

## PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL REDISEÑO DE UNA PIEZA AUTOMOTRIZ, UTILIZANDO SIMULACIÓN MATEMÁTICA

### METHODOLOGICAL PROPOSAL FOR THE REDESIGN OF AN AUTOMOTIVE PART, USING MATHEMATICAL SIMULATION

Ricardo Cortez Olivera, Juan J. Martínez Cosgalla, J. Santana Villarreal  
Reyes

*rcortez@ipn.mx, jmartinezc@ipn.mx, svillarreal@ipn.mx*

Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Azcapotzalco  
Av. De las Granjas No. 682, Col. Sta. Catarina, Azcapotzalco, Ciudad de México

Recibido 23/12/2021; Aceptado: 01/03/2022

**Resumen:** Cuando algún elemento mecánico sufre falla estructural dejando de cumplir con la función para la cual fue diseñado, se realiza el rediseño de este, iniciando por localizar la causa que provocó la falla, y que pudo ser por el material, la forma geométrica, las condiciones de operación o a las cargas a que está sometido. La determinación de estas causas, puede resultar complicada si no se cuenta con experiencia necesaria. En este trabajo se desarrolla una metodología, basada en el método de los elementos finitos, para rediseñar la horquilla de la suspensión delantera de un automóvil compacto, que presentó la falla dentro del periodo de garantía; por lo tanto, se procedió a analizar el diseño original para Europa, obteniendo valores elevados en los esfuerzos y desplazamientos de una sección del elemento; así pues, se redimensionó este y se obtuvieron resultados aceptables para las condiciones de operación en caminos de México.

**Palabras clave:** *metodología; rediseño; elemento mecánico; elementos finitos.*

**Abstract:** *When a mechanical element suffers a structural failure, ceasing to fulfill the function for which it was designed, its redesign is carried out, starting by locating the cause that caused*

*the failure, and which could be due to the material, the geometric shape, the operating conditions or the loads to which it is subjected. The determination of these causes can be complicated if the necessary experience is not available. In this work, a methodology is developed, based on the finite element method, to redesign the front suspension fork of a compact car, which presented the failure within the warranty period; therefore, the original design for Europe was analyzed, obtaining high values in the forces and displacements of a section of the element; thus, this was resized and acceptable results were obtained for the operating conditions on roads in Mexico.*

**Keywords:** methodology; redesign; mechanical element; finite elements.

## 1. Introducción

Cuando se diseña o rediseña cualquier producto, en lo primero que se piensa es que éste debe de cumplir con los requerimientos establecidos por el cliente, debiendo tener un nivel calidad aceptable y acatando la normatividad nacional e internacional vigente; todo esto, con la finalidad que dicho producto que se diseñe o se rediseñe pueda ser comercializado en un mercado globalizado.

Así mismo, al realizar el diseño de cualquier elemento, equipo o máquina, es necesario conocer las necesidades del cliente, mismas que el ingeniero debe transformar en requerimientos técnicos, lo que origina la generación de un proyecto. Guillermo García P [1], establece que: “El proyecto procede de lo abstracto a lo concreto. Este comienza con un pensamiento, el cual posteriormente puede expresarse en palabras, formas geométricas, ilustraciones gráficas o símbolos matemáticos que en alguna forma se ajustan a las circunstancias del problema”.

Por otra parte, se puede definir a un proyecto como el conjunto de las actividades que desarrolla una persona o una entidad para alcanzar un determinado objetivo. Estas actividades se encuentran interrelacionadas y se desarrollan de manera coordinada, para lo cual se toma en consideración la estética, la funcionalidad, la calidad, el medio ambiente, la seguridad, la ergonomía y el costo y la normatividad existente.

Por lo que desarrollar un proyecto puede conllevar a realizar un diseño, el cual según el diccionario de la lengua española [2], indica que puede ser:

- 1.- Proyecto, plan de configurar algo.
- 2.- Concepción original de un objeto u obra destinados a la producción en serie.
- 3.- Descripción o bosquejo verbal de algo.
- 4.- Realización de un plan detallado para la ejecución de una acción o una idea.

