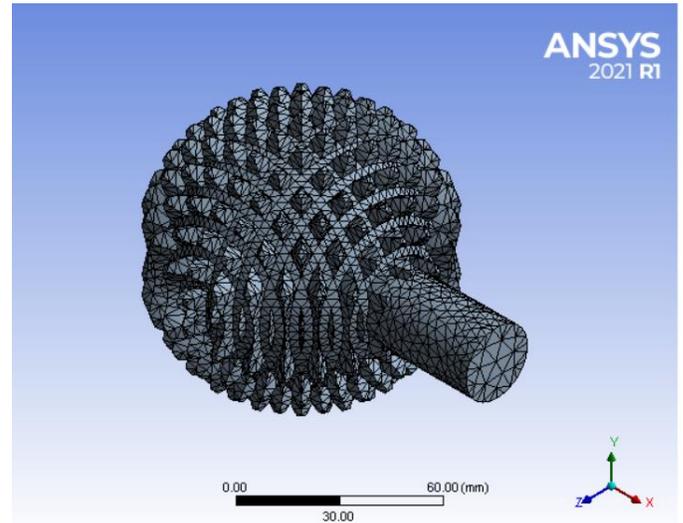


Fig. 5. Mallado del engranaje esférico cruzado.

Es importante definir las condiciones de borde del objeto de estudio, de esta manera los posteriores resultados tendrán valores muy próximos a la realidad. Se considera dos puntos de apoyo fijos en el contacto de los dos engranajes monopolares con el engranaje esférico cruzado y simultáneamente la fuerza de carga la cual estará soportando un valor de 500N, en el sentido negativo de eje “Y” (ver Fig.6).

Por otro lado, la simulación estática realizado con ANSYS encontraremos los esfuerzos, deformaciones y factores de seguridad. Este análisis se encuentra en el rango elástico, es decir, es un análisis lineal. La ecuación matemática que nos permite solucionar este problema es Eq.1.[26].

$$P = Ku \quad (1)$$

Es importante mencionar que es vital conocer el comportamiento de cada estructura de ingeniería, con el análisis modal se pueden determinar el comportamiento dinámico como las frecuencias naturales y los modos de vibración, con la condición de que se desprecia la fricción y las fuerzas externas. En la simulación emplearemos 6 modos de vibración para capturar las frecuencias y modos de

vibración importantes del objeto de estudio de la investigación.

Con el apoyo del análisis modal se puede realizar el análisis transitorio, de igual manera es un análisis transitorio, pero se empleará el método de superposición de modos, por lo que se obtendrán los resultados con menor tiempo de procesamiento en comparación del análisis transitorio full. Sin embargo, este análisis sí considera la fuerza externa a la cual está sometido el engranaje esférico cruzado.

A continuación, la Eq2, es la ecuación diferencial linealizada que gobierna el comportamiento del análisis modal y transitorio [27]–[30].

$$P(t) = M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku \quad (2)$$

Donde, P(t) es la fuerza que varía en el tiempo, M la matriz de masa, C la matriz de amortiguamiento, K matriz de rigidez y u los vectores de aceleración, velocidad y desplazamiento nodal, respectivamente [31]–[33].

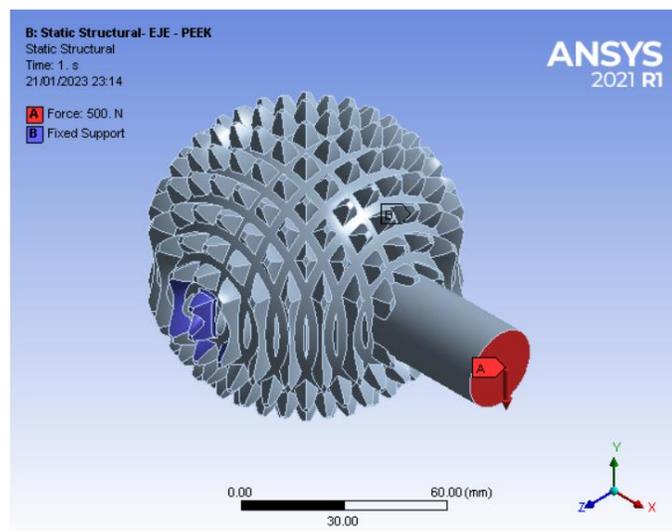


Fig. 6. Condiciones de borde del engranaje esférico cruzado.

