



INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

Proyecto Previo a la Obtención del Título de Ingeniero Automotriz

Autor: Jonathan Ivan Escalante Zuñiga

Tutor: Ing. Edgar Vera Puebla, Msc.

Análisis Modal de Horquilla Superior en Suspensión del Vehículo Yinxiang YX150KD por medio de Programa Computacional de Ingeniería Asistida por Ordenador

Certificación de Autoría

Yo, Jonathan Ivan Escalante Zuñiga, con C.I.: 0923486682, 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.

Jonathan Ivan Escalante Zuñiga

C.I.: 0923486682

Aprobación del Tutor

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

Ing. Edgar Vera Puebla, Msc

C.I: 1715264105

Director del Proyecto

Dedicatoria

En profundo agradecimiento a mis queridos padres. Este logro es el resultado de su inmenso amor y dedicación. Valoro cada una de las lecciones de vida que me han compartido y el cariño que siempre me han brindado. Mi gratitud hacia ustedes es infinita.

A mi esposa, compañera fiel, por su tolerancia y su constante apoyo incondicional en todo momento. Sin tu continuo aliento y sacrificio, este logro no habría sido alcanzable. Eres mi fortaleza y mi refugio.

A mi hija, cuya felicidad y sonrisa son una fuente de motivación para ser mejor persona y profesional. Agradezco tu paciencia; sé que he sacrificado algo tan valioso como es el tiempo para alcanzar esta meta, y es por eso por lo que te dedico este logro especialmente a ti, con la esperanza de que sirva de inspiración para luchar por tus propios sueños con coraje y determinación.

Jonathan Ivan Escalante Zuñiga

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a cada una de las personas que han sido un pilar para la culminación de este proyecto.

Agradezco al Ing. Edgar Vera Puebla, MSc., por su paciencia, conocimiento y guía, que han sido de mucha ayuda para el desarrollo de este trabajo. Sus consejos y sugerencias han sido fundamentales para dar lo mejor en cada una de las etapas de este proyecto.

También quiero expresar mi gratitud al Ing. Darwin Chele, MSc., cuya exigencia y compromiso como docente me han llevado a dar lo mejor como estudiante, incluso desafiando mis límites. Gracias por su dedicación.

Asimismo, agradezco a mis amigos Ing. Jean Carlos Juca, MSc., y Ec. Fernando Vega, MSc., cuya amistad ha sido un apoyo y una motivación constante para mantenerme enfocado en mis metas. Aprecio la comprensión y el saber llevar el equilibrio entre el tiempo de estudio y los momentos de diversión. Sin ustedes, este logro no habría sido posible.

No puedo dejar de mencionar mi profundo agradecimiento a mi esposa, Melissa Salazar, por su paciencia y entrega, y a mi hija, Alice Escalante, cimiento importante de mi vida.

Por último, quiero expresar mi agradecimiento a todas las personas que, de manera directa o indirecta, han hecho posible la realización de este proyecto. ¡Agradezco a todos por ser parte de este logro y por confiar en mis capacidades!

Jonathan Ivan Escalante Zuñiga

Índice General

Dedicatoria.....	v
Agradecimientos.....	vi
Índice General.....	vii
Índice de Figuras	x
Índice de Tablas.....	xii
Resumen	xiii
Abstract.....	xiv
Capítulo I.....	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.....	2
1.2.2. Formulación del Problema	3
1.3. Sistematización del Problema	4
1.4. Objetivos de la Investigación	4
1.4.1. Objetivo General	4
1.4.2. Objetivos Específicos.....	4
1.5. Justificación e Importancia de la Investigación	5
1.5.1. Justificación Teórica	5
1.5.2. Justificación Metodológica	7
1.5.3. Justificación Práctica.....	8
1.5.4. Delimitación Temporal	9

1.5.5. Delimitación Geográfica	9
1.5.6. Delimitación del Contenido	10
1.6. Alcance.....	10
Capítulo II.....	12
2. Marco de Referencia	12
2.1. Introducción al Análisis Modal.....	12
2.1.1. Definición de Análisis Modal	12
2.1.2. Importancia del Análisis Modal en la Industria de la Ingeniería Automotriz.....	13
2.1.3. Aplicación en el Diseño de Componentes Automotrices.....	13
2.2. Conceptos Fundamentales de la Dinámica Estructural.....	14
2.2.1. Vibración Mecánica y sus Causas.....	15
2.2.2. Modos de Vibración y Frecuencias Naturales	16
2.2.3. Influencia de la Rigidez y la Masa en el Comportamiento Dinámico de una Estructura .	17
2.3. Métodos de Análisis Modal	19
2.3.1. Método de Elementos Finitos (MEF).....	19
2.3.2. Enfoque Modal Directo.....	21
2.3.3. Enfoque Modal Indirecto	23
2.3.4. Procedimientos de Solución Numérica para el Cálculo de Modos y Frecuencias por Medio de Software CAE.....	24
2.4. Horquilla de Suspensión	25
2.4.1. Definición y Función de una Horquilla.....	25
2.4.2. Componentes Principales	26
2.5. Aplicación de Modelo CAD y CAE.....	30

Capítulo III	32
3. Metodología de Análisis Modal de Horquilla Superior	32
3.1. Selección del Modelo para Análisis Modal	32
3.2. Preparación del Modelo para Análisis Modal	33
3.2.1. Adquisición y Preparación del Modelo CAD	34
3.2.2. Definición de Materiales, Propiedades y Condiciones de Contorno.....	40
3.2.3. Generación de Malla y Refinamiento	44
Capítulo IV	48
4. Análisis de Resultados	48
4.1. Datos Obtenidos	48
4.1.1. Resultados de Frecuencias por Desplazamiento	49
4.1.2. Resultados de Frecuencia por Estrés	49
4.1.3. Resultados de Frecuencia por Tensión.....	50
4.2. Análisis de Resultados después de la Simulación.....	51
4.2.1. Análisis de los Desplazamientos Generados por Modos de Frecuencia	51
4.2.2. Análisis de Estrés Estructural Generado por los Modos de Frecuencia.....	52
4.2.3. Análisis de Tensión Generado por los Modos de Frecuencia	53
Conclusiones.....	55
Recomendaciones	56
Bibliografía.....	57

Índice de Figuras

Figura 1 <i>Análisis Modal sobre Mecanismo de Suspensión de un Vehículo</i>	14
Figura 2 <i>Análisis de Vibración Mecánica</i>	15
Figura 3 <i>Método de Elementos Finitos MEF – Computacional y Gráfico</i>	20
Figura 4 <i>Conjunto Horquilla, Resorte y Amortiguador</i>	22
Figura 5 <i>Procedimiento de Solución Numérica con CAE</i>	25
Figura 6 <i>Horquilla Superior</i>	26
Figura 7 <i>Amortiguador</i>	27
Figura 8 <i>Muelle o Resorte</i>	28
Figura 9 <i>Buje y Rodamiento</i>	29
Figura 10 <i>Vehículo Yinxiang YX150KD</i>	32
Figura 11 <i>Horquilla Superior de Vehículo Yinxiang YX150KD</i>	33
Figura 12 <i>Inicio de Modelado con AutoDesk Inventor</i>	34
Figura 13 <i>Inicio de Modelado con AutoDesk Inventor en 2D</i>	35
Figura 14 <i>Selección de las Dimensiones del Tubo</i>	36
Figura 15 <i>Extrusión de Secciones del Tubo</i>	38
Figura 16 <i>Pasador Tipo Pivote de Horquilla</i>	38
Figura 17 <i>Empalme en Aristas</i>	39
Figura 18 <i>Base Plana para Sujeción</i>	39
Figura 19 <i>Base para Sujeción de Amortiguador</i>	40
Figura 20 <i>Entorno Nastran de Autodesk</i>	41
Figura 21 <i>Configuración de Edición en Nastran de Autodesk</i>	42
Figura 22 <i>Configuración de Designación de Material en Nastran de Autodesk</i>	43

Figura 23 <i>Configuración de Restricciones en Nastran de Autodesk</i>	43
Figura 24 <i>Configuración de Cargas en Nastran de Autodesk</i>	44
Figura 25 <i>Generación de Mallado en Nastran de Autodesk</i>	47
Figura 26 <i>Resultados de la Simulación en Nastran de Autodesk</i>	47
Figura 27 <i>Análisis del Desplazamiento Máximo en Modo de Frecuencia</i>	51
Figura 28 <i>Análisis del Estrés Estructural Crítico en Modo de Frecuencia</i>	52
Figura 29 <i>Análisis de Tensión Estructural Crítico en Modo de Frecuencia</i>	53

Índice de Tablas

Tabla 1 Especificaciones del Tubo	37
Tabla 2 Resultados de Modos de Frecuencia según el Desplazamiento.....	49
Tabla 3 Resultados de Modos de Frecuencia según el Modo de Estrés Estructural	50
Tabla 3 Resultados de Modos de Frecuencia según el Modo de Tensión Estructural.....	50

Resumen

A través del presente proyecto investigativo se centra en el análisis modal de la horquilla superior de la suspensión del vehículo Yinxiang YX150KD utilizando técnicas de ingeniería asistida por ordenador (CAE). El objetivo principal es evaluar el comportamiento dinámico y estructural de la horquilla bajo condiciones de carga y vibración. El estudio inicia con el modelado por medio del programa Inventor detallado de la horquilla, seguido de la generación de condiciones de contorno realistas, cargas dinámicas y generación de mallado, para finalmente simular las condiciones operativas de la horquilla en el sistema de suspensión del vehículo. Mediante el uso del programa Nastran de análisis modal, se determinan las frecuencias naturales y las formas modales de la horquilla. Los resultados obtenidos determinan las secciones de máxima tensión y deformación, permitiendo identificar modos de vibración críticos que podrían afectar negativamente el rendimiento del componente. Llegando a proponer recomendaciones para la optimización del diseño, incluyendo ajustes en la geometría y la selección de materiales más adecuados. Este proyecto investigativo no solo proporciona una comprensión profunda del comportamiento dinámico de la horquilla superior, sino que también ofrece una guía práctica para futuras mejoras en el diseño de componentes de los vehículos, contribuyendo a una mayor seguridad, durabilidad y confort en la conducción.

Palabras Clave: Diseño, análisis modal, horquilla, sistema de suspensión, mecánica, simulación.

Abstract

Through this research project, it focuses on the modal analysis of the upper fork of the suspension of the Yinxiang YX150KD vehicle using computer-aided engineering (CAE) techniques. The main objective is to evaluate the dynamic and structural behavior of the fork under loading and vibration conditions. The study begins with detailed modeling of the fork using the Inventor program, followed by the generation of realistic boundary conditions, dynamic loads and mesh generation, to finally simulate the operating conditions of the fork in the vehicle suspension system. By using the Nastran modal analysis program, the natural frequencies and mode shapes of the hairpin are determined. The results obtained determine the sections of maximum stress and deformation, allowing the identification of critical vibration modes that could negatively affect the performance of the component. Coming to propose recommendations for the optimization of the design, including adjustments in the geometry and the selection of the most suitable materials. This research project not only provides a deep understanding of the dynamic behavior of the upper fork, but also offers practical guidance for future improvements in the design of vehicle components, contributing to greater safety, durability and driving comfort.

Keywords: Design, modal analysis, fork, suspension system, mechanics, simulation.

Capítulo I

Problema de la Investigación

1.1. Tema de Investigación

Análisis modal de horquilla superior en suspensión del vehículo Yinxiang YX150KD por medio de programa computacional de ingeniería asistida por ordenador.

1.2. Planteamiento, Formulación y Sistematización del Problema

El desarrollo de modelos de transportación es diverso en el campo de la industria automotriz y más aún en cada uno de sus componentes los cuales requieren de un proceso exhaustivo de diseño, así como del análisis del comportamiento de sus elementos como de sus enlaces o mecanismos siendo este un problema continuo por el tipo de ensayo o análisis a ser realizado por el motivo de una continua innovación del producto.

Cada uno de los elementos se encuentran en la realidad sometidos a importantes condiciones de esfuerzos o cargas, los mismos que involucran a un desafío de mejora continua en cada uno de los elementos que para este caso de estudio involucra a la suspensión del vehículo.

Actualmente se posee una gran ventaja y es la disposición de muchas herramientas digitales que facilitan muchos procesos y sobre todo generan un ahorro considerable de recursos dentro del desarrollo de la industria automotriz y mecánica lo que engloba condiciones importantes para los departamentos de desarrollo de las empresas que trabajan constantemente para crear y mejorar este tipo de productos de transportación a nivel mundial, pero bajo un aspecto importante como lo es el estudio del cuidado en lo correspondiente al cuidado del factor ambiental.

Por los motivos expuestos en los párrafos anteriores en el presente estudio se plantea un desarrollo de estudio para llegar a un análisis modal de la horquilla superior en suspensión del vehículo Yinxiang YX150KD, para de esta manera poder conocer el proceso correcto y

llegar a realizar el análisis modal de su comportamiento, y así poder generar un planteamiento de sugerencias de forma específica que permitan a un futuro tomar la decisión en la mejora del este componente.

1.2.1. Planteamiento del Problema

Al momento de plantear el problema para el presente estudio correspondiente a la horquilla superior colocada en la parte superior de la suspensión del vehículo tubular, con lo que este elemento desempeña una importancia crucial en la estabilidad, comodidad y sobre todo seguridad del vehículo.

Como caso específico del presente estudio de investigación se selecciona al vehículo de la marca Yinxiang YX150KD, para de esta manera poder garantizar que la horquilla es un elemento ya en funcionamiento de manera real y que pasó por un proceso de diseño y construcción de forma óptima y la cual soporta cargas dinámicas y distintos modos de vibraciones a las que este elemento se expone durante su proceso de funcionamiento y teniendo en cuenta que también lo realiza en condiciones estáticas.

El estudio del análisis modal de la horquilla superior del vehículo Yinxiang YX150KD a través de un programa computacional que aplica la ingeniería asistida por un ordenador con sus siglas CAE, se presenta como una gran herramienta fundamental para poder evaluar su comportamiento estructural y dinámico bajo diversas condiciones de vibración y carga a las que se encuentra sometido.

El presente análisis permite de mejor manera identificar las posibles deficiencias de diseño a las que puede estar sometido, áreas de concentración de esfuerzos, así como de modos de vibración críticos los cuales pueden complementar el rendimiento y la integridad del componente.

El planteamiento de problema en si fundamentalmente radica en la necesidad de realizar un análisis exhaustivo de la horquilla superior del vehículo Yinxiang YX150KD para

de esta manera garantizar su acomodamiento y optimización en términos de durabilidad, resistencia y seguridad.

Pero es Fundamental el poder comprender cómo es el comportamiento de la horquilla superior a las cargas estáticas y dinámicas, así como a las constantes vibraciones producidas por diversas condiciones de conducción como lo son curvas, baches y frenadas severas al momento del funcionamiento del vehículo.

Además, se requiere poder determinar las frecuencias naturales de vibración y las formas modales las mismas que se encuentran asociadas con el componente, lo que permitirá identificar con mayor exactitud las frecuencias críticas que podrían coincidir con las frecuencias de excitación del vehículo, por lo que podría llevar a fenómenos extremos o complejos de resonancia no deseados y potencialmente peligrosos.

En definitiva, el presente planteamiento del problema para la investigación implica por lo tanto en la aplicación de distintas técnicas de modelado en dos y tres dimensiones del elemento, análisis y simulación computacional para de esta manera poder evaluar su comportamiento dinámico de la horquilla superior del sistema de suspensión del vehículo Yinxiang YX150KD para de esta forma poder proponer algunas soluciones de diseño que permitan mejorar su rendimiento y su seguridad.

Este análisis de factores importantes como la colaboración del personal de docentes técnicos y expertos en el área del diseño automotriz, así como de especialistas en áreas de dinámica de los vehículos y de personal experto en análisis estructural para de esta forma poder abordar de manera integral cada uno de los desafíos planteados para el presente estudio investigativo.

1.2.2. Formulación del Problema

¿Cómo se puede optimizar la horquilla superior de la suspensión del vehículo Yinxiang YX150KD a través de un análisis modal por computadora para de esta manera

mejorar su resistencia y rendimiento dinámico, pero a su vez garantizando una conducción más segura y confortable para sus ocupantes?

