INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

Proyecto Previo a la Obtención del Título de Ingeniero en Mecánica Automotriz

Autor: Gustavo Ronny Solís Vera

Tutor: Ing. Edgar Gustavo Vera Puebla, Msc

Análisis de Esfuerzos en los Brazos de Suspensión del Vehículo Suzuki Swift 1.2 cc

Guayaquil-Ecuador |2024

Certificación de Autoría

Yo, Gustavo Ronny Solís Vera, con CI: 0924894587, declaro bajo juramento, que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional y que se ha consultado la bibliografía detallada.

Cedo mis derechos de propiedad intelectual a la Universidad Internacional del Ecuador, para que sea publicado y divulgado en internet, según lo establecido en la Ley de Propiedad intelectual, reglamento y leyes.

_____

Gustavo Ronny Solís Vera
C.I.: 0924894587

Aprobación del Tutor

Yo, Edgar Gustavo Vera Puebla certifico que conozco al autor del presente trabajo siendo responsable exclusivo tanto de su seguridad y autenticidad, como de su contenido.

_____

Edgar Gustavo Vera Puebla, Msc

C.I. 1715264105

Director del Proyecto

Dedicatoria

A mis padres que siempre me brindaron su confianza, apoyo y amor incondicional para mi realización personal y ahora como un profesional.

A mi pareja que me acompañó durante toda mi etapa estudiantil y siempre ha estado para brindarme soporte y resiliencia.

A mis profesores por tener el arte de enseñarnos y prepararnos como futuros profesionales para alcanzar nuestro éxito laboral.

A mis compañeros que compartimos conocimiento, enseñanzas y risas para hacer de esta linda etapa universitaria más amena.

Gustavo Ronny Solís Vera

Agradecimientos

Agradezco a Dios por brindarme salud y vida para la culminación de una etapa tan importante en la vida como lo son los estudios universitarios. Agradezco a mis padres por ser aquellas personas que supieron labrar y guiar mi camino para la consecución de este logro tan significativo como lo es la realización profesional. Nada hubiese sido posible sin ustedes presentes. ¡Gracias!

Gustavo Ronny Solís Vera

Índice General

Certificación de Autoría iii

Aprobación del Tutor iv

Dedicatoria v

Agradecimientos vi

Índice General vii

Índice de Figuras xi

Índice de Tablas xiv

Índice de Ecuaciones xv

Resumen xvi

Abstract xvii

Capítulo I 1

1 Problema de la Investigación 1

1.1 Tema de Investigación 1

1.2 Planteamiento, Formulación y Sistematización del Problema 1

1.2.1 Planteamiento del Problema 1

1.2.2 Formulación del Problema 2

1.3 Sistematización del Problema 2

1.4 Objetivos de la Investigación 3

1.4.1 Objetivo General 3

1.4.2 Objetivos Específicos 3

1.5 Justificación e Importancia de la Investigación 3

1.5.1 Justificación Teórica 3

1.5.2 Justificación Metodológica 4
1.5.3 Justificación Práctica 5
1.5.4 Delimitación Temporal 6
1.5.5 Delimitación Geográfica 6
1.5.6 Delimitación del Contenido 6
1.6 Alcance 8
Capítulo II 9
2 Marco de Referencia 9
2.1 Sistema de Suspensión 9
2.2 Resorte 10
2.3 Ballesta 12
2.4 Amortiguador 13
2.5 Oscilación y Frecuencia 17
2.6 Vibración 20
2.7 Software de Ingeniería Mecánica y Diseño Asistido por Computadora (CAD) 23
2.7.1 Software Nastran 24
2.8 Vehículo Suzuki Swift 25
Capítulo III 28
3 Metodología 28
3.1 Métodos 28
3.2 Tipo de Estudio 28
3.2.1 Investigación Descriptiva 28
3.2.2 Método Descriptivo 28

3.3 Materiales de Estudio 29
3.4 Análisis y Descripción de Esfuerzos y Vibraciones 29
3.5 Ecuaciones Rectoras 30
3.6 Modelado y Simulación de los Brazos de Suspensión 31
3.7 Consideraciones de Restricción de Diseño 34
3.8 Proceso de Simulación Dinámica del Brazo de Suspensión 36
3.8.1 Consideraciones Iniciales 36
3.8.2 Esfuerzos Principales de Von Mises 37
3.8.3 Modal de Frecuencia 40
3.9 Interpretación de Resultados 42
3.10 Factor de Seguridad 42
Capítulo IV 44
4 Análisis de Resultados 44
4.1 Análisis de Datos Obtenidos 44
4.1.1 Análisis de Esfuerzos Principales de Von Mises 44
4.1.2 Análisis de Desplazamiento 44
4.1.3 Análisis de Fatiga 45
4.1.4 Análisis de Ciclo de Vida 46
4.1.5 Análisis Modal de Frecuencia 46
4.1.6 Factor de Seguridad 47
Conclusiones 49
Recomendaciones 50
Bibliografía 51

Anexos 53

Índice de Figuras

Figura 1 *Sistema de Suspensión Estándar* 9

Figura 2 *Resortes de Suspensión*..... 10

Figura 3 *Cojinete de la Suspensión*..... 11

Figura 4 *Oscilación*..... 11

Figura 5 *Ballestas* 12

Figura 6 *Amortiguador* 13

Figura 7 *Amortiguador de 1 Tubo* 14

Figura 8 *Amortiguador de 2 Tubos*..... 15

Figura 9 *Amortiguador Riostra*..... 15

Figura 10 *Amortiguador con Regulación de Nivel* 16

Figura 11 *Amortiguador con Resorte Neumático* 16

Figura 12 *Amortiguador con Resorte Hidroneumático* 17

Figura 13 *Oscilación Amortiguada*..... 18

Figura 14 *Representación de la Frecuencia* 18

Figura 15 *Sismógrafo de Zhang Heng* 21

Figura 16 *Pantalla del Software AutoCAD 2023*..... 23

Figura 17 *Pantalla del Software Nastran 2023* 24

Figura 18 *Vehículo Suzuki Swift 1.2 cc Año 2023*..... 27

Figura 19 *Plano del Brazo de Suspensión a Elaborar en 2D* 31

Figura 20 *Selección del Plano del Boceto a Diseñar* 32

Figura 21 *Perfilado del Brazo de Suspensión 3D* 32

Figura 22 *Extrusión del Brazo de Suspensión 3D* 33

Figura 23 *Perfil del Brazo de Suspensión 3D* 33

Figura 24 *Perforado del Brazo de Suspensión* 34

Figura 25 *Modelado 3D Final del Brazo de Suspensión* 34

Figura 26 *Selección del Material* 36

Figura 27 *Selección de Análisis Estático* 37

Figura 28 *Colocación de Puntos Fijos* 38

Figura 29 *Brazo de Suspensión con Puntos Fijos para el Análisis* 38

Figura 30 *Mallado* 39

Figura 31 *Brazo de Suspensión con Mallado para el Análisis* 39

Figura 32 *Colocación de la Carga* 40

Figura 33 *Brazo de Suspensión con Cargas para el Análisis* 40

Figura 34 *Tabla de Frecuencia, Tipos de Casos y Periodos* 41

Figura 35 *Cuadro de Ejecución de Análisis* 41

Figura 36 *Cuadro de Opciones para Ver Resultados del Análisis de Simulación* 42

Figura 37 *Análisis de Esfuerzos Generales* 44

Figura 38 *Análisis de Desplazamiento* 45

Figura 39 *Fatiga* 45

Figura 40 *Ciclos de Vida*..... 46

Figura 41 *Análisis Modal de Frecuencia Baja* 46

Figura 42 *Análisis Modal de Frecuencia Media*..... 47

Figura 43 *Análisis Modal de Frecuencia Alta* 47

Figura 44 *Factor de Seguridad*..... 48

Índice de Tablas

Tabla 1 Frecuencias por el Tipo de Suspensión *Frecuencias por el Tipo de Suspensión* 19

Tabla 2 Frecuencias por la Cilindrada del M.C.I *Frecuencias por la Cilindrada del M.C.I*..... 19

Tabla 3 *Propiedades de la Chapa de Acero al Carbono* 37

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1 *Frecuencia Natural de Vibración del Sistema* 22

Ecuación 2 *Coeficiente Crítico de Amortiguamiento* 22

Resumen

Los sistemas que componen el automóvil en la actualidad traen consigo la innovación y la tecnología necesaria para que el ocupante puede movilizarse de manera rápida y segura, sin la preocupación de que algo puede suceder o un accidente producirse. Por ello el sistema de suspensión desde su invención y aplicación ha buscado minimizar el impacto de las vibraciones mecánicas producidas por el contacto de la rueda sobre la calzada, y la cual se transmite a lo largo de la carrocería del automóvil ocasionando que el ocupante también la llegue a sentir; para ello se ha ideado el amortiguador como absorbente de energía y el resorte tipo helicoidal para dispersar la energía, añadido de elementos que hacen la función de sostenibilidad y conexión con el sistema de dirección. Por cuanto se hace necesario el conocer el trabajo, función, desplazamiento, fatiga, ciclo de vida, vibraciones y factor de seguridad del sistema de suspensión del automóvil, a través de la simulación en software de Diseño Asistido por Computadora (CAD), donde se podrá elegir el material y realizar el análisis necesario para conocer los esfuerzos a los que está sometido los brazos de suspensión.

Palabras Clave: *análisis, brazo de suspensión, diseño, esfuerzo, simulación, sistema*

Abstract

The systems that make up the automobile today bring with them the innovation and technology necessary so that the occupant can move quickly and safely, without worrying that something may happen or an accident may occur. For this reason, the suspension system, since its invention and application, has sought to minimize the impact of mechanical vibrations produced by the contact of the wheel on the road, which is transmitted along the body of the car, causing the occupant to also feel it; for this, the shock absorber has been designed as an energy absorber and the helical spring to disperse the energy, adding elements that act as sustainability and connection with the steering system. Since it is necessary to know the work, function, displacement, fatigue, life cycle, vibrations and safety factor of the automobile suspension system, through simulation in Computer Aided Design (CAD) software, where you will be able to choose the material and carry out the necessary analysis to know the stresses to which the suspension arms are subjected.

Keywords: *analysis, suspension arm, design, effort, simulation, system*

Capítulo I

1 Problema de la Investigación

1.1 Tema de Investigación

Análisis de esfuerzos en los brazos de suspensión del vehículo Suzuki Swift 1.2 cc

1.2 Planteamiento, Formulación y Sistematización del Problema

1.2.1 Planteamiento del Problema

En la ingeniería automotriz las innovaciones en los diferentes sistemas del vehículo están a la vanguardia siempre en la búsqueda de nuevos diseños, mejoras en las prestaciones, seguridad, ergonomía, entre otros, y con ello mejorar el desempeño y rendimiento del vehículo. Las innovaciones están enmarcadas en los sistemas de alimentación, escape, transmisión, ruedas, diferencial y suspensión, siendo este último el que menos cambios ha tenido pero mayor atención se le ha dado con la adaptación de tecnologías añadidas se le ha dado por ser el punto fundamental del equilibrio y balance del vehículo, debido a que soporta el peso del vehículo, controlan la estabilidad y generan el confort a bordo. Dentro de las tecnologías que se han añadido para el buen funcionamiento de la suspensión en cualquier tipo de terreno, están el sistema de control de estabilidad (ESP) que trabaja conjuntamente el de freno antibloqueo (ABS), sistema de reparto electrónico del freno (EBD) y sistema de control amiento de tracción. Para lo cual se integran metodologías que contribuyen al ahorro de costos mediante el uso de sistemas ingenieril asistida por sistema computacional, por consiguiente el uso de softwares de diseño que ejecutan un sinnúmero de pasos con resultados reales y precisos. Por lo anteriormente descrito se define analizar las vibraciones del sistema de suspensión estándar el realizar el diseño de la suspensión del vehículo Suzuki Swift 1.2 cc en Nastran, caracterización del trabajo que realiza, y análisis de las vibraciones como punto principal. Con ello se podrá obtener un cuadro de la variación de oscilaciones y frecuencia que genera cada amortiguador a

diferentes revoluciones del M.C.I (motor de combustión interna) y del tipo de carretera en que se desempeña.

Dentro del planteamiento del problema del proyecto presente está las vibraciones normales y adyacentes que se producen en los sistemas de suspensión, así como también el comportamiento según el tipo de carretera en que se desplaza el vehículo.

1.2.2 Formulación del Problema

¿Cuáles son las fases de metodología adecuadas que intervienen en el análisis de esfuerzos y vibraciones en los brazos de suspensión de un vehículo Suzuki Swift 1.2 cc, que permita la estabilidad y confort del ocupante del automotor?

Con la cuestión planteada al presente problema se proyecta la posibilidad de formularse los objetivos proyectantes para alcanzar con el presente proyecto bajo las limitaciones y medidas de estudio en ingeniería por la que se guía la fase de metodología sobre vibraciones y oscilaciones que guiarán la creación del proceso de estudio de la suspensión estándar.

Puntualmente el problema presente se formula a través de:

El análisis de los esfuerzos y las vibraciones producidas por los brazos de suspensión en diferentes tipos de caminos.

Tomando en consideración las limitaciones que se muestran como es las revoluciones, velocidad y cambios de marcha.

1.3 Sistematización del Problema

- ¿Cómo se describen los esfuerzos y las vibraciones en el campo automotriz?
- ¿Cuál es la metodología para analizar y conceptuar el sistema de suspensión estándar?
- ¿Qué parámetro dominante es el indicado a tomar en cuenta cuando se analiza el comportamiento de los brazos de suspensión?

- ¿Cuál(es) es la ecuación(es) base(s) que se toman en consideración para la caracterización y análisis de la suspensión?
- ¿Cuál(es) es el criterio(s) para analizar la eficacia de la simulación de los brazos de suspensión donde el punto crítico a conocer es los esfuerzos y las vibraciones producidas?

1.4 Objetivos de la Investigación

1.4.1 Objetivo General

- Analizar los esfuerzos a los que se encuentran sometidos los brazos de suspensión del vehículo Suzuki Swift 1.2 cc.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Realizar un estudio de los esfuerzos que actúan sobre los brazos de suspensión del vehículo Suzuki Swift 1.2 cc mediante el software Autodesk Nastran.
- Definir los elementos que componen el sistema de suspensión estándar.
- Obtener el informe general de resultados de la simulación de esfuerzos para su respectiva interpretación.

1.5 Justificación e Importancia de la Investigación

1.5.1 Justificación Teórica

Una vez instaurado y determinado los fines del presente análisis investigativo se procede a demarcar por espacio geográfico donde se llevará a cabo el trabajo, así como también las respectivas justificaciones de la simulación respondiendo a las preguntas presentadas para el proceso.