III. RESULTADOS

Análisis estático

Los resultados obtenidos en el análisis estático mediante el análisis por elementos finitos son los esfuerzos máximos obtenido es de 13,76 MPa para el material PEEK y 13.16 MPa para la aleación de titanio Ti-6Al-4V, siendo estos producidos por la carga y representada por una fuerza de las condiciones de borde. En figura 7 (a) se visualiza el engranaje esférico cruzado con el rango de esfuerzos obtenidos, y (b) se observa la sección transversal del engranaje esférico el detalle de la localización específica; la etiqueta roja localiza el punto

crítico siendo esto en el cambio de sección en relación del diente y la esfera.

En cuanto al factor de seguridad tiene un valor de 6.9, siendo este valor del cociente entre el esfuerzo máximo de fluencia del material PEEK y 66.8 de la aleación de titanio Ti-6Al-4V, el esfuerzo de trabajo obtenido en el análisis estático, siendo un valor aceptable cumpliendo con los requisitos de diseño, la cual nos permite tener la seguridad que el engranaje esférico cruzado trabajará de manera segura y adecuada.

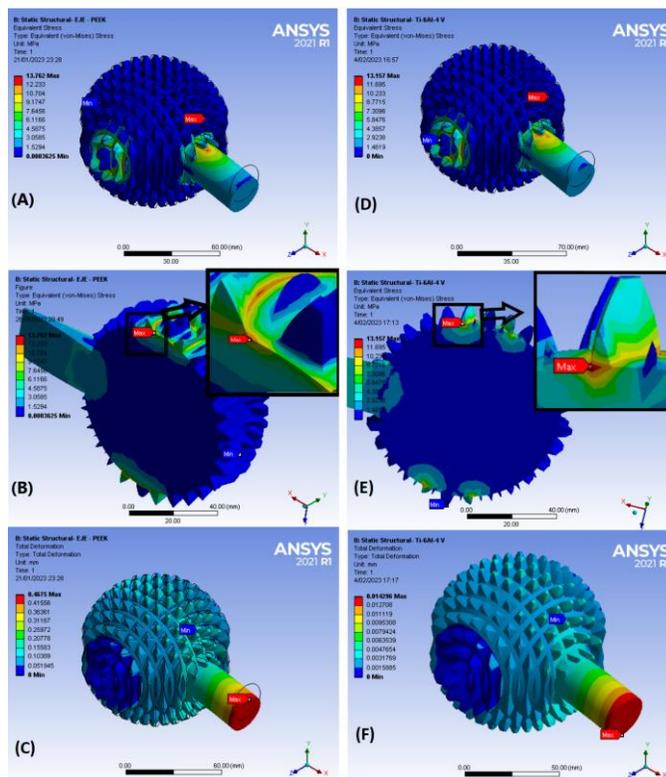


Fig. 7. Esfuerzos máximos del engranaje esférico cruzado de los materiales PEEK y Ti-6Al-4V

Por otro lado, la deformación obtenida en el análisis estático se observa en la figura 7, la deformación con un valor 0.468 mm para el material PEEK y 0.014 mm para el material Ti-6Al-4V, siendo el punto crítico en la etiqueta roja localizado en el extremo del acople del engranaje esférico y la prótesis robótica. Por lo tanto, la deflexión es mínima y cumple con los criterios de diseño.

Análisis modal

Los resultados del análisis modal se consiguió 6 modos de vibración y 6 frecuencias naturales, con un rango de 996.02 Hz ~ 4060.50 Hz en el material PEEK y 3132.30 Hz ~ 12301 Hz del material Ti-6Al-4 V (ver tabla 2). Estas frecuencias se obtuvieron en el software ANSYS, cada modo de vibración diferente comportamiento dinámico y diferente valor.

