

Análisis y simulación del ciclo de vida máximo de una bomba de pedal hidráulico para un sistema de clutch automotriz comercial: un caso de estudio.

Analysis and simulation of the maximum life cycle of a hydraulic pedal pump for a commercial automotive clutch system: a case study

- **Johann Castillo-Chávez** es alumno de la Licenciatura en Ingeniería Mecánica y Automotriz de la Facultad de Ingeniería en la Universidad Autónoma de Querétaro (México) (jcastillo40@alumnos.uaq.mx), Estudiante.
- **David Robledo-Jiménez** es estudiante de doctorado en Mecatrónica de la Facultad de Ingeniería en la Universidad Autónoma de Querétaro (México) (david.robledo@uaq.mx) (<https://orcid.org/0009-0000-7289-6430>), Maestro.
- **Carlos Gustavo Manríquez-Padilla** es profesor de la Licenciatura en Ingeniería Mecánica y Automotriz de la Facultad de Ingeniería en la Universidad Autónoma de Querétaro (México) (carlos.manriquez@uaq.mx) (<https://orcid.org/0000-0003-1332-5173>), Doctor.
- **Ángel Pérez-Cruz** es profesor de la Licenciatura en Ingeniería Mecánica y Automotriz de la Facultad de Ingeniería en la Universidad Autónoma de Querétaro (México) (angel.perez@uaq.mx), (<https://orcid.org/0000-0001-5320-4064>), Doctor.

Resumen: En este trabajo se presenta el análisis de ciclo de vida máximo de uno de los componentes que presenta un mayor grado de desgaste dentro del sistema de clutch de un vehículo comercial, la bomba de pedal hidráulica. El análisis antes mencionado se llevó a cabo empleando una simulación estática del tipo estructural desarrollada en un software comercial basado en los métodos del elemento finito (MEF) emulando las condiciones de operación mínimas del sistema. Adicionalmente, se determinó de forma experimental la magnitud y dirección de la fuerza de operación mínima del sistema, es decir, la fuerza más pequeña que es capaz de impulsar el vástago de la bomba a lo largo de toda su carrera de operación. Mediante el uso y la integración de modelos computacionales complejos y con base a datos que se obtuvieron de manera experimental se realizó una predicción del comportamiento mecánico del sistema de clutch, la cual, permitió corroborar que las zonas de fractura por fatiga que se presentan en la simulación del diseño del vástago de la bomba, coinciden con las fallas que presentan las bombas de clutch de automóviles en los cuales ocurrió el fallo debido a un uso cotidiano de las mismas en condiciones de operación normal, y no debido a una mala instalación o mal uso de la misma, donde la falla se presentaría en diversas zonas y de manera diferente según sea el caso.

Palabras clave: Ciclo de vida, Simulación MEF, Aplicaciones automotrices, Sistema de clutch, Fatiga.

Cómo citar: Castillo-Chávez, J., Robledo-Jiménez, J., Manríquez-Padilla, C. G., y Pérez-Cruz, A., (2024). Propuestas de Política Urbana para Mejorar la Prosperidad Económica en la Zona Metropolitana de Querétaro. *Tecnología, Ciencia y Estudios Organizacionales*, 6(12), pp. 144-150. <https://doi.org/10.56913/teceo.6.12.144-150>

Recepción: 10-10-2024

Aprobación: 23-10-2024



Abstract: On this work is presented the analysis of the maximum life cycle of a component that present a great wear on the clutch system of a commercial vehicle, the hydraulic pedal pump. The aforementioned analysis was made by using a structural static simulation, developed in a commercial software based on Finite Element Method (FEM) emulating the basic operating conditions of the system. Additionally by experimental wayform, the magnitude and direction of the minimum operational force was determined, it means, the smallest force needed for drive the clutch master cylinder push rod by throughall operating stroke. By integration and simulation of complex computational models and data obtained due to a experimental work, a prediction of the mechanical behavior of the clutch system is made, it allows to corroborate that the fatigue failure zone presented on the simulation of the, clutch master cylinder push rod of the pump, match with the failures present on the clutch system of a variety of vehicles where the failure occurs by an everyday use in a normal operational conditions and not by a wrong installation of the pump or an incorrect use of them, where the failure could be very obvious, because the fracture occurs on different areas and on a different way.