La anterior es una definición general de lo que significa la palabra diseño, pero enfocada más al área de ingeniería mecánica, Joseph E. Shigley [3], establece que: “Diseñar, es formular un plan para satisfacer una necesidad específica o resolver un problema.

Si el plan resulta en la creación de algo físicamente real, entonces el producto debe ser funcional, seguro, confiable, competitivo, útil, que pueda fabricarse y comercializarse.

Por lo tanto, el diseño es un proceso innovador y altamente iterativo, el cual también es un proceso de toma de decisiones”.

Robert L. Norton [4], establece que el diseño en ingeniería se ha definido como “el proceso de aplicar las diversas técnicas y principios científicos con el propósito de definir un dispositivo, un proceso o un sistema con suficientes detalles que permitan su realización. El diseño puede ser simple o muy complejo, fácil o difícil, matemático o no matemático; puede implicar un problema trivial o uno de gran importancia”.

Por otra parte, algunos autores consideran que las etapas del proceso de diseño son:

- a) identificación del problema
- b) ideas preliminares
- c) perfeccionamiento
- d) análisis
- e) decisión
- f) realización

Pero estas etapas pueden variar dependiendo de la metodología que se utilice.

En el proceso tradicional de diseño, ya que se tienen establecidas las formas, materiales y dimensiones del elemento a diseñar, se procede a generar un prototipo de este elemento, máquina o mecanismo, al cual se le aplicarán las condiciones de trabajo como funcionará, con el fin de validar el diseño. En ocasiones los elementos que se consideran críticos son sometidos al análisis experimental como pueden ser fotoelasticidad o extensometría.

La extensometría es una técnica experimental que se emplea para la medición de esfuerzos y deformaciones la cual toma como referencia el cambio de la conductividad eléctrica de un material al aplicarse una fuerza a este, lo que permite determinar el estado mecánico del material con un alto grado de exactitud. Su fundamento básico, es la variación de la resistencia eléctrica que se produce en un hilo conductor cuando se alarga o contrae. Para determinar ésta se utiliza un sensor llamado galga extensométrica.

Todo lo anterior resulta ser muy costoso y tardado, ya que se deben de fabricar varios prototipos antes de obtener el modelo final, por lo que, buscando la optimización en el diseño mediante el empleo de la ciencia, desde mediados del siglo pasado se empezaron a utilizar métodos computacionales que permitieran modelar y simular las condiciones a las cuales trabajarían los elementos que se pretendía diseñar.

Estos métodos tienen como base el desarrollo de modelos matemáticos complejos, los cuales se plantearon a principios del siglo pasado, pero no se pudieron desarrollarse completamente. Sólo hasta la aparición de la computadora fue posible realizar estos desarrollos matemáticos; dentro de estos se pueden mencionar las diferencias finitas y los elementos finitos.

Con respecto al método de los elementos finitos, Manuel Vázquez [5], comenta que: “el mismo consiste en dividir la estructura a analizar en partes llamadas *elementos finitos*, interconectadas entre sí, el método de los elementos finitos reduce el problema elástico a la resolución de un sistema de ecuaciones algebraicas”.

Por su parte Zienkewicz [6], establece que: “el método de los elementos finitos es un procedimiento general de discretización de los problemas continuos planteados por expresiones definidas matemáticamente”.

Siendo un procedimiento de aproximación de problemas continuos, donde:

- a) El continuo se divide en un número finito de partes (elementos), cuyo comportamiento se especifica mediante un número finito de parámetros, y
- b) La solución del sistema completo como ensamblaje de los elementos sigue precisamente las mismas reglas que se aplican a los problemas discretos tipo.

Este método se aplica en ingeniería para determinar esfuerzo y deformaciones en automoviles, aeronaves, estructuras de edificios, así como determinar campos magnéticos, flujos de calor y fluidos entre otros.

Tirupathi R. Chandrupatla [7], indica que “con este método pueden modelarse problemas complejos con relativa facilidad y en una computadora pueden probarse varias configuraciones alternas antes de construir el prototipo”.

Por lo que, en la actualidad, este método se utiliza para realizar la simulación de la forma geométrica, los materiales y la forma de actuar de los elementos mecánicos bajo ciertas condiciones de carga, sin tener que fabricar un prototipo físico. Siendo este prototipo fabricado cuando ya se tienen las mejores condiciones tanto técnicas como económicas.

