



UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DEL ECUADOR
Powered by Arizona State University

**FACULTAD DE INGENIERÍAS APLICADAS Y
DESARROLLO INDUSTRIAL**

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**Análisis Cuasiestático en Condiciones de Impacto Lateral
en una Llanta Delantera de Kart Mediante el Método de
Elementos Finitos**

Trabajo de Integración Curricular previo a la obtención del título de:

INGENIERO AUTOMOTRIZ

Autor: Zúñiga Reyes, Carlos Alberto

Tutor: Vera Puebla, Edgar Gustavo

GUAYAQUIL

2026

Aprobación del Tutor del Trabajo de Integración Curricular

Yo Edgar Gustavo Vera Puebla, en calidad de tutor del Trabajo de Integración Curricular denominado: Análisis Cuasiestático en Condiciones de Impacto Lateral en una Llanta Delantera de Kart Mediante el Método de Elementos Finitos, realizado por Carlos Alberto Zúñiga Reyes ha sido orientado y revisado en todas sus partes y considero que cumple los requisitos establecidos por la institución. En virtud de ello doy mi aprobación a fin de continuar con el proceso académico correspondiente.

Ing. Edgar Gustavo Vera Puebla, Msc

Tutor del Trabajo de Integración Curricular

Declaración de autoría y cesión de derechos

Yo, Carlos Alberto Zúñiga Reyes 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.

Autor: Carlos Alberto Zúñiga Reyes

C.I.: 0930441902

Dedicatoria

Dedico este trabajo a dios a mis padres y a mi familia ya que ellos fueron y serán mi pilar e inspiración en mi vida y meta que me proponga obtener, a cada una de las personas que de una manera u otra me inculcaron que el estudio es la mejor arma para afrontar cualquier adversidad en mi vida profesional, gracias.

Agradecimiento

Agradeciéndole primeramente a dios por permitirme cumplir una de las metas que me propuse hace 4 años atrás la cual se veía lejos, pero con ayuda de los docentes y buenos compañeros se pudo superar, fue un camino lleno de sorpresas y adversidades pero se pudo lograr el objetivo, darle las gracias de antemano a mi tutor el Ing. Vera Puebla Edgar Gustavo por su tiempo y apoyo brindado por días y horas en este proyecto, puedo decir que esta experiencia vivida en la UIDE fue una de las mejores, gracias.

Índice de contenido

Carátula	I
Aprobación del Tutor del Trabajo de Integración Curricular	II
Declaración de autoría y cesión de derechos.....	III
Dedicatoria	IV
Agradecimiento.....	V
Índice de contenido	VI
Índice de figuras	X
Índice de ecuaciones	XI
Resumen	1
Abstract.....	2
Introducción.....	3
Capítulo I	5
Problema de la investigación.....	5
1.1. Tema	5
1.2. Planteamiento, formulación y sistematización del problema	5
1.2.1. Planteamiento del problema.....	6
1.2.2. Formulación del problema.....	6
1.3. Sistematización del problema.....	7
1.4. Objetivos de la investigación.....	7
1.4.1. Objetivo general	7

1.4.2. Objetivos específicos.....	8
1.5. Justificación y delimitación de la investigación.....	8
1.5.1. Justificación teórica.....	8
1.5.2. Justificación metodológica	10
1.5.3. Justificación práctica.....	10
1.5.4. Delimitación temporal	11
1.5.5. Delimitación geográfica	12
1.5.6. Delimitación del contenido	12
1.6. Alcance.....	13
Capítulo II	14
Marco referencial	14
2.1. Antecedentes en análisis de llantas de karts	14
2.2. Llantas de kart y su comportamiento mecánico.....	16
2.3. <i>Características y tipos de llantas de kart</i>	16
2.3.1. Composición y materiales utilizados	17
2.3.2. Diferencias entre llantas de competencia y recreativas	17
2.3.3. Tipos de neumáticos y compatibilidad con las llantas.....	18
2.4. Geometría y dimensiones de la llanta delantera de kart	18
2.4.1. Ancho	19
2.4.2. Offset.....	19
2.4.3. Espesor	20
2.4.4. Diámetros de centro de agujeros de fijación (PCD).....	21
2.5. Factores que afectan al desempeño de las llantas	22

2.6. Análisis estructural de la llanta	23
2.6.1. Resistencia a impactos laterales y esfuerzos mecánicos	23
2.6.2. Distribución de cargas en frenado y curvas.....	23
2.6.3. Evaluación mediante el método de elementos finitos	24
2.7. Modelos matemáticos involucrados en el análisis.....	24
2.7.1. Ecuación de equilibrio estático	25
2.7.2. Ley de Hooke (Deformación elástica)	25
2.7.3. Criterio de falla de Von Mises.....	25
2.7.4. Energía de deformación.....	25
2.7.5. Ecuación de desplazamiento en FEM	26
Capítulo III	27
Desarrollo metodológico.....	27
3.1. Enfoque del estudio.....	27
3.2. Generación del boceto	28
3.3. Diseño del modelado tridimensional	29
3.4. Materiales y propiedades mecánicas utilizadas	31
3.5. Condiciones de frontera y restricciones del modelo	32
3.6. Aplicación de cargas	33
3.7. Mallado y refinamiento	34
3.8. Procesamiento y obtención de resultados	36
3.8.1. Resultados de tensión de Von Mises.....	36
3.8.2. Resultados de deformación.....	37
3.8.3. Resultado de coeficiente de seguridad	38

Capítulo IV	40
Interpretación de resultados	40
4.1. Análisis de tensiones de Von Mises	40
4.2. Análisis de deformación máxima	41
4.3. Análisis de coeficiente de seguridad	42
Conclusiones	44
Recomendaciones	45
Bibliografía	46

Índice de figuras

Figura 1 <i>Llanta de kart</i>	16
Figura 2 <i>Tipos de llanta para karts</i>	18
Figura 3 <i>Ancho de llanta</i>	19
Figura 4 <i>Offset de llanta</i>	20
Figura 5 <i>Espesor de llanta</i>	21
Figura 6 <i>PCD de llanta</i>	21
Figura 7 <i>Generación de boceto de la llanta</i>	29
Figura 8 <i>Modelado 3D de la llanta</i>	30
Figura 9 <i>Designación de material</i>	32
Figura 10 <i>Restricción de la llanta</i>	33
Figura 11 <i>Carga aplicada en la llanta</i>	34
Figura 12 <i>Generación de mallado en la llanta</i>	35
Figura 13 <i>Procesamiento de mallado en la llanta</i>	35
Figura 14 <i>Resultado de tensión de Von Mises</i>	37
Figura 15 <i>Resultados de deformación</i>	38
Figura 16 <i>Resultado de coeficiente de seguridad</i>	38
Figura 17 <i>Análisis de resultado de tensión de Von Mises</i>	41
Figura 18 <i>Análisis de resultado de deformación máxima</i>	42
Figura 19 <i>Análisis de resultado de coeficiente de seguridad</i>	43

Índice de ecuaciones

Ecuación 1 Ecuación de Equilibrio Estático	25
Ecuación 2 Ley de Hooke (Deformación Elástica).....	25
Ecuación 3 Criterio de Falla de Von Mises.....	25
Ecuación 4 Energía de Deformación	25
Ecuación 5 Ecuación de Desplazamiento en FEM.....	26

Resumen

El presente proyecto investigativo tiene como objetivo el análisis del comportamiento estructural de la llanta delantera de un kart ante impactos laterales en condiciones cuasiestáticas que se pueden presentar durante una competencia, utilizando el método de elementos finitos (FEM) con la ayuda del programa computacional Autodesk Inventor. El estudio inicia con la recopilación de información técnica sobre las propiedades mecánicas de su material como lo es el aluminio 6061, el mismo que se lo selecciona por su resistencia, peso reducido y buena capacidad de absorción de impactos. Posteriormente, se procede a realizar el modelado 3D a partir de planos dimensionales y geométricos emitidas por el fabricante, cuidando las restricciones y relaciones con el mecanismo. Con la simulación se establecen condiciones de frontera y una carga lateral de 37500 N, obtenida de modelos matemáticos basados en datos reales de carrera. La malla es configurada con refinamiento en zonas críticas que mejoran la precisión de los resultados. Los resultados obtenidos indican una tensión de Von Mises máxima de 183.3 MPa concentrada en el orificio de la válvula y una mínima de 0 MPa en áreas opuestas; una deformación máxima de 0.1361 mm en la zona de impacto; y un coeficiente de seguridad mínimo de 1.5 en áreas críticas y máximo de 15 en zonas sin sollicitación. Con el análisis se determina que el diseño actual soporta la carga aplicada, aunque presenta márgenes de mejora en zonas específicas.