Tabla II

Análisis modal del engranaje esférico cruzado con materiales PEEK y Ti-6Al-4V

MODO	PEEK Frecuencia (Hz)	Ti-6Al-4V Frecuencia (Hz)
1	996.02	3132.30
2	2284.60	6984.20
3	2544.50	7509.60
4	3496.20	7952.80
5	3113.50	9571.30
6	4060.50	12301.00

En la Fig.8, se observan las imágenes de cada forma de vibración del engranaje esférico cruzado con material PEEK, el modo de vibración 1 se deforma flexionando hacia abajo en el eje “Y”, el modo de vibración 2 se deforma hacia los laterales del eje “Z”, el modo de vibración 3 tiene desplazamiento abajo en el eje “Y”, el modo de vibración 4 se deforma delante y hacia atrás en el eje “X”, el modo de vibración 5 presenta un movimiento torsional en el eje “Y”, el modo de vibración 6 tiene comportamiento torsional en el eje “Y”. De igual manera engranaje esférico cruzado con el material Ti-6Al-4 V tiene el mismo comportamiento, pero con diferentes valores de frecuencia natural (ver Fig.9).

Identificando los modos de vibración relevantes para el engranaje esférico cruzado de material PEEK y Ti-6Al-4V, en la Fig.8 y Fig.9 muestran que los modos de vibración 3 y 5 en dirección “Y” son los de interés para nuestro objeto de estudio, ya que tienen el mayor factor de participación de masa en comparación de los demás modos de vibración en la misma dirección, sumando un valor porcentual de participación del 95.876%.

En la Fig.10, se observa la evaluación de las frecuencias naturales del material Ti-6Al-4V, siendo este mayor en comparación con el PEEK, teniendo en cuenta que se sometió a las mismas condiciones de borde.

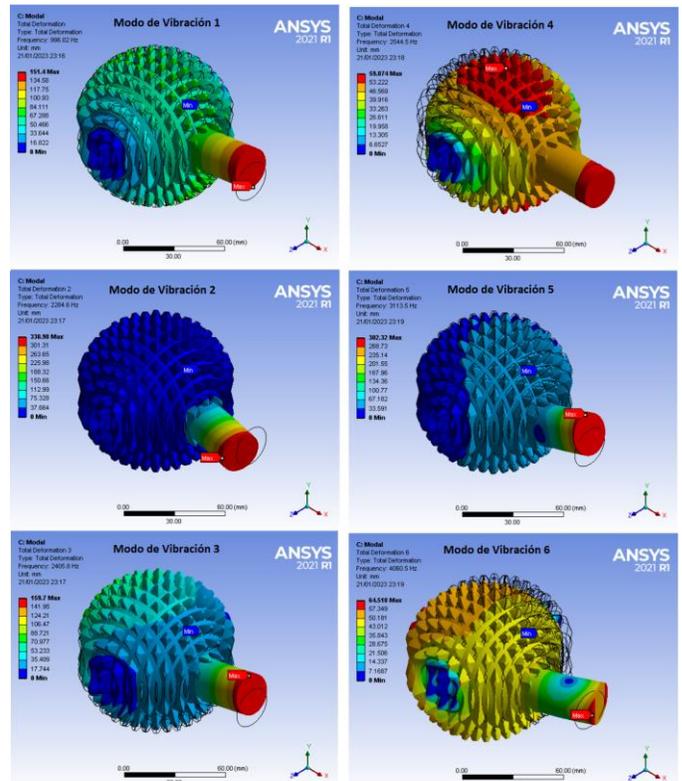


Fig. 8. Los 6 modos de vibración del engranaje esférico cruzado material PEEK.