## **2. Problemática**

Cuando se diseña un elemento mecánico se consideran las condiciones de operación a que estará sometido, sin embargo en ocasiones estas se presentan de manera diferente a las previstas; en el mejor de los casos dicho elemento no fallará toda vez que se diseñó para trabajar bajo condiciones más severas, pero pueden presentarse fallas por resistencia (sobrepasando el esfuerzo del material con que es fabricado) o por rigidez (presentando una deformación mayor a la permitida en la aplicación para la cual fue diseñado).

Ya sea una u otra el tipo de falla, finalmente este elemento no está cumpliendo con las especificaciones para lo cual fue diseñado, lo que puede ocasionar pérdidas económicas o humanas. Cuando se generan estas fallas es necesario el rediseño del elemento, tomando en consideración las condiciones reales de trabajo.

Pero en algunas ocasiones es muy difícil poder establecer con exactitud estas condiciones de trabajo (que fuerzas son aplicadas, en qué punto del elemento se aplican, si son fuerzas estáticas o dinámicas, las condiciones de apoyo, si son cargas cíclicas, las temperaturas a las cuales es sometido, etc.).

Lo anterior origina que el rediseñar este elemento sea un tanto complicado, ya que no se cuenta con todos los datos que permitan establecer un análisis adecuado.

Esto se complica aún más cuando dicho elemento está fabricado de diferentes materiales, y formas geométricas complicadas, lo que origina que determinar cómo se distribuyen las fuerzas aplicadas en cada material de forma teórica sea laborioso y en algunos casos muy difícil de realizar, por lo cual para estas condiciones son de gran ayuda los métodos computacionales.

### **3. Metodología propuesta**

Para realizar el diseño de elementos mecánicos existen varias metodologías entre las que se pueden mencionar: diseño orientado al usuario, diseño orientado al objeto, diseño por caja negra, diseño por caja transparente, diseño metodológico, diseño axiomático, diseño basado en el modularidad del producto, entre otras.

La mayoría de estas metodologías están enfocadas a productos nuevos, pero en ocasiones se tiene que rediseñar o realizar una ingeniería inversa de algún producto o componente. En ese sentido Juan J. Delfín [8], comenta que “La Ingeniería Inversa es una metodología que se utiliza para obtener modelos o duplicados a partir de un objeto de referencia y casi un 80% de las actividades de las industrias, está relacionado algún método de la Ingeniería Inversa.”

El término ingeniería inversa [9], que comúnmente es abreviado como RE (por sus siglas en inglés), se utiliza para resumir el proceso de reconstrucción de un objeto existente, se puede decir que el ingeniero de diseño comienza con el producto final y trabaja a través del proceso de diseño en la dirección opuesta, para llegar a la especificación de diseño del producto. Durante el proceso, se descubre información vital sobre el concepto de diseño y los métodos de fabricación

Por lo cual, el establecer metodologías para el rediseño o ingeniería inversa es de vital importancia. En este sentido se propone una metodología para el rediseño, la cual constan de los siguientes pasos:

- A) **ANALISIS GENERAL DE LA PIEZA QUE FALLA:** es establecer en que sección o secciones de la pieza se produce la falla y de que tipo es esta.
- B) **ANALISIS DE CONDICIONES DE TRABAJO:** Se establecen cuáles son las condiciones en que trabajaba la pieza, como pueden ser temperatura, humedad, ambiente, etc.
- C) **ANALISIS DE PUNTOS CRITICOS Y DE FALLA:** Se establecen en que sección o secciones de la pieza se pueden concentrar los esfuerzos, en donde se produce la falla y de que tipo es.
- D) **ANALISIS DE COMPOSICION QUIMICA DE LA PIEZA:** Se realizan pruebas de laboratorio para determinar la composición química de la pieza, saber si cumple con las especificaciones establecidas o si es homogéneo el material.