El análisis de ingeniería en curso se justifica debido a la escasez de analizar y optimizar el sistema de suspensión estándar de un automóvil. Para lo cual se formula que la suspensión sea lo menos vibratoria, eficaz y segura con la optimización de componentes ideales, para de esta forma contribuir al confort en conducción, las pérdidas de arrastre y velocidad sean

mínimas, los cambios de marcha sean menos bruscos y la eficiencia de frenado sea la más óptima.

Lo que se pretende alcanzar es un análisis de los esfuerzos en carretera de los brazos de la suspensión que permita determinar los puntos críticos a mejorar y generar menos vibración de campo.

Por consiguiente, el presente proyecto ofrece un estudio de un sistema del vehículo conjuntamente con la ingeniería del diseño y análisis mecánico.

1.5.2 Justificación Metodológica

La metodológica total aplicada en el actual trabajo es tipo analítico, experimental, cuantitativo y cualitativo, dado que se realiza una simulación de los brazos de suspensión estándar específicamente en los esfuerzos y las vibraciones producidas propias del mismo como las que se generan por el camino en que se desplaza el vehículo.

El estudio está basado en el principio del método Root Mean Squared (R.M.S), la velocidad máxima, valor eficaz, ley de elasticidad de Hooke, entre otros, para lo cual se emplea la metodología experimental en donde el conocimiento y diseño mecánico se unen permitiendo utilizar una amplia gama de herramientas que implementarán al sistema; identificando los estándares de estudio que maximizan su eficacia y eficiencia, tratando siempre que no se llegue a comprometer el diseño estructural del automóvil, resistencia, confort y peso del vehículo. En el caso del análisis gráfico se pretende el observar las formas de onda que se generan. Por cuanto, al concebir la fase de simulación y análisis de los parámetros de estudio la resultante alcanzada se basara en las distintas condiciones de torque, velocidad y tipo de carretera.

Lo anteriormente explicado se justifica en que las metodologías a emplear buscan integrar técnicas de diseño y bases ingenieril, que permiten de manera visual y práctica un enfoque de lo que sucede en los componentes de la suspensión.

Al momento de tomar en cuenta las vibraciones y ondulaciones lo que se pretende es observar cuál es el trabajo que realiza y cómo lo realiza.

1.5.3 Justificación Práctica

La justificación desarrollativo del actual trabajo se fundamenta en el diseñar, conceptualización y análisis en los brazos de la suspensión estándar. Dentro de las resultantes que se intentan obtener con la simulación y diseño se muestran en la:

- Mejora de la prestación del automóvil Suzuki Swift 1.2 cc por medio de la corrección de puntos críticos encontrados en el análisis de los esfuerzos y las vibraciones con lo cual se podrá efectuar un mejor desempeño y confort. Teniendo en cuenta que los componentes de la suspensión estándar tales como amortiguares, bases, gomas, mesas y demás, con el objetivo de no afectar la estabilidad propia del vehículo.
- En cuanto a la caracterización permitirá conocer las ondas y amplitudes mediante el uso del acelerómetro, debido a que por medio de este equipo se podrá detectar las fuerzas de aceleración tanto estática (gravedad) como dinámica (vibraciones y movimiento).
- La simulación contribuirá a la unión de la caracterización y análisis para la interpretación y comparación de a futuro realizar un cambio de algún componente del sistema de suspensión actual por uno que se adapte a las necesidades del conductor. Asi también la baja empleabilidad de costos en pruebas de asertividad o error físicas, es decir pruebas reales sin previa simulación en software, por consiguiente se traduce al poder reducir los análisis físicos debido a que al diseñarse en software el sistema se puede identificar los componentes y variables que contribuyan a obtener mayor eficiencia y seguridad de conducción.

- Seguridad del vehículo total por la razón que se genera una repartición de esfuerzo, movimientos, cargas y vibraciones, directamente en las varias condicionantes de conducción y desplazamiento en diferentes tipos de carretera, logrando alcanzar una mejora total en cuanto a la seguridad general.
- En lo que compete al desarrollo de técnicas innovadoras en el actual proyecto está el uso de procesos de innovación como lo es la simulación gráfica, el estudio de vibraciones y caracterización del sistema de suspensión estándar.

Por lo anteriormente expuesto se podrá concluir que la justificativa de la práctica radica en ser una generación potencial, ya que se traduce el conocer teórico y procesos físicos: en fases de prueba y error sin costos elevados y reales, los mismas que contribuyen a renovar el campo automotriz, al conocer y optimizar fases de bosquejo de sistemas del vehículo, incluyendo la seguridad pasiva y activa, competitividad, eficacia y eficiencia en los componentes automotrices.

1.5.4 Delimitación Temporal

De acuerdo con la planificación establecida para el presente proyecto tiene una proyección de tiempo que inicia el 20 de mayo de 2024 y finalizaría el 8 de septiembre de 2024, tiempo en el cual se lleva a cabo cada una de las fases en las que de manera cronológica se cumplirán con los objetivos planteados hasta llegar a su culminación.

1.5.5 Delimitación Geográfica

El presente proyecto se lleva a cabo en las instalaciones de la Escuela de Ingeniería Automotriz de la Universidad Internacional del Ecuador extensión Guayaquil, tanto en la parte teórica, así como práctica con la utilización de los laboratorios con que cuenta la institución.

1.5.6 Delimitación del Contenido

El presente análisis se encuentra establecido en un cuadro teórico y referencial en la discusión del análisis técnico, así como de la simulación y caracterización de las vibraciones

en el sistema de suspensión, mediante la fase investigativa basada en fuentes de bibliografía técnica y teórica, artículo de carácter científico, páginas web, estudios de titulación, entre otras similares, que se organizan adecuadamente para poder cumplir los objetivos planteados.

La estructura del marco teórico se muestra en 4 capítulos como marcos de teorías con sus conclusiones y recomendación. A diferencia de la investigativa que se delimita acorde el acompañamiento y restricción de la forma siguiente:

En lo referente a la restricción se establece que:

- Dispone una vista en análisis y caracterización de las vibraciones del sistema de suspensión estándar.
- Aplicación de simulación por medio del software Nastran la gráfica de las ondas y amplitudes de las vibraciones bajo distintos parámetros, tales como revoluciones, cambios de marcha y tipo de carretera en que se desplaza el vehículo.
- Atención en la finalidad de objetivos y restricciones, como lo es la eficacia que va a obtener el sistema en análisis y la mejora de la conducción.
- Evaluación de las respuestas obtenidas en los que se encierran principalmente los esfuerzos y las vibraciones producidas por los brazos de la suspensión en estado dinámico.
- Para finalizar la perspectiva en la mejora de la prestación, confort y seguridad del automóvil.

En cuanto a la demarcación se muestra lo siguiente:

- Exclusión absoluta de otros procesos de simulación no relacionados con esfuerzos y las vibraciones producidas.
- No se incluirá ni abordará ningún otro sistema ni parte del vehículo que no sea los brazos de la suspensión.

- No se incluirá otro tipo de análisis como cambios de elementos para caracterización y comparación con otros sistemas ni consideraciones de trabajo del M.C.I.

1.6 Alcance

El alcance de este análisis se focaliza en el analizar los esfuerzos de los brazos de una suspensión estándar con su respectiva simulación. Se abordará la aplicación de simulaciones de onda, amplitud y frecuencia para modelar el comportamiento del sistema bajo diferentes parámetros como son la velocidad, cambio de marcha y tipo de carretera. El estudio incluirá las ecuaciones base del método R.M.S.

Sin embargo, no se supondrán medios relacionados con la construcción ni costes de fabricación. El análisis se centra únicamente en el análisis y simulación gráfica de los brazos de la suspensión estándar.

Capítulo II

2 Marco de Referencia

2.1 Sistema de Suspensión

Según (Gesellschaft y Zysammenarbeit, 1980) menciona que "…ninguna carretera está completamente plana. Las ruedas…, aparte de su movimiento de rotación, movimiento hacia abajo y hacia arriba. Cuando la marcha es acelerada este movimiento se suceden a espacio muy corto de tiempo y la aceleración perpendicular a la carretera puede ser de un valor alto con respecto en la aceleración de la gravedad…" por ende se entiende que de no existir un elemento que amortigua el golpe contra la calzada produciría inestabilidad del vehículo, inseguridad al momento de manejar, el no confort de los ocupantes y disminución de la vida útil de elementos que constituyen el vehículo como tal. Ver Figura 1.

Por ejemplo, un vehículo sin sistema de suspensión tendería a que al desplazarse en una calzada muy irregular las ruedas no giren adecuadamente, no se pueda maniobrar la dirección, el ingreso de marchas se ve comprometido, el frenado sea brusco y de existir una curva pueda existir volcamiento.

Figura 1

Sistema de Suspensión Estándar

Fuente: (MotorKote Colombia, 2022)

Las funciones del sistema de suspensión son:

- Estabilidad: acorde al portal web (Ingemecanica, s.f.) menciona que “la función de estabilidad es cuando se absorbe gran parte de la fuerza centrífuga generada en el cambio de la dirección, previniendo por medio de la deformación de los resortes o ballestas, que la fuerza sea transmitida en su totalidad a las llantas”.
- Mejora de la conducción: asegura el contacto entre las llantas con la calzada manteniendo la función directriz.
- Seguridad y confort.

2.2 Resorte

Dentro del sistema de suspensión se dispone de los resortes como elemento principal que hace la función de la elasticidad, es decir, absorber los impactos de las irregularidades en la calzada. Van montados de forma libre o alrededor del amortiguador, dependiendo el tipo de vehículo y la configuración del fabricante. Ver Figura 2

Figura 2

Resortes de Suspensión

Fuente: (MotorKote Colombia, 2022)

Actúan en forma vertical y en menor proporción lateral, por lo cual requieren de un cojinete de goma que va unido a una base de forma constructiva no regular (base de amortiguador), dicho elemento es el sostén de la vibración. Ver Figura 3.

Figura 3

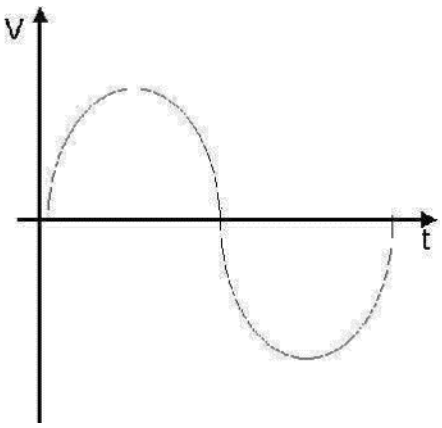
Cojinete de la Suspensión

Fuente: (MotorKote Colombia, 2022)

Los resortes son susceptibles de las oscilaciones propias que se generan por el mismo elemento como del peso de la carrocería del vehículo, por ende dichas oscilaciones se generan en tres direcciones de los ejes en el espacio dado que los golpes y choques sufridos por la calzada en que se desplaza generan la intervención de las fuerzas como son propulsoras, de frenado, del viento, centrífugas, entre otras similares. Ver Figura 4.

Figura 4

Oscilación



Fuente: (Zamora Ramírez, 2015)

Para determinar el tipo de resorte (blando, flojo, duro o fuerte) se recurre al índice de resorte, que es la relación entre la fuerza que actúa sobre él y el recorrido elástico correspondiente, su medida será en N/m. Lo cual no quiere decir que si es el resorte es muy

rígido o muy blando no va tener una amortiguación apropiada, debido a que la masa del vehículo también influye.

De manera técnica los resortes del automóvil están anexados por el peso del vehículo, por consiguiente un vehículo que se desplace a gran velocidad con una elevación en la calzada la carrocería en principio permanece en reposo, por su inercia propia, si la suspensión es independiente, el neumático en relación con la estructura es lanzado súbitamente hacia lo alto y el resorte(s) que corresponde se comprime. Pero si en la calzada que se desplaza el vehículo cae en un bache el neumático en relación con la carrocería es lanzado rápidamente hacia abajo, por acción del peso de la carrocería. Así también, la fuerza necesaria para la aceleración del vehículo es mayor a la tensión anterior al resorte.

2.3 Ballesta

Cuando la configuración del vehículo es para carga y/o remolque se desiste del resorte y se emplea ballesta, que es un conglomerado de hojas metálicas de aleación que hacen que la flexión sea proporcional al peso de la carga adicional. Ver Figura 5.

Figura 5

Ballestas

Fuente: (BALLESTAS BENI S.L., 2019)

La desventaja es que produce el efecto elástico, en el que la estructura del vehículo puede ladear por la operación de esfuerzos horizontales, sucede por lo general en el desplazamiento por un carretero con curvas donde la fuerza centrífuga obliga que exista una

inclinación de la carrocería hacia fuera (efecto tambaleo), y si existe la aplicación del freno o cambio de marcha brusca la carrocería tiende a desplazarse hacia adelante o hacia atrás (efecto cabeceo). Como estrategia mecánica en la actualidad existen los estabilizadores que hacen la función de nivelar y equiparar los movimientos disminuyendo el centro de gravedad.

2.4 Amortiguador

El amortiguador cumple la función de atenuar las oscilaciones de forma rápida, aumentando la seguridad de la conducción y confort. Se ubican entre la suspensión del neumático (mesa o brazo de suspensión) y la carrocería. Por ende se puede decir que el amortiguador transforma en calor la energía oscilante. Sabiendo que los neumáticos y la carrocería tienen distintas frecuencias en las oscilaciones, el amortiguador debe ser capaz de funcionar de manera eficaz entre ambas oscilaciones. Ver Figura 6.

Figura 6

Amortiguador

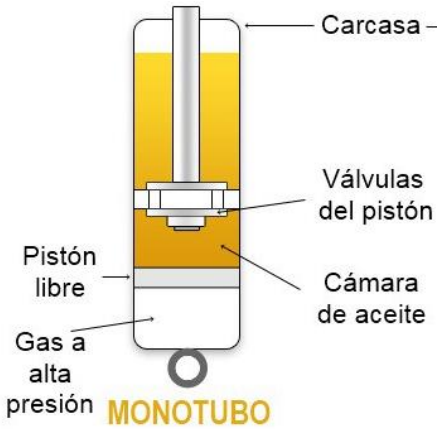
Fuente: (MotorKote Colombia, 2022)

Los amortiguadores no han cambiado de forma desde su creación solo se han innovado en constitución y fabricación, los más comunes son los telescópicos hidráulicos que se compone de un embolo que se desplaza dentro de un cilindro permitiendo el paso de aceite a través de pequeños orificios o válvula (dependiendo la configuración del fabricante). Los amortiguadores pueden ser:

- De un tubo: también conocido como amortiguador de presión de gas, no varían su comportamiento ni en subida (elevación en calzada) o bajada (bache). El vástago no dispone de depósito de aceite generando un mejor campo de refrigeración. Por ende, la compensación de volumen se genera por medio de una almohada de gas que está por lo general apartado de la cámara de aceite a través de un flotante embolo. La almohada de gas y el aceite amortiguador son de la misma presión, por ende no se forman espumas de aceite ya que siempre están bajo presión de trabajo. Lo que si recomienda todo fabricante es que en caso de desmontarlos y desecharlos, no dejarlos a la intemperie o desecharlos como basura común, porque pueden generar una explosión por el calor que comienza adquirir del exterior. Ver Figura 7.