Keywords: Life cycles, FEM Simulation, Automotive applications, Clutch system, Fatigue.

Introducción

El sistema de clutch en un automóvil desempeña una función vital al regular la transferencia de potencia desde el motor de combustión interna (MCI) hacia las ruedas de manera controlada. De forma general, estos sistemas permiten conectar y desconectar el flujo de potencia del MCI mediante la presión de un pedal, lo que facilita un control preciso sobre la transmisión de potencia y mejora la experiencia de conducción. Investigaciones previas han explorado diversos aspectos de este sistema. Por ejemplo, Zink et al. (2006) llevaron a cabo un análisis de las diversas tecnologías relacionadas con sistema de clutch, destacando la importancia del diseño de los dispositivos periféricos para mejorar el confort del usuario. Welter et al. (2010) centraron su investigación en la operación del sistema de clutch, demostrando cómo la integración de sensores electrónicos y nuevos tipos de accionamiento ofrece soluciones técnicas efectivas para los problemas comunes en los sistemas tradicionales. Por su parte, Camarena (2011) detalló la metodología de diseño del clutch en vehículos terrestres, incluyendo los cálculos para elementos principales como lo son; diafragmas, tirantes y muelles de amortiguación. De manera similar, Hernández (2023) investigó los parámetros de operación del sistema de clutch mediante la implementación de un banco de pruebas para cilindros maestros y boosters, identificando factores clave que afectan el rendimiento de estos componentes. Estas investigaciones proporcionan una base sólida para comprender la evolución y los desafíos actuales en el diseño y funcionamiento de los sistemas de clutch en la industria automotriz, como lo es la adecuada selección de los materiales de fabricación.

Considerando lo anterior, en este trabajo se plantea un análisis estático, mediante la implementación de una simulación en un software comercial basado en los métodos del elemento finito (MEF), para determinar el ciclo de vida máximo de la bomba de pedal hidráulica de uno de los automóviles más vendidos en México en 2023, según la Asociación Mexicana de la Industria Automotriz AMMIA, el Nissan Versa en su generación N17. Para el análisis se seleccionó la bomba de pedal ya que es uno de los componentes que presenta un alto grado de desgaste dentro del sistema de clutch debido tanto a las condiciones de operación, como a la gran cantidad de ciclos de trabajo al que se encuentra sometida la bomba de pedal. Al integrar modelos computacionales complejos con datos experimentales se espera obtener una comprensión holística y precisa del comportamiento del sistema bajo condiciones de carga mínimos. Este enfoque combinado entre

experimentación y simulación proporciona una base sólida para la evaluación de la integridad estructural y el rendimiento operativo de los componentes del sistema de clutch en estudio.

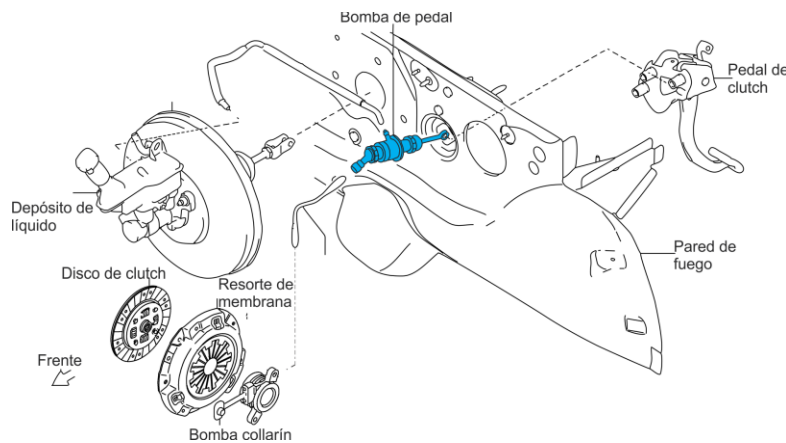
Método

En esta sección se describe la falla en la bomba de pedal de clutch que se analizó en el presente trabajo, así como el estado de cargas que lo ocasiona. Adicionalmente, se brinda una descripción de los experimentos físicos realizados para determinar las magnitudes de las fuerzas mínimas de funcionamiento del sistema, así como de las condiciones de frontera utilizadas para desarrollar la simulación estática estructural para determinar el estado de esfuerzos y los ciclos de vida de los componentes críticos del sistema.