- E) **PRUEBAS FÍSICAS DESTRUTIVAS Y NO DESTRUCTIVAS:** Se realizan con la finalidad de determinar la dureza de material, el esfuerzo de cedencia, la deformación unitaria. y corroborar que lo anterior corresponde al material establecido por las pruebas químicas.
- F) **EVALUAR DATOS OBTENIDOS, PARA ESTABLECER POSIBLES CAUSAS DE FALLA:** Se comparan los datos obtenidos en el análisis químico con las pruebas físicas para corroborar que ambos resultados correspondan con el material de que está fabricada la pieza. Se comparan condiciones de trabajo con condiciones establecidas en el diseño.
- G) **GENERAR MODELO, APLICAR CARGAS Y DETERMINAR ESFUERZOS Y DEFORMACIONES:** Conociendo las propiedades químicas y mecánicas del material se procede a realizar el modelo, generar el mallado, establecer condiciones de frontera, aplicar las cargas en los lugares en donde se supone están actuando. Se determinan los esfuerzos y las deformaciones, los cuales deben de coincidir con la forma en que falla la pieza. Si no se logra lo anterior, se tienen que establecer variantes en la forma y ubicación en que se aplican las cargas hasta que coincida. Lográndose esto se dice que se ha validado el modelo.
- H) **REALIZAR EL REDISEÑO:** Teniendo el modelo validado se puede realizar variantes en cuanto al material utilizado, forma geométrica del elemento, tolerancias de forma y posición y ubicación de apoyos, con el fin de lograr disminuir los esfuerzos y las deformaciones en los puntos críticos.

Lo anterior se muestra en el diagrama de flujo indicado en la figura 1.

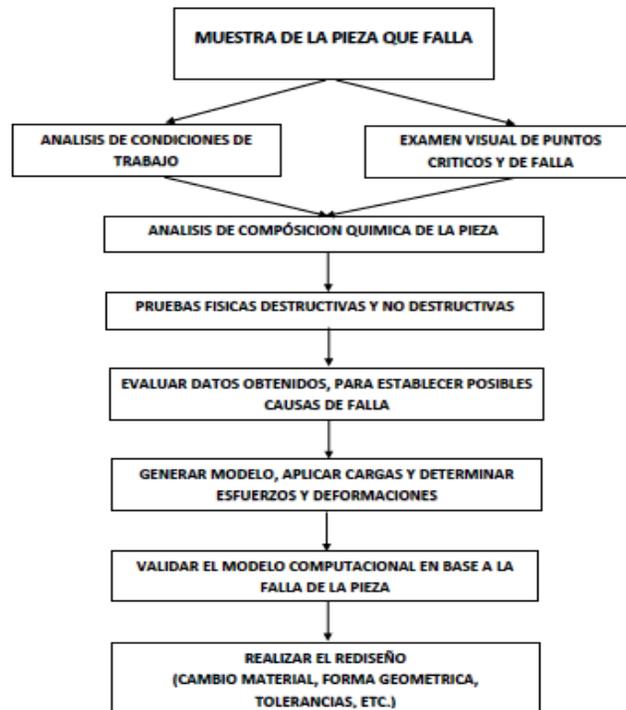


Figura 1. Diagrama de flujo. Fuente: propia

Para realizar lo anterior es importante tomar en cuenta dos aspectos. El aspecto técnico el cual entre otras cosas toma en consideración cuales son las condiciones en que estará trabajando la pieza, con qué elementos estará en contacto, qué espacio se tiene para ubicarla, qué tolerancias de forma y posición se requieren, cuál es el proceso de manufactura de la pieza y hasta cuál es la forma de embalar la pieza.

También es muy importante considerar el aspecto económico que nos permite establecer cual posible cambio es el que permite aumentar la confiabilidad de la pieza, sin aumentar su costo o en el mejor de los casos disminuyendo su costo.