Palabras clave: llanta, kart, método de elementos finitos.

Abstract

This research project aims to analyze the structural behavior of a kart's front tire under side impacts under quasi-static conditions that may occur during a competition, using the finite element method (FEM) with the help of the Autodesk Inventor software. The study begins with the collection of technical information on the mechanical properties of its material, such as 6061 aluminums, selected for its strength, low weight, and good impact absorption capacity. Subsequently, 3D modeling is performed from dimensional and geometric drawings issued by the manufacturer, considering the restrictions and relationships with the mechanism. The simulation establishes boundary conditions and a lateral load of 37,500 N, obtained from mathematical models based on real race data. The mesh is configured with refinement in critical areas that improve the accuracy of the results. The results obtained indicate a maximum Von Mises stress of 183.3 MPa concentrated in the valve orifice and a minimum of 0 MPa in opposite areas; a maximum deformation of 0.1361 mm in the impact zone; and a minimum safety factor of 1.5 in critical areas and a maximum of 15 in unstressed areas. The analysis determines that the current design supports the applied load, although it has room for improvement in specific areas.

Keywords: rim, kart, finite element method.

Introducción

La seguridad y el desempeño estructural de los vehículos de competición constituyen aspectos fundamentales dentro de la ingeniería automotriz. En el caso de los karts, las llantas representan uno de los componentes más importantes debido a que son el único punto de contacto entre el vehículo y la superficie de rodadura, estando sometidas a diversas solicitaciones mecánicas durante su operación. Entre estas solicitaciones, los impactos laterales pueden generar deformaciones significativas que comprometen la estabilidad, el control y la seguridad del vehículo.

Ante esta problemática, el presente trabajo desarrolla un análisis cuasiestático de una llanta delantera de kart sometida a condiciones de impacto lateral mediante la aplicación del Método de Elementos Finitos (MEF), permitiendo evaluar su comportamiento estructural y determinar las zonas críticas de concentración de esfuerzos y deformaciones.

La investigación dio respuesta al problema planteado mediante la implementación de un modelo computacional que simula las condiciones de carga lateral experimentadas por la llanta durante un impacto. A través del uso de herramientas de análisis numérico basadas en elementos finitos, fue posible obtener información detallada sobre la distribución de esfuerzos, desplazamientos y deformaciones, proporcionando criterios técnicos para evaluar la resistencia estructural del componente y su capacidad de soportar condiciones adversas de funcionamiento.

Los objetivos propuestos fueron alcanzados satisfactoriamente. Se logró caracterizar geométricamente la llanta delantera de kart, definir las propiedades mecánicas del material empleado, establecer las condiciones de carga y restricciones necesarias para la simulación, y finalmente analizar los resultados obtenidos mediante el software especializado. Estos resultados permitieron identificar el comportamiento estructural de la llanta frente a impactos laterales y establecer conclusiones relacionadas con su desempeño mecánico.

Durante el desarrollo del trabajo se presentaron diversas oportunidades y limitaciones. Entre las facilidades encontradas destacan la disponibilidad de software de simulación asistida por computadora y la existencia de información técnica relacionada con el

comportamiento de materiales y estructuras sometidas a cargas mecánicas. Sin embargo, se enfrentaron limitaciones asociadas a la obtención de datos experimentales para la validación del modelo, así como simplificaciones geométricas y de carga necesarias para reducir el tiempo computacional sin afectar significativamente la precisión de los resultados.

La metodología utilizada se fundamentó en un enfoque cuantitativo y descriptivo, basado en el modelado tridimensional de la llanta, la definición de las propiedades mecánicas del material, el establecimiento de las condiciones de frontera y carga, la generación de la malla de elementos finitos y la ejecución del análisis estructural cuasiestático. Posteriormente, se realizó la interpretación de los resultados obtenidos para determinar el comportamiento mecánico de la llanta bajo las condiciones de impacto consideradas.

La estructura del documento se organiza en cinco capítulos. El Capítulo I presenta el planteamiento del problema, los objetivos y la justificación de la investigación. El Capítulo II desarrolla el marco teórico, donde se abordan los fundamentos relacionados con la dinámica de impactos, el comportamiento de materiales, los karts y el Método de Elementos Finitos. El Capítulo III describe la metodología empleada para el modelado y simulación numérica. El Capítulo IV expone los resultados obtenidos y su respectivo análisis. Finalmente, el Capítulo V presenta las conclusiones y recomendaciones derivadas de la investigación.

La importancia de este estudio radica en la contribución al conocimiento técnico sobre el comportamiento estructural de componentes automotrices sometidos a cargas laterales, permitiendo optimizar diseños, incrementar los niveles de seguridad y reducir costos asociados a pruebas físicas. Asimismo, los resultados obtenidos constituyen una referencia útil para futuras investigaciones relacionadas con el análisis estructural y la aplicación de herramientas de simulación numérica en el ámbito de la ingeniería automotriz y del deporte motor.

Capítulo I

Problema de la investigación

1.1. Tema

Análisis cuasiestático en condiciones de impacto lateral en una llanta delantera de kart mediante el método de elementos finitos.

1.2. Planteamiento, formulación y sistematización del problema

Uno de los aspectos de mucha importancia en las áreas de diseño es el análisis estructural de autopartes en la industria automotriz mediante el método de elementos finitos (FEM) el cual es fundamental para garantizar su comportamiento, resistencia y seguridad.

En mundo de los karts de competencia, las llantas delanteras están expuestas a muchos impactos frontales y laterales que pueden comprometer su forma geométrica, integridad y afectar de esta manera el desempeño del vehículo. Sin embargo, la evaluación de cada uno de estos efectos bajo condiciones cuasiestáticas no ha sido ampliamente estudiada por las marcas y equipos involucrados en este tipo de competencias automovilísticas, lo que genera incertidumbre sobre el comportamiento real de la llanta ante dichas condiciones.

El problema fundamental radica en la falta de estudios detallados los mismos que permitan comprender de una forma clara la respuesta mecánica a la que están sometidas las llantas ante este tipo de impactos laterales. Bajo este criterio, se requiere un modelado y una simulación basada en el método de elementos finitos por el cual se analice la distribución de esfuerzos, deformaciones y posibles fallos estructurales. Con estos resultados obtenidos, será posible determinar si el diseño actual de la llanta delantera del kart cumple con los requerimientos técnicos de resistencia o si necesita algún tipo de mejoras para soportar cargas extremas al momento de una colisión lateral.

Por lo tanto, el presente estudio investigativo pretende formular un modelo de análisis cuasiestático el cual permita predecir el comportamiento de la llanta bajo este tipo de condiciones de impacto lateral. A través de la sistematización de los resultados que se

obtengan, se pretende aportar información clave para optimizar la seguridad y mejorar de forma considerable la eficiencia en el diseño de llantas delanteras de kart.