Descripción de la falla del sistema

Dentro del mercado mexicano, los vehículos marca Nissan, principalmente el modelo Versa (N17), el March (N17) y el Tiida (N16) utilizan un sistema de clutch que se encuentra provisto de una bomba conectada al pedal de accionamiento del clutch, la cual, genera presión hidráulica que se utiliza para separar el disco de clutch del volante del motor mediante la bomba collarín, permitiendo los cambios de velocidades en un sistema de transmisión estándar como se observa en la Figura 1.

Figura 1. Partes del sistema de clutch.



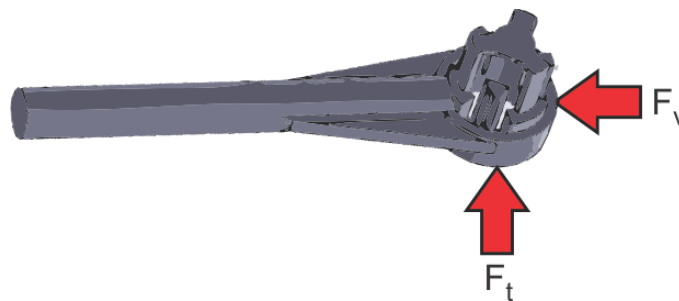
Una de las fallas que la bomba de pedal suele presentar es la fractura en el soporte del vástago en la zona de sujeción al pedal de clutch, como se muestra en la Figura 2, causada por diferentes factores como lo son; la geometría de la pieza, la fatiga de los materiales y los diferentes hábitos de manejo al accionar incorrectamente el pedal, provocando que la pieza entera quede inutilizable a pesar de que el mecanismo de la bomba todavía se encuentre funcional, debido a que en este estado ya no puede soportar las cargas a las que normalmente se encuentra sometida al presionar el pedal.

Figura 2. Tipo de falla en la bomba de pedal



De manera experimental, se determinó la fuerza mínima a la que funciona el sistema, es decir, la fuerza más pequeña que permite desplazar e inclinar el vástago de la bomba de pedal a lo largo de toda su carrera de funcionamiento compuesta por una longitud de 30 mm y una inclinación de 15°. Para realizar el experimento, se consideró el estado de cargas mostrado en la Figura 3, donde se observa que se aplican dos cargas una vertical, F_v , y otra transversal, F_t .

Figura 3. Estado de cargas del vástago de la bomba de pedal.



Se realizaron una serie de experimentos sobre una bomba de pedal comercial, para ambos casos, el experimento consistió en aplicar una fuerza de forma gradual hasta que el vástago de la bomba llego hasta a su límite de desplazamiento o de inclinación. Después de realizar un total de diez experimentos, se encontró que el promedio de la fuerza vertical mínima, F_v , es de 88.5 N, mientras que la fuerza transversal mínima, F_t , tiene una magnitud de 1.20 N. Las fuerzas antes mencionadas se utilizaron como parte de las condiciones de frontera empleadas para elaborar una simulación estática estructural de la bomba de pedal con el objetivo de determinar tanto los estados de esfuerzos y las gráficas del ciclo de vida de los elementos críticos que componen a la bomba de pedal analizada.