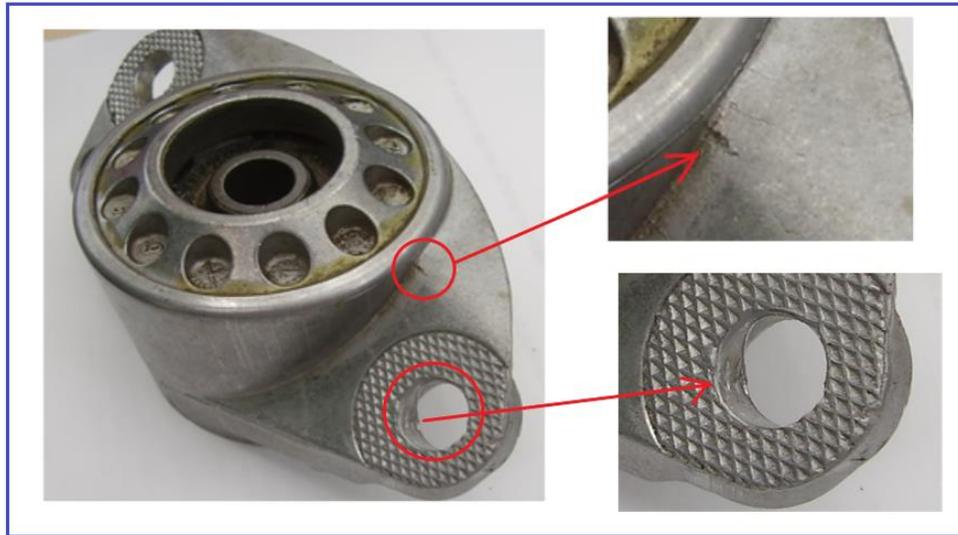


Figura 3. Ubicación de las zonas en la que falla la base. Fuente: Diaz, G. F. & Jimenez, J. 2011

Esta falla originaba vibración y ruido cuando circulaba el vehículo, esto se presentaba en el periodo de garantía del automóvil por lo que se generaban altos costos para la empresa fabricante del automóvil.

Para realizar este análisis se supuso que existen dos posibles causas de la falla. La primera es que la pieza no está diseñada para las condiciones de las calles de la Ciudad de Mexico, en las cuales existen una gran cantidad de baches, topes y hoyos entre otros. La segunda es que los materiales con que se fabrica esta pieza no cumplen con los estándares de calidad establecidos por el fabricante.

La pieza se compone de diferentes materiales como son: acero, plástico, caucho y aluminio como se muestra en la figura 4.

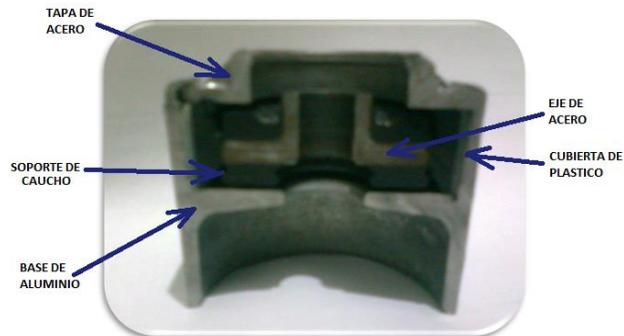


Figura 4. Componentes de la base del amortiguador. Fuente: Diaz, G. F. & Jimenez, J. 2011

Tomando en consideración que la falla se produce en la base de aluminio y no se conoce que tipo de material (aleación de aluminio) se tiene, lo cual sucede con frecuencia, se procedió a determinar sus propiedades químicas y mecánica, con el fin de establecer el tipo de aleación de que se trata, y así tener la suficiente información para realizar la simulación computacional.

En primera instancia se procedió a realizar un análisis metalográfico, mediante el cual se encontró que tenía porosidad en varias zonas del cuerpo de la base, como se muestra en la figura 5.

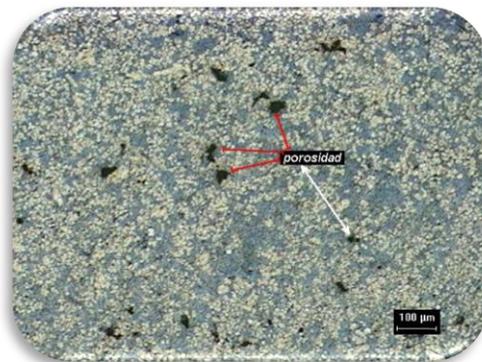


Figura 5. Metalografía a 100 µm de un aumento. Fuente: Diaz, G. F. & Jimenez, J. 2011

Posteriormente, para determinar la composición química del material se utilizó un microscopio de barrido, con el cual se corroboró que se trata de una aleación de aluminio, como se muestra en las figuras 6 y 7.