1.3. Sistematización del Problema

- ¿Cuál es el propósito que se lleva a cabo con el análisis modal de la horquilla superior en la suspensión del vehículo Yinxiang YX150KD?
- ¿Cuáles son los pasos importantes en la preparación del modelo para el análisis modal?
- ¿Qué información se pretende obtener con el proceso de un análisis modal sobre una horquilla superior de suspensión?
- ¿Cómo se interpretan los resultados del análisis modal?
- ¿Cuál es la importancia de la validación y refinamiento en el proceso del análisis modal en una horquilla superior de la suspensión delantera del vehículo Yinxiang YX150KD?

1.4. Objetivos de la Investigación

1.4.1. Objetivo General

- Realizar la simulación de análisis modal de horquilla superior en la suspensión del vehículo Yinxiang YX150KD utilizando el programa AutoDEsk Inventor Nastran 2024.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Generar un modelo geométrico tridimensional de la horquilla superior del vehículo Yinxiang YX150KD en AutoDEsk Inventor Nastran 2024.
- Determinar cargas y restricciones de contorno en la horquilla superior, para la simulación de funcionamiento a las que estará expuesto el componente en su entorno operativo.

- Proporcionar recomendaciones de diseño y optimización basadas en los resultados del análisis modal.

1.5. Justificación e Importancia de la Investigación

Con el presente trabajo investigativo que se enfoca en el análisis modal de la horquilla superior de la suspensión delantera del vehículo Yinxiang YX150KD, establece objetivos por medio de fuentes investigativas las cuales presentan soluciones a la perspectiva metodológica, práctica y teórica como se puede plantear a continuación:

1.5.1. Justificación Teórica

El presente estudio relacionado al análisis modal de la horquilla colocada en la parte superior del sistema de suspensión delantera del vehículo Yinxiang YX150KD a través de un programa computacional de ingeniería asistida por un computador se justifica de forma teórica por su importancia en la evaluación, así como de su optimización en el rendimiento del elemento de forma estructural y dinámica de esta autoparte dentro del sistema de suspensión del vehículo.

En términos técnicos y teóricos la horquilla ubicada en la parte superior del sistema de suspensión del vehículo en estudio es una parte crítica la cual soporta un conjunto de cargas variables y se encuentra sujeta a muchos ciclos de vibraciones durante la operación de funcionamiento. Al realizar el análisis modal esto permite entender cuál es su comportamiento vibratorio de esta autoparte, identificando sus modos de vibración de forma natural y las frecuencias asociadas. Todos estos modos pueden ayudar a mostrar o identificar áreas susceptibles a resonancia no deseadas, las cuales podrían en un punto a conducir a fallos prematuros en el funcionamiento dentro del vehículo.

Cabe aclarar que al realizar un análisis modal teórico este proporciona información muy importante para la optimización del diseño del elemento, permitiendo realizar modificaciones en sus formas geométricas, selección de mejores tipos de materiales para la

elaboración del componente de forma adecuada y mejorar significativamente la distribución de las cargas. De esta manera se contribuye a la mejora continua de la durabilidad, la seguridad y confort del vehículo, al mismo tiempo en el que se reduce el riesgo de los fallos estructurales del componente.

En definitiva, al realizar este análisis modal de manera teórica de la horquilla superior de la suspensión del vehículo Yinxiang YX150KD por medio de un programa de ingeniería asistida por ordenador representa ser una gran herramienta para así garantizar un diseño robusto y con un rendimiento óptimo de la autoparte en condiciones de funcionamiento de forma cotidiana y real.

Una de las formas de justificar la sección teórica del presente estudio se basa en la revisión previa de diversos estudios ya realizados relacionados con el presente estudio de forma parcial entre los cuales se menciona a continuación algunos de ellos:

Según (Castro & Herrera, 2020) su estudio “analiza el comportamiento de los soportes con acción rápida en la horquilla, para optimizar el recambio del neumático, aplicado a un prototipo de motocicleta para la Competencia Internacional MotoStudent”.

Según (Gómez S. , 2016) realiza “el diseño de una horquilla para bicicletas de montaña dotada de suspensión telescópica de tipo monobrazo para un uso previsto en modalidad de descenso y la aplicación de los ensayos de seguridad de la normativa pertinente”.

Según (Moreno e. , 2021) se basa en “diseñar una horquilla adecuada a las condiciones/requerimientos de un caso en particular. Entendiendo los esfuerzos y comportamientos mecánicos de la pieza para su posterior modelización y simulación a través de un software basado en el método de los elementos finitos”.

Por medio de un estudio científico (De la Peña & Castro, 2019) “muestra un modelo teórico, programado con el software Matlab, que permite el análisis dinámico de una suspensión independiente de doble horquilla”.

1.5.2. Justificación Metodológica

Teniendo en cuenta el enfoque de la presente investigación la metodología que se propone con el fin de llevar a cabo el análisis de la horquilla superior de la suspensión del vehículo Yinxiang YX150KD por medio del uso de un programa computacional aplicado a la ingeniería asistida por ordenador en el campo del diseño automotriz se fundamenta en la necesidad de garantizar la durabilidad, seguridad y eficiencia del elemento en estudio. Este tipo de estudio se justifica por medio de varias razones, las cuales en su mayoría se detallan a continuación:

Se da inicio con el análisis modal la cual es una técnica muy conocida en el campo del estudio estructural y también es aplicada en la ingeniería con el fin de evaluar el comportamiento vibratorio y dinámico de estructuras mecánicas. Al ser aplicada este tipo de análisis en el diseño de la horquilla superior de un sistema de suspensión, se puede identificar y mitigar posibles inconvenientes de resonancia, fatiga y vibraciones que en algún momento podrían comprometer de forma estructural su rendimiento en condiciones de funcionamiento del elemento.

Además, con la aplicación de un programa computacional de CAE se proporciona una plataforma precisa y eficiente para poder realizar este tipo de análisis. Los modelos computacionales poseen la ventaja de permitir generar simulaciones con una amplia gama de condiciones de esfuerzos, cargas y de escenarios de operación, con lo que se facilita la exploración de un sinnúmero de configuraciones de diseño y así mismo el poder evaluar su impacto en el comportamiento estructural de la autoparte.

Finalmente, esta metodología brinda grandes ventajas al ser altamente adaptable y escalable. Una vez establecido el modelo de simulación o conocido como renderizado, es posible realizar varios tipos de análisis de forma adicional que permiten investigar distintos aspectos del diseño, también el realizar optimizaciones y validar soluciones propuestas, lo que permite contribuir a un proceso de diseño iterativo y centrado básicamente en la mejora de forma continua del producto final.

En definitiva, la metodología propuesta permite brindar un enfoque riguroso y sistemático con el fin de abordar los desafíos asociados con el diseño y validación del diseño de la horquilla superior de la suspensión del vehículo Yinxiang YX150KD.

1.5.3. Justificación Práctica

El estudio del análisis modal de la horquilla superior a través de un programa computacional de CAE es fundamental para poder garantizar dos factores fundamentales como lo son el rendimiento óptimo y la seguridad del componente en condiciones reales y variadas de funcionamiento. Esta herramienta del diseño brinda una evaluación de forma precisa de la respuesta estructural y dinámica del elemento en estudio, lo que permite identificar posibles deficiencias en diseños originales y áreas que constantemente trabajan para el mejoramiento del elemento de forma continua.

A través del análisis modal, es posible prever y mitigar problemas potenciales, tales como resonancias no deseadas durante su funcionamiento, modos de vibración críticos y puntos de concentración de esfuerzos que podrían en algún momento conducir a fallas prematuras. Además, este enfoque facilita significativamente la optimización del diseño, la selección precisa de materiales y la validación de soluciones de ingeniería alternativas antes de la fabricación y la implementación en el sistema de suspensión del vehículo.

Al invertir recursos de manera significativa en este tipo de análisis modal por medio de herramientas de CAE, los fabricantes en las distintas áreas automotrices pueden ahorrar

costos y tiempo al evitar inversiones económicas en pruebas físicas iterativas y reducir el riesgo de fallos inesperados en el campo. Además, al mejorar de manera significativa la durabilidad y la confiabilidad de la autoparte, mejorando de esta manera la reputación de la marca y se garantiza una experiencia de conducción más segura y satisfactoria para los ocupantes de este tipo de vehículos.

En definitiva, un análisis modal mediante CAE se la debe considerar como una inversión esencial para mejorar continua de la calidad o llamada también innovación y la competitividad comercial de los vehículos Yinxiang YX150KD en el mercado automotriz.

1.5.4. Delimitación Temporal

El presente proyecto investigativo iniciará el 20 de mayo y se extenderá durante 16 semanas, hasta el 8 de septiembre de 2024. La delimitación temporal comprende cuatro etapas principales fundamentales en el desarrollo del proyecto: la preparación inicial, que abarca las primeras dos semanas; seguida por la modelización y análisis, con una duración de seis semanas; luego, la optimización y refinamiento del diseño, ocupando cuatro semanas; y, finalmente, la validación y documentación de resultados durante las últimas cuatro semanas para su presentación final.

1.5.5. Delimitación Geográfica

La delimitación geográfica donde se lleva a cabo el presente proyecto investigativo se realizará en la ciudad de Guayaquil, Ecuador, específicamente en la Escuela de Ingeniería Automotriz de la Universidad Internacional del Ecuador. Este enfoque geográfico permitirá un estudio detallado de los desafíos y oportunidades automotrices en la región costera y de todo el país, contribuyendo al desarrollo local y nacional, así como a la formación técnica de los estudiantes de Ingeniería Automotriz.

1.5.6. Delimitación del Contenido

La delimitación del contenido del presente proyecto investigativo del análisis modal de la horquilla superior en la suspensión del vehículo Yinxiang YX150KD, se enfocará básicamente en la evaluación estructural y dinámica de esta autoparte automotriz. El análisis se centrará en la horquilla superior como un componente crucial en el sistema de suspensión delantera del vehículo, con el fin de identificar sus modos de vibración naturales, frecuencias críticas y formas modales asociadas.

Se tomarán en cuenta las cargas estáticas y dinámicas relevantes para poder de esta manera simular condiciones realistas de operación del vehículo. La delimitación excluye análisis detallados de otros componentes de la suspensión y aspectos más amplios del diseño del vehículo.

El proyecto se realizará utilizando un programa computacional de ingeniería asistida por ordenador para generar un modelo de elementos finitos preciso, aplicar las condiciones de carga y restricciones adecuadas, y ejecutar el análisis modal. La optimización del diseño basada en los resultados del análisis no está dentro del alcance directo de este proyecto, pero se podrán ofrecer recomendaciones preliminares en función de los hallazgos.

1.6. Alcance

El alcance del presente estudio abarca la evaluación exhaustiva del sistema de suspensión delantera del vehículo Yinxiang YX150KD, centrándose en uno de sus componentes importantes como lo es la horquilla superior. Se analizarán los aspectos estructurales y principios dinámicos utilizando un enfoque de análisis modal asistido por computadora. DE la misma manera se examinarán los materiales utilizados, la geometría del diseño y la respuesta del componente a diferentes condiciones de carga y vibración. El presente estudio también incluirá la revisión de literatura pertinente sobre técnicas de análisis modal y diseño de suspensiones automotrices en vehículos de serie y tubulares. Se realizará

un análisis detallado de los modos de vibración naturales, frecuencias resonantes y formas modales para identificar posibles áreas de mejora en el rendimiento y la durabilidad de la horquilla superior. Se explorarán posibles estrategias de optimización del diseño para mitigar los efectos de la fatiga estructural y mejorar la resistencia a la carga. El alcance del estudio también incluirá recomendaciones para el diseño y la ingeniería de horquillas superiores en suspensión de vehículos de estructura tubular, con el objetivo de proporcionar orientación práctica para la mejora continua de los sistemas de suspensión en vehículos similares. Los resultados del estudio se documentarán en un informe técnico detallado, que se utilizará para informar futuras decisiones de diseño y desarrollo en la industria automotriz.

Capítulo II

Marco de Referencia

El marco referencial del presente proyecto investigativo establece el contexto teórico y conceptual para comprender su relevancia y alcance. Explora investigaciones previas, teorías y enfoques metodológicos pertinentes. Esta introducción proporciona una visión general concisa de los fundamentos que guiarán el desarrollo y la implementación del estudio de la mejor manera.

2.1. Introducción al Análisis Modal

Una de las herramientas fundamentales dentro de la ingeniería automotriz, así como de la mecánica es sin duda alguna el análisis modal, por el motivo que permite poder comprender el comportamiento dinámico de la estructura.

Otra de las ventajas que nos brinda es la de identificar los modos de vibración naturales o regulares y de las frecuencias que están asociadas, fundamentales para de esta manera prevenir fallos estructurales y optimización de los diseños. Todo esto se logra a través de la aplicación de métodos computacionales como lo es el método de elementos finitos con sus siglas MEF, con el que se permite realizar simulaciones de cada una de las respuestas de sistemas ante excitaciones, para lograr de esta manera información muy importante sobre la durabilidad, estabilidad y del rendimiento estructural.

En el caso de la industria automotriz, este tipo de análisis modal es primordial para mejorar significativamente la seguridad y eficiencia de los vehículos, así como de cada uno de sus elementos como para este caso la horquilla superior de la suspensión.

2.1.1. Definición de Análisis Modal

Una de las definiciones de análisis modal según (Aranaz, Aibar, Vitaller, & Mira, 2008) dice que es “una herramienta que permite identificar, evaluar y diseñar estrategias de mejora de posibles fallos de un proceso o producto, realizando el análisis de los efectos que

tienen dichos fallos, sus causas, gravedad, frecuencia y la posibilidad de detectarlos a tiempo”.

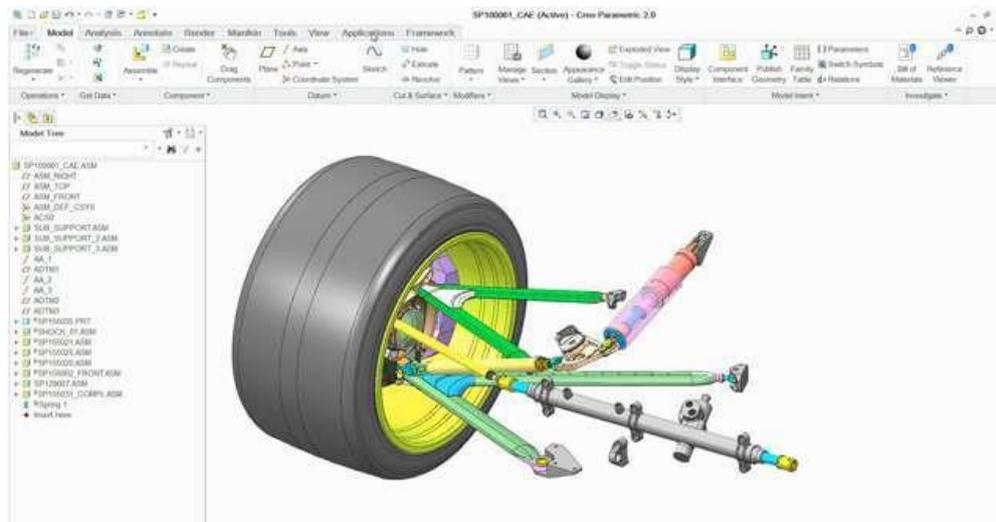
2.1.2. Importancia del Análisis Modal en la Industria de la Ingeniería Automotriz

La importancia del tipo de análisis modal dentro de la industria de la mecánica automotriz es fundamental, para de esta manera poder comprender el comportamiento vibratorio de cada uno de los componentes o de toda la estructura, permitiendo de esta forma identificar cada uno de los puntos donde se generan los modos y formas de vibración naturales, así como frecuencias críticas, permitiendo de esta forma prevenir que los sistemas de los vehículos o mecanismos del mismo lleguen a experimentar una falla catastrófica, mejorar su durabilidad, optimización y la reducción significativa de los costos de mantenimiento.