1.2.1. Planteamiento del problema

Uno de los aspectos a tomar muy en cuenta en los karts de competencia es que normalmente las llantas delanteras están constantemente sometidas a impactos laterales que pueden comprometer su integridad estructural y afectar el desempeño del vehículo. Estos impactos pueden comúnmente darse por colisiones con otros karts, contacto con bordes (pianos), bordillos o irregularidades en la pista, generando esfuerzos considerables que pueden llegar a provocar deformaciones permanentes o fallos mecánicos algunos sistemas del vehículo.

Sin embargo, las características y resistencia de las llantas ante estas condiciones no han sido suficientemente estudiada mediante análisis cuasiestático con el método de elementos finitos (FEM), lo que genera incertidumbre sobre su comportamiento real.

En este aspecto la falta de estudios detallados sobre la respuesta mecánica que experimenta la llanta ante cargas laterales impide optimizar su diseño para mejorar su resistencia y seguridad del elemento, así como de los mecanismos que pueden ser comprometidos con este tipo de impactos. Aunque existen análisis dinámicos de impacto, un enfoque cuasiestático permite evaluar el proceso de deformación de manera controlada y con mayor precisión.

Por lo tanto, con el planteamiento de la presente investigación surge la necesidad de desarrollar un modelo de simulación por medio del método de elementos finitos el cual permita analizar la distribución de esfuerzos, desplazamientos y posibles fallos estructurales en la llanta, proporcionando de esta forma información clave para su mejor optimización y determinación de diseño seguro.

1.2.2. Formulación del problema

Al tener en cuenta que la resistencia de las llantas delanteras de kart ante impactos laterales es un factor de mucha importancia en la seguridad y desempeño de este tipo de vehículos. Sin embargo, la escasez de este tipo de estudios detallados que analicen este tipo

de comportamiento estructural bajo estas condiciones utilizando un enfoque cuasiestático mediante el método de elementos finitos.

La falta de este tipo de información dificulta significativamente la optimización del diseño y la prevención de fallos mecánicos. En este contexto, es fundamental el poder desarrollar un modelo de simulación el cual permita evaluar de forma constante la distribución de esfuerzos, deformaciones y posibles puntos de falla en la estructura de este tipo de llanta, por lo tanto, se plantea la siguiente interrogante:

¿Cómo afecta un impacto lateral en la llanta delantera de un kart bajo condiciones cuasiestáticas y qué tan eficiente es su diseño actual en términos de resistencia estructural?

1.3. Sistematización del problema

- ¿Cuál es el comportamiento estructural de la llanta delantera de un kart ante un impacto del tipo lateral en condiciones cuasiestáticas?
- ¿Cómo es la distribución correspondiente a los esfuerzos y deformaciones en la llanta cuando se somete a una carga lateral progresiva?
- ¿Cuáles son los puntos críticos de falla en la estructura de la llanta bajo este tipo de condiciones de impacto?
- ¿Qué tan efectivo es el diseño actual de la llanta delantera de kart en términos de resistencia mecánica y seguridad?
- ¿Qué mejoras pueden implementarse en el diseño de la llanta de kart para optimizar su desempeño estructural ante impactos laterales?

1.4. Objetivos de la investigación

1.4.1. Objetivo general

- Analizar el comportamiento estructural de la llanta delantera de un kart ante impactos laterales en condiciones cuasiestáticas mediante el método de elementos finitos a través de programa computacional de Autodesk Inventor.

1.4.2. Objetivos específicos

- Recopilar información sobre las propiedades mecánicas de la llanta y los principios del método de elementos finitos.
- Simular el comportamiento de la llanta delantera de kart en condiciones de impacto lateral por medio del programa computacional Autodesk Inventor.
- Proponer mejoras en el diseño de llantas delanteras de karts para optimizar su resistencia y seguridad.

1.5. Justificación y delimitación de la investigación

La presente investigación referente al estudio del comportamiento estructural de la llanta delantera de un kart ante impactos laterales es primordial para poder mejorar su resistencia y seguridad. Por medio de la aplicación del método de elementos finitos (FEM) en un análisis cuasiestático, es posible evaluar la distribución de esfuerzos y deformaciones, permitiendo de esta manera optimizar el diseño y reducir considerablemente el riesgo de fallos mecánicos de este tipo de elemento.

Para poder justificar esta investigación se establece la necesidad de desarrollar modelos de simulación precisos que contribuyan a la seguridad significativa en el karting de competencia. Además, con los resultados obtenidos pueden ser aplicables en la mejora de materiales y geometrías estructurales de las llantas delanteras de este tipo de vehículos.

La investigación se delimita estrictamente al análisis estructural de una llanta específica de kart, considerando impactos laterales en condiciones cuasiestáticas. Se empleará el programa computacional Autodesk Inventor el cual permite realizar la simulación por medio del método de elementos finitos y se establecerán condiciones de carga y restricción realistas para obtener resultados representativos y aplicables en el diseño y manufactura de llantas más seguras y eficientes.

1.5.1. Justificación teórica

Fundamentalmente el análisis estructural de componentes en la industria automotriz mediante el método de elementos finitos es una herramienta fundamental en la ingeniería

mecánica para predecir de esta manera el comportamiento en lo correspondiente a materiales y estructuras bajo cargas específicas. En el caso de las llantas delanteras de kart o conocidas como de dirección, su resistencia ante impactos laterales puede determinarse a través de un análisis cuasiestático, permitiendo identificar de esta manera la distribución de esfuerzos y posibles fallos mecánicos.

Teóricamente, la presente investigación se basa en la mecánica de materiales y la teoría de elasticidad y plasticidad, aplicando criterios de falla como Von Mises el cual permite evaluar la resistencia estructural. Además, se consideran modelos matemáticos y métodos de simulación computacional, los cuales permiten realizar un tipo de estudios más precisos y eficientes. El uso de estos enfoques teóricos garantiza de forma confiable una evaluación detallada para mejorar el diseño y la seguridad de las llantas delanteras aplicadas en karts.

A continuación, se exponen algunos criterios científicos que aportan a este estudio investigativo:

En la investigación realizada por (Cisilino y otros, 2005) concluye que “los modelos computacionales, permitieron verificar la aptitud de los materiales e introducir modificaciones en el diseño original de las piezas y sus procesos de fabricación que aseguren su capacidad para soportar las cargas sometidas durante la competencia”.

Una recomendación que realiza (Marcial & Rosero, 2012) es la que “cuando se realiza un análisis por elementos finitos, es necesario que la solución cumpla con un criterio de convergencia, para con ello asegurar que los resultados obtenidos sean fieles a la realidad, de lo contrario el programa arroja valores falsos”.

En lo concerniente a mallado de los elementos (Sanz, 2014) establece que “el tamaño de la malla permite conocer el comportamiento aproximado de la estructura en cuanto a desplazamientos y carácter tensional general. Con sistemas más potentes se podría refinar más la malla y obtener una determinación más exacta en valores obtenidos”.

En uno de los pocos estudios realizados en lo concerniente a impactos sobre llantas la investigación realizada por (Calle & Cumbe, 2016) concluye que la “fiabilidad de resultados se debe considerar las características mecánicas y físicas involucradas en cada componente,

su disposición, porcentaje de absorción de energía de impacto para la compensación de la ausencia del neumático y la velocidad en el instante de impacto”.

1.5.2. Justificación metodológica

El enfoque metodológico que se plantea en el presente proyecto investigativo se basa en el método de elementos finitos para la realización del análisis cuasiestático de la llanta delantera de un kart ante impactos laterales. Este método es el más adecuado porque permite evaluar la distribución de cada uno de los esfuerzos, desplazamientos y posibles fallos estructurales con gran precisión, sin necesidad de realizar pruebas físicas costosas o destructivas, las cuales conllevan un alto consumo de recursos.

Para desarrollar el presente estudio, se utiliza el programa computacional de Autodesk Inventor el cual es especializado para este tipo de proyecto, en el cual se implementará un modelo tridimensional de la llanta o denominado como modelado. Se definirán las condiciones de frontera, aplicando restricciones y cargas laterales progresivas que simulen un impacto realista. Además, se empleará un mallado refinado para mejorar la precisión de cada uno de los resultados.