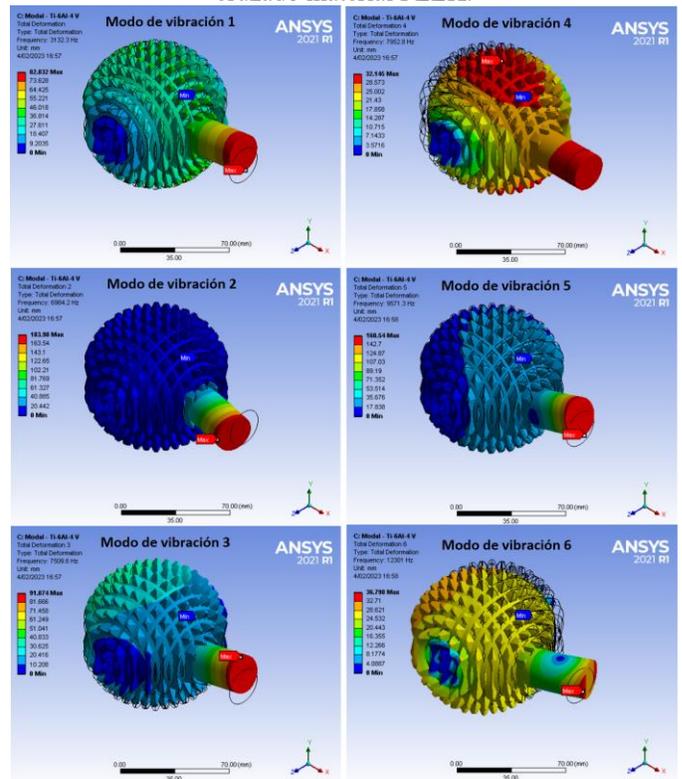


Fig. 9. Los 6 modos de vibración del engranaje esférico cruzado material Ti-6Al-4V.

IV. CONCLUSIONES

En este estudio, la simulación y análisis del engranaje esférico cruzado que es la parte principal de la rótula con tres grados de libertad en prótesis robótica para brazo se llevó a cabo utilizando INVENTOR y ANSYS Mechanical. Se eligieron dos materiales diferentes para fabricar el engranaje esférico cruzado evaluado bajo cierta condición de carga, los resultados mostraron que el menor valor de deformación total y esfuerzos ocurrió en engranaje esférico cruzado hecho de aleación de titanio Ti-6Al-4V para el valor de la carga, por ende, este material tiene un mayor factor de seguridad comparado con el material PEEK, esa diferencia es debido a que el esfuerzo máximo de fluencia es mayor en la aleación de titanio. La concentración de tensión siempre ocurre en la superficie de la esfera y la base del diente del engranaje esférico. Por lo tanto, el valor máximo de esfuerzo y de deformaciones tienen un valor aceptable cumpliendo con los requisitos de diseño, la cual nos da un buen factor de seguridad que el engranaje esférico cruzado trabajará de manera segura y adecuada.

Finalmente, se debe de tener en cuenta que el módulo del engranaje es inversamente proporcional al número de dientes del engranaje, este parámetro es vital, ya que al aumentar el módulo el número de dientes disminuye, por ende, los pasos son mayores y los movimientos bruscos. Por el contrario, si el número de dientes disminuye para obtener movimientos finos, el paso es menor y la resistencia del diente del engranaje disminuye. Por lo tanto, se debe de llegar a una relación de equilibrio entre la resistencia y la finura de los movimientos de la prótesis.

Se recomienda complementar el diseño del engranaje esférico cruzado con un análisis explícito para calcular tensiones y deformaciones de los dientes de los engranajes y compararlos con los resultados del análisis transitorio. Además, en otra futura investigación se podría realizar un análisis de fatiga (alto ciclaje) para verificar su durabilidad de acuerdo con sus cargas de servicio que tiene el engranaje esférico cruzado.