Además, que al generarse este tipo de análisis de forma estructural teniendo en consideración como responde a cada una de las cargas dinámicas, los ingenieros automotrices o grupo de diseño pueden determinar de forma eficiente la integridad estructural y de la seguridad de los sistemas mecánicos de alta complejidad como lo son los vehículos, estructuras civiles y de maquinaria industrial.

2.1.3. Aplicación en el Diseño de Componentes Automotrices

Existen un sinnúmero de elementos en la industria automotriz en los que sus diseñadores y fabricantes realizan sobre ellos análisis modal y de forma crucial por el motivo que de esta forma o metodología se permite mejorar el rendimiento, durabilidad y la seguridad del vehículo. A través de la detección de modos de vibración naturales y cada una de sus frecuencias asociadas con su funcionamiento en cada uno de los sistemas que conforman un vehículo como lo es motor, suspensión, dirección, carrocería y chasis otros sistemas internos y externos de los vehículos diseñados hasta la actualidad, como se puede observar en la figura 1.

Figura 1*Análisis Modal sobre Mecanismo de Suspensión de un Vehículo*

Fuente: (PTC, 2014)

Teniendo en cuenta que este tipo de metodología brinda grandes ventajas para prevenir fallas prematuras provocadas por fatiga o resonancia, logrando conseguir de esta forma un comportamiento dinámico óptimo bajo condiciones de operación diversas, así mismo con este tipo de análisis al que está enfocado el presente estudio permite en el caso del diseño realizar ajustes antes de la fabricación en serie de un elemento, consiguiendo de esta manera disminución de costos de producción y de reducción significativa de tiempos de las fases de desarrollo.

2.2. Conceptos Fundamentales de la Dinámica Estructural

Básicamente al momento de referirse a la dinámica estructural según (Botero, 2011) indica que “es el resultado de la experiencia que permite una predicción del comportamiento del sistema físico basado en un modelo matemático que representa las propiedades inherentes a dicho sistema”, en definitiva, se puede decir que es el estudio del comportamiento de las estructuras cuando se encuentran en movimiento, la cual se concentra en las vibraciones mecánicas así como de cada una de sus causas.

También lo que se intenta es el comprender la interacción que se genera entre la rigidez y masa que fluye de manera significativamente por este tipo de comportamiento.

Cabe aclarar que cada uno de estos conceptos son fundamentales dentro de lo correspondiente al análisis modal, convirtiéndose en una herramienta fundamental dentro del campo de la ingeniería de la mecánica automotriz para sus distintos tipos de diseños y de la optimización de sus componentes.

2.2.1. Vibración Mecánica y sus Causas

Para poder entender y comprender la definición de vibración mecánica (Arias & Martínez, 2021) establece que “Existen diferentes definiciones de vibración: vibración mecánica, oscilación, movimiento periódico”, bajo este criterio se puede generar que al momento de tratarse de una vibración mecánica no es más que el movimiento oscilatorio de un determinado sistema físico alrededor de su posición de equilibrio, esto se puede apreciar de manera de ejemplo en la figura 2.

Figura 2

Análisis de Vibración Mecánica



Fuente: (Torres, URANY, 2022)

Así mismo al estudiar las vibraciones mecánicas estas se enfocan en la interacción entre la rigidez y la masa de un elemento, generando de esta manera fluctuaciones de energía que se propagan a través del mecanismo o del sistema.

Este tipo de fenómeno físico mecánico es fundamental dentro de la ingeniería automotriz, afectando el rendimiento, la durabilidad y la seguridad de los mecanismos estructurales, así como de las máquinas.

Entre las causas que se pueden generar por las vibraciones mecánicas en los mecanismos o sistemas automotrices incluyen la falta de alineación, el desequilibrio de la masa, resonancia estructural, defectos de fabricación y fuerzas externas, lo que puede desencadenar como resultado en un daño de los sistemas, disminución del rendimiento del vehículo y por ende alto riesgo pasa la seguridad de los ocupantes.

2.2.2. Modos de Vibración y Frecuencias Naturales

Según (Fernández G. , 2023) establece que “Los modos de vibración es el movimiento de átomos o grupo de átomos sincronizados e independientes que pueden ser excitados sin compartir la excitación de cualquier otro modo normal, comportándose como un oscilador armónico”.

Por lo tanto, se puede llegar a determinar una definición en la que los modos de vibración son referidos o interpretados como las formas características en las que una estructura o sistema mecánico automotriz experimenta una vibración en respuesta a una excitación.

Se tiene que tomar en cuenta que cada modo de vibración posee una frecuencia asociada que se la conoce con el término de frecuencia natural, que no es más que la frecuencia a la que la estructura experimenta vibración de manera libre, pero en ausencia de cualquier fuerza externa.

Las frecuencias conocidas como naturales son definidas por las propiedades geométricas y materiales con las que está elaborada la estructura y son fundamentales para poder comprender como es su comportamiento dinámico y de la misma forma cuál es su respuesta a distintas condiciones de cargas.

2.2.3. *Influencia de la Rigidez y la Masa en el Comportamiento Dinámico de una Estructura*

Al momento de abordar un tema significativo dentro de un análisis estructural como lo es el comportamiento dinámico sobre el elemento en estudio como lo es la horquilla de la suspensión delantera superior del vehículo Yinxiang YX150KD, este se encuentra influenciado de manera significativa a dos factores importantes como lo es:

- Influencia de rigidez
 - *Rigidez estructural*, se basa en el análisis de la determinación de la capacidad que posee la estructura para resistir deformaciones bajo cada una de las cargas. En definitiva, con este tipo de análisis modal, cuando una estructura es rígida posee modos de vibración con frecuencia de vibración más elevados, lo que conlleva a una respuesta de forma rápida a excitaciones dinámicas. Teniendo en cuenta que si una estructura presenta una baja rigidez puede llegar a mostrar deformaciones significativas bajo carga, llegando a alterar sus modos de vibración, así como de su respuesta dinámica.
 - *Frecuencias naturales*, teniendo en cuenta que la rigidez puede llegar a afectar directamente a las frecuencias naturales según su complejidad de la estructura, determinando de esta manera su comportamiento de la estructura y que esta experimente como lo es la parte dinámica, siendo en esta parte fundamental para poder entender cómo actúa dinámicamente la estructura en estudio.
 - *Formas modales*, éstas se basa en la rigidez influenciada en las formas modales de vibración de una determinada estructura. Se debe tener en cuenta que mientras más rígida sea la estructura su tendencia es que tendrá formas modales más localizadas y mejor definidas, mientras que si la estructura es menos rígida puede presentar modos de vibración con mayor complejidad y

distribuidos. Estas formas modales lo que representan es el movimiento estructural en respuesta a las excitaciones dinámicas y especialmente son muy importantes para poder comprender su comportamiento dinámico de forma global.

- Influencia de la masa
 - *Masa efectiva*, es cuando se toma en cuenta a la masa de una determinada estructura la cual influye directamente en su comportamiento dinámico al ser determinada su inercia. Su interpretación se da de la siguiente manera: A mayor masa aumenta su inercia, afectando de esta manera a la capacidad de la estructura para poder modificar su estado del movimiento con respecto a las distintas fuerzas a las que actúan sobre la misma. Dentro del análisis modal, la masa se toma en cuenta por medio de las propiedades de masa asociadas a cada nodo o también llamado elemento finito del modelo.
 - *Frecuencias naturales*, tomando en cuenta que la masa afecta las frecuencias naturales de una estructura. Cuando la estructura posee mayor peso tendrá frecuencias naturales más bajas, en cambio que cuando una estructura es más ligera tendrá frecuencias naturales más altas. Por lo tanto, este tipo de frecuencias naturales determinan el comportamiento estructural a las excitaciones dinámicas y también se las considera críticas para comprender su comportamiento vibratorio.
 - *Amortiguamiento*, las características de la masa también puede influir en la capacidad de una estructura para disipar energía al momento de experimentar una vibración. Un mayor amortiguamiento efectivo puede ser el resultado de una mayor masa y puede afectar considerablemente la respuesta dinámica de la estructura al amortiguar las oscilaciones no deseadas.

En definitiva, tanto la masa como la rigidez son factores principales que influyen en el comportamiento dinámico de una estructura.

La rigidez es la que determina la capacidad de la estructura para poder resistir deformaciones y frecuencias naturales de vibración, mientras que la masa influye en la inercia y las características de amortiguamiento de la estructura, la cuales se consideran en el análisis del presente estudio investigativo.

2.3. Métodos de Análisis Modal

Existen algunos tipos de métodos de análisis modal por el motivo que estas son técnicas que se aplican dentro del campo de la ingeniería estructural, mecánica y automotriz, con el fin de poder determinar cada una de las características de vibración de un determinado sistema, como lo son las frecuencias naturales y de los modos de vibración. Entre los tipos de modos con mayor importancia se consideran los siguientes:

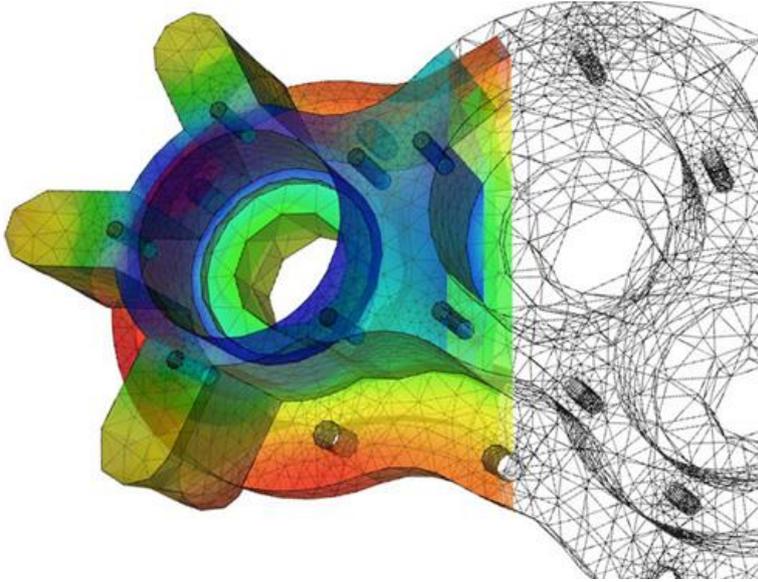
- Método de elementos finitos (MEF)
- Método de Rayleigh-Ritz
- Método de la matriz de flexibilidad
- Método de la matriz de rigidez
- Método de la superposición modal
- Método de los elementos espectrales

2.3.1. Método de Elementos Finitos (MEF)

Para poder definir que es el método de elementos finitos con sus siglas MEF, se toma en consideración a (Linero, Garzón, & Ramírez, 2013) el cual dice que “El método de elementos finitos es un procedimiento numérico que permite resolver problemas de la mecánica del continuo, entre otros, con una aproximación aceptable para ingeniería”, como se puede observar en la figura 3.

Figura 3

Método de Elementos Finitos MEF – Computacional y Gráfico



Fuente: (Amuchastegui, 2016)

Por lo tanto, se considera al método de elementos finitos computacional, como una de las técnicas numéricas que se utilizan para aproximar y resolver ecuaciones diferenciales parciales que modelan el comportamiento de sistemas físicos y sobre todos de estructuras.

Este método es ampliamente utilizado en ingeniería mecánica, ingeniería automotriz y ciencias aplicadas para de esta manera poder analizar el comportamiento de estructuras y sistemas en condiciones variadas, como carga mecánica, térmica, eléctrica, entre otras.

La consideración que se debe tener en cuenta cuando se aplica el método de elementos finitos en cuanto a principios básicos son los siguientes:

- Discretización del dominio
- Formulación de las ecuaciones de equilibrio
- Aproximación de soluciones
- Formulación del sistema de ecuaciones algebraicas
- Aplicación de condiciones de contorno
- Resolución numérica

- Post-procesamiento de resultados

Así mismo entre las ventajas que brinda el trabajar o aplicar el método de elementos finitos se determinan las siguientes:

- Versatilidad al modelar una amplia gama de problemas estructurales o físicos.
- Precisión en las soluciones aproximadas con una precisión arbitraria según la densidad de la malla y la complejidad del modelo.
- Eficiencia computacional al resolver problemas grandes y complejos como casos de estudio.
- Flexibilidad al permitir incorporar distintos tipos de condiciones de contorno y del comportamiento del material o materiales aplicados al momento de realizar el análisis.

2.3.2. *Enfoque Modal Directo*

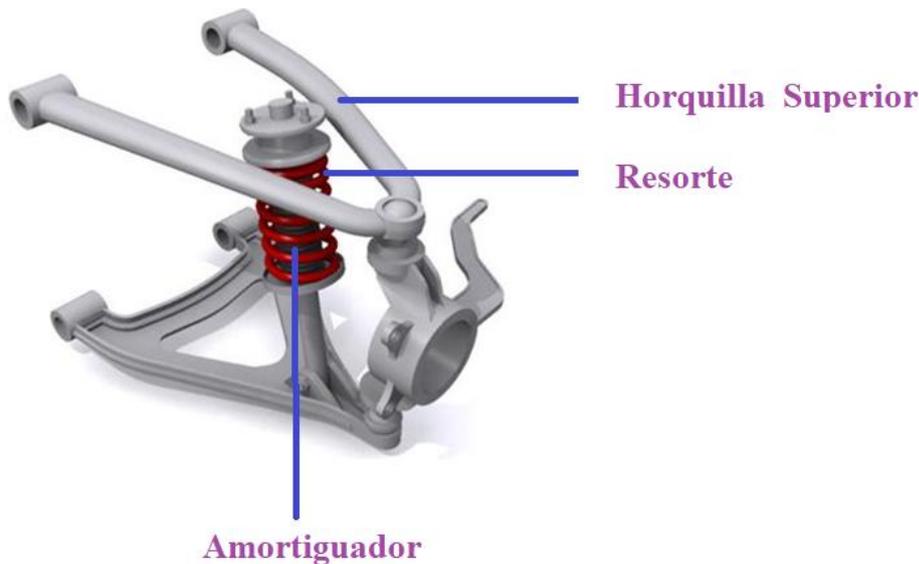
En lo referente al enfoque modal directo dentro del análisis de una horquilla que trabaja sobre la suspensión de un vehículo, implica la determinación de los modos de vibración naturales y las frecuencias asociadas directamente a partir de las ecuaciones de movimiento del sistema al que se encuentra asociada directamente. Este al ser un método de suma importancia se basa en la formulación de las ecuaciones de equilibrio y dinámica del sistema con la utilización de principios físicos y matemáticos fundamentales, como las leyes de Newton y las ecuaciones de equilibrio estático y dinámico.

En el contexto de una horquilla de suspensión, el enfoque modal directo se fundamenta en la modelización matemática de la horquilla como un sistema de masa-resorte-amortiguador, el cual trabaja en conjunto y por lo tanto las masas representan las partes móviles de la horquilla, los resortes simbolizan la rigidez estructural del sistema y los amortiguadores capturan la disipación de energía debido a la resistencia interna del sistema de suspensión.

La ubicación de los elementos que se involucran se puede ver de manera clara en la figura 4.

Figura 4

Conjunto Horquilla, Resorte y Amortiguador



Fuente: (Blancarte, 2013)

Para este tipo de estudios las ecuaciones de movimiento resultantes se resuelven con el fin de obtener las frecuencias naturales de la parte estructural y los modos de vibración del sistema de suspensión del vehículo, lo que proporciona información sobre cómo responde la horquilla a las diferentes condiciones de carga y vibración al momento de permanecer en una condición estática como dinámica.

Estos modos de vibración pueden incluir modos de flexión, torsión y vibración axial, entre otros, cada uno se encuentra asociado con una frecuencia natural específica que determina la rapidez con la que la horquilla vibrará en respuesta a una excitación externa de desempeño. Este enfoque proporciona una comprensión detallada del comportamiento dinámico de la horquilla y es fundamental para su diseño, optimización y análisis de rendimiento de este elemento en conjunto con todo el sistema.