Este enfoque metodológico permite de maneja muy amigable obtener datos cuantificables y replicables, facilitando la comparación entre diferentes configuraciones de diseño de llantas para karts. Además, garantiza una evaluación estructural rigurosa, que puede ser utilizada como base para futuras mejoras en la fabricación de llantas más resistentes y seguras. La validación de los resultados se realizará a través de criterios de convergencia y comparación con referencias previas en la literatura técnica.

1.5.3. Justificación práctica

La presente investigación tiene una justificación práctica fundamentada básicamente en la aplicación del método de elementos finitos con la aplicación del programa computacional de Autodesk Inventor como herramienta principal para el desarrollo del presente estudio. Este programa computacional permite realizar todo el proceso de análisis, desde la creación del diseño en 2D, modelado 3D, hasta la simulación y generación de resultados, garantizando un flujo de trabajo integrado y eficiente.

Inicialmente, se elaborará un boceto en 2D de la llanta delantera de kart bajo las dimensiones y geometría referenciadas por el fabricante de forma exacta para su posterior modelado en 3D, asegurando que la geometría sea fiel a las condiciones reales de la llanta de kart delantera. Luego, el modelo tridimensional será sometido a un análisis estructural mediante el método de elementos finitos, donde se aplicarán las condiciones de frontera, las cargas laterales progresivas y los parámetros de material.

La simulación permitirá observar la distribución de esfuerzos y deformaciones, identificar posibles puntos críticos de falla, así como su coeficiente de seguridad y de esta manera poder evaluar la resistencia de la llanta ante impactos laterales. Autodesk Inventor proporciona herramientas avanzadas de simulación que permiten obtener resultados precisos sin necesidad de realizar ensayos físicos costosos.

Este enfoque práctico facilita de forma significativa la optimización del diseño de la llanta, permitiendo proponer mejoras estructurales basadas en los datos obtenidos. Además, brinda una metodología replicable para futuras investigaciones en el análisis y mejora de componentes automotrices.

1.5.4. Delimitación temporal

La delimitación temporal de la presente investigación establece un periodo de 16 semanas, iniciando en la segunda semana de julio de 2025 y finalizando en la primera semana de noviembre de 2025. Tiempo en el cual, se lleva a cabo todas las etapas necesarias para el desarrollo del estudio, asegurando un análisis detallado y la obtención de cada uno de los resultados de forma precisa.

En las primeras dos semanas, se enfocará en la revisión bibliográfica sobre análisis estructural de llantas y la aplicación del método de elementos finitos, además de la recopilación de datos geométricos y materiales de la llanta en estudio. Posteriormente, en las siguientes tres semanas, se procederá con la creación del modelo en Autodesk Inventor, comenzando con el boceto 2D, su transformación en modelo 3D y la asignación de propiedades de material.

Durante la sexta y décima semana, se definirán las condiciones de frontera y cargas para la simulación, así como la ejecución las simulaciones FEM y se analizarán los resultados. Finalmente, en las últimas semanas, se elaborará el informe técnico, documentando hallazgos y recomendaciones para optimizar el diseño de la llanta.

1.5.5. Delimitación geográfica

La delimitación geográfica del presente proyecto investigativo se establece en la Universidad Internacional del Ecuador (UIDE), sede Guayaquil. En esta institución se llevará a cabo el desarrollo del modelo en Autodesk Inventor, la simulación mediante método de elementos finitos y el análisis de los resultados para la optimización del diseño de la llanta delantera para karts.

1.5.6. Delimitación del contenido

La presente investigación se enfoca de manera clara y precisa en el análisis cuasiestático de un impacto lateral en la llanta delantera de un kart mediante el método de elementos finitos, a través de la utilización del programa computacional Autodesk Inventor para la realización del modelado y simulación. Se abarca desde la elaboración del boceto en 2D, la creación del modelo 3D o modelado y la asignación de propiedades del material con el que está constituido las llantas de karts, hasta la implementación de las condiciones de frontera como son las secciones de restricción, cargas laterales y parámetros de simulación.

Así mismo el presente proyecto investigativo se delimita exclusivamente al comportamiento estructural de la llanta, sin considerar el neumático, el sistema de suspensión ni la interacción dinámica con la pista de competencias.

Se evalúan de manera secuencial la distribución de esfuerzos, deformaciones y posibles fallos mecánicos sobre el elemento en análisis, identificando los puntos críticos que pueden comprometer la resistencia del componente en estudio. Hay que tener muy en cuenta que no se realizarán pruebas experimentales, ya que el estudio se basa estrictamente en simulaciones computacionales.

Los resultados obtenidos por medio del programa computacional Inventor, permitirán determinar si el diseño actual es óptimo o si requiere mejoras estructurales para soportar

impactos laterales, contribuyendo a la seguridad y rendimiento del kart en condiciones normales de competencia.

1.6. Alcance

El planteamiento del alcance del presente proyecto investigativo se limita básicamente en la búsqueda de información técnica relacionada con el diseño, materiales y esfuerzos mecánicos presentes en las llantas delanteras de los karts bajo condiciones máximas de impacto lateral. Cabe aclarar que el presente estudio no se realizarán pruebas físicas ni prototipos; el estudio se centrará exclusivamente en el entorno virtual por medio de programas computacionales.

Así mismo se desarrollará el modelado tridimensional estructural de la llanta utilizando Autodesk Inventor, respetando cada una de las dimensiones y características reales o estandarizadas en este tipo de elementos. A continuación, se aplicará el método de elementos finitos para de esta forma simular el comportamiento estructural de la llanta ante una carga cuasiestática lateral, estableciendo las condiciones de frontera, tipos de materiales y configuración de la malla para obtener resultados representativos.

Cada uno de los datos obtenidos de la simulación se analizarán en función de los criterios de resistencia mecánica, principalmente el de Von Mises, con el objetivo de identificar posibles zonas críticas de fallo o deformación y su coeficiente de seguridad. Finalmente, se plantearán propuestas de mejora en el diseño o selección de materiales que optimicen la resistencia estructural sin comprometer el peso ni el desempeño del componente sobre la estructura del kart.

La base del presente proyecto investigativo tiene exclusivamente un enfoque computacional y analítico, sin ejecución experimental, lo cual permite evaluar el comportamiento del elemento en estudio con eficiencia y precisión dentro de un entorno simulado.

Capítulo II

Marco referencial

En la presente sección destina al marco conceptual de referencia de esta investigación se fundamenta en proporcionar cada una de las bases teóricas y antecedentes necesarios para el estudio relacionado al análisis cuasiestático en el caso de un impacto lateral aplicado sobre la llanta delantera de un kart a través del método de elementos finitos. Se abordan conceptos clave como resistencia de los materiales con que están constituidos, la mecánica estructural, teoría de elasticidad y plasticidad, así como los criterios de falla aplicable, como Von Mises.

Además, se incluyen referencias a ciertos estudios previos sobre simulaciones estructurales en componentes automotrices que fundamentan al presente, destacando la importancia del modelado 3D y la simulación computacional a través de la aplicación de Autodesk Inventor para predecir el comportamiento de materiales bajo cargas específicas.

Este marco permite contextualizar la investigación dentro del campo de la ingeniería mecánica automotriz y validar la metodología utilizada, asegurando que los resultados sean comparables con investigaciones similares y puedan contribuir a la mejora del diseño y seguridad de las llantas de kart en condiciones de impacto lateral y sobre todo mejorar el desempeño de los karts en condiciones de competencia.