Figura 7

Amortiguador de 1 Tubo



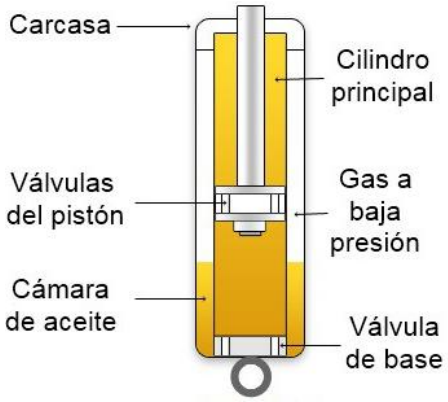
Fuente: (Rodiauto, 2017)

- De dos tubos: éstos internamente disponen de un pistón con vástago y conducto de protección fijado a la estructura, mientras que el conducto interno (cámara de trabajo y externo se fija al eje. La cámara intermedia entre los dos tubos sirve de receptor de aceite de reserva. Cuando sube el embolo, el aceite pasa a través de finos

orificios de la válvula de laminillas, generando una estrangulación que causa una amortiguación deseada. Ver Figura 8.

Figura 8

Amortiguador de 2 Tubos

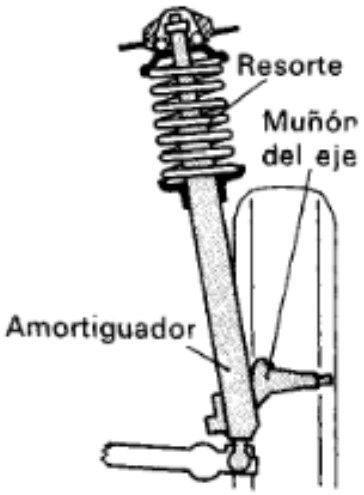


Fuente: (Rodiauto, 2017)

- Combinados con pata telescópica o también llamados riostra: pueden usarse como la suspensión del neumático y proveerse de un muñón de eje. El montaje requiere que tenga cierto ángulo de inclinación. Ver Figura 9.

Figura 9

Amortiguador Riostra



Fuente: (Gesellschaft y Zysammenarbeit, 1980)

- Combinado con regulación de nivel: mantienen la forma común, con la adición de un sistema que permite al conductor controlar el nivel del resorte, es decir puede

contraer al resorte (disminuyendo el amortiguamiento hasta el punto de anular) o liberarlo (para trabajo normal). En el caso de que el resorte se contraiga en su totalidad puede acarrear la falta de control en la dirección, a velocidades medias y altas se sensibiliza el flujo de aire lateral y deslumbramiento para los coches que vienen en circulación contraria. Ver Figura 10.

Figura 10

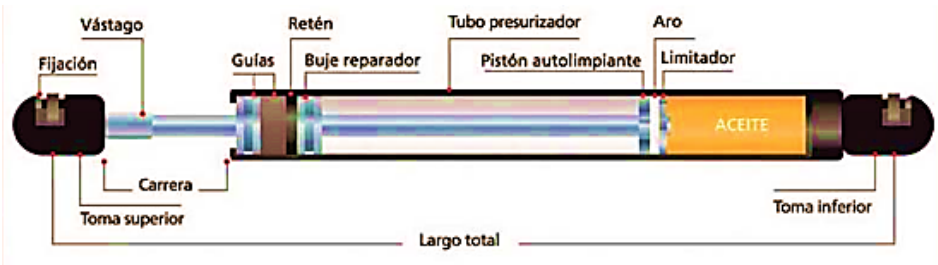
Amortiguador con Regulación de Nivel

Fuente: (ICCTUNING, 2021)

- Combinado con resorte neumático: mantienen la forma común, similar a los de regulación de nivel por cumplir la misma función, pero con la diferencia que el sistema de regulación es por medio de un compresor de aire o una bomba de mano adaptada con manómetro. En la configuración más sofisticada dispone de una compensación automática de nivel, por ejemplo en vehículos que en reposo se mantiene al nivel del piso y una vez que se da el encendido se descomprime la suspensión elevando el vehículo a su forma normal. Ver Figura 11.

Figura 11

Amortiguador con Resorte Neumático

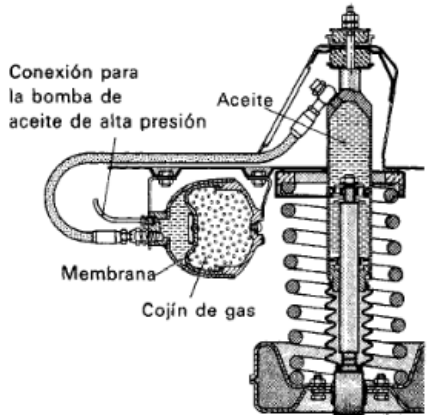


Fuente: (ICCTUNING, 2021)

- Combinado con resorte hidroneumático: similar a los de resorte neumático, pero con la configuración de que existe el bombeo de aceite a la cámara de trabajo del embolo amortiguador. En algunos fabricantes este sistema dispone de tubería(s) con válvula(s) de regulaciones que trabajan mediante palanca(s) dispuesta(s) en el puente /o barra estabilizadora del eje posterior. La cámara de aceite de alta presión del sistema es ejecutada por el cigüeñal del M.C.I. a través de la banda y en tecnologías más avanzadas por cadena. Ver Figura 12.

Figura 12

Amortiguador con Resorte Hidroneumático



Fuente: (Gesellschaft y Zysammenarbeit, 1980)

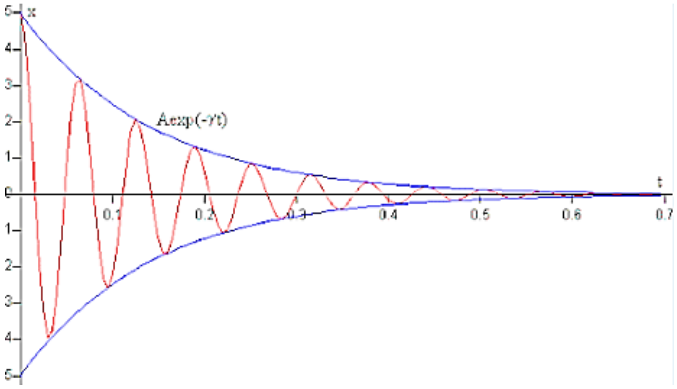
2.5 Oscilación y Frecuencia

La oscilación se define como la conversión de potencial gravitatoria en energía cinética y viceversa. Para (Gesellschaft y Zysammenarbeit, 1980) la oscilación se basa en "…si un cuerpo (masa) pende de un resorte helicoidal, en la posición de reposo la fuerza del resorte será igual a la del peso del cuerpo…". Por consiguiente se va generar una amplitud, es decir, la distancia entre el punto superior (movimiento hacia lo alto por arriba de la primitiva lugar de descanso hasta el punto mayor de regreso) e inferior de retorno (inercia de la masa en la posición de descanso y que a causa de la elevación de la fuerza del resorte es aplazado). Un proceso de oscilación continuo conlleva a que la repetición constante haga que la energía de

movimiento se transforme en calor (rozamiento del resorte y del aire), a esto se denomina oscilación amortiguada. Ver Figura 13.

Figura 13

Oscilación Amortiguada

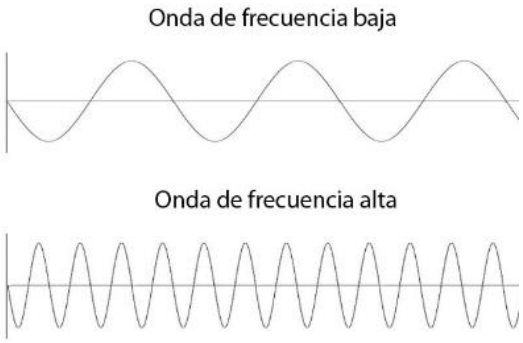


Fuente: (Zamora Ramírez, 2015)

Cuando un cuerpo es empujado (por golpe o choque) se genera la llamada resonancia, es decir, aumenta la amplitud de la oscilación en virtud de la afluencia de nueva energía. Por ejemplo el desplazarse sobre un carretera de tercer orden. A la par se genera una frecuencia, que es el número de oscilaciones por segundo, esta obedece de la masa del elemento que oscila y de la(s) característica(s) físicas y mecánicas del resorte. De darse una masa grande y un resorte inerte, se obtendrá una frecuencia pequeña con un amortiguamiento grande, pero de ser de masa pequeña y un resorte fuerte se obtiene una frecuencia grande con amortiguamiento pequeño. Ver Figura 14.

Figura 14

Representación de la Frecuencia



Fuente: (Zamora Ramírez, 2015)

Para que exista una oscilación completa debe existir una compresión y expansión del resorte, en la que no interviene el amortiguador debido a que este hace la función de oponer resistencia a la función del resorte para disminuir la amplitud. Por consiguiente, entre más peso de carga existe menor será la frecuencia propia de las oscilaciones. En la Tabla 1 se detalla las frecuencias de oscilaciones por minuto generadas por lo general según el tipo de suspensión que se disponga y que puede incurrir en el confort del ocupante.

Tabla 1

Frecuencias por el Tipo de Suspensión

Tipo de suspensión	Frecuencia (oscilaciones por minuto)	Injerencia	Corrección
Suspensión blanda	60	Puede producir mareo y malestar a los ocupantes del vehículo	El resorte debe realizar la oscilación completa
Suspensión dura	90	Puede producir sacudidas a nivel de la columna vertebral del ocupante	Se recomienda para vehículo de carga fuerte.
Suspensión dura	100	Vehículo pequeño y de carga mínima, nula o baja	Marcha moderada

En la Tabla 2 se presenta la frecuencia de oscilaciones por minuto según la cilindrada del M.C.I.

Tabla 2

Frecuencias por la Cilindrada del M.C.I

Cilindrada	Frecuencia
> 1.6 cc	70 oscilaciones por minuto
< 1.6 cc	85 – 95 oscilaciones por minuto

2.6 Vibración

Con el surgimiento de los primeros instrumentos musicales (silbato, arpa, tambor, entre otros) surge el conocer por qué se produce una vibración. Los filósofos, de 4000 A.C, se interesaron en el tema para mejorar la calidad del sonido.

Como base científica se remonta al 583 A.C donde el matemático griego Pitágoras investiga al sonido musical a través de experimentos con instrumentos de una sola cuerda (monocordio) luego le añadiría una segunda cuerda, llegando a concluir que la cuerda más corta emite un nota alta, mientras que la cuerda larga una nota baja, y sí la cuerda corta es la mitad de lo larga emite una nota octava sobre la otra, por consiguiente dio el primer paso a lo que después se llamaría tono y frecuencia (siglo XVI a través de Galileo).

En el siglo II cuando China era un país de continuos sismos el historiador y astrónomo Zhang Heng, desarrolla el primer instrumento para medir sismos (sismógrafo), su diseño era en forma de jarra de vino fabricado de fino bronce fundido, dentro del cual se disponía un péndulo cercado por un conjunto de 8 palancas cada uno apuntando en una dirección diferente.

Este sismógrafo tenía ocho figuras de dragón alrededor de su estructura cada uno con una bala de bronce en la fauce, abajo de cada uno, en la base, ocho ranas con la boca abierta hacia arriba.

Bajo ese diseño se suponía que al existir un sismo muy fuerte en cualesquier trayectoria, inclinaba el péndulo en esa trayectoria y activaba la palanca en la fauce del dragón, haciendo que éste arroje la bala de bronce y caiga en la boca de cada rana generando un sonido tipo metal para determinar el tiempo como dirección de ocurrencia de un sismo. Ver Figura 15.

Figura 15

Sismógrafo de Zhang Heng

Fuente: (CRI Español, 2014)

En 1686 Sir Isaac Newton publica los Principios matemáticos de filosofía natural, en la cual su segunda ley contempla las vibraciones con derivación a las ecuaciones de movimiento para un cuerpo que vibra. Con el desarrollo de las computadoras de alta velocidad, se logra dar paso a que los ingenieros y utilicen el método finito para analizar vibraciones numéricamente detallado en sistemas mecánicos, estructurales y vehiculares, en despliegues de mallas con grados de libertad.

Por ende la vibración ha sido estudio en diferentes campos, y en el vehicular se puede ejemplificar que si su control y aplicación no es adecuada puede ser un problema, por ejemplo, vibraciones excesivas en el tablero de instrumentos provocan un mal funcionamiento y lecturas erróneas.

Las vibraciones se clasifican en:

- Libre: cuando un medio vibra por sí mismo tras una inicial perturbación, por ende no actúa ninguna fuerza externa.
- Forzada: existe una fuerza externa. Y si coincide con las frecuencias naturales del sistema ocurrirá la condición llamada resonancia, la cual dependiendo su medio en que esté y la ocurrencia puede provocar fallas muy graves en el sistema.

- Vibración no amortiguada: es cuando no se disipe o pierda energía por rozamiento u otra resistencia en el proceso de la oscilación. Ver Ecuación 1.

Ecuación 1

Frecuencia Natural de Vibración del Sistema

$$w_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Donde:

k = rigidez del sistema

m = masa del sistema

w_n = frecuencia natural de vibración del sistema

- Vibración amortiguada: se da el efecto contrario a la no amortiguada. Ver Ecuación 2.

Ecuación 2

Coeficiente Crítico de Amortiguamiento

$$c_{cr} = 2mw_n$$

Donde:

c_{cr} = frecuencia natural de vibración del sistema

w_n = frecuencia natural de vibración del sistema

m = masa del sistema

- Vibración lineal: es cuando todos los componentes del sistema (resorte, nasa y amortiguador) se comportan linealmente
- Vibración no lineal: se da el efecto contrario a la lineal.

Las vibraciones se caracterizan por:

- Periodo: es el momento del tiempo necesario para que el medio genere un ciclo completo de movimiento.