2.3.3. Enfoque Modal Indirecto

Una vez conocido lo que represente el enfoque modal directo ahora se procede a establecer en que consiste el enfoque modal indirecto dentro del análisis de una horquilla superior en el que implica la determinación de las frecuencias naturales y las formas modales del componente por medio de un modelo matemático del método de elementos finitos. En este método, primero se procede a la generación de un modelo de elementos finitos de la horquilla, discretizando su geometría en una serie de elementos más pequeños dentro de toda su estructura. Luego, se procede a dar solución a las ecuaciones de movimiento del sistema utilizando técnicas numéricas para obtener los modos de vibración y las frecuencias naturales correspondientes, que para el presente estudio de lo lleva a cabo con la ayuda de programas computacionales de ingeniería asistida por ordenador, con lo que se logran óptimos resultados y con bajo consumo de recursos en su desarrollo.

Este enfoque requiere calcular las matrices de masa y rigidez del sistema, que describen cómo responden las fuerzas aplicadas a las aceleraciones y desplazamientos respectivamente dentro de su desempeño al momento que el vehículo se encuentre en desplazamiento. Posteriormente, se resuelven las ecuaciones características del sistema, que son una generalización de las ecuaciones de vibración de este, para encontrar las frecuencias y modos de vibración naturales.

Una vez obtenidos los modos de vibración, se interpretan las formas modales para comprender cómo la horquilla se mueve en respuesta a diferentes excitaciones, para lo cual una de las ventajas al realizar este proceso es que con la ayuda de los programas computacionales nos permiten observar hasta su comportamiento dinámico de desplazamientos. Esto proporciona información valiosa sobre las características dinámicas y la respuesta estructural del componente, lo que permite optimizar su diseño y mejorar su rendimiento en condiciones de uso reales.

2.3.4. Procedimientos de Solución Numérica para el Cálculo de Modos y Frecuencias por Medio de Software CAE

Para proceder con el cálculo de los modos y frecuencias de una horquilla superior en el sistema de suspensión delantera de un vehículo con la aplicación de un software de método CAE (ingeniería asistida por computadora), se emplean un conjunto de procedimientos de solución numérica preestablecida, de la siguiente manera:

Primero, se procede al diseño y modelado del elemento a realizar el estudio que en este caso es una horquilla superior del sistema de suspensión para luego generar una importación del modelo del elemento en el software CAE y se aplica un proceso de mallado del elemento, al crea esta malla de elementos finitos que discretiza el dominio de la horquilla en elementos pequeños, así como de su forma. Luego, se procede a definir las propiedades del material con que está elaborado el elemento y se procede a determinar las condiciones de contorno, como restricciones y cargas aplicadas sobre el elemento en estudio como en este caso la horquilla superior.

El análisis modal se realiza aplicando métodos numéricos como el Método de los Elementos Finitos (MEF). Este método resuelve un conjunto de sistema de ecuaciones matriciales para así determinar los modos de vibración naturales y sus correspondientes frecuencias. El software CAE utiliza algoritmos de solución numérica iterativos los mismos que permiten calcular estos modos y frecuencias.

Durante la ejecución del análisis, el software CAE calcula y muestra cada uno de los modos de vibración, que representan las formas de vibración característica de la horquilla en respuesta a diferentes excitaciones. También permite obtener información sobre las frecuencias naturales asociadas a cada modo de vibración.

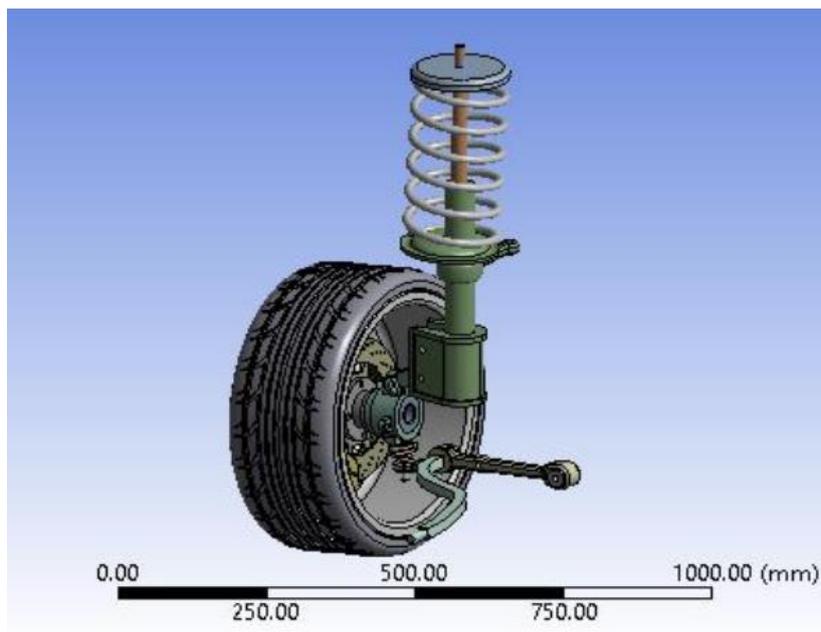
Finalmente, se analizan y se interpretan los resultados obtenidos o también llamadas soluciones del problema, identificando los modos críticos y evaluando su influencia en el

rendimiento estructural y dinámico de la horquilla superior. Estos resultados pueden utilizarse para optimizar el diseño de la horquilla, mejorar su comportamiento vibratorio y garantizar su adecuado desempeño en aplicaciones reales.

Un ejemplo de aplicación de este método se puede apreciar en la figura 5, en la que se observa una simulación de un sistema de suspensión de un vehículo.

Figura 5

Procedimiento de Solución Numérica con CAE



Fuente: (Gómez & Guadarrama, 2017)

2.4. Horquilla de Suspensión

Básicamente para poder entender que es una horquilla de suspensión este no es más que un componente fundamental en muchos vehículos, motocicletas y bicicletas, que cumple un papel crucial en absorber impactos y vibraciones de la superficie por donde se desplaza, proporcionando una conducción más suave y controlada. Aquí hay una descripción general de la horquilla de suspensión:

2.4.1. Definición y Función de una Horquilla

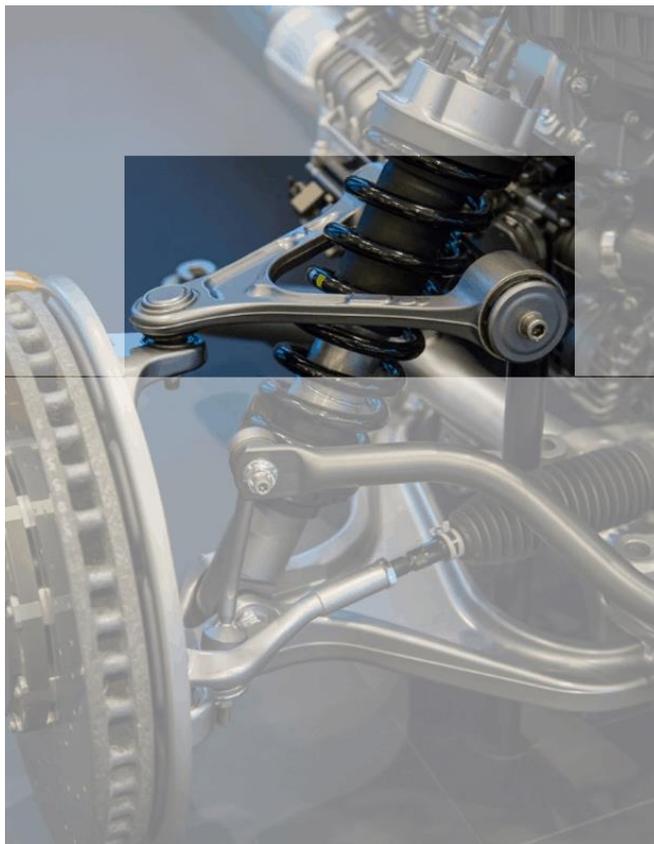
Dentro de la definición de lo que es una horquilla de suspensión este es un conjunto de componentes mecánicos que conectan la rueda delantera de un vehículo al chasis o al cuadro.

Consiste típicamente en dos tubos telescópicos que contienen resortes y amortiguadores, como se puede apreciar claramente en la figura 6.

Su función principal es la de absorber las irregularidades del terreno, como baches y vibraciones, para proporcionar una conducción más suave y estable. Así mismo contribuye a mantener el contacto de la rueda con la superficie del camino para mejorar la tracción y el control del vehículo.

Figura 6

Horquilla Superior



Fuente: (Moreno S. , 2019)

2.4.2. Componentes Principales

Al tratarse de un elemento que trabaja en conjunto con otros componentes en el sistema de suspensión del vehículo se procede a tomar en cuenta cada uno de ellos con su descripción y función y entre estos se tiene los siguientes:

Amortiguadores, también conocidos en su nomenclatura en inglés como shocks, los cuales son dispositivos normalmente hidráulicos diseñados para controlar el movimiento del sistema de suspensión y mantener la estabilidad del vehículo al momento de absorber los impactos y vibraciones. Así mismo (Báez, 2011) establece que “su misión es la de convertir la energía mecánica de los sistemas elásticos de la suspensión en calor”, y esto se puede ver en la figura 7.

Figura 7

Amortiguador



Fuente: (Plaza, 2019)

Muelles, también conocidos normalmente como resortes de suspensión estos se utilizan para soportar el peso del vehículo y proporcionar resistencia a la compresión. Normalmente estos pueden ser de tipo helicoidal, espiral o de otro diseño dependiendo de la aplicación y el diseño del vehículo, como se puede apreciar en la figura 8, para motivos de cálculos y análisis de este elemento del sistema de suspensión se debe tener en cuenta que posee un coeficiente el cual dependerá del tipo de muelle sobre el que se realiza el estudio y dentro de la definición de este coeficiente (Lleó & Lleó, 2011) establece que “depende de la

longitud del muelle si este coeficiente es dependiente y si es independiente de igual manera y esta es de la misma forma y con la misma clase de material”.

Figura 8

Muelle o Resorte



Fuente: (SKF, 2020)

Bujes y rodamientos, estos elementos permiten que los tubos telescópicos se puedan desplazar de forma suave y con disminución en la fricción generada, facilitando de esta manera el movimiento de compresión y extensión de la horquilla ya sea de la parte superior como inferior.

Para tener claro la diferencia entre buje y rodamiento esto dependerá según el movimiento que se realiza al momento de entrar en funcionamiento y de la forma en que se encuentra constituido por lo que los cojinetes pueden ser de dos tipos:

- Buje, en el caso de que se genere un deslizamiento o fricción
- Rodamiento cuando sea de rodadura

Según (Torres, Urany, 2023) dice que “son componentes mecánicos cuya función es apoyar o servir de guía para piezas que giran, oscilan o se deslizan. Con base en su diseño, dichos componentes mecánicos pueden resistir cargas axiales, cargas radiales o una combinación de ambas”.

Este tipo de elementos se puede observar de manera clara su diferencia en la figura 9.

Figura 9

Buje y Rodamiento



Fuente: (Torres, URANY, 2022)

Abrazaderas y soportes, estos componentes se utilizan dentro del mecanismo para fijar la horquilla al chasis o al cuadro del vehículo de manera segura y estable.

En lo correspondiente al proceso de mantenimiento que debe aplicarse a la horquilla del sistema de suspensión es que este elemento requiere un mantenimiento periódico, que puede incluir la lubricación de los rodamientos, la inspección de los sellos que contiene y retenes de aceite, y también de la verificación de la presión y el ajuste de los amortiguadores y muelles según las preferencias del conductor y de cada una de las condiciones de conducción que se aplique.

En definitiva, si se puede generar un resumen, la horquilla del sistema de suspensión es un componente esencial en muchos vehículos, que contribuye significativamente al confort, la estabilidad y el rendimiento general del vehículo en el momento de la conducción o desplazamiento.

Su diseño y mantenimiento adecuados son fundamentales para garantizar una conducción segura y cómoda a través de sus funciones principales al trabajar con todo el sistema de suspensión como son los siguientes:

- Absorber impactos
- Mantener el contacto con la superficie de la carretera
- Minimizar el balanceo y la inclinación
- Proporcionar confort de conducción

2.5. Aplicación de Modelo CAD y CAE

En el presente estudio en lo concerniente a la aplicación del modelo CAD (diseño asistido por computadora) y CAE (ingeniería asistida por computadora) en su desarrollo mediante el programa Inventor Nastran de Autodesk es primordial para el diseño y análisis avanzado de componentes y sistemas mecánicos.

En primer lugar, el modelo CAD permite crear representaciones digitales tridimensionales del elemento que para este caso es la horquilla superior o del sistema que se va a analizar. Con el programa computacional Inventor Pro, los departamentos de diseño de las empresas pueden diseñar la horquilla de suspensión del vehículo Yinxiang YX150KD de manera precisa, definiendo su geometría, materiales y características estructurales con las que se desempeñará dentro del sistema.

Una vez completado el modelo CAD en 3D, se utiliza el programa Inventor Nastran el cual brinda las ventajas de realizar el análisis de elementos finitos (FEA). Esta herramienta permite simular de forma eficiente el comportamiento estructural y dinámico del elemento bajo diversas condiciones de carga, vibración y temperatura. Utilizando Nastran, se procede aplicar cada una de las restricciones de contorno y cargas, y se genera una malla de elementos finitos sobre el modelo CAD para discretizar el dominio y resolver las ecuaciones de equilibrio por parte de su potente sistema de resolución.

El análisis estructural que se genera con Nastran proporciona información detallada sobre el rendimiento del componente, incluyendo deformaciones, los esfuerzos generados, frecuencias naturales y modos de vibración. Esto permite observar e identificar cada una de

las áreas críticas de tensión, evaluar la durabilidad y la seguridad del diseño, y optimizar la geometría y los materiales para mejorar el rendimiento estructural del componente en estudio como lo es la horquilla superior.

Además, Inventor Nastran ofrece de forma eficiente herramientas de post-procesamiento avanzadas para visualizar y analizar los resultados del análisis de manera efectiva.

Esto incluye gráficos de contorno, animaciones de deformación y tablas de resultados que ayudan a comprender mejor el comportamiento del componente y tomar decisiones informadas de diseño.

En definitiva, la combinación de modelado CAD con Inventor y análisis CAE con el programa computacional Nastran permite un enfoque integrado y eficiente para el desarrollo de proyectos de ingeniería mecánica. Esto ayuda a reducir costos y tiempos de desarrollo, garantizar la calidad del diseño y mejorar el rendimiento y la fiabilidad de los productos finales dentro de la industria del diseño automotriz.

Capítulo III

Metodología de Análisis Modal de Horquilla Superior

3.1. Selección del Modelo para Análisis Modal

Para la presente sección de estudio se plantea la selección del modelo del elemento para el análisis modal de la horquilla superior en la suspensión del vehículo Yinxiang YX150KD como se puede apreciar en la figura 10, la cual es un paso crucial para garantizar la precisión y relevancia de los resultados que se generarán.

Figura 10

Vehículo Yinxiang YX150KD



Como primer paso, se debe obtener el componente a ser estudiado que en este caso en la horquilla superior de la suspensión del vehículo seleccionado como se puede observar en la figura 11 para luego proceder a crear un modelo CAD detallado de la horquilla, tanto en 2D como en 3D, que incluya todas las características geométricas y detalles estructurales del

elemento dentro del software AutoDesk Inventor. Este modelo se importará a un software de análisis por elementos finitos (FEA), como lo es Nastran igualmente de AutoDesk.

Figura 11

Horquilla Superior de Vehículo Yinxiang YX150KD



El siguiente paso de forma general dentro de la metodología es definir los materiales con cada una de sus propiedades mecánicas específicas, como módulo de elasticidad, densidad y coeficiente de Poisson. Luego, se procede a generar una malla adecuada, asegurando un refinamiento suficiente en áreas críticas para captar los modos de vibración con precisión.

Cada una de las condiciones de contorno y las restricciones deben reflejar las condiciones reales del armado y operación, incluyendo puntos de fijación y cargas aplicadas. Por lo que se procede a aplicar las excitaciones dinámicas pertinentes para simular las condiciones de uso. Finalmente, se configurará y ejecutará el análisis modal para de esta manera proceder a identificar las frecuencias naturales y las formas modales de la horquilla superior, proporcionando información esencial para el diseño y optimización del elemento es estudio.