2.1. Antecedentes en análisis de llantas de karts

Existen muy pocos estudios realizados en lo correspondiente al análisis estructural en este tipo de componentes como lo son las llantas de los vehículos a nivel general tanto en vehículos pesados, medianos, livianos, así como vehículos utilizados en competencias automovilísticas por lo que bajo esa necesidad se busca fortalecer investigaciones en esta área por lo que a continuación se incluyen algunos de esas investigaciones realizadas de manera globalizada.

La importancia que se pretende con todos los estudios realizados es que toda llanta debe contar con características de ser un producto seguro en lo concerniente a resistencia y

rigidez y estable para un sinnúmero de cargas a las que se encontrará sometido durante su funcionamiento.

En lo concerniente a la conceptualización de rigidez angular (Perles, 2021) lo define como “el movimiento que hay que aplicar a una barra para provocar un giro unitario, es decir un giro de un grado, en un minuto o en un segundo”.

En lo referente a resistencia de materiales (Cervera & Blanco, 2002) define que “se basa en tres principios fundamentales: Principio de rigidez, Principio de suspensión y Principio de Saint – Venant. La calidez de los resultados depende básicamente, del grado de satisfacción de estos principios en el caso concreto en que se aplique”.

Uno de los estudios de suma importancia en esta área está el de (Jorge & Roa, 2008) concluyendo con que “las zonas en donde existen mayor concentración de esfuerzos quedan lejos del esfuerzo decadencia del aluminio permitiendo hacer aligeramiento en espesor del rin reduciendo material, costos y peso que es un factor importante en condiciones de competencias automovilísticas”.

En lo concerniente al uso del tipo de metodología (Montes de Oca y otros, 2017) establece que “permite el desarrollo adecuado de los modelos y análisis, logrando el objetivo de obtener las fuerzas de reacción y esfuerzos en elementos en análisis, así como los esfuerzos en la estructura del vehículo cuando está a su máxima capacidad bajo las condiciones de manejo estándar”.

Bajo lo analizado en la recopilación de estos estudios el análisis estructural en llantas de kart es crucial para de esta forma poder garantizar su resistencia, seguridad y desempeño en condiciones de competencia de karting. El poder evaluar su comportamiento ante distintos tipos de impactos laterales permite identificar zonas de falla estructural, optimizar el diseño y seleccionar materiales adecuados. Esto contribuye de manera significativa el poder mejorar la durabilidad y estabilidad del kart, reduciendo riesgos de deformación o fractura durante una competencia.

2.2. Llantas de kart y su comportamiento mecánico

Las llantas utilizadas en los vehículos karts, son componentes claves del sistema de rodadura, éstas son estructuras rígidas que soportan el neumático y garantizan la transmisión de fuerzas al suelo, como se puede apreciar en la figura 1. Por lo general son fabricadas en aluminio o aleaciones ligeras, deben poseer una alta resistencia a impactos y cargas generadas en maniobras de alta velocidad.

Figura 1

Llanta de kart



Fuente: (Bernardi, 2018)

El comportamiento mecánico de este tipo de elemento de vehículos depende de factores como el diseño geométrico, material y condiciones de carga. En impactos laterales, la llanta debe absorber de forma considerable esfuerzos sin deformarse excesivamente ni ser susceptible a fracturas. Además, su distribución de masa influye en la estabilidad y rendimiento del kart. El análisis estructural permite optimizar su diseño, asegurando de esta forma, resistencia, ligereza y durabilidad en condiciones de competencia de este tipo de vehículos.

2.3. Características y tipos de llantas de kart

La llanta de un kart es un componente fundamental el cual influye en el rendimiento, estabilidad y seguridad de un kart en competencia. Su diseño se fundamenta en el uso de

material y su estructura lo cual determinan su resistencia ante impactos, distribución de carga y capacidad para disipar calor generado durante la conducción, cabe aclarar que este último aspecto se lo relaciona en conjunto con el neumático.

2.3.1. Composición y materiales utilizados

Normalmente estos componentes son elaborados en aleaciones de aluminio 6061, debido a su ligereza, resistencia y capacidad de disipación térmica, lo que reduce de manera considerable el sobrecalentamiento de los neumáticos que es uno de los factores fundamentales al momento que un kart se encuentra en competencia debido a la elevación de temperatura provocada por la fricción del neumático con el asfalto y sobre todo en condiciones e frenado.

Algunos modelos de alto rendimiento emplean aleaciones de magnesio, los mismos que brindan características como menor peso y mayor rigidez, mejorando de esta manera la respuesta del kart en curvas y frenado. También existen versiones de acero, aunque son menos comunes debido a que su aumento de peso y menor eficiencia térmica.

2.3.2. Diferencias entre llantas de competencia y recreativas

En este aspecto las llantas de competencia están básicamente diseñadas para máxima precisión y rendimiento, por lo que se las elabora con materiales ligeros y resistentes que optimizan la velocidad y estabilidad. Normalmente suelen tener diseños del tipo ventilados para mejorar la disipación de calor y reducir considerablemente el desgaste del neumático. De lo contrario, las llantas recreativas son más pesadas, económicas y de larga duración, enfocadas en la resistencia y facilidad de mantenimiento en lugar del rendimiento extremo.

En la figura 2 se puede apreciar los tipos de llantas más utilizados en karts y los mismos que se describen a continuación:

- Llantas de dos piezas
- Llantas de aluminio
- Llantas universales

Figura 2*Tipos de llanta para karts***2.3.3. Tipos de neumáticos y compatibilidad con las llantas**

Un aspecto fundamental de las llantas es la adaptabilidad que debe existir con los diferentes tipos de neumáticos como son los siguientes:

- Neumáticos Lisos o slicks: Utilizados para superficies secas, requieren aros rígidos para maximizar agarre.
- Neumáticos de Lluvia: Utilizan llantas con mejor drenaje térmico para evitar deformaciones.
- Neumáticos Mixtos: Combinan características para diversas condiciones, necesitando un equilibrio entre peso y resistencia.

2.4. Geometría y dimensiones de la llanta delantera de kart

Existen diversas medidas estructurales a considerar al diseñar llantas o generar un modelado tridimensional, las cuales varían según los requisitos reglamentarios y las opciones de fabricación de cada proveedor. Estos factores influyen directamente en el desempeño del kart en la pista, afectando su estabilidad, tracción y respuesta en diferentes condiciones de manejo. Elegir la llanta adecuada puede marcar una diferencia significativa en la competitividad y seguridad del kart, por lo que es fundamental conocer sus características al realizar una fase de diseño o rediseño.

2.4.1. Ancho

El modelado tridimensional de la llanta de kart requiere una representación precisa de su geometría y dimensiones reglamentarias. Según la FIA, las categorías OK, OKJ y KZ establecen un ancho límite de 135 mm en la parte delantera y 215 mm en la trasera para llantas de seco, mientras que para lluvia son 130 mm y 180 mm, respectivamente. En la categoría MINI, los valores son 120 mm adelante y 150 mm atrás. Estas dimensiones influyen en el diseño 3D, donde se consideran variaciones en el perfil, fijación al buje y compatibilidad con neumáticos, asegurando precisión en la simulación estructural, como se puede observar en la figura 3.