Condiciones de frontera de la simulación MEF

Con el fin de realizar la simulación estática estructural, se seleccionó como cuerpo de análisis el vástago de la bomba de pedal, debido a que este componente es el que se encuentra sometido de forma directa a las cargas verticales y transversales que ocasionan la fractura en la zona de sujeción

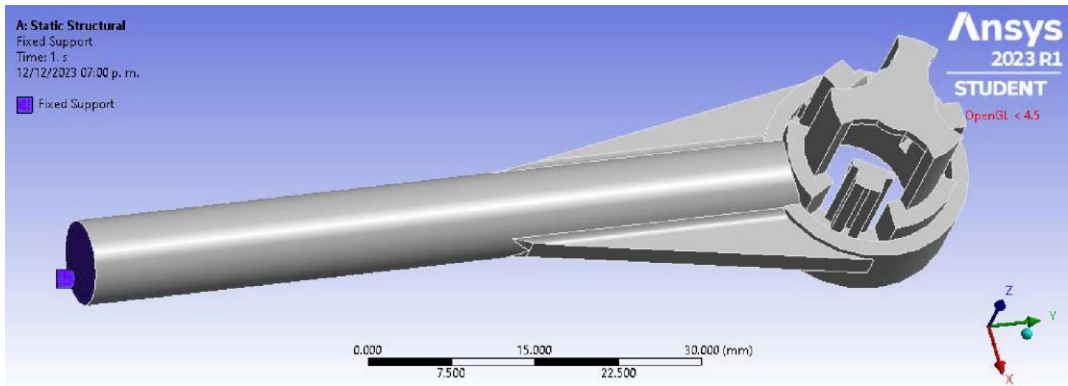
con el pedal de clutch. Para realizar la simulación se empleó el software MEF comercial ANSYS Workbench 2023 R1 en su versión estudiantil. Los parámetros utilizados como condiciones de frontera se enlistan en la Tabla 1.

Tabla 1.
Condiciones de frontera de la simulación MEF.

Parámetro	Valor
Material	Polycarbonato
Tipo de elemento	SOLID186
Tamaño del elemento	0.5 mm
Número de nodos	114,558
Número de elementos	65,031

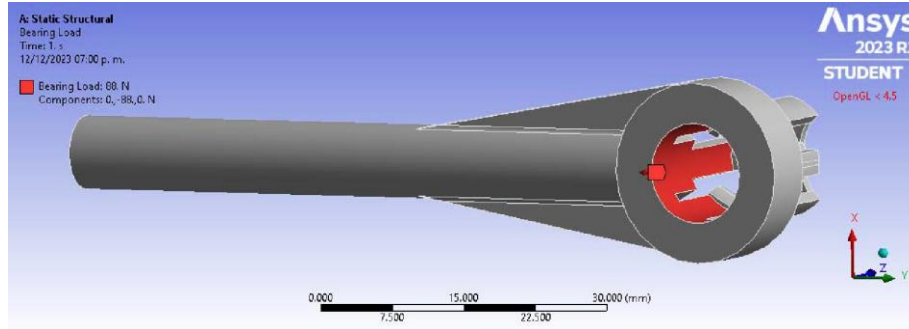
Como parte de las condiciones de frontera, se restringieron los desplazamientos y las rotaciones del vástago de la bomba de pedal en uno de sus extremos, como se muestra en la Figura 5. Este empotramiento representa la restricción física que experimenta el vástago cuando se encuentra en el límite inferior de su carrera de funcionamiento, es decir, cuando el pedal de clutch se presionó por completo.

Figura 5. *Restricciones de movimiento aplicadas al vástago de la bomba de pedal.*

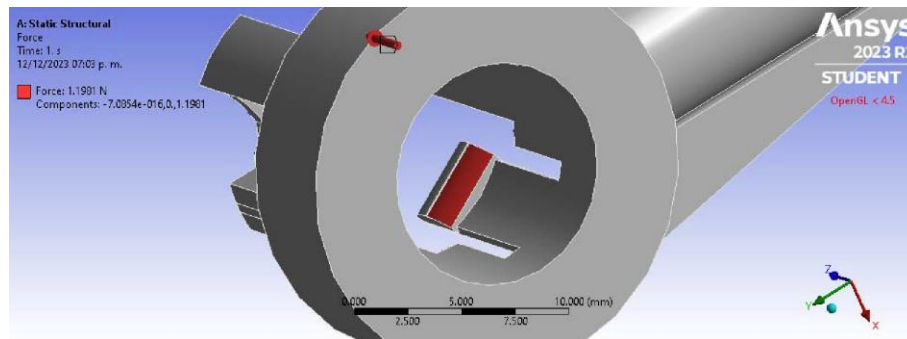


De forma similar, se aplicaron las fuerzas mínimas, F_v y F_t , dentro del soporte de unión entre el vástago y el pedal del clutch como se muestra en la Figura 6. El estado de cargas emula las fuerzas más pequeñas transmitidas por el pedal del clutch al presionarse por completo.