3.2. Preparación del Modelo para Análisis Modal

La preparación y extracción de medidas del modelo para el análisis modal de la horquilla superior del sistema de suspensión consta de los siguientes pasos: Extraer del

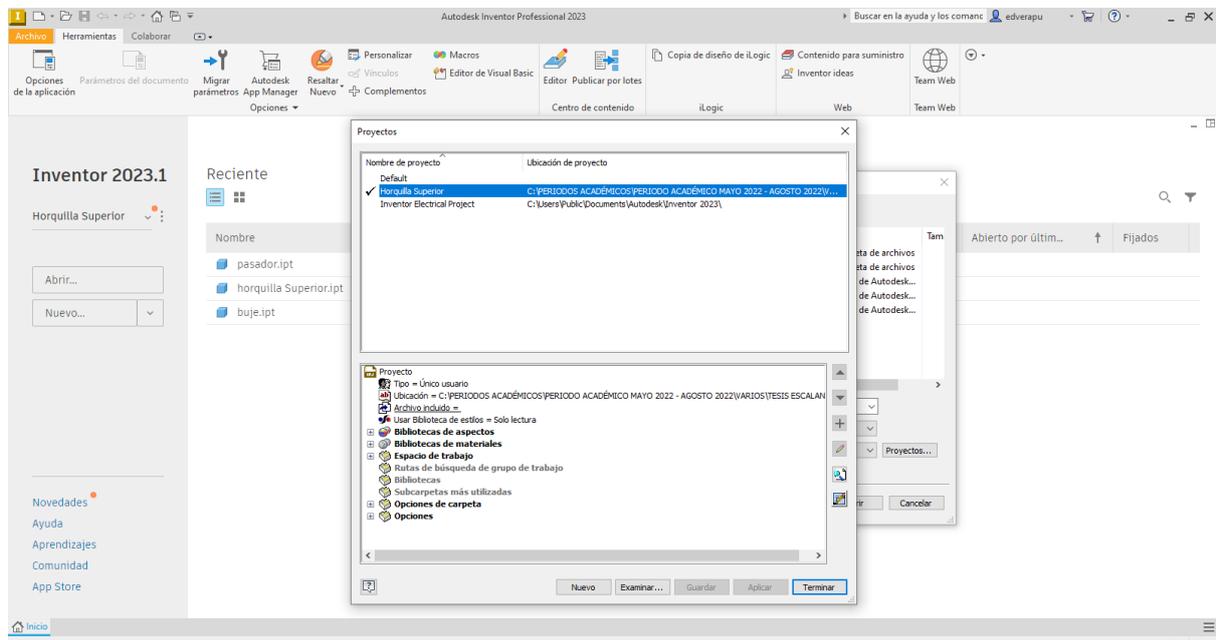
elemento original cada una de las medidas con la ayuda de instrumentación adecuada para posteriormente obtener un modelo CAD preciso de la horquilla, importar el modelo a un software de CAE, y generar una malla de elementos finitos adecuada, para luego continuar con las siguientes fases:

3.2.1. Adquisición y Preparación del Modelo CAD

Para la fase de creación del modelo del elemento en la parte del dibujo asistido por el computador, se debe tener en cuenta cada una de las medidas que conforman el elemento a ser modelado en este caso la horquilla superior y poder arrancar con el programa de AutoDesk Inventor, como se puede observar en la figura 12, para cabe aclarar que este programa cuenta con sus respectivas licencias para su desempeño en este estudio.

Figura 12

Inicio de Modelado con AutoDesk Inventor



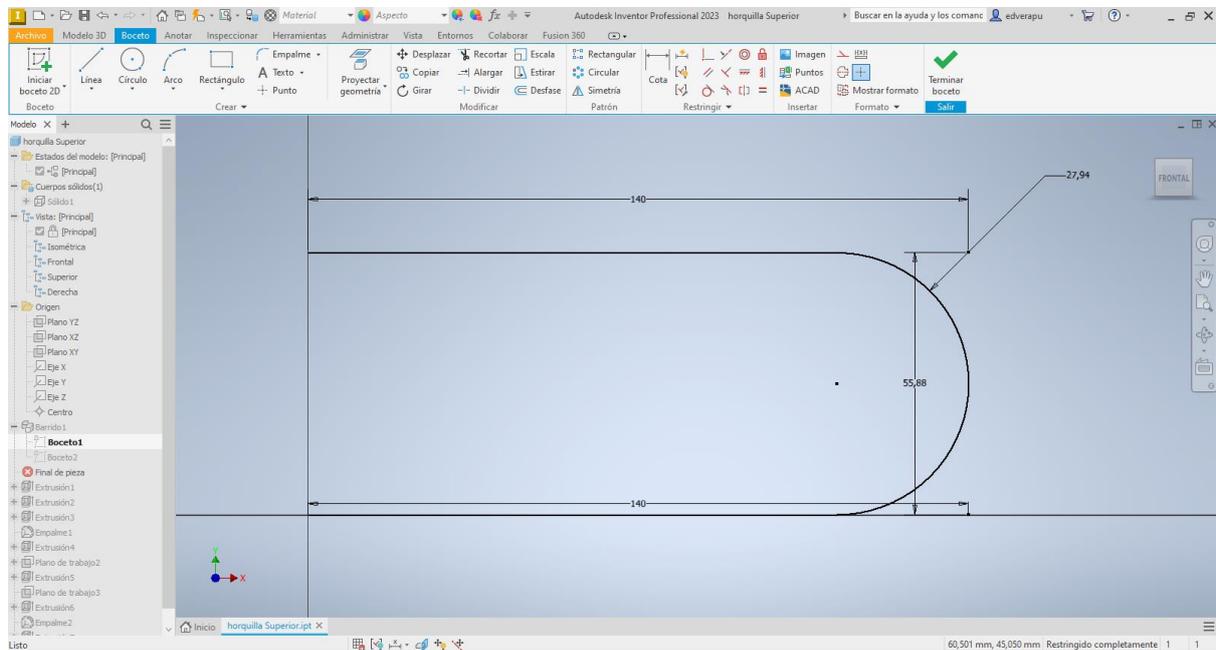
Lo que se debe tener muy en cuenta es que en esta fase inicial del modelado es de suma importancia el crear un proyecto nuevo con el fin de que sobre el mismo se guarden cada uno de los elementos creados para el estudio y evitar que se generen otros destinos de los elementos comprometidos, sobre todo al crear un nuevo proyecto se establece el nombre

de este y de la dirección de ubicación de la carpeta dentro del sistema operativo del computador.

Una vez generado el proyecto se empieza con la fase de dibujo de asistido por computadora, al crear un nuevo boceto y con la selección del modelado en 2D en al cual se aplica cada una de las medidas del componente tanto de longitud como de ángulos de inclinación como se puede apreciar en la figura 13, teniendo en cuenta que el programa Inventor exige que cada una de sus líneas deben estar restringidas por medio de las formas de acotación de forma correcta.

Figura 13

Inicio de Modelado con AutoDesk Inventor en 2D



Una de las ventajas que brinda este tipo de programas es que permite trabajar en distintos planos para continuar con el modelado de la figura.

Para el caso de la generación del diseño en cuanto al perfil de la sección tubular interna y externa se toma en cuenta las características de tuberías comerciales en el mercado local las mismas que se puede observar en la figura 14, pero la selección que se tiene para el presente estudio es la de un tubo de 15.88 mm o también conocido con la medida de 5/8 in y un espesor de 1.20 mm.

Figura 14

Selección de las Dimensiones del Tubo

Tipos de Material								
Lamina Fría								
Fabricada bajo norma: JIS G3141 SPCC SD								
Dimensiones, Espesores y Pesos								
Dimensiones Externas (D)		Espesor (t)		Peso			Piezas por Paquete	Kgs por Paquete
mm ⁽¹⁾	plg ⁽²⁾	mm	Kg/m	Lb/pie	Kg/Pieza	Lb/Pieza		
15,88	5/8	0,70	0,27	0,18	1,65	3,64	217	358,00
15,88	5/8	0,80	0,31	0,21	1,89	4,16	217	409,14
15,88	5/8	0,90	0,35	0,24	2,12	4,68	217	460,28
15,88	5/8	1,20	0,47	0,32	2,83	6,23	217	613,71
19,05	3/4	0,70	0,33	0,22	1,98	4,36	169	334,00
19,05	3/4	0,80	0,38	0,25	2,26	4,98	169	381,72
19,05	3/4	0,90	0,42	0,28	2,54	5,60	169	429,43
19,05	3/4	1,20	0,56	0,38	3,39	7,47	169	572,58
22,23	7/8	0,70	0,38	0,26	2,29	5,06	169	387,78
22,23	7/8	0,80	0,44	0,29	2,62	5,78	169	443,18
22,23	7/8	0,90	0,49	0,33	2,95	6,50	169	498,58
22,23	7/8	1,20	0,66	0,44	3,93	8,67	169	664,77
25,40	1	0,70	0,44	0,30	2,64	5,82	127	335,02
25,40	1	0,80	0,50	0,34	3,01	6,65	127	382,88
25,40	1	0,90	0,57	0,38	3,39	7,48	127	430,74
25,40	1	1,20	0,75	0,51	4,52	9,97	127	574,31

Fuente: (Indenicsa, 2014)

El tubo seleccionado cumple las siguientes descripciones y características:

Es utilizado normalmente dentro de la industria metalmecánica como:

- Automotriz, en lo concerniente a fabricación de autopartes de carrocerías y rodados
- Agroganadera, en maquinaria e implementos ganaderos, avícolas y agrícolas
- Artículos de hogar, como lo es fabricación de muebles, juegos infantiles, iluminación
- Señalización vial, para elaboración de alumbrado y soportes
- Equipo hospitalario
- Equipos de gimnasia
- Construcción, columnas, portones, rejas, etc

- Muebles, reposeras, mesas, rejas, etc

Para lo concerniente a las especificaciones del tubo a trabajar se encuentra en la tabla

1 siguiente:

Tabla 1

Especificaciones del Tubo

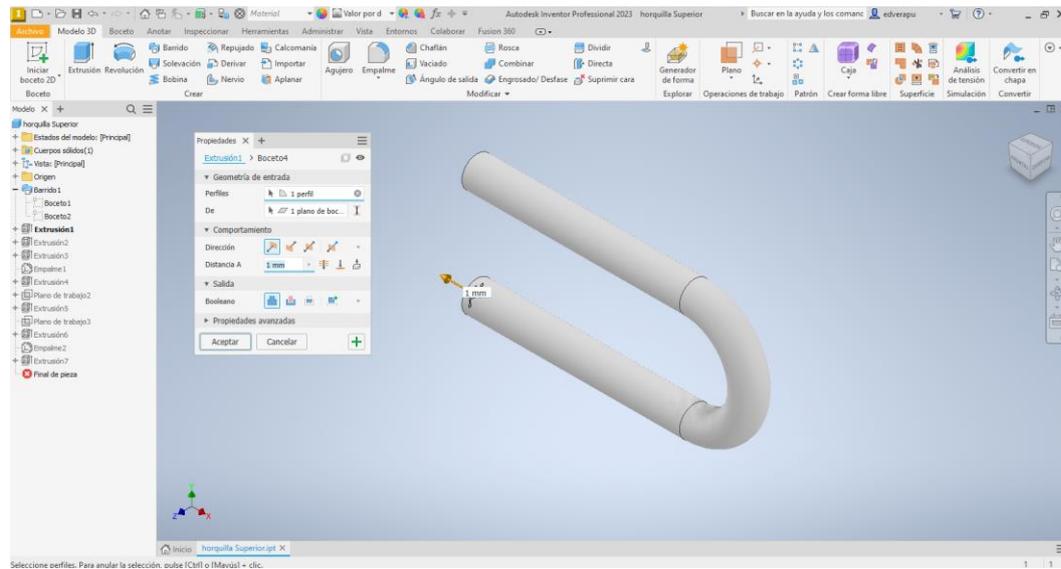
Especificaciones Técnicas	
Norma de Fabricación	ASTM A500 Gr B
Propiedades Químicas	Carbono 0.26 % max Silicio 0.35 % max Manganeso 1.35 % max Fósforo 0.035 % max Azufre 0.035 % max
Propiedades Mecánicas	Resistencia a la tracción 400 Mpa Límite de fluencia 317 Mpa
Tolerancias	± 0.5 % del diámetro nominal como dimensión externa Espesor de la pared ± 10 % del espesor nominal
Longitud	Tubos ≤ 6.7 m (+ 12.7/-6.4 mm)

Fuente: (Indenicsa, 2014)

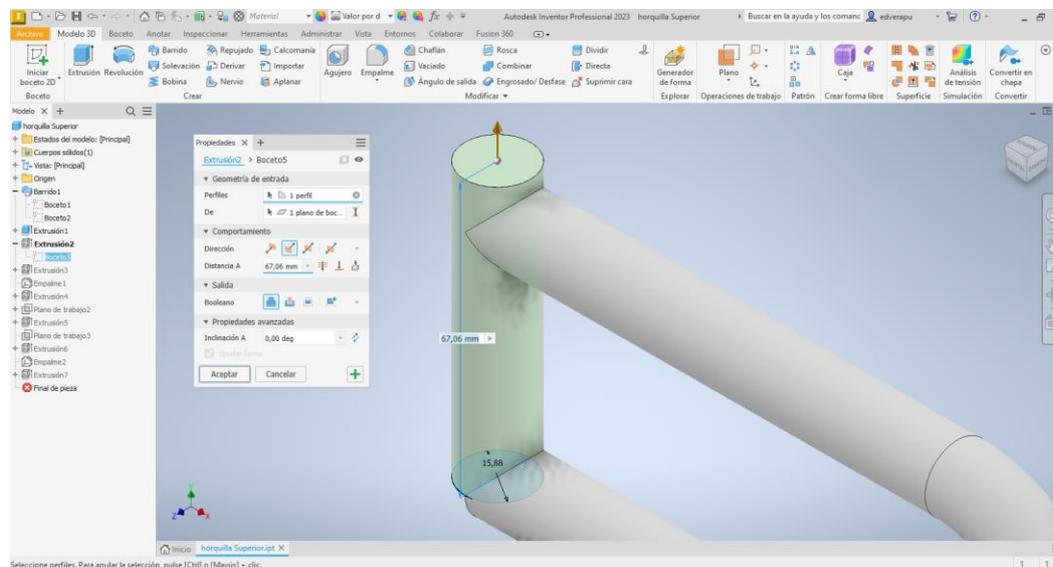
Una vez conocida las dimensiones del tubo y los elementos con que cuenta la horquilla a realizar el modelado se procede a crear la fase del 2D en condiciones de base para el desarrollo del modelado de la horquilla para después llegar a la fase del 3D con la ayuda de la herramienta de extrusión, revolución, barrido, entre otras como se puede apreciar en la figura 15.

Aquí se puede apreciar claramente como se empieza a crear la parte tubular de la horquilla por medio de un barrido de la sección tubular a través de la trayectoria generada sobre el plano transversal.

Así mismo se tiene en cuenta la geometría de entrada que contempla solo la sección del espesor de la tubería para que la salida sea a través de diferencia de perfiles.