Figura 3

Ancho de llanta



Fuente: (Colombo, 2023)

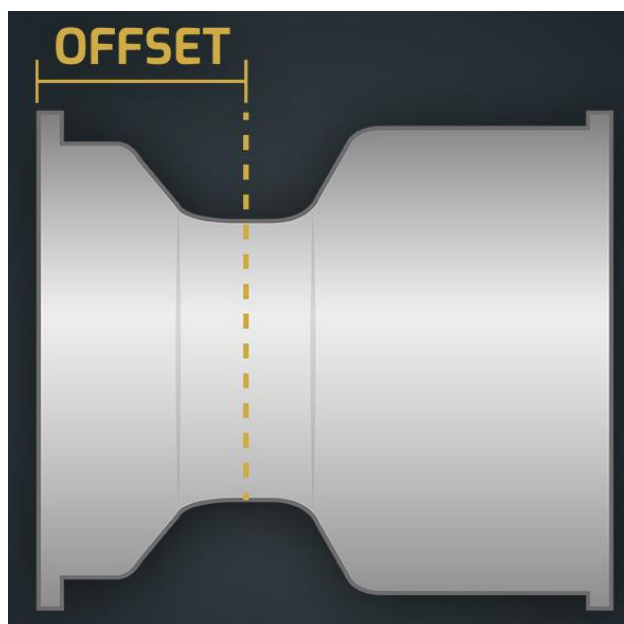
2.4.2. Offset

Como se puede apreciar en la figura 4, para el modelado tridimensional de la llanta de kart, es fundamental definir con precisión sus dimensiones y características geométricas, incluyendo el offset. Este término se refiere a la distancia entre el plano central de la llanta y su punto de fijación al buje. En el proceso de diseño, se debe representar con exactitud la relación entre la brida de fijación y el perfil interno de la llanta, ya que esta medida influye directamente en la estructura y rigidez del modelo. La variación del offset modifica la

distribución de cargas y torsión, lo que impacta el desempeño del kart en pista. Un offset mayor implica una mayor rigidez, lo que aumenta el agarre en curvas y debe reflejarse correctamente en la simulación estructural. En el modelado 3D, es clave parametrizar esta variable para analizar cómo afecta la flexión de los extremos del eje o los husillos en las llantas delanteras, asegurando que el diseño represente fielmente su comportamiento en condiciones reales.

Figura 4

Offset de llanta

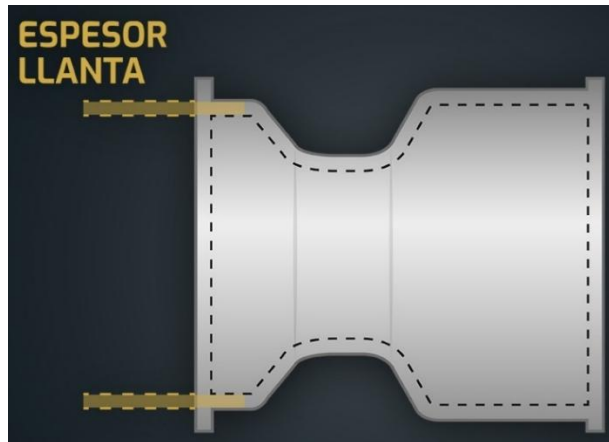


Fuente: (Colombo, 2023)

2.4.3. Espesor

El modelado tridimensional de la llanta requiere una representación precisa de su geometría, incluyendo el grosor del material. Aunque este parámetro no está regulado, cada fabricante define su propio estándar para optimizar peso, resistencia estructural y disipación de calor.

En el diseño 3D, se debe considerar un espesor adecuado para garantizar un equilibrio entre rigidez y rendimiento térmico. En el caso de las llantas AMV, el grosor estándar de 3 mm se implementa en todos sus modelos, ya que ofrece un compromiso óptimo entre estos factores y se puede ver su característica en la figura 5.

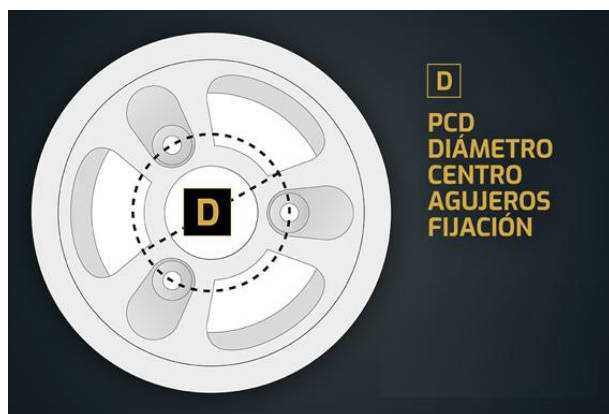
Figura 5*Espesor de llanta*

Fuente: (Colombo, 2023)

2.4.4. Diámetros de centro de agujeros de fijación (PCD)

El modelado tridimensional de la llanta de un kart requiere la representación precisa de su geometría y dimensiones clave, incluyendo el círculo de diámetro primitivo (PCD). Este parámetro define la circunferencia hipotética que pasa por los agujeros de montaje de la llanta en el buje.

Para garantizar compatibilidad, se deben considerar los estándares más comunes, como 58 mm, utilizado por la mayoría de los fabricantes de chasis. Sin embargo, existen excepciones, como los karts de la familia CRG, cuyo PCD es de 67 mm, lo que influye en el diseño del modelo tridimensional, esto se puede ver en la figura 6.

Figura 6*PCD de llanta*

Fuente: (Colombo, 2023)

2.5. Factores que afectan al desempeño de las llantas

El desempeño de cada una de las llantas de kart delanteras como posteriores está influenciado por varios factores clave, entre ellos está la más importante como lo es la presión y temperatura de inflado, el comportamiento en diferentes tipos de superficies y las distintas condiciones climáticas al momento de una competencia, así como el desgaste y durabilidad en competición.

La presión de inflado afecta directamente la adherencia, estabilidad y la reacción del kart al momento de desplazarse por la trayectoria de superficie; una presión baja incrementa la superficie de contacto, mejorando la tracción, pero genera mayor resistencia y desgaste en los laterales, mientras que una presión alta reduce el agarre y provocando una menor deformación del neumático, pero afectando considerablemente a la maniobrabilidad. La temperatura también influye en el rendimiento del sistema, ya que un neumático frío ofrece menor adherencia y uno excesivamente caliente, pero esto puede generar que se degrade de forma más rápida.

El comportamiento del conjunto llanta y neumático en distintas superficies varía según el tipo de pista y su rugosidad; en superficies secas, los neumáticos lisos (slicks) proporcionan el mejor agarre, mientras tanto que en condiciones de superficies húmedas se requieren neumáticos de lluvia con ranuras los cuales faciliten la evacuación del agua en pista.

Las condiciones climáticas también afectan la elección del compuesto de los neumáticos, por el motivo que a temperaturas elevadas aceleran el desgaste de la banda de rodadura, mientras que temperaturas bajas pueden endurecer la goma y reducir su efectividad.

Finalmente, la degradación y la durabilidad dependen del tipo de compuesto con que están elaborados, la estrategia de conducción y la frecuencia de uso, siendo fundamental un buen estilo de conducción y del mantenimiento adecuado para prolongar de esta manera la vida útil y garantizar un desempeño óptimo en competición.

2.6. Análisis estructural de la llanta

Al tratar sobre el análisis estructural de la llanta esto no es más que evaluar su resistencia, deformaciones y distribución de esfuerzos ante cargas externas en cada uno de sus puntos estructurales, especialmente impactos laterales. Mediante el método de elementos finitos, se procede a simular condiciones reales para identificar zonas críticas de falla en la estructura de la llanta y optimizar de esta manera su diseño.

Este estudio es clave para mejorar la durabilidad, seguridad y rendimiento de la llanta en competencias de karting, evitando deformaciones en condiciones de desempeño normal o fracturas prematuras. Por este motivo se procede a describir los siguientes aspectos:

2.6.1. Resistencia a impactos laterales y esfuerzos mecánicos

La resistencia a impactos laterales y esfuerzos mecánicos en las llantas de kart es fundamental para garantizar su durabilidad y seguridad en competición. Durante una carrera, las llantas están expuestas a fuerzas laterales intensas, especialmente en curvas cerradas y colisiones con otros karts o bordes de la pista. Estos impactos pueden generar deformaciones, grietas o fallas estructurales, afectando el rendimiento y estabilidad del kart.

Con el presente análisis de estos esfuerzos mediante el método de elementos finitos se logra evaluar de manera coherente la distribución de tensiones y puntos críticos de falla. Esto facilita la optimización del diseño y selección de materiales adecuados para mejorar la resistencia, reducir peso y maximizar la eficiencia estructural de la llanta en su desempeño normal de funcionamiento.