Figura 6. Aplicación de las fuerzas F_v y F_t sobre el vástago de la bomba de pedal.



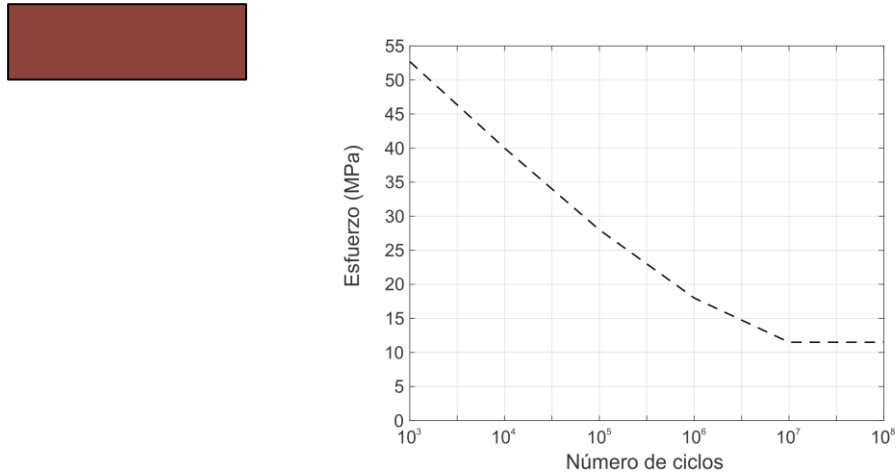
a) Aplicación de la fuerza F_v .



b) Aplicación de la fuerza F_t .

Con el fin de conocer el comportamiento que tendría el vástago de la bomba de pedal al someterlo a una cantidad finita de ciclos de carga, se realizó un análisis de fatiga del material. Para ello, se determinó la curva de ciclo de esfuerzos para el material en cuestión. Mura y Ricci (2018), elaboraron una serie de diagramas del ciclo de esfuerzo para el plástico Policarbonato (PC)-Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) bajo diversas temperaturas de trabajo. Tomando como base la información reportada por Mura y Ricci (2018), considerando que la bomba de pedal trabajará en un ambiente sin alta humedad a una temperatura promedio de 22°C, se recreó la curva de ciclo de esfuerzos, dentro del software MEF como se muestra en la Figura 7.

Figura 7. Aproximación de la curva de ciclo de esfuerzos para PC-ABS.

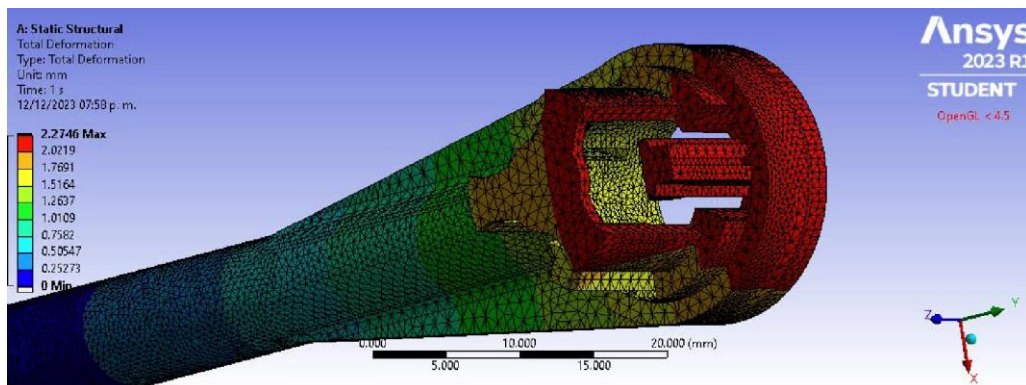


Una vez alimentada la curva de ciclo de esfuerzos en el software MEF se procedió a calcular la resolución de la simulación, utilizando los siguientes bloques de resultados: Deformación total, Esfuerzo equivalente Von-Mises, Ciclo de vida y Factor de seguridad.