Figura 15*Extrusión de Secciones del Tubo*

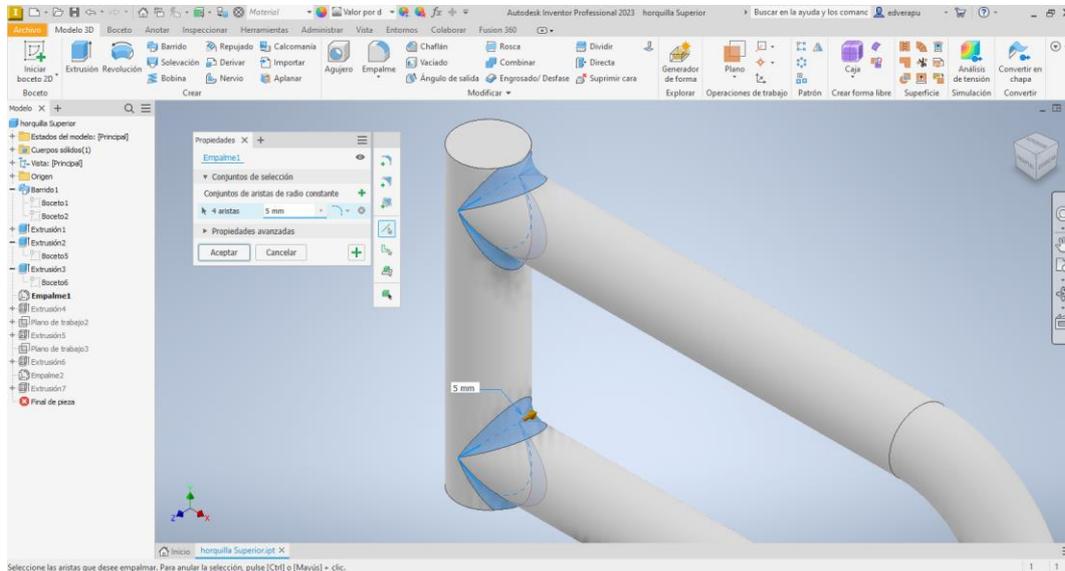
Para continuar con el modelado se procede a la realización de la sección transversal del tubo que tiene la finalidad de sujetarse la al parte superior de la carrocería y por donde para el eje que cumple la función de pivote de la horquilla en funcionamiento el cual posee un diámetro de 15.88 mm y una longitud de 67.06 mm como se puede apreciar claramente en la figura 16.

Figura 16*Pasador Tipo Pivote de Horquilla*

Luego de esta fase se procede a generar los empalmes de contorno los cuales se generan por el tipo de soldadura y se considera que su radio es de 5 mm en sus aristas como se puede apreciar en la figura 17.

Figura 17

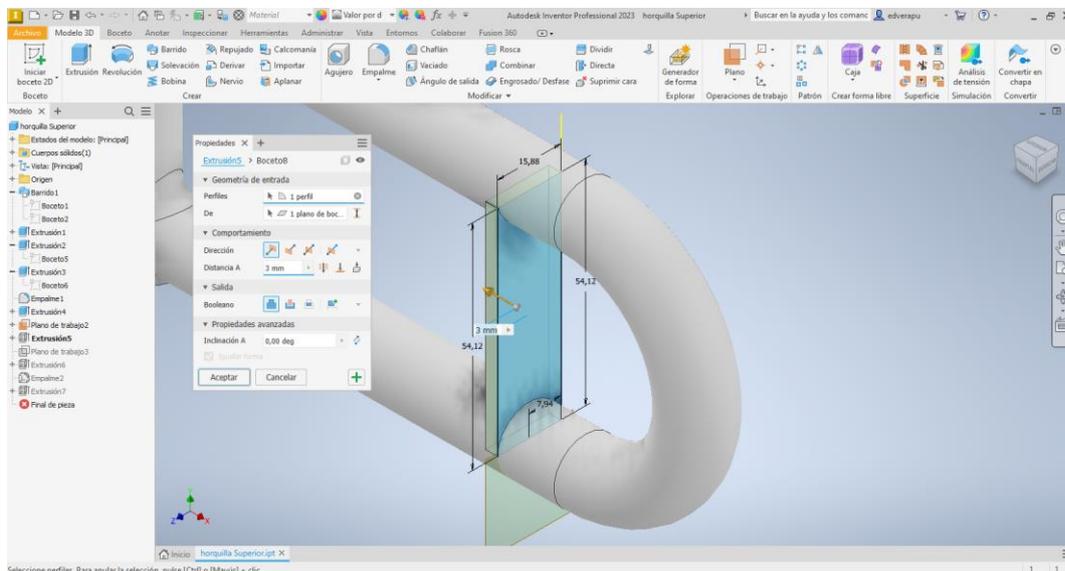
Empalme en Aristas



Luego se procede a la creación de un nuevo boceto con el que se generará el inicio para la base o soporte en donde se sujetará el extremo del amortiguador el mismo que tiene un espesor de platina de 3 mm, como se puede apreciar en la figura 18.

Figura 18

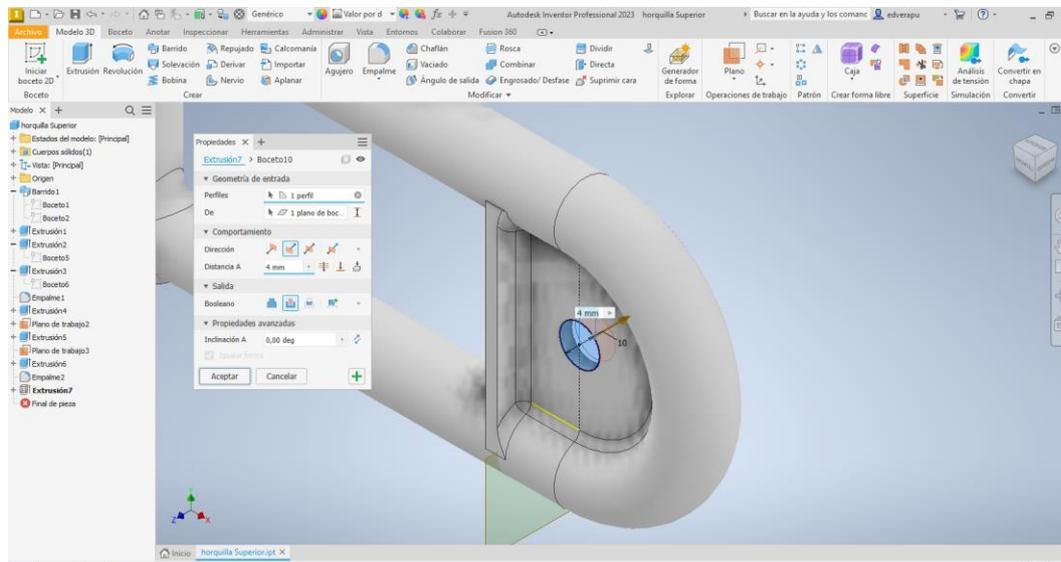
Base Plana para Sujeción



Para finalizar con la fase del modelado se concluye con la base de 4 mm de espesor en la que se procede a la generación de un orificio de 10 mm de diámetro, como se puede apreciar de forma clara en la figura 19.

Figura 19

Base para Sujeción de Amortiguador



3.2.2. Definición de Materiales, Propiedades y Condiciones de Contorno

Con el modelado de la horquilla de la suspensión superior en el programa Inventor de Autodesk, se procede a realizar el enlace con el programa de Autodesk denominado Nastran, el mismo que cuenta con las herramientas adecuadas para la realización del análisis modal del elemento en estudio ya que Inventor no cuenta con este tipo de simulaciones de análisis modal.

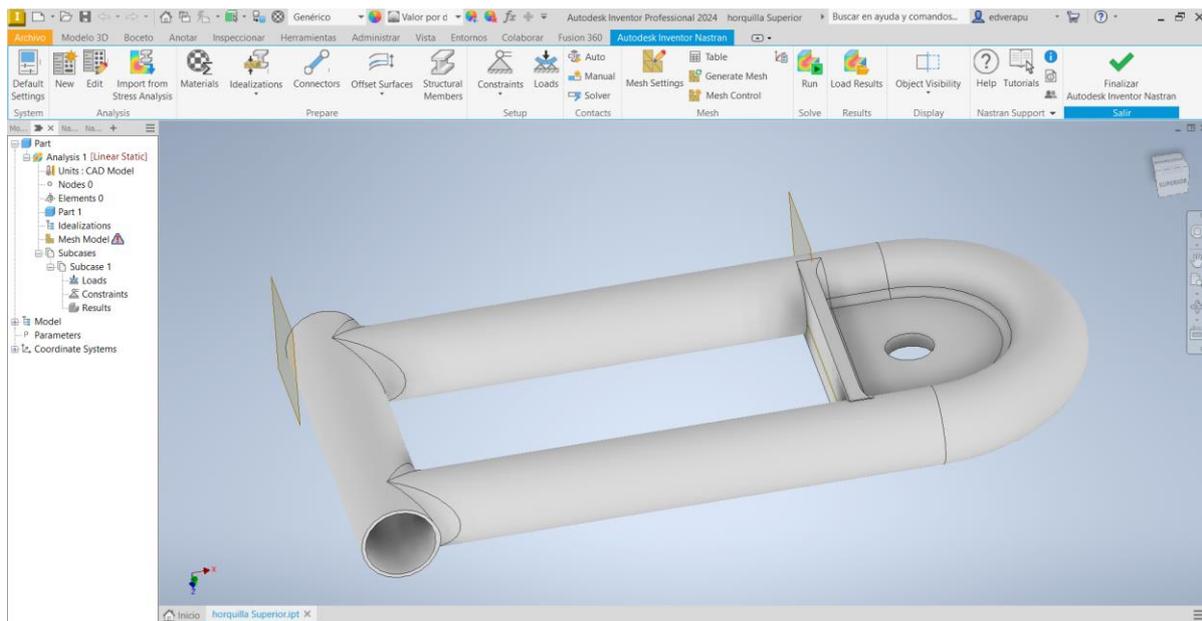
Dentro del mismo programa Inventor se presenta un hipervínculo denominado entornos el cual es el medio por el cual se enlazan los otros programas de Autodesk como lo es el caso de Autodesk Nastran.

Con el uso de Autodesk Nastran para el análisis modal de la horquilla proporciona una plataforma avanzada para poder de esta forma determinar las frecuencias naturales y las formas modales sobre el elemento. Sobre todo, como se puede apreciar en la figura 20, este software ofrece precisión y eficiencia en el procesamiento de elementos finitos, permitiendo

evaluar cómo la horquilla responde a diferentes modos de vibración en la simulación de su normal funcionamiento. Además, facilita la identificación de puntos críticos por medio de un mapa colorimétrico o de forma cuantitativa y de la misma manera permite la optimización del diseño para mejorar de esta manera la durabilidad y el rendimiento estructural de la horquilla del sistema de suspensión superior.

Figura 20

Entorno Nastran de Autodesk



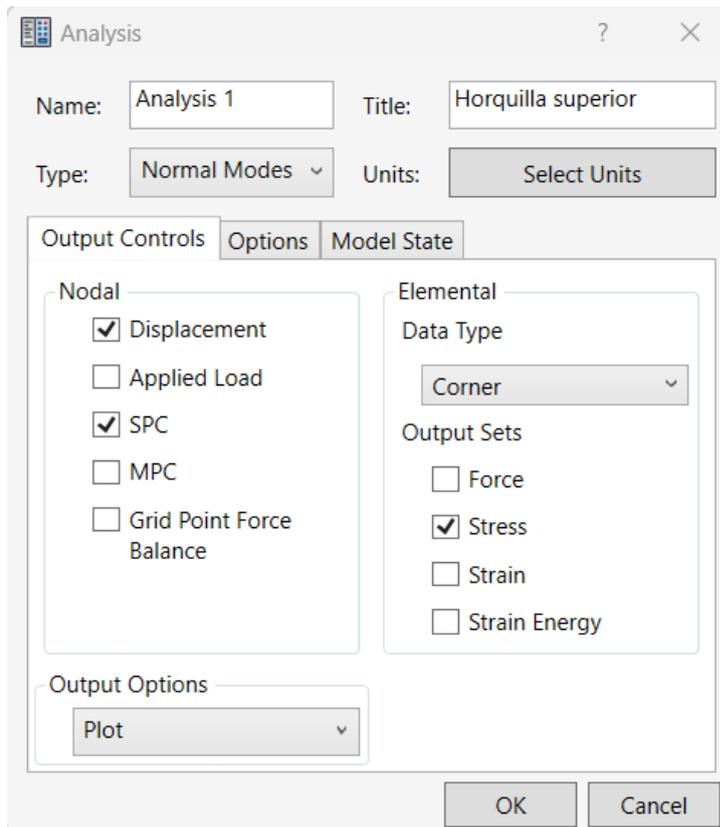
Una vez que se activa Nastran se procede de forma secuencial a preparar las condiciones iniciales para la simulación entre las cuales está la de edición en la que se establecen los siguientes parámetros:

- Nombre del análisis
- Tipo de análisis en el que par este proyecto se establece como Modos Normales
- Unidades con las que se trabajan
- Controles de salida

Esta interfaz se puede observar en la figura 21, teniendo en cuenta que se presentan otras opciones como lo son opciones y modos de estilos.

Figura 21

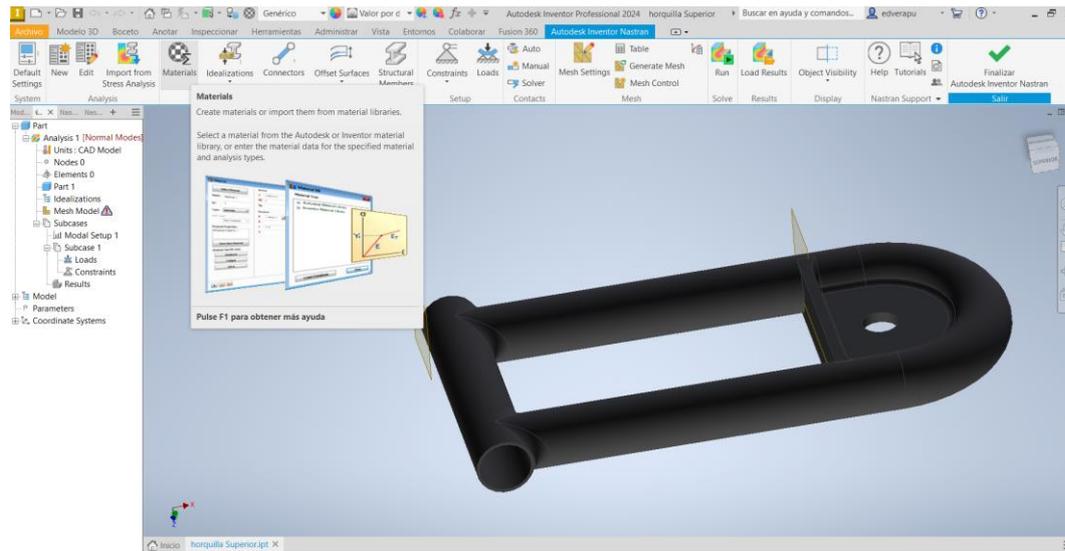
Configuración de Edición en Nastran de Autodesk



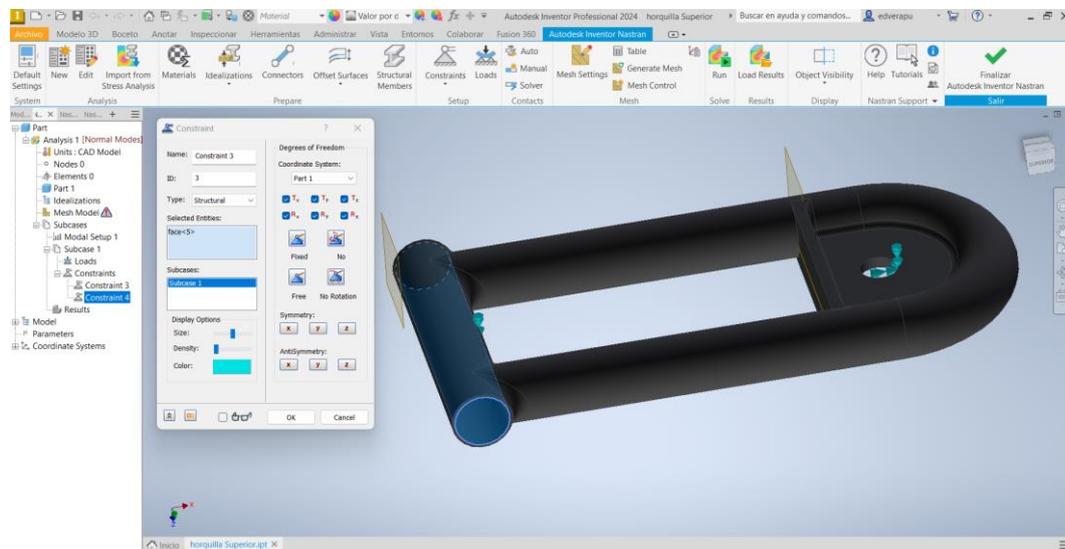
Luego de la edición se procede a la designación de materiales del elemento para el cual se activa la selección en modo de la biblioteca de materiales de Autodesk por el motivo que brinda una gama amplia para escoger en comparación a la biblioteca de Inventor, así mismo también se puede crear un nuevo material en el caso que se lo requiere y teniendo en cuenta cada una de sus propiedades.