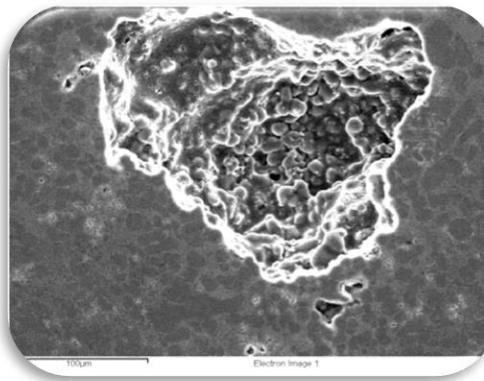


Figura 6. Muestra de un rechupe en el microscopio de barrido. Fuente: Diaz, G. F. & Jimenez, J. 2011

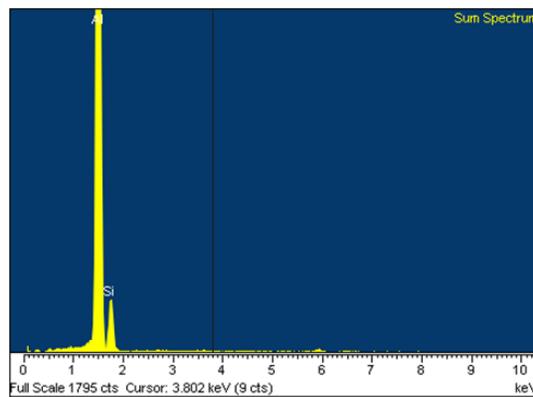


Figura 7. Componentes de la aleación de aluminio.

Con lo anterior se determinó que se trataba de un aluminio al silicio (Al Si) con 12% de Si. Fuente: Diaz, G. F. & Jimenez, J. 2011

Esta aleación se puede clasificar como: ASTM. 413.0: S12B. B85 S12A y tiene las siguientes propiedades mecánicas, las cuales son definidas únicamente para pruebas en automóviles.

- Esfuerzo a la tensión, 290 MPa (42 Ksi);
- Esfuerzo cortante 130MPa (19 Ksi);
- Elongación 3.5%.

Conociendo lo anterior, se determinó la dureza del material mediante un ensayo Brinell, así como los esfuerzos y deformaciones en los puntos críticos de la pieza mediante pruebas de extensometría, como se muestra en la figura 8.



Figura 8. Pruebas de dureza y extensometría. Fuente: Diaz, G. F. & Jimenez, J. 2011

Conociendo las propiedades químicas y mecánicas del material se procedió a realizar el modelo computacional de la base, considerando que está fabricada de diferentes

materiales, lo cual se debe de tomar en cuenta a la hora de establecer las propiedades de los materiales que la componen, el modelo de la base se muestra en la figura 9.

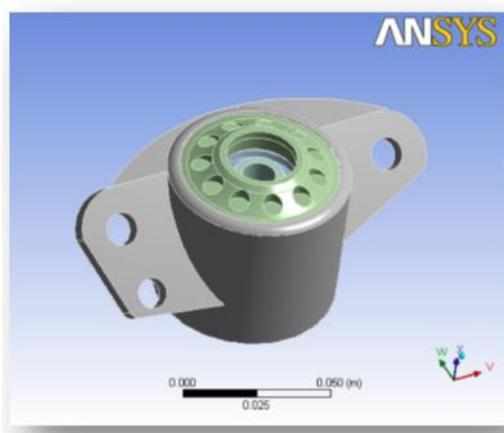


Figura 9. Modelo computacional de la base de amortiguador. Fuente: Diaz, G. F. & Jimenez, J. 2011

Se aplicaron las condiciones de frontera y cargas, en los lugares en donde se supone actúan las cargas sobre la base; para esto, se realizaron varios análisis variando ubicación de las cargas hasta lograr que el perfil de esfuerzos y deformaciones coincidieran con el modo de falla de la pieza real, como se muestra en la figura 10.