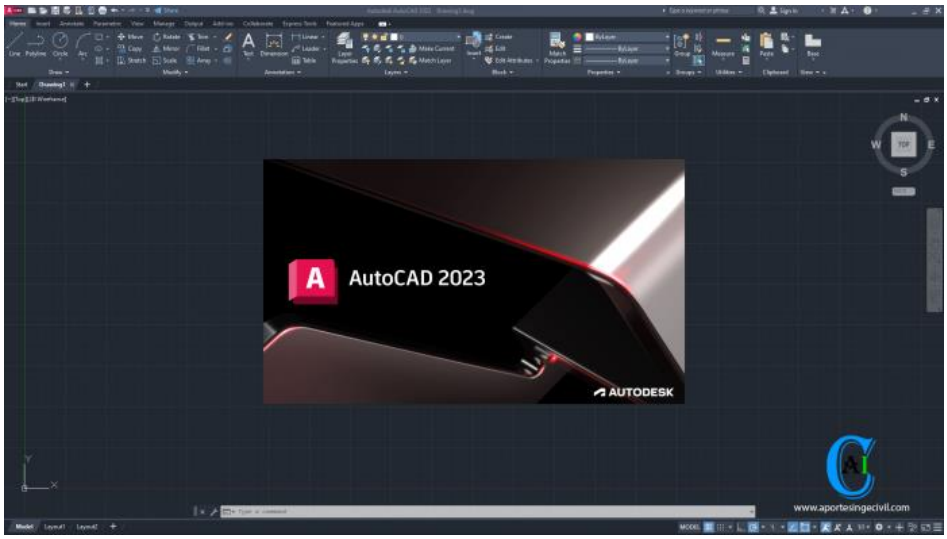
- Frecuencia: es el número de repeticiones por segundo que se hace un periodo, su medición es en hertzios (Hz).
- Amplitud: indica la intensidad de la vibración del sistema y se mide en velocidad (m/s), aceleración (m/s^2) y desplazamiento (m).
- Dirección: las vibraciones van en 3 direcciones lineales (longitudinal - x, lateral – y, vertical - z) y 3 rotacionales (balanceo - rx, cabeceo – ry y deriva rz).

2.7 Software de Ingeniería Mecánica y Diseño Asistido por Computadora (CAD)

La informática ha trascendido en el campo de la industria e ingeniería automotriz dando origen a que el Diseño Asistido por Computadora procese la pre-visualización, análisis, comunicaciones y estudio previo a la elaboración y producción del elemento propio. Un sistema CAD contiene un uso ampliado de varias herramientas informáticas que el profesional de dibujo operan en la generación del trabajo, sea en arquitectura, ingeniería, diseño gráfico, entre otras. Ver Figura 16.

Figura 16

Pantalla del Software AutoCAD 2023



Fuente: (Frausto-Robledo, 2022)

2.7.1 Software Nastran

El Software *Nastran* (ver Figura 17) tiene en su constitución un conjunto de herramientas profesionales para diseño mecánico, arquitectónico, estructural, de ingeniería, entre otros, a la par permite la comparación, visualización, simulación y documentación de modelos 3D. Por cuanto permite integrar los datos en 3D y el 2D en un entorno propio, permitiendo el crear una visualización virtual del elemento acabado que permita estudiar el diseño paramétrico, ajustes, funcionamiento y la forma del elemento producido, anterior a su fabricación, con lo que se produce elementos con acabados superiores y bajos costos de construcción. Mediante la biblioteca interna se puede elegir elementos básicos de contenido personalizado como conexiones por pernos, engranajes, aceros, tornillería, leva, tubos, entre otras. Por consiguiente, se establece que Nastran es aplicable al análisis en propuesta dado que aporta a que se genere la simulación del entorno y numérica en aplicación de suspensiones, es decir, previamente al boceto 3D en el programa se realizará el plano en 2D, las evaluaciones mediante métodos de elementos finitos, fatiga, evaluaciones de amplitud, vibraciones, entre otros. Y con ello realizar un análisis de vibraciones del sistema estándar de suspensión del vehículo Suzuki Swift 1.2 cc.

Figura 17

Pantalla del Software Nastran 2023

Fuente: (Vera E. , 2017)

2.8 Vehículo Suzuki Swift

El vehículo en referencia para el estudio es el Suzuki Swift año 2023 (Ver Figura 18), que tiene como características generalas las siguientes:

- M.C.I de 82 CV tipo *Mild Hybrid* (Eléctrico Semi-híbrido) de 1.2 cc con 3 cilindros en línea y doble inyección directa (Sistema *DualJet*)
- M.C.I alimentado por gasolina (combustible).
- Carrocería tipo h*atchback* de 5 puertas abatibles.
- Consumo de combustible urbano de 4.7 litros (L) por cada 100 km.
- Consumo del combustible extraurbano de 3.7 L a 100 km.
- Consumo de combustible combinado de 3.9 L por cada 100 km.
- Emisión CO2 Ponderada de 91 gr por km.
- Relación peso/potencia de 11.2 kg/CV.
- Relación peso/Par de 8.5 kg/Nm.
- La batería híbrida es del tipo de Iones de litio, ubicada debajo de los asientos posteriores.
- El motor eléctrico es del tipo sincrónico, se encuentra en la parte frontal dentro del compartimiento del M.C.I., de forma transversal.
- Potencia motor eléctrico de 3 CV @ 1100rpm.
- Par máximo motor eléctrico de 60 Nm @ 100rpm.
- Peso en orden de marcha de 920 kg
- Capacidad depósito de 37 L

Las características del M.C.I son las siguientes:

- Ubicado en la parte frontal de forma transversal
- Potencia máxima de 82 CV @ 5700rpm.
- Potencia por litro de 68.5 CV/l.

- Par máximo de 108 Nm @ 4500rpm.

En cuanto a la cadena cinemática, frenos y suspensión del vehículo se tiene:

- El M.C.I. y el eléctrico propulsan los neumáticos delanteros del vehículo haciendo que pueda funcionar sólo en forma mixta.
- Dispone de tracción frontal con transmisión manual de 5 velocidades.
- La suspensión delantera es del tipo independiente McPherson con resorte helicoidal y barra estabilizador.
- La suspensión posterior es del tipo resorte helicoidal con puente de torsión.
- Frenos frontales con disco ventilado.
- Freno posterior con tambores.
- Dirección asistida eléctrica con cremallera.
- Aros de aluminio con neumáticos de medida: 185/55 R16 83V.

En cuanto a seguridad activa y pasiva:

- Dispone de sistema antibloqueo de ruedas (ABS).
- Asistente de arranque en pendiente (HSA).
- Control de Estabilidad (ESP).
- Dispone de 6 Airbags.
- Sistema de anclaje para asientos de niños (Isofix).
- Tecnología de carrocería con deformación programada para dispersión de energía en caso de colisión (*Heartect*).
- 5 Cinturones de seguridad de 3 puntos de anclaje.

En cuanto a características de diseño y accesorios dispone de:

- Faros delanteros con proyección de luz LED.
- Mascarilla de guardachoque delantera cromada tipo deportiva.
- Encendido por botón.

- Volante tipo deportivo.
- Climatizador automático.
- Pantalla de radio táctil de 9”

Figura 18

Vehículo Suzuki Swift 1.2 cc Año 2023

Fuente: (Suzuki Ecuador, 2024)

Capítulo III

3 Metodología

3.1 Métodos

Las sistemáticas de la investigación en la simulación de los brazos de suspensión implican la concentración de variaciones controladas de la configuración pre-establecida para observar la forma de onda producida. El análisis basado en algoritmos que exploran las gráficas de ondas producidas en reposo, en arranque y en movimiento. Estos procesos combinan el análisis preciso con enfoque algorítmico para un análisis eficaz y real del sistema en estudio.

3.2 Tipo de Estudio

En este estudio se divide como un análisis experimental. Recurre a la simulación de los esfuerzos y las vibraciones, los parámetros de onda, fases y frecuencia. El proyecto se basa en la concentración práctica de procedimientos ingenieril en un ámbito físico, con el fin de analizar el sistema que contribuye a la estabilidad del vehículo y la seguridad del mismo al momento de desplazarse en diferentes tipos de carreteras. Se usan cálculos de datos y resultados de análisis para avalar la conclusión y recomendación respectiva.

3.2.1 Investigación Descriptiva

Es una investigación descriptiva que se define por una manipulación deliberada y sostenida de constantes en el medio para entender las uniones de causa y efecto. En esta dirección, se trazan simulaciones con pares de variaciones y controles, y se archivan y estudian los datos de las simulaciones. El fin es indagar y alcanzar el objetivo planteado, indagar relaciones de trabajo y establecer conclusiones basadas en evidencia empírica y real.

3.2.2 Método Descriptivo

Al implementar este método se podrá realizar análisis, comparaciones y presentar a través del procedimiento en propuesta, así también lograr un correcto estudio experimental y

de simulación, como también del estudio estructural y caracterización en la cual se obtendrán datos para fundamentar cada criterio y llegar a un cierre.

3.3 Materiales de Estudio

La perspectiva sistémica y de las fases a perseguir contribuye a generar el proyecto actual de análisis de esfuerzos, vibraciones y caracterización de los brazos de suspensión estándar, con el desarrollo, simulación y modelado del componente, considerando la física en su punto de análisis y cálculo de los esfuerzos y vibraciones.

Así como también se implementan el algoritmo de control a través del sistema computacional ingenieril asistido, y así hallar las diferentes ondas y amplitudes generadas por la vibración. Los resultados alcanzados se trasladan a analizar y estudiar mediante parámetros de caracterización, así como la prestación a obtener en seguridad activa y pasiva del vehículo y estabilidad de la carrocería del mismo.

Cada uno de estos parámetros metodológicos se presenta de la siguiente manera:

- Análisis de esfuerzos y vibraciones
- Descripción de la metodología del análisis de esfuerzos y vibraciones
- Solución de ecuaciones base
- Modelado y simulación del sistema de suspensión estándar
- Definición de ondas y amplitudes
- Evaluación de resultados

3.4 Análisis y Descripción de Esfuerzos y Vibraciones

(Singiresu, 2012) en su libro de Vibraciones Mecánicas, menciona que "… un sistema vibratorio es dinámico si variables como las excitaciones (entradas) y respuestas (salidas) dependen del tiempo". Por tanto la respuesta de las vibraciones dependerá de las excitaciones externas como de las condiciones iniciales.

Cuando se realiza un análisis vibratorio se debe considerar la complejidad y los detalles matemáticos que acarrea, por lo cual se determina los puntos principales para predecir el comportamiento del sistema en condiciones específicas.

El modelado matemático representa todos los detalles y punto de partida con el objetivo de emplear la(s) ecuación(es) matemática(s) que aplican al medio de estudio. Podría ser del tipo lineal si se requiere soluciones rápidas y sencillas de manejar o no lineal cuando se requiere encontrar el detalle y revelar ciertas características del sistema.

Se inicia de manera rustica donde se detalla el sistema en su totalidad, seguido de un análisis base del comportamiento y trabajo del sistema. Con ello se procede a refinar la base del trabajo con una simulación del sistema para observar su diseño como tal.

A continuación se procede con la base de la dinámica para obtener la ecuación que detallan la vibración del entorno, tales como, fórmula de movimiento que derivan del diagrama de cuerpo libre de todas las interventoras, donde se determina las fuerzas externas aplicadas, reactivas y de inercia. También se aplica la 2da ley del movimiento de Isaac Newton, el fundamento D'Alembert y el fundamento de la conservación de energía.

3.5 Ecuaciones Rectoras

Con base en las ecuaciones de movimiento se procede a la resolución, sea por el método de ecuaciones diferenciales, trasformada de Laplace, matriz y/o numérico. Dada la naturaleza del proyecto se procede por el método numérico que se puede resolver mediante software computacional y obtener resultados variables según los criterios que se programen.

La función de las ecuaciones es la de obtener resultados y realizar un análisis de vibraciones del sistema de suspensión conteniendo todo el detalle necesario para evitar errores de cálculo y resultados erróneos, con ello se podrá establecer la seguridad y si cumple con todos las expectativas de uso y aplicación en el vehículo.

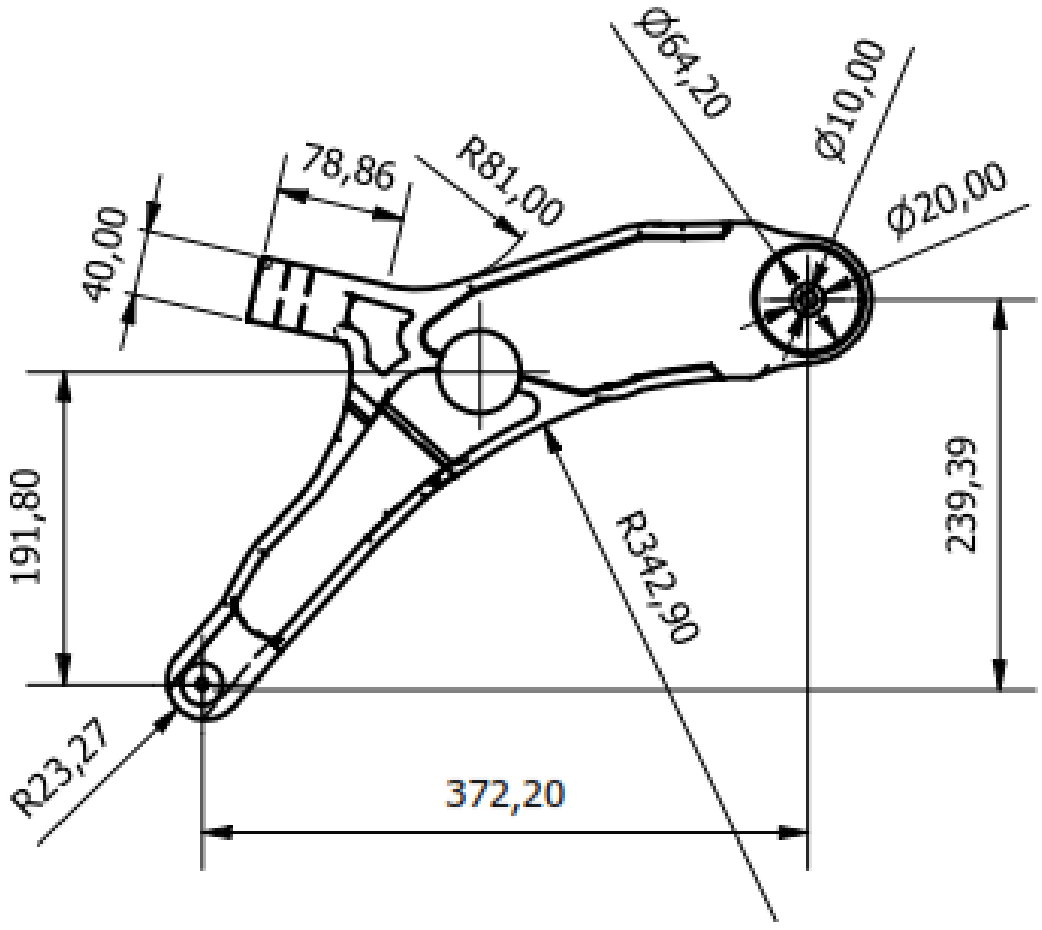
3.6 Modelado y Simulación de los Brazos de Suspensión

Con base en las ecuaciones de movimiento se procede a la resolución, sea por el método de ecuaciones diferenciales, trasformada de Laplace, matriz y/o numérico. Dada la naturaleza del proyecto se procede por el método numérico que se puede resolver mediante software computacional y obtener resultados variables según los criterios que se programen.