REFERENCES

- [1] A. I. Vázquez and J. U. Pérez, "Conceptual design of an alignment device for transfemoral prosthesis," *Rev. Fac. Ing.*, no. 102, pp. 108–114, 2022, doi: 10.17533/udea.redin.20200805.
- [2] S. Bai, X. Li, and J. Angeles, "A review of spherical motion generation using either spherical parallel manipulators or spherical motors," *Mech. Mach. Theory*, vol. 140, pp. 377–388, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2019.06.012>.
- [3] S. Bai and J. Angeles, "The design of spherical multilobe-cam mechanisms," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 223, no. 2, pp. 473–482, 2009, doi: 10.1243/09544062JMES1154.
- [4] N. M. Bajaj, A. J. Spiers, and A. M. Dollar, "State of the art in prosthetic wrists: Commercial and research devices," in *IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*, 2015, vol. 2015-Septe, pp. 331–338, doi: 10.1109/ICORR.2015.7281221.

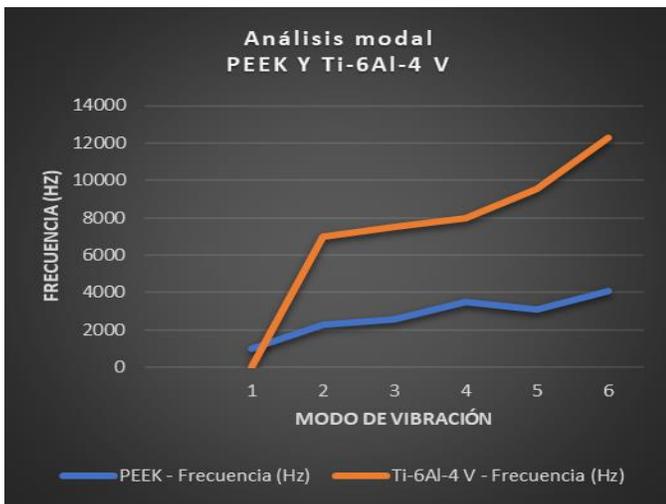


Fig. 10. Gráfica comparativa de los dos materiales evaluados

Análisis transitorio

Los resultados del análisis transitorio del engranaje esférico cruzado los observamos en la Fig.11, producidos por la fuerza actuante en un lapso corto de tiempo. Los esfuerzos máximos obtenidos son de 13.76MPa y 13.16 MPa para los materiales PEEK y Ti-6Al-4V, respectivamente, siendo el punto crítico localizado en el mismo punto del análisis estático.

Por otro lado, la deformación máxima obtenida es de 0.468 mm y 0.014mm, para los materiales PEEK y Ti-6Al-4V, respectivamente, siendo este último menor valor con respecto al material PEEK en los resultados del análisis estático y análisis transitorio, pero de igual valor del análisis estático del mismo material. Comparando los dos análisis estático y transitorio, no hay variación significativa, hemos obtenido los mismos valores

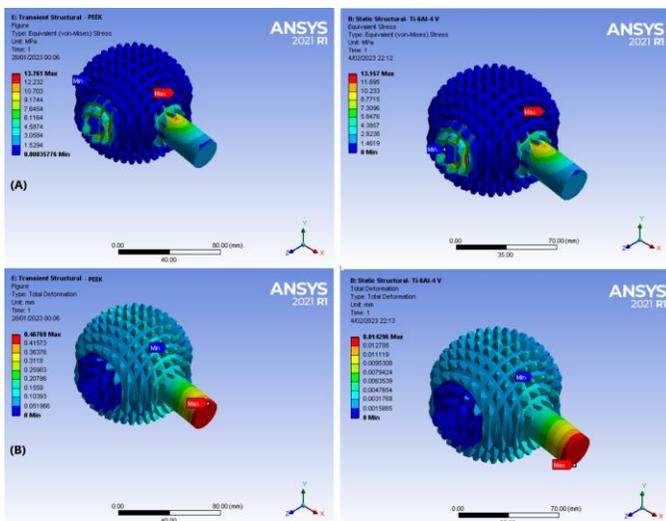


Fig. 11. Análisis transitorio del engranaje esférico cruzado de los materiales PEEK y Ti-6Al-4V.