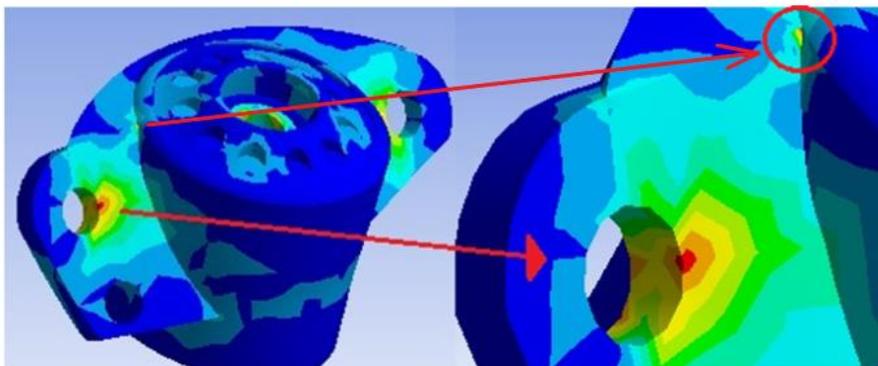


Figura 10. Zonas en donde se presentan los principales esfuerzos en la base. Fuente: Diaz, G. F. & Jimenez, J. 2011

Con lo anterior se validó el modelo, el cual serviría de base para realizar el rediseño, ya sea cambiando el material empleado en el cuerpo, modificando la forma geometría, etc. En este caso se propuso aumentar el espesor de las orejas ya que se consideró que sería lo más económico, no afectando en gran medida la manufactura y la funcionalidad de la pieza.

## **5.- Conclusiones**

Cuando se diseñan elementos, mecanismos o máquinas, es muy común que algunos de estos elementos se diseñen para ciertas condiciones de trabajo, las cuales no siempre se cumplen, sobreviniendo la falla mecánica ya sea por resistencia o por rigidez.

Estas fallas pueden originar altos costos económicos y sobre todo, la pérdida de confianza hacia el fabricante por parte del consumidor, por lo que cuando sucede esto se debe realizar un rediseño que permita evitar lo antes indicado.

Por lo que, la metodología que se propone puede servir en su totalidad o en parte, como referencia a las personas que rediseñen. Pues con la misma se pueden establecer los parámetros básicos que se deben de tomar en cuenta para realizar las simulaciones computacionales que permita llegar a un diseño óptimo del elemento, mecanismo o máquina que se requiera, con ahorro de tiempo y dinero.

Es importante destacar que esta metodología también se puede emplear en la ingeniería inversa, la cual cada día es más importante en la industria.

## **6.- Bibliografía**

- [1] G. Garcia P, «Un proceso general de diseño en ingeniería mecánica.» *Ingeniería e investigación*, n° 10, pp. 35-43, 1984.
- [2] Real Academia Española, «Diccionario de la lengua española,» 04 09 2021. [En línea]. Available: <https://dle.rae.es/diseño>.
- [3] R. Budynas G y J. K. Nisbett, *Diseño en ingeniería Mecánica de Shigley*, 8 ed., México, D.F.: Mc Graw Hill, 2008, pp. 4-5.

- [4] R. L. Norton, Diseño de maquinaria, 4 ed., Ciudad de Mexico: Mc Graw Hill , 2009, p. 7.
- [5] M. Fuentes y E. Lopez, El metodo de los elementos finitos aplicado al analisis estructural, Madrid: Editorial Noela, 2001, p. 1.
- [6] O. C. Zienkiewicz y R. L. Taylor, El metodo de los elementos finitos, 4 ed., vol. 1, España: Mc Graw Hill/Interamericana, 1994.
- [7] T. R. Chandrupatla y A. D. Belegundu, Introducción al estudio del elemento finito en ingeniería, 2a. en español ed., México D.F.: Prentice Hall, 1999, p. 1.
- [8] J. J. Delfín V y E. Jiménez L, *Ingeniería Inversa: Metodología y aplicaciones*, Sonora: ITESCA, 2011.
- [9] «Tecnología para la industria.» 24 06 2021. [En línea]. Available: <https://tecnologiaparalaindustria.com/aplicaciones-industriales-mas-comunes-de-la-ingenieria-inversa/>.
- [10] L. E. Diaz G., R. T. J. F. y M. M. Jimenez J., *Analisis de la tapa del amortiguador de la suspension trasera de un SEAT Ibiza 2008*, Ciudad de Mexico, 2011, pp. 1-140.