Como punto base se inicia con el diseño de la geometría en plano (2D) del brazo de suspensión del vehículo Suzuki Swift 1.2 cc como se ve en la Figura 19.

Figura 19

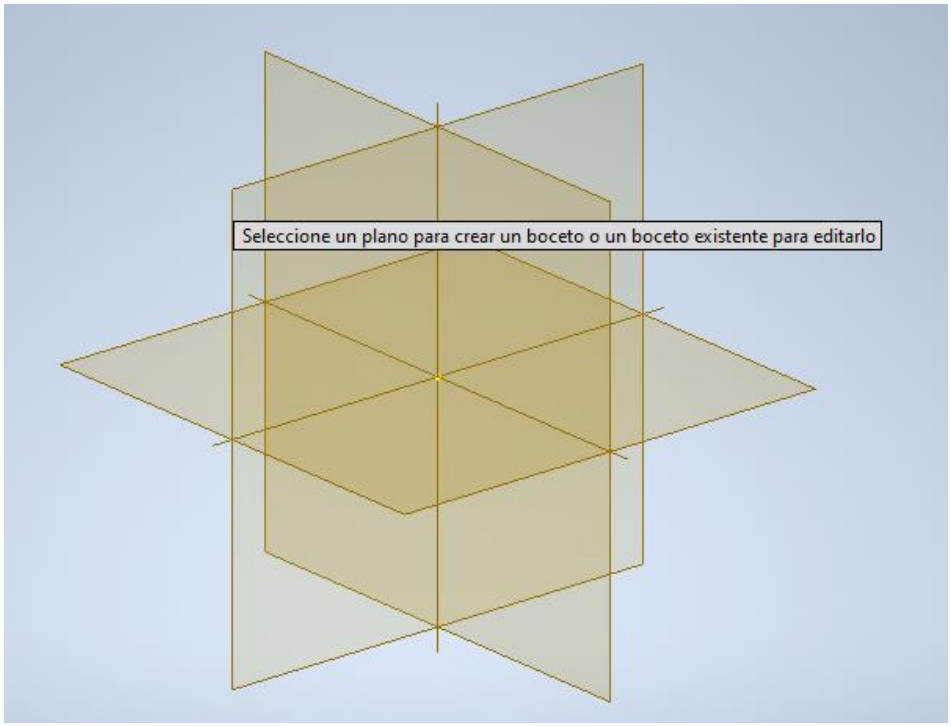
Plano del Brazo de Suspensión a Elaborar en 2D



Para el diseño se considera que se debe seleccionar el plano frontal con el fin de crear la parte del boceto que luego se estira en la geometría. Ver Figura 20.

Figura 20

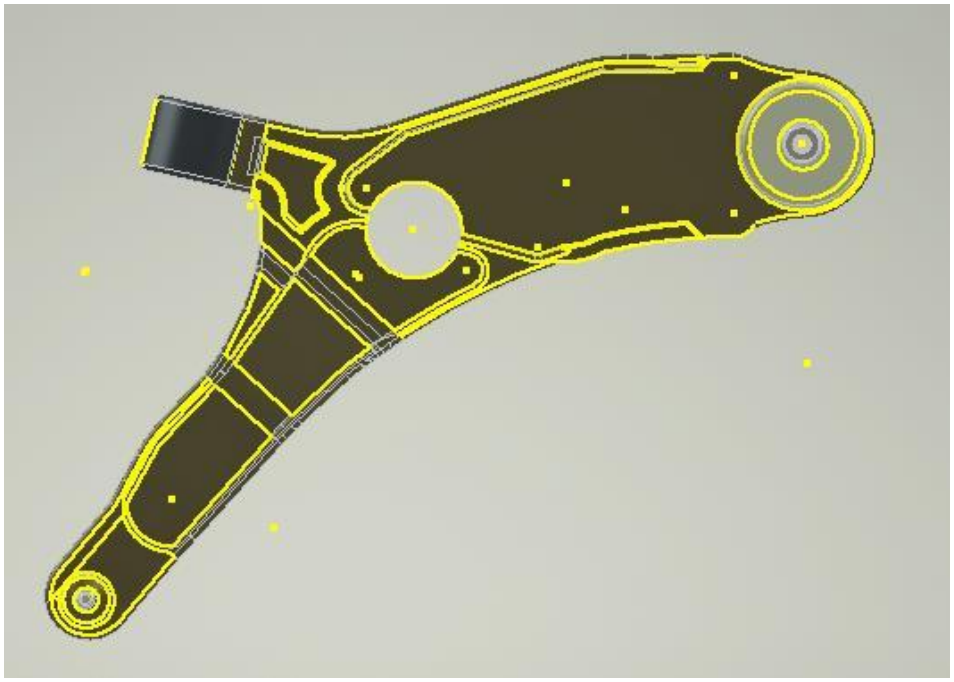
Selección del Plano del Boceto a Diseñar



Se procede a realizar la extrusión del plano dibujado del brazo de suspensión (de 2D a 3D) como se observa en la Figura 21.

Figura 21

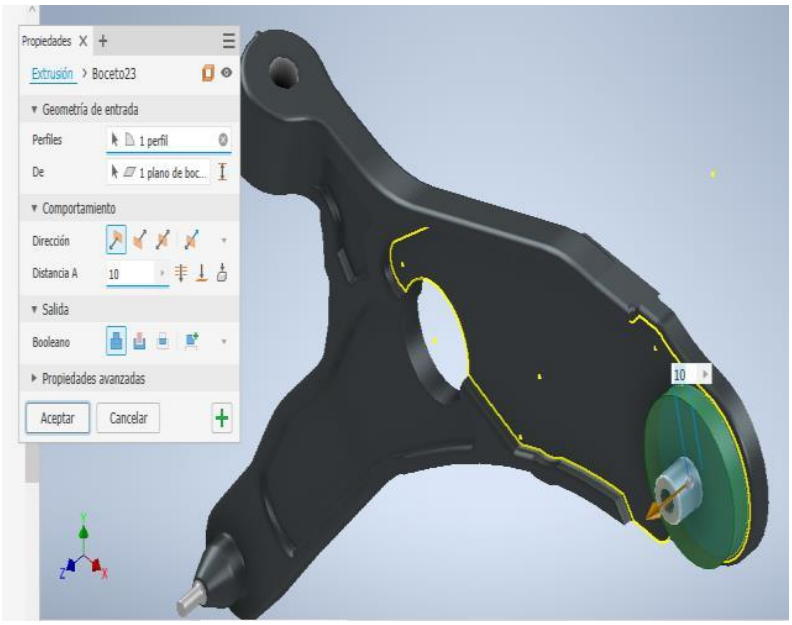
Perfilado del Brazo de Suspensión 3D



En la Figura 22 se observa la geometría del brazo de suspensión en proceso de moldeando tanto en las ranuras como los biselados para que tomen la curvatura apropiada con un espesor inicial que dependerá como se moldee hasta tomar la forma final que se desea obtener.

Figura 22

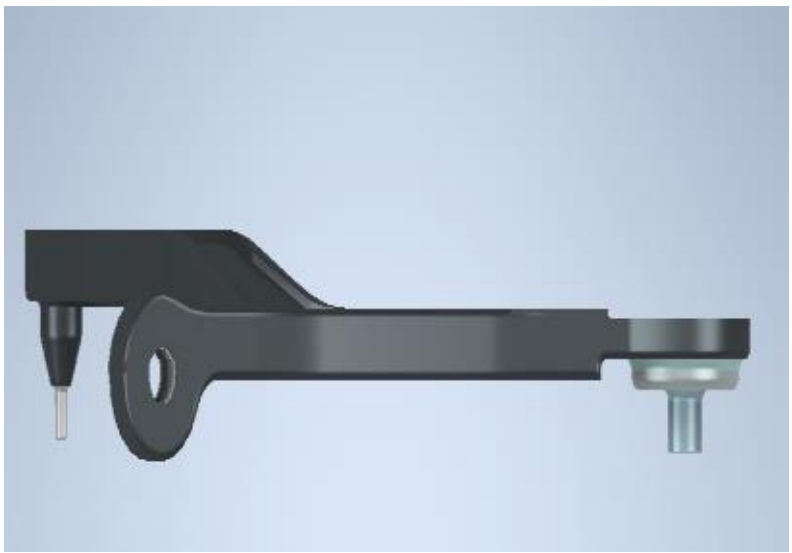
Extrusión del Brazo de Suspensión 3D



En la Figura 23 se observa el resultado parcial en perfil lateral del brazo de suspensión diseñado.

Figura 23

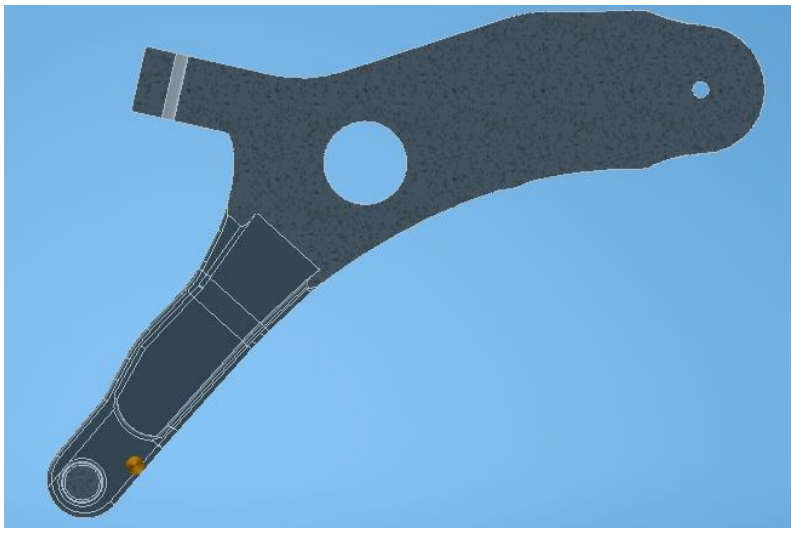
Perfil del Brazo de Suspensión 3D



A continuación se genera el perforado en los puntos donde las secciones del brazo de suspensión se fija al montarse en el vehículo, así también el orificio que alivia el peso de la pieza como se observa en la Figura 24.

Figura 24

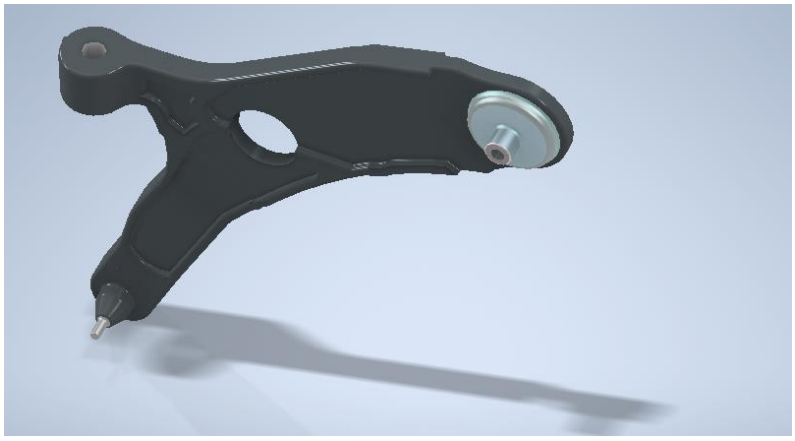
Perforado del Brazo de Suspensión



En la Figura 25 se observa el diseño final del brazo de suspensión estándar del vehículo Suzuki Swift 1.2 cc.

Figura 25

Modelado 3D Final del Brazo de Suspensión



3.7 Consideraciones de Restricción de Diseño

Al instante de considerar las restricciones en cuanto concierne a diseño de estructuras se podrá visualizar y analizar los elementos fundamentales de la optimización topológica, el cual desempeña una base fundamental en la generación de las medidas realistas y variables.

Dichas limitaciones establecen las condiciones y el límite, en los cuales debe desempeñarse el elemento en optimización, para de esta manera avalar su funcionalidad de requisitos mínimos, seguridad y trabajo.

Al instante de hablar de las limitaciones de diseño, éstas abarcan varios aspectos tales como la variación de oscilaciones y de frecuencia que genera cada amortiguador a diferentes revoluciones del M.C.I y en el tipo de carretera en que se desplaza.

La selección correcta de las restricciones de movimiento depende de la aplicación de los fines de bosquejo y de la forma definida a estudiarlo.

Como, por ejemplo, para el caso de las optimizaciones topológicas del entorno de suspensión, las restricciones que se podrían incluir son revoluciones, velocidad, tipo de carretera y cambios de marcha. También se puede establecer cada uno de los requisitos de las vibraciones (onda, amplitud, curva, frecuencia), para de esa forma garantizar que el amortiguador genere el mínimo de vibración en desplazamiento del vehículo.

Las restricciones en un proceso de diseño que por lo general se nacen de estándares del campo vehicular y mecánica, necesidades determinadas del propósito y sobretodo de normativas o estándares.

Pero un carácter fundamental en consideración es hallar el balance de la optimización con la estructura del componente y el cumplimiento de las restricciones, por la razón que un componente óptimo desde el enfoque de la eficacia podría resultar no ser factible si no sé cumplen las limitaciones de seguridad y trabajo.

Se debe considerar que en varios casos las limitaciones pueden contradecirse y/o solicitan de un nexo entre diferentes fines del bosquejo. Por lo tanto, el desarrollo de optimizaciones topológicas involucra un enfoque interactivo y la realización del análisis minucioso para así ajustar cada parámetro y alcanzar un boceto que cumpla con todos los requerimientos sobresalientes. En conclusión, la consideración de limitación en la fase de

boceto con la intervención de optimización topológica es necesario, para avalar que las soluciones obtenidas sean prácticas y seguras.

Estas limitaciones permiten entablar cada uno de las restricciones dentro de lo que se busca la mejor de las estructuras del componente, contribuyendo a un diseño óptimo que relacione su eficiencia, eficacia, funcionabilidad, y aplicabilidad.