2.6.2. Distribución de cargas en frenado y curvas

Al momento de tratar un tema como lo es el modelado tridimensional de una llanta de kart, es fundamental poder considerar la distribución de cargas durante el momento de frenado y las condiciones o comportamiento en curvas, ya que estas afectan su desempeño estructural de la llanta.

En el frenado, el peso se transfiere hacia las ruedas delanteras, aumentando la carga sobre ellas y generando esfuerzos de compresión y flexión. En las curvas en cambio, las

fuerzas laterales provocan una redistribución de carga entre las ruedas internas y externas, generando tensiones asimétricas. Este análisis es fundamental para poder diseñar o rediseñar una llanta que resista dichas cargas sin comprometer su desempeño ni su integridad estructural.

2.6.3. Evaluación mediante el método de elementos finitos

Con la obtención de los resultados es muy importante y fundamental la evaluación mediante el método de elementos finitos, lo cual permite analizar el comportamiento estructural de la llanta del kart bajo condiciones de impacto lateral en competencia. Este método divide la geometría del modelo tridimensional en elementos pequeños elementos interconectados, facilitando el cálculo de esfuerzos, deformaciones y distribuciones de carga con alta precisión por parte del programa computacional.

A través de este programa como lo es Autodesk Inventor, se definen cada una de las propiedades del material, condiciones de frontera y fuerzas aplicadas, permitiendo obtener resultados detallados sobre zonas críticas de falla. La simulación por parte del método de elementos finitos ayuda a optimizar el diseño, reduciendo peso sin comprometer la resistencia. Además, evita la necesidad de múltiples pruebas físicas, disminuyendo costos y tiempo en la validación del componente.

2.7. Modelos matemáticos involucrados en el análisis

Para el desarrollo de este tipo de análisis estructural de la llanta de un kart, generalmente se aplican diversos modelos matemáticos como la Ley de Hooke, el criterio de Von Mises y la ecuación de equilibrio estático pueden utilizarse para poder evaluar cada uno de los esfuerzos y deformaciones que se presentan.

Sin embargo, en la práctica, estos cálculos no se realizan manualmente, ya que el programa computacional Autodesk Inventor integra estos modelos dentro de su proceso de simulación por medio del método de elementos finitos. El programa computacional cumple la función de automatiza el proceso, permitiendo obtener resultados precisos sin necesidad de resolver las ecuaciones de forma analítica.

Estos modelos matemáticos permiten evaluar el desempeño estructural de la llanta delantera o posterior en condiciones de impactos, identificando zonas críticas y optimizando su diseño.

Entre los modelos matemáticos se tienen los siguientes:

2.7.1. Ecuación de equilibrio estático

Ecuación 1

$$\sum F = 0 \text{ y } \sum M = 0$$

Esta ecuación establece que la sumatoria de fuerzas y momentos en un sistema en equilibrio debe ser cero. En el análisis cuasiestático, esta ecuación se usa normalmente para determinar la distribución de cargas sobre la llanta.

2.7.2. Ley de Hooke (Deformación elástica)

Ecuación 2

$$\sigma = E * \varepsilon$$

La presente ecuación relaciona el esfuerzo (σ) y la deformación (ε) por medio del módulo de elasticidad (E). Se usa normalmente para describir el comportamiento del material de la llanta en el régimen elástico.

2.7.3. Criterio de falla de Von Mises

Ecuación 3

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$$

A través del presente modelo lo que se permite es determinar si un material dúctil alcanzará la falla plástica bajo esfuerzos combinados. Es clave en el análisis de tensiones en la llanta.

2.7.4. Energía de deformación

Ecuación 4

$$U = \frac{1}{2} \int_V \sigma * \varepsilon dV$$

El presente modelo matemático representa la energía interna acumulada en la llanta debido a la carga aplicada. Este modelo matemático es muy importante porque es útil para evaluar la capacidad de absorción de impactos de cualquier índole en cualquier elemento o mecanismo estructural.

2.7.5. Ecuación de desplazamiento en FEM

Ecuación 5

$$[K]\{u\} = \{F\}$$

Donde:

$[K]$ = matriz de rigidez

$\{u\}$ = vector de desplazamiento

$\{F\}$ = vector de fuerzas

Finalmente, esta ecuación se resuelve por medio del método de elementos finitos para obtener de esta manera cada uno de los desplazamientos y deformaciones en la llanta en condiciones de impacto.

Capítulo III

Desarrollo metodológico

El presente capítulo describe de manera detallada el desarrollo metodológico aplicado en el modelado y análisis estructural de la llanta delantera de un kart bajo condiciones de impacto lateral cuasiestático, utilizando herramientas de simulación computacional.

La metodología se basa en el método de elementos finitos, el mismo que permite evaluar el comportamiento mecánico del elemento sin la necesidad de ensayos físicos. Para el desarrollo se emplea el software Autodesk Inventor, que integra el modelado bidimensional, tridimensional y la simulación estructural en un mismo entorno, facilitando un flujo de trabajo continuo desde el diseño hasta la obtención de resultados de la simulación.

El proceso metodológico se da inicio con la recolección de información técnica sobre las dimensiones, materiales y parámetros estructurales de las llantas utilizadas en karts de competencia de marcas más relevantes en el mercado. Luego, se desarrolla el boceto en 2D y el modelo 3D de la llanta, considerando características geométricas reales.

Posteriormente, se definen cada una de las condiciones de frontera, cargas aplicadas de acuerdo con criterios reales y las propiedades o características del material, luego se genera el proceso de creación del mallado para posteriormente ejecutar la simulación bajo un escenario cuasiestático. Finalmente, se analiza la distribución de esfuerzos y deformaciones resultantes, identificando zonas críticas y posibles fallos. Con base en estos datos, se proponen mejoras de diseño que incrementen la resistencia estructural sin afectar el peso o el rendimiento del kart.

3.1. Enfoque del estudio

En lo que conlleva al presente estudio es el de adaptar un enfoque analítico-computacional, centrado puntualmente en el análisis estructural de una llanta delantera de kart sometida a condiciones de impacto lateral cuasiestático durante una competencia. Por lo que se basa en la aplicación del método de elementos finitos a través del uso del software

Autodesk Inventor, el cual permite bocetear, modelar, simular y analizar el comportamiento del componente sin necesidad de realizar ensayos físicos.

Por lo tanto este estudio no busca validar experimentalmente los resultados en pista, sino evaluar el desempeño mecánico de la llanta a través de un proceso de simulaciones estructurales precisas. De esta forma se pretende identificar la distribución de esfuerzos que actúan en el componente, deformaciones y posibles zonas críticas de falla, a partir de un modelo tridimensional que representa fielmente las características geométricas y materiales del componente.

El enfoque investigativo está dirigido a generar conocimiento útil para la optimización del diseño en este tipo de componentes, con propuestas de mejora que puedan ser aplicadas a futuros desarrollos. Se prioriza la eficiencia, el análisis virtual y la aplicación de herramientas digitales de ingeniería utilizadas en la actualidad a la realización del presente trabajo investigativo.

3.2. Generación del boceto

Uno de los procesos o fases fundamentales lo es la generación del boceto en 2D lo cual constituye el primer paso antes del modelado tridimensional de la llanta y se basa en las dimensiones y geometría proporcionadas por el fabricante. La importancia a tener en cuenta en esta fase al generar el boceto es que se debe elaborar con la máxima precisión, respetando de manera fundamental la forma original de la llanta y cuidando la colocación correcta de las cotas en cada sección del diseño.