Resultados

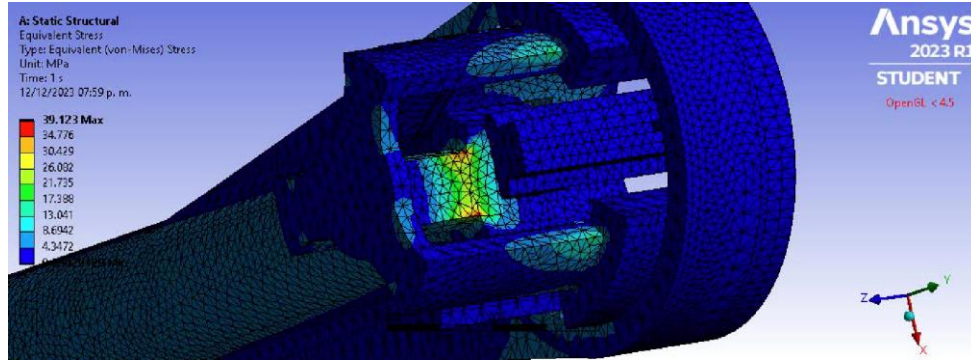
Con las condiciones de frontera mencionadas en la sección anterior se realizó una simulación estática estructural donde se encontraron los siguientes resultados, para el caso de la deformación total se encontró que el vástago de la bomba sufre una deformación máxima de 2.27 mm en el área del acoplamiento con el pedal del clutch como se muestra en la Figura 8.

Figura 8. Gráfica de deformación total del vástago.



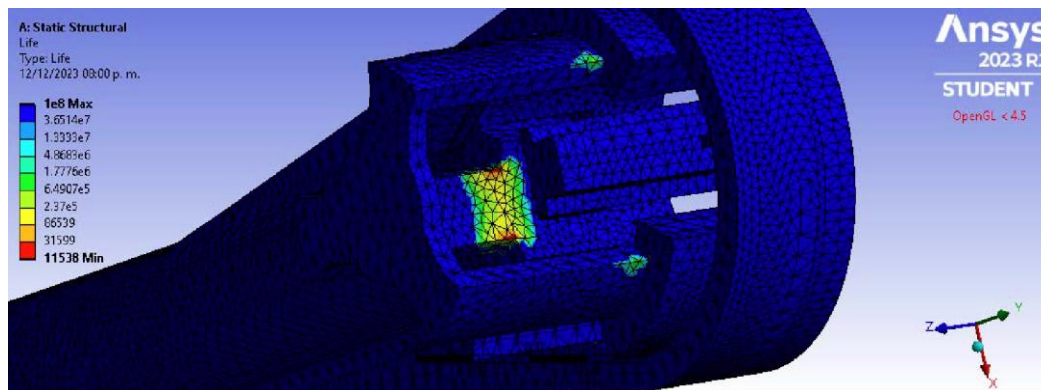
Para el análisis de esfuerzos se encontraron que los esfuerzos máximos rondan los 39 MPa y se presentaron en las bases de los seguros que unen el vástago con el perno del pedal de clutch como se muestra en la Figura 9.

Figura 9. Gráfica del estado de esfuerzos al que se encuentra sometido el vástago.