3.8 Proceso de Simulación Dinámica del Brazo de Suspensión

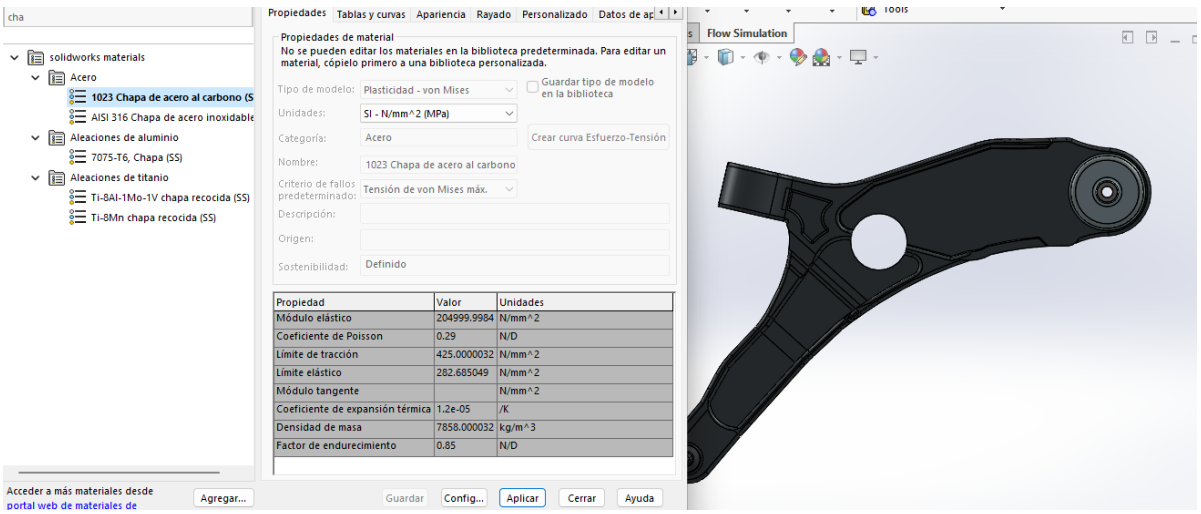
3.8.1 Consideraciones Iniciales

El presente estudio dinámico se lo realiza para los tipos de esfuerzos presentados para el análisis del comportamiento del brazo de suspensión que actúa en la parte delantera del vehículo. Adicional comprende los diferentes ciclos de frecuencia con porcentaje de daño al cual está sometido considerando los factores como la carga que soportará.

En cuanto al material a utilizar para el brazo de suspensión se utilizará el que determina el fabricante que es chapa de acero al carbono. Ver Figura 26.

Figura 26

Selección del Material



En la Tabla 3 se muestra las propiedades mecánicas principales del material, chapa de acero al carbono, el cual corresponde al brazo de suspensión real de la pieza en estudio.

Tabla 3

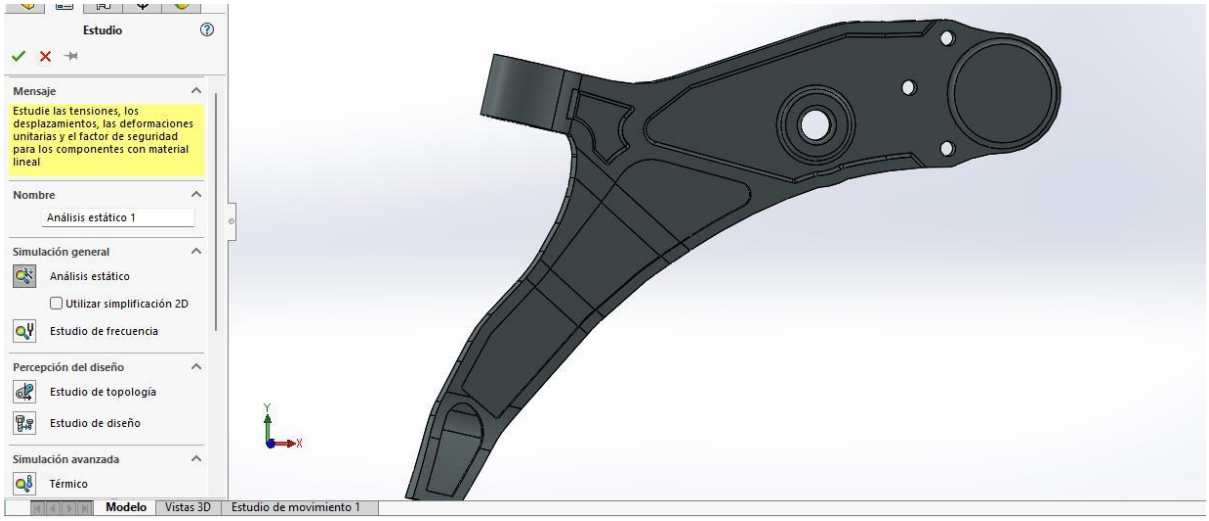
Propiedades de la Chapa de Acero al Carbono

Propiedad	Valor
Modulo elástico	204.99 GPA
Coeficiente de Possion	0.29
Limite elástico	282.68 Mpa
Densidad de masa	7858 kg/m^3

Adicional, para el análisis se estima un peso de 3000 Newton (N) con una masa asignada de 305.81 kg por el peso aproximado que oscila entre 1.000 kg y 1.200 kg en total. Con estos datos base se desarrollará el estudio estático. En la Figura 27 se observa los primeros resultados, los cuales representan los valores predeterminados para la simulación y el estudio del brazo de suspensión.

Figura 27

Selección de Análisis Estático



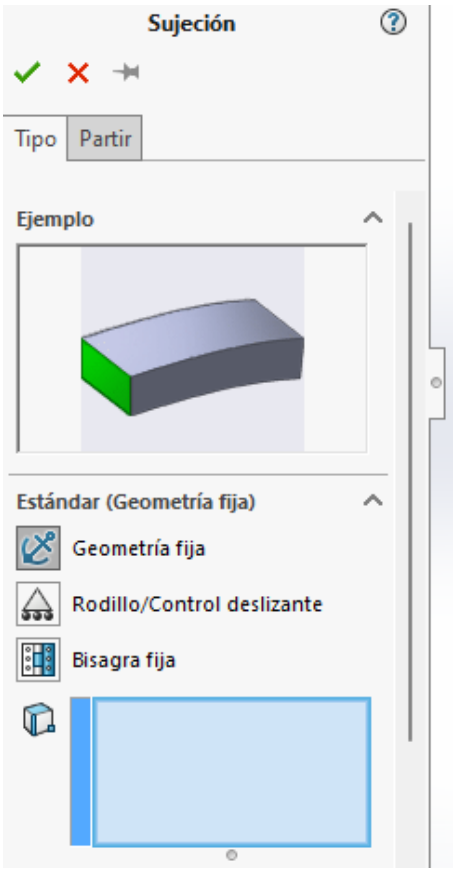
3.8.2 Esfuerzos Principales de Von Mises

El presente estudio dinámico se lo realiza para los tipos de esfuerzos presentados para el análisis del comportamiento del brazo de suspensión que actúa en la parte delantera del vehículo. Adicional comprende los diferentes ciclos de frecuencia con porcentaje de daño al cual está sometido considerando los factores como la carga que soportará. Para lo cual una vez

creada la geometría se coloca los puntos fijos que estarán situados como acople, éstos restringen los movimientos omitiendo los redondeos y chaflana para simplificar la simulación. Ver Figura 28.

Figura 28

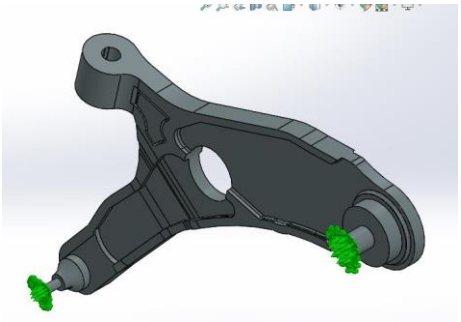
Colocación de Puntos Fijos



En la Figura 29 se muestra el brazo de suspensión con los puntos donde se restringe el movimiento para proceder con el análisis de esfuerzos.

Figura 29

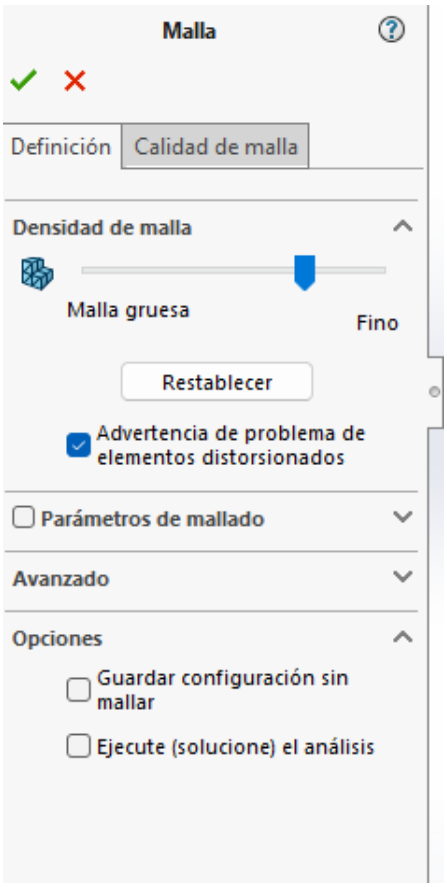
Brazo de Suspensión con Puntos Fijos para el Análisis



El mallado del elemento se prepara acorde a la geometría, en este caso representa bordes muy pequeños por lo cual para obtener un análisis mejor se refina la malla de tal manera que se obtiene valores cercanos al teórico. Ver Figura 30.

Figura 30

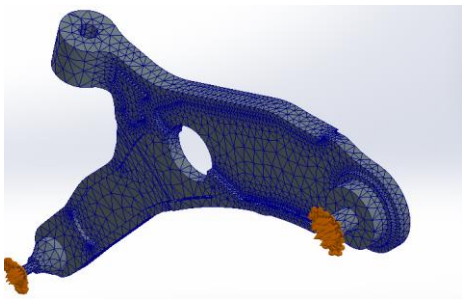
Mallado



En la Figura 31 se muestra el brazo de suspensión con su respectivo mallado.

Figura 31

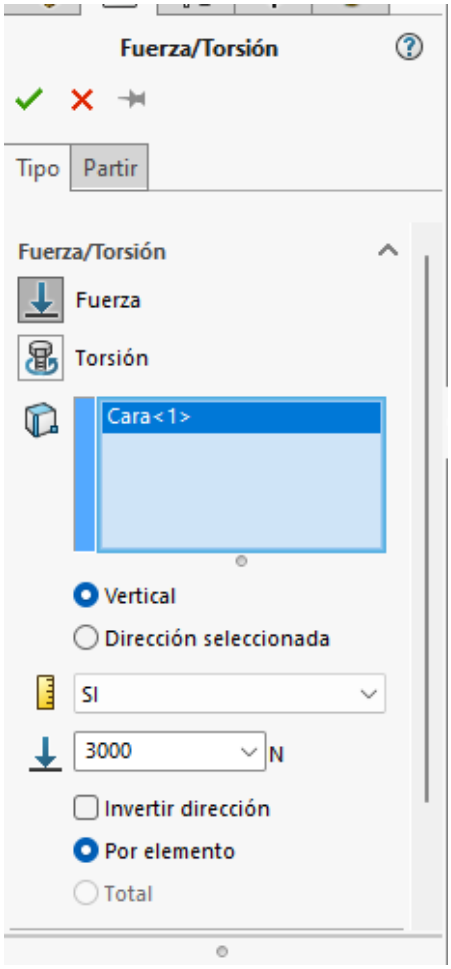
Brazo de Suspensión con Mallado para el Análisis



Se coloca la carga que va estar sometido el brazo de suspensión de manera correcta para poder obtener los resultados con precisión. Ver Figura 32.

Figura 32

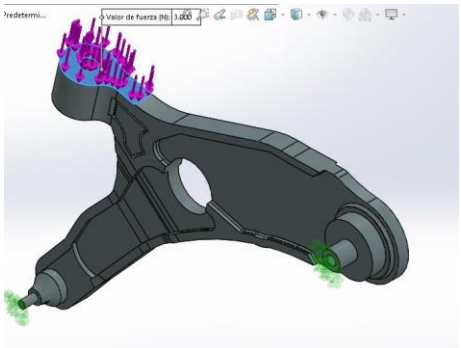
Colocación de la Carga



En la Figura 33 se muestra el brazo de suspensión con sus respectivas cargas.

Figura 33

Brazo de Suspensión con Cargas para el Análisis



3.8.3 Modal de Frecuencia

Se especifica la frecuencia en 4 tipos de análisis modales si la frecuencia de excitación se acerca a la frecuencia nativa de la estructura puede producir una elevación significativa en

la amplitud de oscilación de la suspensión. La resonancia en que el sistema presenta puede producir un cierto aumento significativo en la amplitud de las oscilaciones, las condiciones iniciales del componente y las fuerzas exteriores que actúan en él también pueden influir en su movimiento para el caso de tipo de frecuencia existe frecuencia. Ver Figura 34.

Figura 34

Tabla de Frecuencia, Tipos de Casos y Periodos

Nombre de estudio:Estudio de frecuencia 1

Nº de modo	Frecuencia(Rad/seg)	Frecuencia(Hertz)	Período(Segundos)
1	1.033,8	164,54	0,0060776
2	2.668,4	424,68	0,0023547
3	3.402,9	541,58	0,0018464
4	5.813,7	925,28	0,0010808
5	9.651,2	1.536	0,00065102
6	10.356	1.648,3	0,00060669
7	12.280	1.954,4	0,00051166
8	14.178	2.256,4	0,00044318
9	16.043	2.553,3	0,00039166

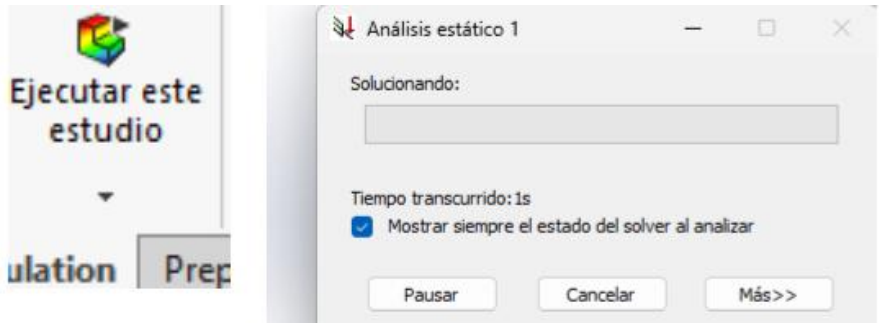
A continuación se detalla los modales de frecuencia para el análisis:

- Bajas frecuencias: frecuencias menores a 300 Hz.
- Frecuencias medias: en el rango de 300 Hz a 3 kHz.
- Altas frecuencias: frecuencias por encima de 3 kHz.