Para el caso del presente estudio se selecciona el material de acero al carbono el mismo que presenta un 26 % de este elemento en su composición, lo que le hace óptimo para el tipo de aplicación en la parte estructural de elementos en el área automotriz.

En la figura 22 se puede apreciar que el modelado de la horquilla superior se ha designado el material, como lo que se observa en la pantalla con el cambio de color a un más oscuro.

Figura 22*Configuración de Designación de Material en Nastran de Autodesk*

Una vez determinado el material se procede a la colocación de las restricciones del elemento o también conocida esta fase como designación de condiciones de contorno, que para este caso está dada de forma fija en el eje de pivote y otra en la base donde acciona el extremo del amortiguador como se puede ver en la figura 23.

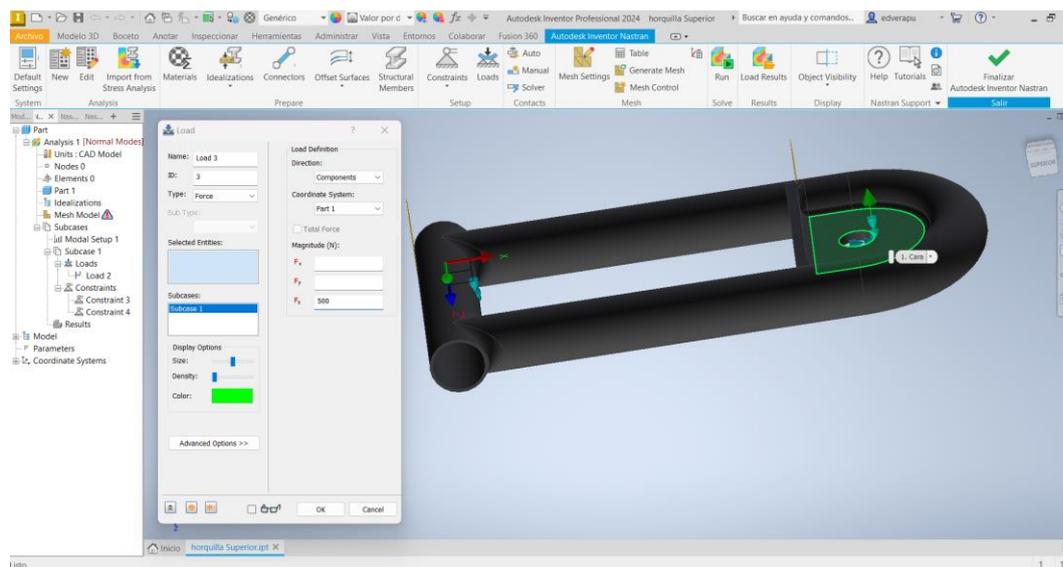
Figura 23*Configuración de Restricciones en Nastran de Autodesk*

Con la designación de las restricciones se procede a colocar las cargas que actúan sobre el elemento en estudio que en este caso es la horquilla superior de la suspensión teniendo en cuenta cada uno de los puntos donde actúan.

En esta fase se debe tener en cuenta la sección donde actúa cada carga, así como el sentido según los ejes de coordenadas a las que se encuentra sometido como se puede observar en la figura 24.

Figura 24

Configuración de Cargas en Nastran de Autodesk



3.2.3. Generación de Malla y Refinamiento

La generación del proceso de mallado y del refinamiento del modelado de la horquilla realizado en este proyecto con la ayuda de la utilización de Autodesk Inventor es un proceso crítico para realizar análisis de elementos finitos (FEA) precisos y efectivos. Este proceso inicia con la importación o creación del modelo CAD de la horquilla en Autodesk Inventor como se puede observar en la sección anterior. Una vez el modelo está listo, se procede a la generación de la malla o también denominado mallado del elemento.

Una ventaja que brinda Autodesk Inventor es que se accede al módulo de análisis de elementos finitos y se define la malla inicial, que consiste básicamente en dividir el modelo en elementos más pequeños o fragmentos, típicamente tetraedros para modelos 3D. A través

de la programación del software permite ajustar el tamaño de la malla, donde una malla más fina (con elementos más pequeños) generalmente proporciona resultados más precisos, especialmente en áreas del componente modelado con alta concentración de esfuerzos o geometrías complejas.

Al tomar en cuenta entre ventajas o desventajas del tipo de mallado se tiene lo siguiente:

- Las ventajas de un mallado fino, es la presión con la que se captura detalles complejos y distribución de esfuerzos con mayor exactitud. Mejora la convergencia de los resultados dentro del análisis no lineales o de alta complejidad.
- Las desventajas de un mallado fino son que el tiempo que requiere para el cálculo y procesamiento de datos es mayor y consume mayor cantidad de recursos computacionales. Así mismo en lo concerniente a la complejidad aumenta la dificultad en el manejo y de la visualización de los datos obtenidos.
- Ventajas de un mallado grueso, reduce el tiempo de cálculo y el uso de recursos computacionales y facilita la visualización y el manejo del modelo en cuanto a su simplicidad.
- Desventajas de un mallado grueso, es que limita la precisión ya que no capturar detalles críticos ni distribuir esfuerzos con suficiente exactitud y aumenta la probabilidad de errores en resultados debido a simplificaciones excesivas.

Según la forma del mallado con los que se pueden trabajar existen varios que brindan ciertas características y aplicaciones específicas dentro del análisis de elementos finitos y entre estas se tienen las siguientes:

- Malla tetraédrica: Utiliza elementos tetraédricos, común en geometrías complejas 3D debido a su flexibilidad y adaptabilidad.

- Malla hexaédrica: Compuesta por elementos cúbicos o prismáticos, ideal para estructuras regulares y proporciona alta precisión en menos elementos.
- Malla cuadrilateral: Formada por elementos cuadrados o rectangulares, común en análisis de estructuras o superficies planas.
- Malla triangular: Utilizada en superficies 2D y contornos irregulares, facilita la adaptación a geometrías complejas.

Cabe aclarar o tener presente que el tipo de malla seleccionado depende de la geometría del modelo y la precisión requerida del análisis

Después de generar la malla inicial, se realiza un refinamiento del modelado. Esto implica ajustar manualmente el tamaño de los elementos en áreas críticas para mejorar la precisión del análisis.

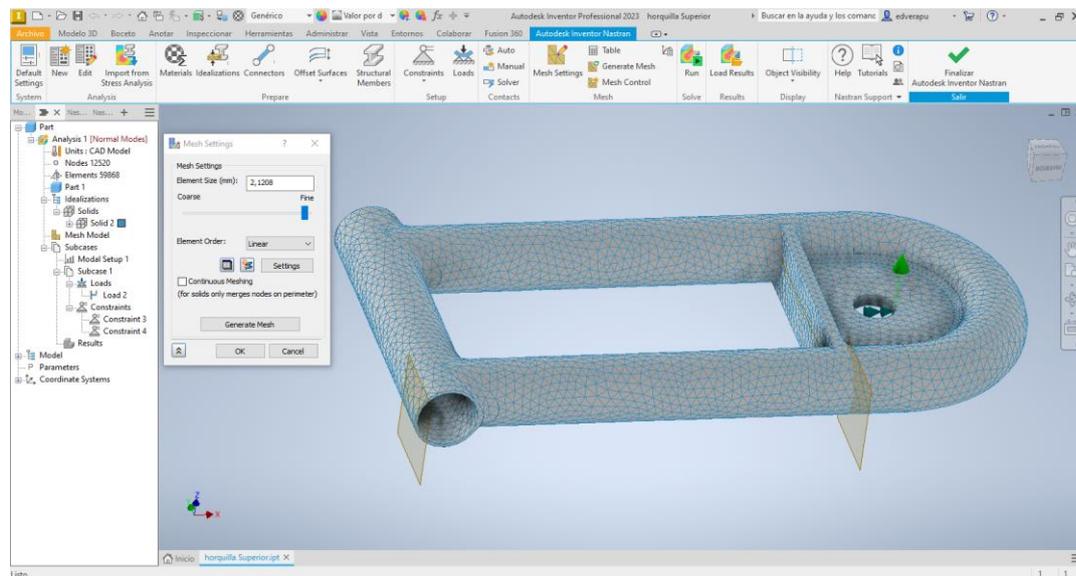
Las herramientas de refinamiento permiten aumentar la densidad de la malla en zonas específicas sin aumentar innecesariamente el número total de elementos, optimizando así el balance entre precisión y tiempo de cálculo. Una vez completado el refinamiento, el modelo está listo para el análisis modal u otros tipos de análisis FEA.

En el caso del presente estudio y una vez que se completó con la generación del modelado y aplicación de las restricción y cargas se procede a generar la fase del mallado como se puede observar en la figura 25.

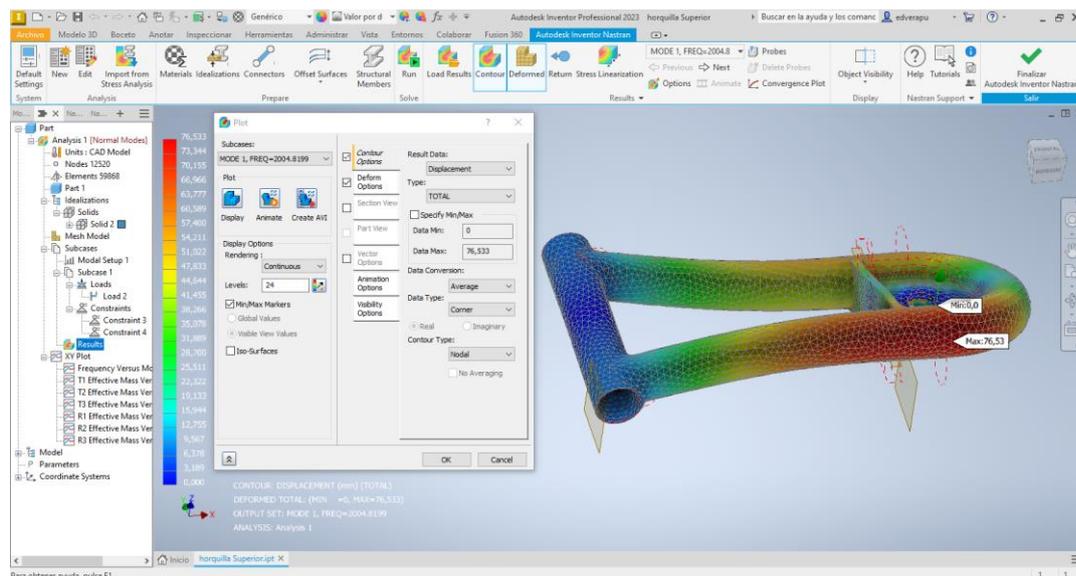
En el caso de la interfase que se presenta para la configuración del mallado para este tipo de estudio en lo que se consideran los siguientes parámetros:

Tamaño del elemento 2.1208 mm del tipo fino esto se parametriza por el motivo que la estructura de los perfiles o grosores permiten este tipo de rango.

Orden de los elementos lineal, por el motivo que la acción de las cargas aplicadas es sobre los elementos de contacto, pero de forma plana, caso contrario si los esfuerzos aplicados tendrían una forma irregular se seleccionaría el tipo parabólico.

Figura 25*Generación de Mallado en Nastran de Autodesk*

Con la generación del mallado se procede a procesar la información con lo que obtienen los resultados del estudio, como se puede apreciar en la figura 26.

Figura 26*Resultados de la Simulación en Nastran de Autodesk*

Cada uno de los resultados obtenidos se analiza en el siguiente capítulo.

Capítulo IV

Análisis de Resultados

4.1. Datos Obtenidos

Tras realizar la simulación del análisis modal de frecuencias en Autodesk Inventor y bajo el entorno de Autodesk Nastran, se obtienen los modos de vibración naturales de la horquilla superior y sus correspondientes frecuencias naturales. Cada uno de estos resultados incluyen formas modales de su estructura, que muestran cómo se deforma la horquilla en cada modo de vibración y las frecuencias asociadas, que muestran las tasas en las que se producen cada una de estas vibraciones.

Los resultados ayudan a identificar posibles resonancias y puntos críticos donde pueden concentrarse esfuerzos. El análisis permite a los ingenieros evaluar la estabilidad y el rendimiento dinámico de la horquilla, y realizar ajustes de diseño para mejorar su comportamiento estructural.

Los resultados arrojados por el programa de acuerdo con los datos de resultados son de cada uno en 10 modos de frecuencia del elemento sobre el modo de simulación para lo cual para el presente estudio se toma en cuenta cada una de estas soluciones cabe aclarar que en la interfaz que brinda el programa están los siguientes parámetros:

- Contorno
- Deformación total
- Conjunto de salida
- Descripción del análisis
- Valores máximos y mínimos
- Escala colorimétrica de variación de valores

En cambio, que los resultados por parte del desarrollo de la simulación que nos brinda el programa se presentan los siguientes:

- Desplazamiento
- Estrés
- Tensión
- Reacciones a fuerzas, entre otros resultados

4.1.1. Resultados de Frecuencias por Desplazamiento

Los resultados según los modos de frecuencia de acuerdo con los desplazamientos obtenidos dentro de la deformación estructural se pueden apreciar en la tabla 2.

Tabla 2

Resultados de Modos de Frecuencia según el Desplazamiento

Modo	Frecuencia (Hz)	Valor mínimo (mm)	Valor máximo (mm)
1	2004,8	0	76,53
2	2442,2	0	74,75
3	3339,5	0	113,58
4	4225,8	0	86,01
5	6197,1	0	82,66
6	6888,7	0	90,21
7	6926,5	0	83,98
8	9034,3	0	86,57
9	9792,2	0	82,08
10	11983,7	0	128,89

4.1.2. Resultados de Frecuencia por Estrés

El análisis de frecuencia por estrés revela que las frecuencias naturales más altas coinciden con áreas de mayor concentración de estrés en la horquilla superior del vehículo Yinxiang YX150KD. Estas frecuencias críticas deben ser cuidadosamente consideradas para evitar resonancias que puedan comprometer la integridad estructural y la seguridad del componente.

Los resultados obtenidos por parte de los modos de frecuencia de acuerdo con el nivel de estrés que experimenta la parte estructural de la horquilla superior se puede observar en la Tabla 3.

Tabla 3*Resultados de Modos de Frecuencia según el Modo de Estrés Estructural*

Modo	Frecuencia (Hz)	Valor mínimo (MPa)	Valor máximo (MPa)
1	2004,8	-132537	135743
2	2442,2	-257310	258439
3	3339,5	-591058	553831
4	4225,8	-154122	155261
5	6197,1	-283092	280311
6	6888,7	-294423	259704
7	6926,5	-302586	316283
8	9034,3	-261093	260961
9	9792,2	-276562	282449
10	11983,7	-981972	997329

4.1.3. Resultados de Frecuencia por Tensión

Los resultados obtenidos en el análisis de frecuencia por tensión estructural muestran claramente las frecuencias naturales a las que la horquilla superior de la suspensión delantera tiende a vibrar.

Identificar estas frecuencias es de suma importancia para evitar resonancias dañinas, optimizando el diseño para mejorar la durabilidad y el rendimiento estructural bajo diversas condiciones de carga, esto se puede ver en la tabla 4.