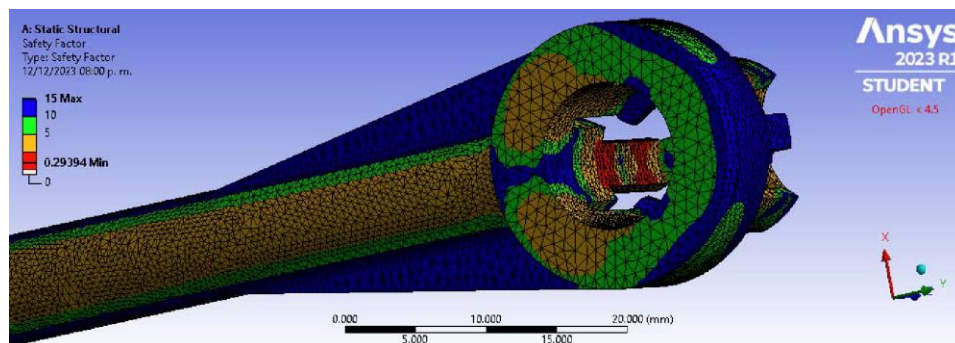
Para el caso del análisis del ciclo de vida del vástago, se encontró que la zona con menor esperanza de vida es la misma que presenta mayor magnitud de esfuerzos, ubicada en la zona de la base de los seguros que sujetan al pedal, obteniendo zonas con esperanza de vida de menos de 12 mil ciclos.

Figura 10. Gráfica del estado de esfuerzos al que se encuentra sometido el vástago.



De forma similar, para el caso del factor de seguridad se encontró que la zona con menores factores de seguridad se presenta alrededor de la zona de sujeción al pedal, resultando así áreas de la geometría con un factor de seguridad de hasta 0.29.

Figura 11. Gráfica de la distribución de factores de seguridad en el vástago.



Como se puede observar en los resultados provenientes de la simulación, el estado de esfuerzos al que se encuentra sometido el vástago está muy por debajo de los 54 MPa, lo que corresponde al valor del esfuerzo de cedencia del material, por ello tanto los esfuerzos como las deformaciones se encuentran dentro del rango elástico del material.

Discusión

En este trabajo se presentó un análisis del comportamiento mecánico de la bomba de pedal hidráulica de un Nissan Versa en su generación N17, llevado a cabo mediante la implementación de una simulación estática estructural elaborada en un software comercial basado en los métodos del elemento finito (MEF). Se determinó de manera experimental la fuerza mínima de funcionamiento del sistema y junto con las propiedades mecánicas del material PC-ABS se establecieron las condiciones de frontera de la simulación del vástago de la bomba. Como resultado de la simulación se encontró que, tanto los esfuerzos como las deformaciones que experimenta el vástago de la bomba de pedal al someterse a una fuerza mínima de funcionamiento se encuentran dentro del rango elástico del material. Adicionalmente, se determinó que en las zonas del vástago donde las magnitudes del estado de esfuerzos al que se encuentra sometido el cuerpo son máximos, el factor de seguridad y los ciclos de vida son mínimos. Las zonas de esfuerzos máximos y ciclos de vida mínimos, coinciden con las zonas de fractura de las bombas de pedal sometidas a condiciones de trabajo reales. Por lo anterior se puede decir que es necesario realizar un rediseño de la zona de acoplamiento entre el vástago de la bomba de pedal y el perno del pedal de clutch, de tal forma que se puedan reducir los concentradores de esfuerzos, ya sea mediante la implementación de un refuerzo en las bases de los seguros o mediante un cambio de geometría de las mismas.

Referencias

- Camarena Lillo, F. (2011). Diseño del embrague de un vehículo (Ingeniería Técnica en Mecánica). Universidad Carlos III de Madrid.
- Hernández Referia, A. F. (2015). Determinación de parámetros de operación de banco de pruebas de ingeniería de Cilindro Maestro y Booster aplicando diseño de experimentos (Maestría en Ingeniería). Universidad Autónoma de Querétaro.
- Mura, A., Ricci, A., & Canavese, G. (2018). Investigation of fatigue behavior of ABS and PC-ABS polymers at different temperatures. *Materials*, 11(10), 1818. <https://doi.org/10.3390/ma11101818>
- Welter, R., Lang, V., & Wolf, B. (2010). Clutch operation. In 9th Schaeffler Symposium, 61-74.
- Zink, M., Hausner, M., Welter, R., & Shead, R. (2006). "Clutch and release system". In 8th LuK Symposium, 27-45.