En la Figura 35 se muestra el cuadro de ejecución de análisis que lo realiza el software.

Figura 35

Cuadro de Ejecución de Análisis

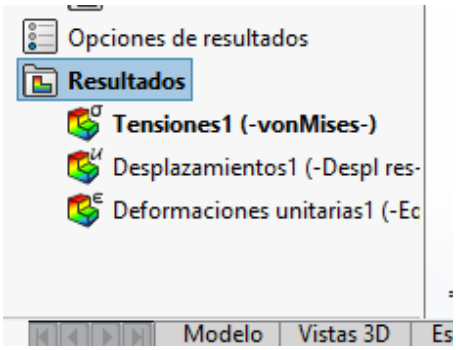


3.9 Interpretación de Resultados

Las ecuaciones rectoras darán los resultados de desplazamiento, velocidad y aceleración de las diferentes masas que actúan en el sistema, y con ello poder a definir el análisis de las vibraciones presentes, sus efectos y correcciones. Ver Figura 36.

Figura 36

Cuadro de Opciones para Ver Resultados del Análisis de Simulación



Por ende, el definir las soluciones analíticas que se obtendrán son útiles para comprender las vibraciones generadas en el sistema con respecto a patrones de cambio en los parámetros, además de constituir la ayuda inmediata al trazar componentes que integren cualquier rasgo de respuesta detallada con la selectiva del parámetro modificable.

De presentarse el caso que la repuesta analizada se dificulte la resultante puede hallarse por procedimientos de agrupación numérica, por ejemplo el método de Runge-Katta.

3.10 Factor de Seguridad

Según (Riddell & Hidalgo, 1997) señala que "… se entiende por seguridad el evitar que un elemento alcance o sobrepase un estado límite hasta el cual se considere que el comportamiento del elemento es aceptable".

Por lo cual un factor de seguridad es tan solo un elemento fundamental en esbozo y diseño por medio del cual se valora la capacidad del elemento para analizar su comportamiento vibratorio en diferentes parámetros. Así también, representa la unión entre carga máxima que un componente podrá soportar antes de que falle y la carga propia que se estima aplicar sobre

la misma. En resumen, el factor de seguridad presenta cual es la arista de resistencia que dispone un componente en relación con la condición propia de trabajo.

Un factor de seguridad se calcula por medio de la fracción de la carga de falla a alcanzar o carga de ruptura, por la carga propia que está sobre el componente en análisis. En la cuestión de que el factor de seguridad sea > 1, representa que el componente es apto de soportar la carga sin que esté presente un colapso y por tanto habrá una diferencia de seguridad. En la cuestión de que el factor de seguridad sea = 1 el componente está laborando al límite de la resistencia y por la presencia de cualquier otro factor que eleve la carga puede llevarlo a un colapso. Pero si el factor de seguridad es < 1 el elemento es absolutamente inseguro y no estará en capacidad de aguantar la carga en aplicación.

Dicho resultado del factor de seguridad depende de algunos elementos entre ellos están los siguientes:

- Medio del componente
- Incertidumbre en las cargas
- Importancia de aplicación
- Propiedades de los materiales

En las aplicaciones críticas es necesario el factor de seguridad > 1, que garantizará un alto estándar de seguridad del elemento y confiabilidad.

Es relevante tomar en circunspección que el factor de seguridad no sea una constante; el mismo puede variar según las condiciones de trabajo, las incertidumbres en las propiedades de los materiales involucrados y cambios en el ambiente operativo.

El cómputo del factor de seguridad es fundamental para asegurar que el componente sea lo totalmente resistente y seguro para la aplicación, confianza de los componentes de diseño y favorecimiento de la integridad.

Capítulo IV

4 Análisis de Resultados

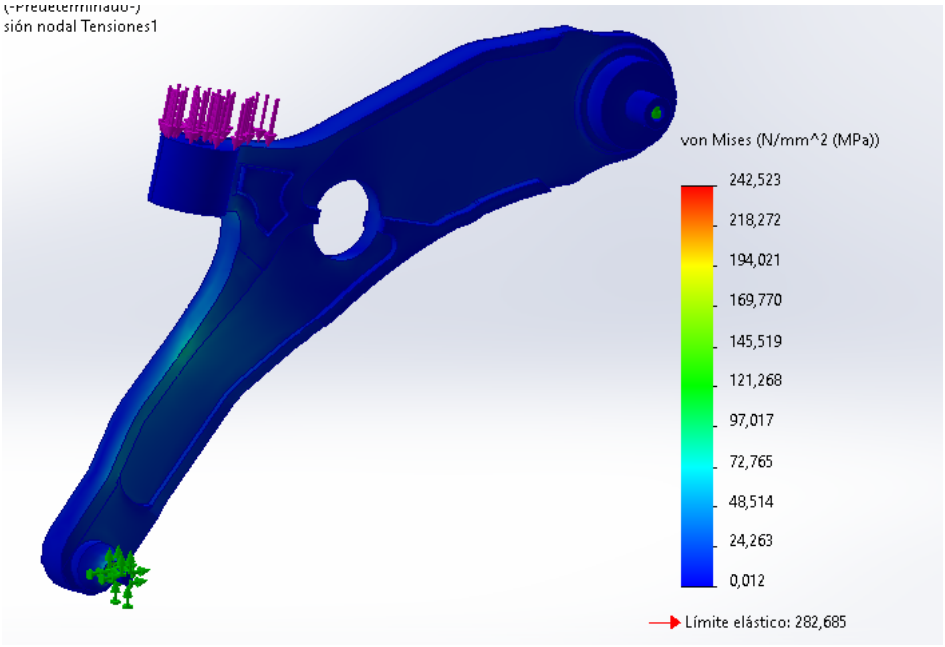
4.1 Análisis de Datos Obtenidos

4.1.1 Análisis de Esfuerzos Principales de Von Mises

El esfuerzo principal generado en el brazo de suspensión no debe superar el límite elástico debido a que se encuentra en un rango seguro por tanto no presentará fallos para el análisis estático debido a que tiene un límite mínimo de 0.012 MPa hasta un máximo 242.52 MPa presentado como mayor tensión principal para el cual en los soportes presenta un menor esfuerzo, como se observa en la Figura 37.

Figura 37

Análisis de Esfuerzos Generales

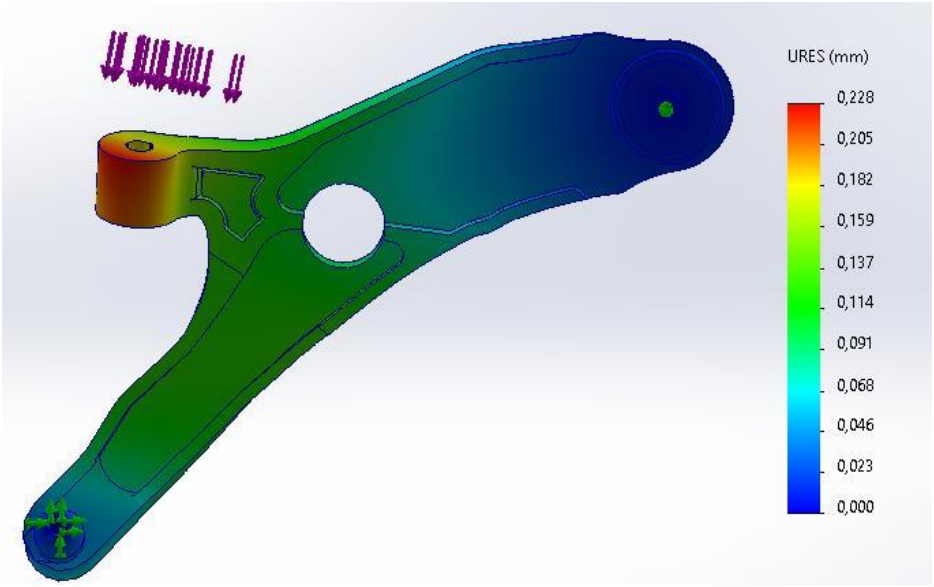


4.1.2 Análisis de Desplazamiento

El desplazamiento que presenta el brazo de suspensión son leves deformaciones con un mínimo de 0 hasta un máximo de 0.23 mm como se observa en la Figura 38. A excepción de la parte de las fijaciones de las zonas de anclajes debido a que están fijadas como modelo de anclaje.

Figura 38

Análisis de Desplazamiento

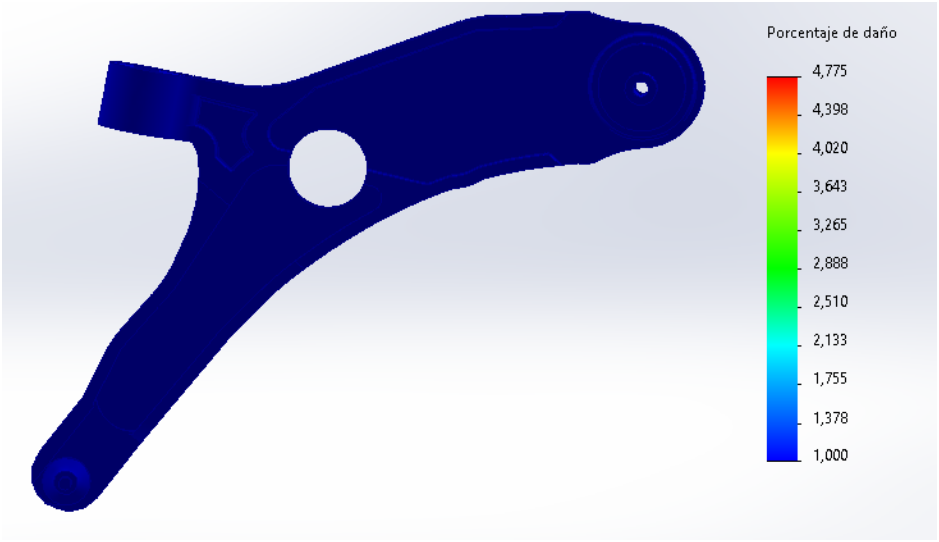


4.1.3 Análisis de Fatiga

En la Figura 39 se muestra el porcentaje de daño que puede llegar a presentar el brazo debido a las cargas cíclicas tales como el vehículo en movimiento, y presentado cargas diferentes se podrá ver afectado un máximo de 4.75% del volumen total.

Figura 39

Fatiga

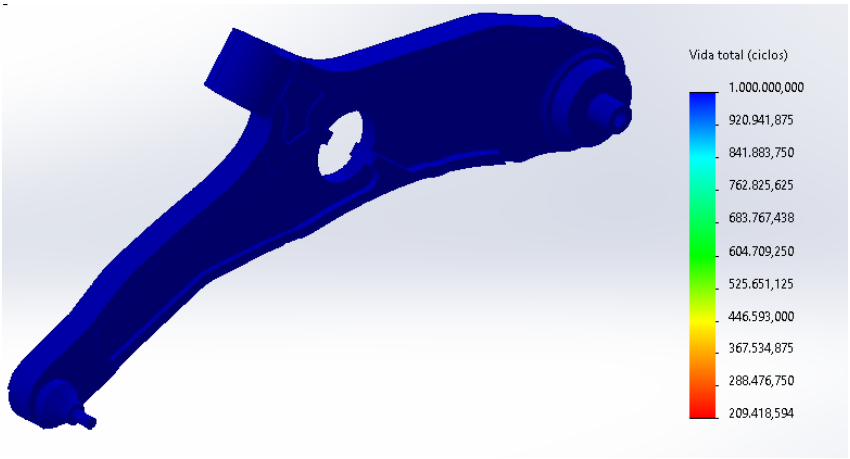


4.1.4 Análisis de Ciclo de Vida

Para los ciclos de vida que tiene el brazo cuando la carga va estar actuando por el movimiento presentado por el vehículo y la suspensión ejerciendo su trabajo de amortiguamiento, se verá reflejado la superación del valor máximo de ciclos que la suspensión comenzará a presentar fallas o hasta que pudiera sufrir una ruptura. El escenario más crítico se puede verse reflejado si supera los 209.418 ciclos. Ver Figura 40.

Figura 40

Ciclos de Vida

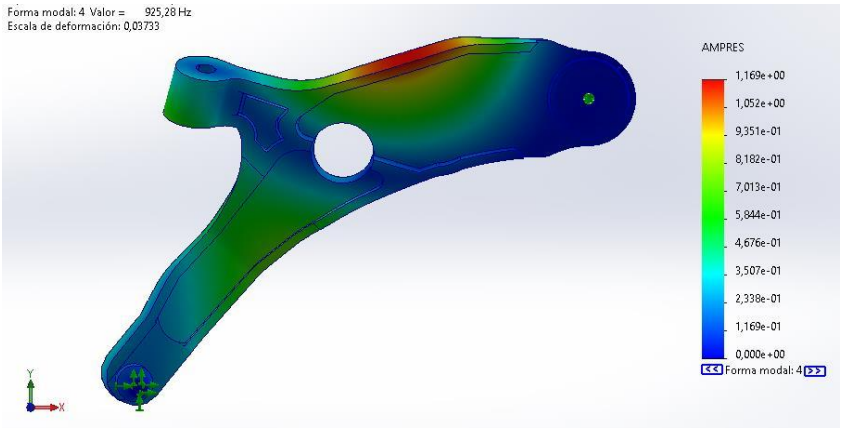


4.1.5 Análisis Modal de Frecuencia

En el caso de la frecuencia baja (< 300 HZ) las vibraciones en este rango son por lo general producidas por eventos tales como el funcionamiento del M.C.I, el rodaje de los neumáticos y la suspensión del vehículo. Ver Figura 41.

Figura 41

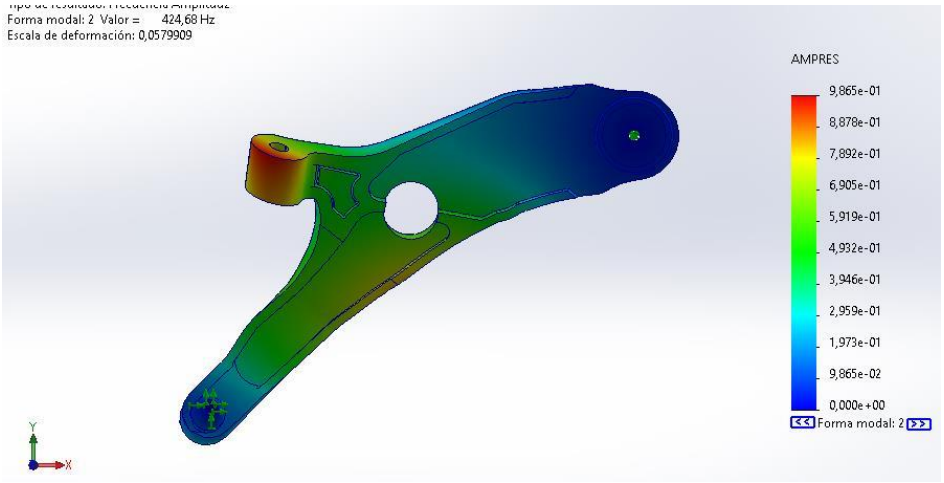
Análisis Modal de Frecuencia Baja



En el caso de la frecuencia media (300 Hz a 3 kHz) las vibraciones en este rango son por lo general producidas por una variedad de fuentes tales como la velocidad de cargas cíclicas, sistema de dirección y sistema de transmisión. Ver Figura 42.