- [5] F. Patanè and P. Cappa, "A 3-DOF parallel robot with spherical motion for the rehabilitation and evaluation of balance performance," *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 19, no. 2, pp. 157–166, 2011, doi: 10.1109/TNSRE.2010.2089535.
- [6] T. Makino, S. Takaneke, Y. Sakai, H. Yoshikawa, and T. Kaito, "Impact of mechanical stability on the progress of bone ongrowth on the frame surfaces of a titanium-coated PEEK cage and a 3D porous titanium alloy cage: in vivo analysis using CT color mapping," *Eur. Spine J.*, vol. 30, no. 5, pp. 1303–1313, 2021, doi: 10.1007/s00586-020-06673-4.
- [7] C. Gao *et al.*, "Enhancing antibacterial capability and osseointegration of polyetheretherketone (PEEK) implants by dual-functional surface modification," *Mater. Des.*, vol. 205, p. 109733, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109733>.
- [8] G. L. Converse, T. L. Conrad, C. H. Merrill, and R. K. Roeder, "Hydroxyapatite whisker-reinforced polyetherketoneketone bone ingrowth scaffolds," *Acta Biomater.*, vol. 6, no. 3, pp. 856–863, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2009.08.004>.
- [9] S. M. Kurtz and J. N. Devine, "PEEK biomaterials in trauma, orthopedic, and spinal implants," *Biomaterials*, vol. 28, no. 32, pp. 4845–4869, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2007.07.013>.
- [10] S.-C. Yang, C.-K. Chen, and K.-Y. Li, "A geometric model of a spherical gear with a double degree of freedom," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 123, no. 2, pp. 219–224, 2002, doi: 10.1016/S0924-0136(02)00067-5.
- [11] H.-C. Yang, "Using an Imaginary Planar Rack Cutter to Create a Spherical Gear Pair with Continue Involute Teeth," *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 42, no. 11, pp. 4725–4735, 2017, doi: 10.1007/s13369-017-2630-z.
- [12] S.-C. Yang, "A rack-cutter surface used to generate a spherical gear with discrete ring-involute teeth," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 27, no. 1–2, pp. 14–20, 2005, doi: 10.1007/s00170-004-2150-3.
- [13] L. Zhang, X. Lu, B. Wang, and X. Zhang, "Tooth Surface Modeling and Stress Analysis of 3-DOF Spherical Gear," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1570, no. 1, doi: 10.1088/1742-6596/1570/1/012099.
- [14] K. Abe, K. Tadakuma, and R. Tadakuma, "ABENICS: Active ball joint mechanism with three-DoF based on spherical gear meshings," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 37, no. 5, pp. 1806–1825, 2021, doi: 10.1109/TRO.2021.3070124.
- [15] F. Thomas, "Kinematics of a Gear-Based Spherical Mechanism," *Springer Proc. Adv. Robot.*, vol. 24 SPAR, pp. 323–331, 2022, doi: 10.1007/978-3-031-08140-8_35.
- [16] O. K. Ajayi, B. O. Malomo, S. D. Paul, A. A. Adeleye, and S. A. Babalola, "Failure modeling for titanium alloy used in special purpose connecting rods," *Mater. Today Proc.*, vol. 45, pp. 4390–4397, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.852>.
- [17] K. Abe and R. Tadakuma, "Development of Control Method for Active Ball Joint Mechanism Considering Singularity of Spherical Gear," in *2021 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, SII 2021*, 2021, pp. 690–695, doi: 10.1109/IEECONF49454.2021.9382684.
- [18] J. Zhang *et al.*, "Additively manufactured polyether ether ketone (PEEK) skull implant as an alternative to titanium mesh in cranioplasty," *Int. J. Bioprinting*, vol. 9, no. 1, pp. 173–180, 2023, doi: 10.18063/ijb.v9i1.634.
- [19] A. Heydari Astaraee, C. Colombo, and S. Bagherifard, "Insights on metallic particle bonding to thermoplastic polymeric substrates during cold spray," *Sci. Rep.*, vol. 12, no. 1, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-22200-5.