Tabla 4*Resultados de Modos de Frecuencia según el Modo de Tensión Estructural*

Modo	Frecuencia (Hz)	Valor mínimo (MPa)	Valor máximo (MPa)
1	2004,8	0,002	1,570
2	2442,2	0,001	1,057
3	3339,5	0,001	2,242
4	4225,8	0,006	1,061
5	6197,1	0,001	1,576
6	6888,7	0,002	1,276
7	6926,5	0,002	1,179
8	9034,3	0,000	3,372
9	9792,2	0,012	1,190
10	11983,7	0,004	4,198

4.2. Análisis de Resultados después de la Simulación

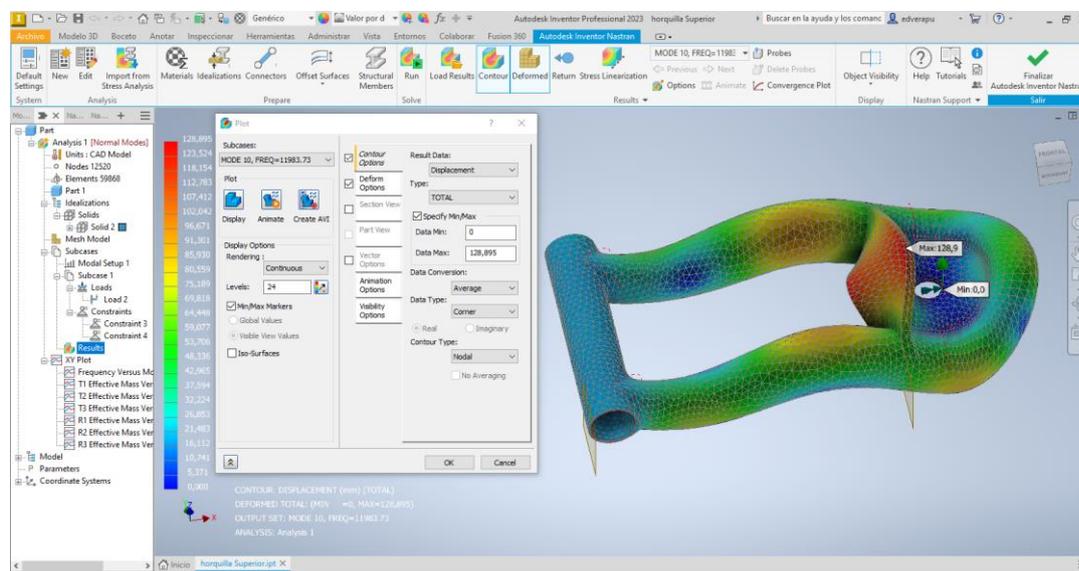
En esta sección correspondiente al análisis de los resultados obtenidos de la simulación generada con la horquilla superior consiste en desplazamientos, estrés estructural y tensiones. De la misma manera se procede a comparan con expectativas teóricas y datos experimentales, identificando cada una de las áreas críticas y proponiendo mejoras en el diseño. Lo que este tipo de análisis asegura la fiabilidad y robustez de la horquilla superior, optimizando su rendimiento y seguridad.

4.2.1. Análisis de los Desplazamientos Generados por Modos de Frecuencia

En la realización del análisis de los desplazamientos generados por modos de frecuencia revela valores máximos significativos en el tercer y décimo modos de vibración. A 3339.5 Hz, el cual es el tercer modo se observa un desplazamiento máximo de 113.58 mm, lo cual muestra una resonancia fuerte que puede causar deformaciones importantes en la horquilla superior. Otro valor crítico se ve en el décimo modo, a una frecuencia más alta de un desplazamiento máximo de 128.89 mm, sugiriendo aún mayor susceptibilidad a vibraciones extremas del componente como se puede observar en la figura 27.

Figura 27

Análisis del Desplazamiento Máximo en Modo de Frecuencia



Estos resultados subrayan la necesidad de revisar y posiblemente reforzar el diseño para mitigar estos efectos, mejorando la estabilidad y la durabilidad del componente bajo condiciones dinámicas.

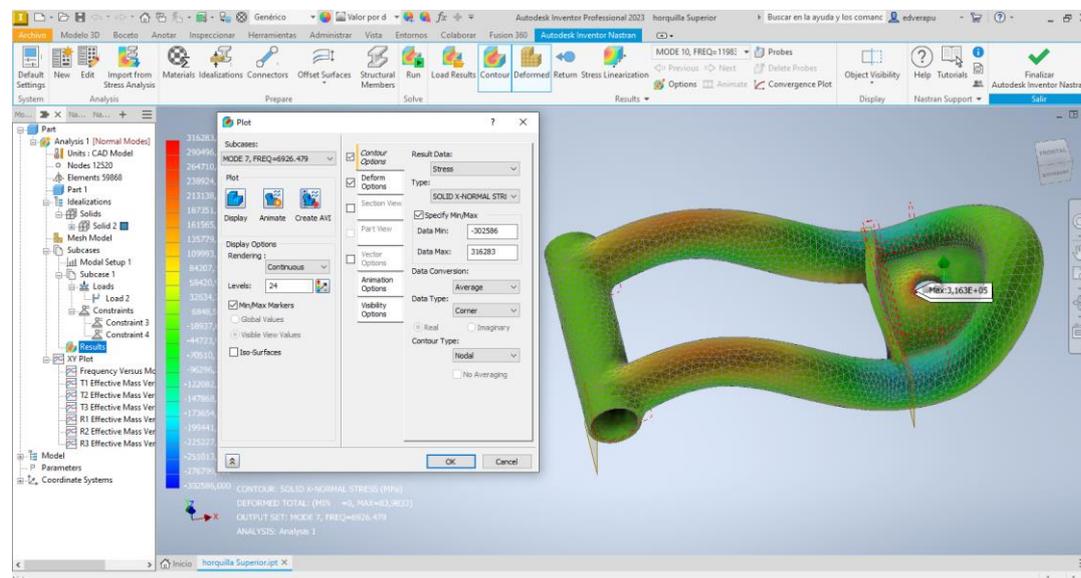
4.2.2. Análisis de Estrés Estructural Generado por los Modos de Frecuencia

Para la realización del análisis de un punto crítico que presentan los valores del comportamiento de acuerdo con el incremento de frecuencia en cuanto al estrés estructural se revela que el séptimo modo de frecuencia, a 6926.5 Hz, presenta un valor máximo de estrés de 316283 MPa, como se puede observar en la figura 28. Este pico elevado en la curva indica una concentración de tensiones significativa, lo que prevé un valor que podría llevar al fallo estructural si no se aborda adecuadamente.

Este punto de estrés estructural crítico en el séptimo modo sugiere que la horquilla está sometida a vibraciones resonantes en esta frecuencia, lo cual puede generar fatiga material y, eventualmente, fracturas. Para disminuir este riesgo, se recomienda revisar y posiblemente rediseñar la geometría de la horquilla o modificar las propiedades del material para de esta manera mejorar la distribución de tensiones y reducir la resonancia en esa frecuencia crítica.

Figura 28

Análisis del Estrés Estructural Crítico en Modo de Frecuencia

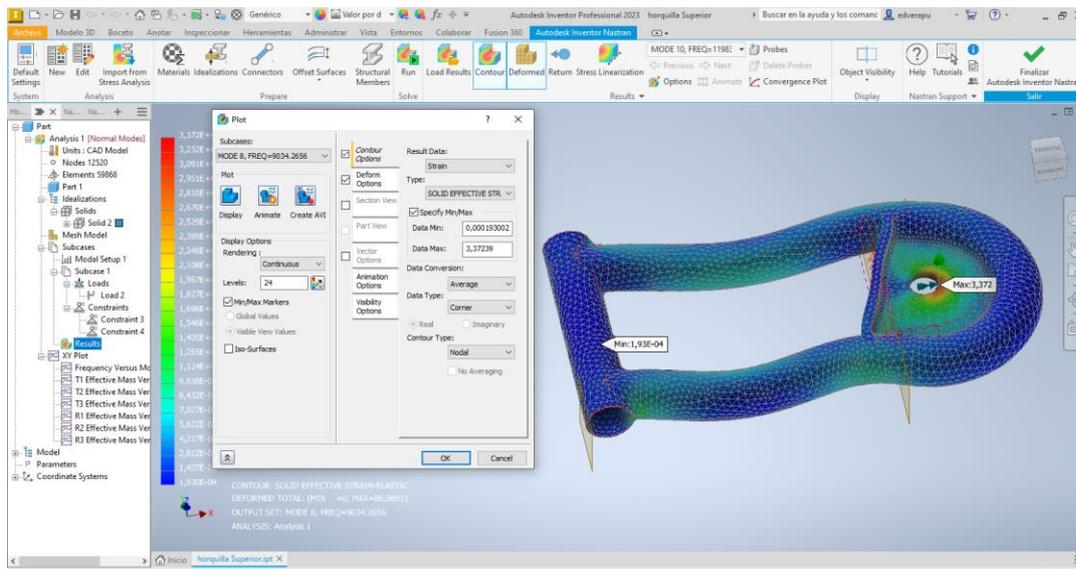


4.2.3. Análisis de Tensión Generado por los Modos de Frecuencia

Finalmente, el análisis de los resultados críticos en cuanto a lo que es la tensión estructural generada por los modos de frecuencia revela que el octavo modo de frecuencia, que se presenta a 9034.3 Hz, experimenta un valor máximo crítico de tensión de 3.372 MPa. Esta tensión máxima se ubica en la zona de contacto con el amortiguador, como se puede observar de una forma clara en la figura 29. La identificación de este pico de tensión es de suma importancia, ya que indica un punto de alta concentración de esfuerzos, que podría ser susceptible a fallos críticos o fatiga de la horquilla superior bajo condiciones de operación prolongadas. Este resultado o punto crítico sugiere la necesidad de un refuerzo estructural o una redistribución de cargas en esa área para mejorar la durabilidad y la seguridad de la horquilla. Además, la frecuencia elevada de este modo destaca la importancia de evaluar el comportamiento dinámico del sistema en casos de experimentar una alta frecuencia para asegurar el rendimiento óptimo de la suspensión delantera del vehículo.

Figura 29

Análisis de Tensión Estructural Crítico en Modo de Frecuencia



La simulación reveló que la horquilla superior del vehículo Yinxiang YX150KD presenta frecuencias naturales y modos de vibración dentro de los límites aceptables, pero que requieren de un criterio de mejora en el caso de estrés y tensión estructural tanto en la parte

de geometría como en características del material, siendo estas áreas críticas identificadas para la realización de dichos ajustes menores para optimizar el diseño. En general, los resultados validan la robustez del diseño actual, garantizando seguridad y rendimiento eficiente de la horquilla superior.

Conclusiones

Al finalizar el presente estudio se llegó a la siguiente conclusión:

Se realizó cada paso para lograr la simulación de análisis modal de la horquilla que se encuentra ubicado en la parte superior del sistema de suspensión delantera del vehículo Yinxiang YX150KD, con la ayuda de los programas de AutoDesk como lo son Inventor y Nastran 2024, con los que se realizó el modelado, designación de material, colocación de restricciones y aplicación de cargas para así lograr la simulación que reveló las frecuencias naturales y modales de vibración y sus puntos críticos dentro del comportamiento estructural de funcionamiento.

Los resultados críticos para sus análisis obtenidos por la simulación mostraron que la horquilla superior soporta adecuadamente las condiciones de carga previstas, con desplazamientos en una frecuencia de 3339.5 Hz, el cual en el tercer modo se observa un desplazamiento máximo de 113.58 mm, en cuanto al estrés estructural su valor crítico se generó en el séptimo modo de frecuencia, a 6926.5 Hz, presenta un valor máximo de estrés de 316283 MPa y finalmente en cuanto a la tensión estructural se observó que su modo de frecuencia revela que el octavo modo a 9034.3 Hz, experimenta un valor máximo crítico de tensión de 3.372 MPa. Sin embargo, se identificaron algunas áreas de este componente con potencial para optimización, así como de posibles sugerencias de modificación de forma geométrica o características del material utilizado, pero teniendo en cuenta que los resultados validan la robustez del diseño actual, garantizando seguridad y rendimiento eficiente de la horquilla superior.

Recomendaciones

Fundamentándose en cada uno de los resultados del análisis modal, se recomienda realizar ajustes o rediseño en lo correspondiente a la geometría de la horquilla superior y en la selección de materiales para mejorar su resistencia y reducir las frecuencias naturales críticas en su funcionamiento. Esto puede implicar el uso de materiales compuestos o aleaciones de mayor rendimiento sobre todo estructural, así como la redistribución del material para minimizar los puntos de concentración de tensiones.

Para garantizar la precisión y fiabilidad de los resultados de la simulación, se sugiere e futuras investigaciones llevar a cabo pruebas experimentales en prototipos físicos de la horquilla superior. Comparar los datos experimentales con los resultados de la simulación del presente proyecto investigativo ayudará a validar el modelo y a identificar posibles discrepancias, permitiendo refinamientos adicionales en el diseño.

Bibliografía

- Amuchastegui, J. (28 de Enero de 2016). *ENSUS*. Obtenido de <https://ensus.com.br/elementos-finitos-quais-os-beneficios/>
- Aranaz, J., Aibar, C., Vitaller, J., & Mira, J. (2008). *Gestión Sanitaria. Calidad y seguridad de los pacientes*. España: Editorial Díaz de Santos, S.A.
- Arias, G., & Martínez, C. (2021). *Guía metodológica para la evaluación de vibraciones en mano-brazo*. Cali: Autónoma de Occidente.
- Báez, A. (2011). *Amortiguadores, Modelo Térmico*. Madrid: Editorial Academica Espanola.
- Blancarte, J. (23 de Agosto de 2013). *Autocosmos*. Obtenido de <https://noticias.autocosmos.com.co/2013/08/23/cuales-son-los-tipos-de-suspension-mas-comunes>
- Botero, J. (2011). *Dinámica de estructuras*. Medellín: EAFIT.
- Castro, J., & Herrera, C. (2020). *Análisis del comportamiento de los soportes con acción rápida en la horquilla, para optimizar el recambio del neumático de una motocicleta de competición MotoStudent*. Latacunga: ESPEL.
- De la Peña, N., & Castro, C. (2019). Análisis del comportamiento dinámico de una suspensión de vehículo independiente de doble horquilla. *ResearchGate*, 10-33.
- Fernández, G. (2023). *Fisicoquímica - Mecánica cuántica y espectroscopía*. Madrid: Copyrighted Material.
- Fernández, M., Guzmán, I., Vázquez, T., Michel, A., & Rojas, G. (2006). *Module 1: Meteorology and Climatology - Project: Training educators for the development of educational activities on climate change*. Cochabamba: Energética.
- Gómez, A., & Guadarrama, E. (2017). Análisis y simulación de frecuencia del sistema de suspensión McPherson para un vehículo automotor. *Revista de Ingeniería Mecánica*, 10-20.

- Gómez, S. (2016). *Análisis dinámico de una horquilla monobrazo para bicicletas de descenso*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.
- Indenicsa. (2014). *Ficha de producto*. Nicaragua: Indenicsa.
- Linero, D., Garzón, D., & Ramírez, A. (2013). *Análisis estructural mediante el método de los elementos finitos. Introducción al comportamiento lineal elástico*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Lleó, A., & Lleó, L. (2011). *Gran manual de magnitudes físicas y sus unidades*. Madrid: Diaz de Santos .
- Moreno, e. (2021). *Estudio de diseño y optimización de una pieza mediante la modelización de su comportamiento estructural con un programa de elementos finitos*. Barcelona: upc. Barcelona: UPC.
- Moreno, S. (20 de Mayo de 2019). *Automotriz Maver*. Obtenido de <https://automotrizmaver.com/blog/la-horquilla-de-suspension/>
- Plaza, D. (22 de Noviembre de 2019). *Morores.es*. Obtenido de <https://www.motor.es/que-es/amortiguador>
- PTC (Dirección). (2014). *Prestaciones de Creo Simulation* [Película].
- SKF. (2020). *SKF*. Obtenido de SKF: <https://skf-la.com/conoce-los-fundamentos-de-la-termografia-infrarroja-y-mas-con-el-curso-de-skf/>
- Torres, G. (26 de Julio de 2022). *URANY*. Obtenido de <https://cl.urany.net/blog/an%C3%A1lisis-de-vibraciones>
- Torres, G. (18 de Enero de 2023). *Uranity*. Obtenido de <https://pe.urany.net/blog/diferencia-entre-buje-y-rodamiento>
- Vera, E. (2017). *Propuesta de diseño ergonómico en butacas de vehículos monoplaza, para equipos ecuatorianos participantes de la Formula Student*. Quito: UISEK.