Figura 42

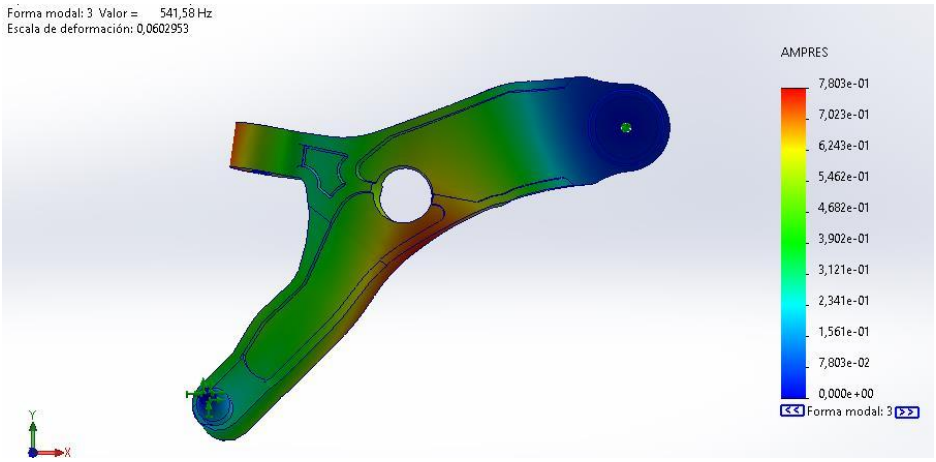
Análisis Modal de Frecuencia Media



En el caso de la frecuencia alta (300 Hz a 3 kHz) las vibraciones en este rango son por lo general producidas por el mismo brazo de suspensión por el trabajo que realiza Ver Figura 43.

Figura 43

Análisis Modal de Frecuencia Alta



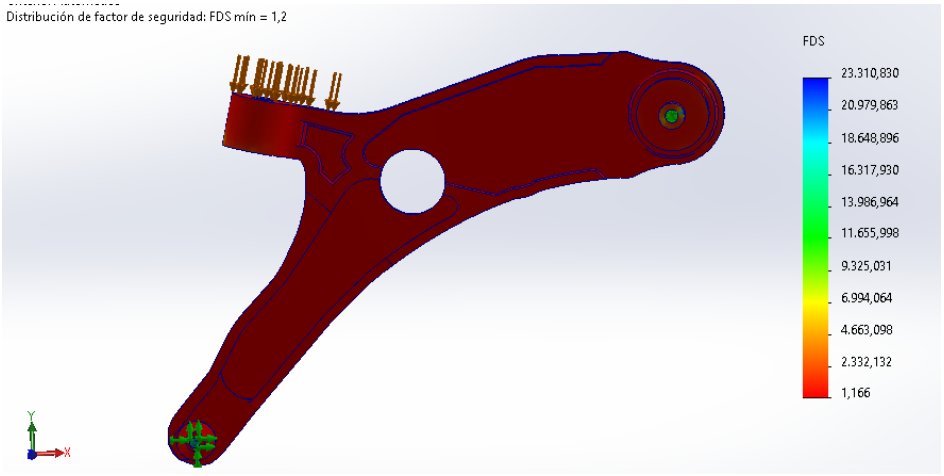
4.1.6 Factor de Seguridad

El valor obtenido supera el valor mínimo de 1.2, por cuanto el diseño del brazo de suspensión es seguro ni presentara fallas por la carga asignada debido a las cargas estáticas

sometidas por el peso mismo que viene de la estructura del vehículo sin comprometer los demás componentes o partes que se pudieran ver afectados en donde el brazo pudiera fallar si el factor es < 1. Ver Figura 44.

Figura 44

Factor de Seguridad



Conclusiones

Se analizó los esfuerzos a los que se encuentran sometidos los brazos de suspensión del vehículo Suzuki Swift 1.2 cc por medio de la simulación de elementos finitos del Software *Nastran*.

Se definió los elementos que componen el sistema de suspensión estándar y propiedades del material con que se fabrica, determinando que chapa de acero al carbono muestra un comportamiento mecánico dentro de los límites de seguridad establecidos los esfuerzos principales de Von Mises no despuntan el límite elástico del acero, garantizando así un diseño robusto capaz de soportar las cargas estáticas y cíclicas esperadas durante la vida útil del vehículo.

Se realizó un estudio de los esfuerzos que actúan sobre los brazos de suspensión del vehículo Suzuki Swift 1.2 cc mediante el software Autodesk *Nastran*, determinando en el análisis de fatiga que el brazo de suspensión puede experimentar hasta un 4.75% de daño debido a las cargas cíclicas, mientras que el análisis modal de frecuencia destaca la necesidad de tener en cuenta las vibraciones en diferentes rangos de frecuencia para garantizar un rendimiento óptimo y confort del vehículo durante su funcionamiento..

Se generó un modelo 3D del brazo de suspensión mediante elementos finitos y optimización topológica con el manejo del Software Autodesk *Nastran*, para comprender su esfuerzo con un límite máximo 242.52 Mpa, fatiga con un máximo de 4.75%, ciclo de vida si supera los 209.418 ciclos y frecuencia que va desde los 424.68 Hz hasta los 925.28 Hz.

Se obtuvo un factor de seguridad de 1.2 en el brazo de suspensión lo cual supera el mínimo requerido, indicando un margen de seguridad adecuado para la carga asignada en el elemento, y por consiguiente es eficiente en términos de material utilizado y estructura.

Recomendaciones

Se recomienda que, para estudios de análisis y simulaciones, se labore basándose en datos del fabricante de brazos de suspensión ya habientes en el mercado para con ello obtener una visión global y así reconstruir en base a las necesidades requeridas.

Se sugiere que futuras simulaciones y análisis de componentes y estructuras sean como la presente sean de conocimiento técnico, computacional, desarrollativo y de integridad física ya que así se podrá estudiar la capacitancia de la persona para generar y crear elementos fundamentados en procedimientos.

Dictar seminarios de manejo de Programas CAD y CAM para transformar dibujos planos en elementos 3D donde se realice evaluaciones técnicas, estudios de materiales, carga, resistencias, esfuerzo, vibraciones, entre otras similares.

Dictar cursos sobre materiales utilizados en el campo automotriz e industrial, para conocer sus usos, origines, aleaciones, entre otros.

Bibliografía

Andueza, L. (21 de Septiembre de 2015). Autodesk Fusion 360: Análisis de Esfuerzos. http://dimcad3d.com/2015/09/21/fusion360-fem/

Ashby, M. F. (2000). *Material Selection in Mechanical Desing. Butterworth Heinemann*. http://www.utc.fr/~hagegebe/UV/MQ12/CORRECTIONS_TD/%5BASHBY99%5D%20-

Autodesk Support. (8 de Octubre de 2023). Como refinar la malla en los nodos seleccionados en robot structural analysis. https://www.autodesk.es/support/technical/article/caas/sfdcarticles/sfdcarticles/ESP/How-to-refine-mesh-in-selected-points-in-Robot-Structural-Analysis.html

BALLESTAS BENI S.L. (28 de Marzo de 2019). *Conceptos básicos de las ballestas*. https://www.citefast.com/?s=APA7#_Webpage

Cengel, A. Y., y Boles, A. M. (2011). *Termodinamica.* McGraw-Hill.

Cengel, Y. A., y Cimbala, J. M. (2012). *Mecanica de Fluidos. Fundamentos y aplicaciones* (Segunda ed.). México, México: MCGraw Hill. https://archive.org/details/mecanicadefluidosfundamentoyunusa.cengel/page/n3/mode/2up

CRI Español. (31 de Octubre de 2014). *El sismógrafo de Zhang Heng*. https://espanol.cri.cn/culture/others/3177/20141031/332667.html

Frausto-Robledo, A. (26 de Mayo de 2022). Autodesk AutoCAD 2023 — AI, Upskilling Users and Performance. https://architosh.com/2022/05/autodesk-autocad-2023-ai-upskilling-users-and-performance/

Gesellschaft, D., y Zysammenarbeit, T. (1980). *Tecnología del automóvil Tomo 2.* Reverte.

Gonzalez Herrera, E. (2018). *Análisis estructural de un sistema de enganche de remolque automotriz mediante el método de elemento finito.* México.

ICCTUNING. (5 de Octubre de 2021). *Todo sobre - Suspensión regulable, coilovers y cuerpo roscado*. https://tienda.icctuning.com/blogs/news/todo-sobre-suspension-regulable-coilovers-y-cuerpo-roscado

Ingemecanica. (s.f.). *Ingemecanica*. https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn73.html#google_vignette

MotorKote Colombia. (30 de Abril de 2022). ¿Que es y cómo funciona el sistema de suspension? https://motorkote.com.co/como-funciona-sistema-suspension/

Prototicad3d. (2017). Cómo hacer soldaduras con Autodesk Inventor. https://www.prototicad3d.com/2017/02/como-hacer-soldaduras-con-autodesk.html

Rivera Berrío, J. G. (2022). *FÍSICA VOLUMEN I.* Córdoba, España: RED Descartes.

Rodiauto. (25 de Marzo de 2017). *Amortiguadores deportivos*. https://blog.rodiautosport.es/amortiguadores-deportivos/

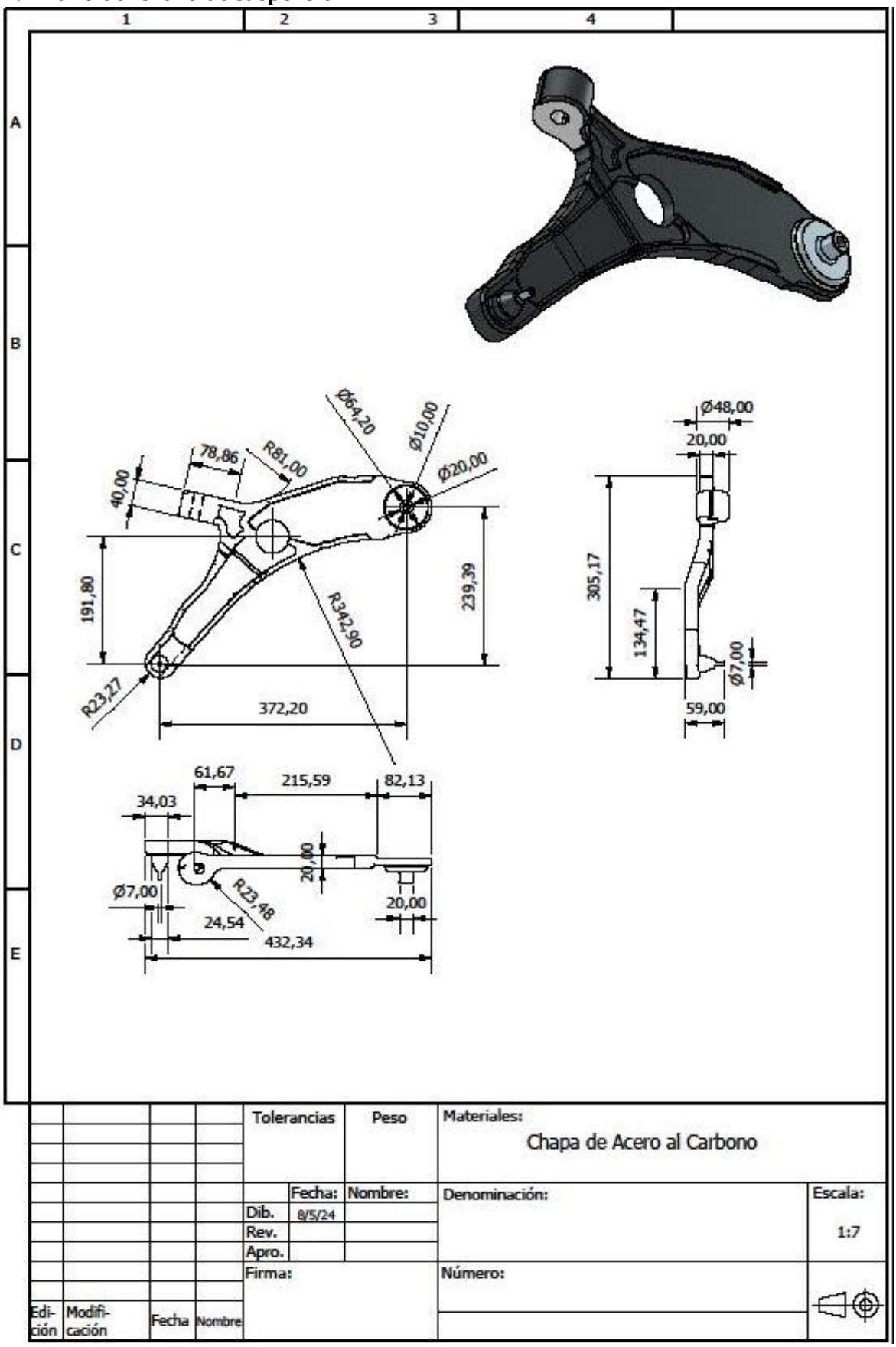
Singiresu, R. S. (2012). *Vibraciones Mecánicas* (Quinta ed.). México, México: Pearson Educación.

Tavera, B. (7 de Septiembre de 2023). Aplicación de Autodesk Robot Structural Analysis y Revit para Proyectos Estructurales. https://www.inesa-tech.com/blog/aplicacion-de-autodesk-robot-structural-analysis-y-revit-para-proyectos-estructurales/

Vera, E. (2017). *Propuesta de diseño ergonómicoen butacas de vehículos monoplaza, para equipos ecuatorianos participantes de la Formula Student.* Quito: UISEK.

Vera, E. (2017). *Propuesta de diseño ergonómicoen butacas de vehículos monoplaza, para equipos ecuatorianos participantes de la Formula Student.* Quito: UISEK.

Zamora Ramírez, Á. (Abril de 2015). *Definición de Oscilación*. https://significado.com/oscilacion/

Anexos

A. Plano del brazo de suspensión