- [20] Z. Ding, J. Ju, M. Ma, Y. Zhang, and J. Chen, "Tuberosity reconstruction baseplate for shoulder hemiarthroplasty: Morphological design and biomaterial application," *Front. Bioeng. Biotechnol.*, vol. 10, 2022, doi: 10.3389/fbioe.2022.1047187.
- [21] A. Mestar, S. Zahaf, N. Zina, and A. Boutaous, "Numerical study of the effect of elastomer and cement of stress absorbers on the reduction of stresses in tibia and tibial bone analysed by finite element method," *Nano Biomed. Eng.*, vol. 10, no. 1, pp. 56–78, 2018, doi: 10.5101/nbe.v10i1.p56-78.
- [22] S. Kapoor *et al.*, "Evaluation of Stress Generated with Different Abutment Materials and Angulations under Axial and Oblique Loading in the Anterior Maxilla: Three-Dimensional Finite Element Analysis," *Int. J. Dent.*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/9205930.
- [23] L. Xie *et al.*, "Numerical analysis and experimental validation on residual stress distribution of titanium matrix composite after shot peening treatment," *Mech. Mater.*, vol. 99, pp. 2–8, 2016, doi: 10.1016/j.mechmat.2016.05.005.
- [24] M. G. Gok and O. Cihan, "Numerical analysis of the application of different lattice designs and materials for reciprocating engine connecting rods," *Sci. Iran.*, vol. 29, no. 5 B, pp. 2362–2373, 2022, doi: 10.24200/sci.2022.59400.6216.
- [25] A. K. Bhawe *et al.*, "Static structural analysis of the effect of change in femoral head sizes used in Total Hip Arthroplasty using finite element method," *Cogent Eng.*, vol. 9, no. 1, 2022, doi: 10.1080/23311916.2022.2027080.
- [26] H. Song, L. Xu, X. Chen, W. Wei, and K. Liu, "Static and dynamic performance analysis of scissor seat of combine harvester," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2125, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/2125/1/012042.
- [27] Y. Cao, R. Zhong, D. Shao, Q. Wang, and X. Guan, "Dynamic Analysis of Rectangular Plate Stiffened by Any Number of Beams with Different Lengths and Orientations," *Shock Vib.*, vol. 2019, p. 2364515, 2019, doi: 10.1155/2019/2364515.
- [28] W. Yang and D. Jiang, "An improved rigid multibody model for the dynamic analysis of the planetary gearbox in a wind turbine," *Shock Vib.*, vol. 2016, 2016, doi: 10.1155/2016/9742673.
- [29] M. L. Puneeth and G. Mallesh, "Dynamic contact behavior of asymmetric spur gear," in *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 44, pp. 2019–2027, doi: 10.1016/j.matpr.2020.12.125.
- [30] Y. Su, L. Yao, and J. Zhang, "Contact dynamics analysis of nutation drive with double circular-arc spiral bevel gear based on mathematical modeling and numerical simulation," *Mech. Sci.*, vol. 12, no. 1, pp. 185–192, 2021, doi: 10.5194/ms-12-185-2021.
- [31] B. Zheng, X. Wang, and J. Zhang, "Structure Optimization Design for Brake Drum Based on Response Surface Methodology," *Manuf. Technol.*, vol. 21, no. 3, pp. 413 – 420, 2021, doi: 10.21062/mft.2021.045.

- [32] F. Concli, L. Cortese, R. Vidoni, F. Nalli, and G. Carabin, "A mixed FEM and lumped-parameter dynamic model for evaluating the modal properties of planetary gearboxes," *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 32, no. 7, pp. 3047–3056, 2018, doi: 10.1007/s12206-018-0607-9.
- [33] B. W. Lenggana *et al.*, "Effects of mechanical vibration on designed steel-based plate geometries: Behavioral estimation subjected to applied material classes using finite-element method," *Curved Layer. Struct.*, vol. 8, no. 1, pp. 225–240, 2021, doi: 10.1515/cls-2021-0021.