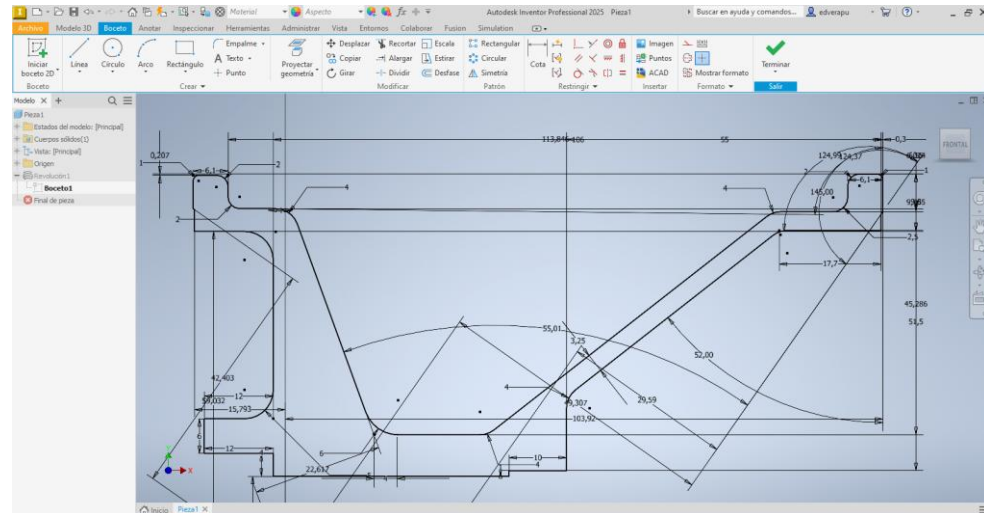
Es fundamental en este tipo de metodologías, aplicar restricciones geométricas entre líneas, arcos y radios para garantizar que el perfil mantenga su integridad durante futuras ediciones o extrusiones.

Al momento que se realiza este tipo de boceto es que se debe tener bien definido asegurando que el modelo 3D conserve cada una de las proporciones reales y se ajuste correctamente a las condiciones de simulación, como se puede apreciar en la figura 7, teniendo en cuenta que en cualquier tipo de programas de modelado y diseño que cuente con cada una de las dimensiones y algo de suma importancia cada una de las restricciones con

que debe contar la fase del modelo en 2D, caso contrario al momento de utilizar las herramientas para el modelado 3D se generan errores.

Figura 7

Generación de boceto de la llanta



3.3. Diseño del modelado tridimensional

Una vez generado el boceto con cada una de las medidas geométricas del perfil de la llanta de kart se procede a realizar la fase del diseño o denominado técnicamente como modelado tridimensional de la llanta delantera del kart el cual se realiza utilizando el software Autodesk Inventor Professional, el mismo que brinda cada una de las herramientas precisas para la creación de geometrías complejas a partir del boceto en 2D ya generado.

Este proceso requiere una interpretación exacta de las dimensiones proporcionadas por el fabricante, respetando tanto la forma geométrica original como cada una de las especificaciones técnicas con que cuenta el elemento, tales como el diámetro exterior, diámetro de orificio para eje se tuerca de sujeción, ancho, espesor del material, entre otros aspectos de la geometría y detalles estructurales internos propios.

Una vez culminado el boceto base de la llanta en 2D, se procede con herramientas como extrusión, revolución, corte y simetría, que permiten construir el modelo tridimensional de forma progresiva y controlada. Es fundamental aplicar cada una de las restricciones geométricas en el lugar adecuado y parámetros de diseño desde el inicio de esta fase, lo cual facilita modificaciones posteriores en caso de que se lo requiera y mantiene la consistencia

del modelo. También se debe tomar muy en cuenta el uso de planos auxiliares para garantizar la correcta ubicación de características internas y simetrías.

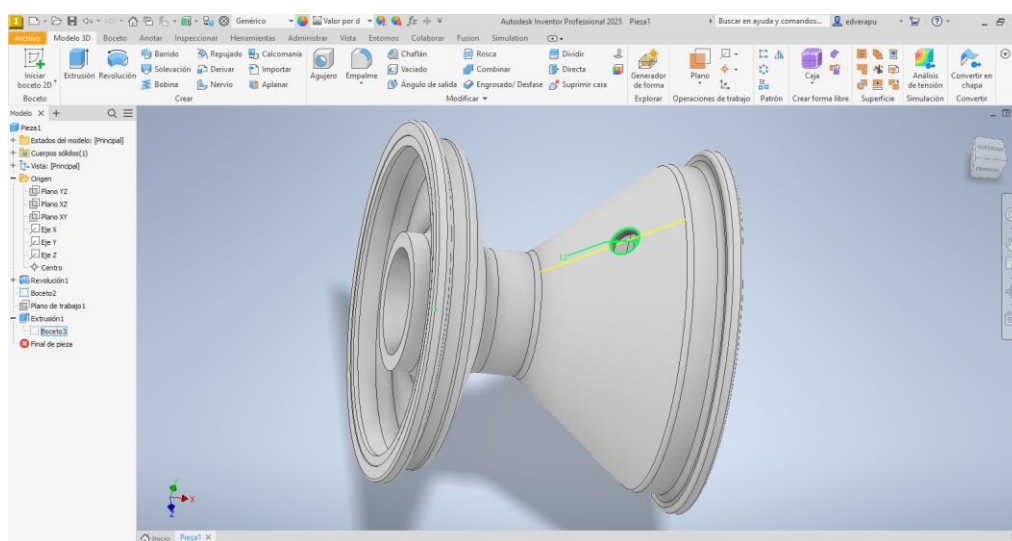
Durante la fase del modelado, se deben tener ciertos cuidados técnicos en este proceso de diseño, como evitar errores de sobredefinición en los bocetos, restricciones repetidas, controlar la precisión en las cotas y verificar la correcta alineación entre elementos. Además, es de suma importante mantener cada una de las organizaciones del árbol de operaciones y utilizar nombres descriptivos en las funciones el mismo lo que permite su identificación, lo que mejora la trazabilidad y edición del diseño.

Además, Autodesk Inventor permite visualizar el modelo en distintas vistas y secciones, lo cual es útil para comprobar que no existan interferencias ni errores en la geometría. Un modelo 3D que se encuentre bien construido bajo toda su geometría o especificaciones de su origen es esencial para lograr una simulación FEM confiable, ya que la calidad del mallado y la asignación de condiciones dependen directamente de la integridad del diseño geométrico. Así, el modelado tridimensional no solo representa la forma física, sino que constituye la base del análisis estructural posterior, los cuales se realizarán más adelante.

El modelado de la llanta de kart se puede observar en la figura 8.

Figura 8

Modelado 3D de la llanta



Teniendo en cuenta que la geometría de la llanta se ha definido a partir de las dimensiones proporcionadas por un modelo real, se toman en cuenta elementos claves como lo es el diámetro exterior, el ancho de la llanta, el espesor del material, la forma de las paredes internas y la ubicación de los orificios de fijación al buje o válvula de inflado. Cada uno de estos elementos permiten representar de manera fiel el componente real, facilitando un análisis estructural confiable en la fase de simulación.

Así mismo en la figura 8 se presentan todos los elementos geométricos considerados, junto con sus respectivas cotas y restricciones aplicadas durante el diseño, constituyendo de esta manera la base para validar la integridad del modelo 3D y garantizando su correcta preparación para el análisis por medio del método de elementos finitos.

3.4. Materiales y propiedades mecánicas utilizadas

Para la fase de selección del material con el que el elemento modelado se procederá a simular para el presente proyecto, lo es el aluminio 6061 como material base para el análisis estructural de la llanta delantera del kart bajo condiciones de impacto lateral. Esta aleación es ampliamente utilizada en la industria automotriz, aeronáutica y sin duda en vehículos inmersos en competencias automovilísticas, debido a su excelente relación resistencia-peso, su buena resistencia a la corrosión y su capacidad de conformado y maquinado, lo que la convierte en una opción ideal para componentes que requieren ligereza y resistencia estructural.

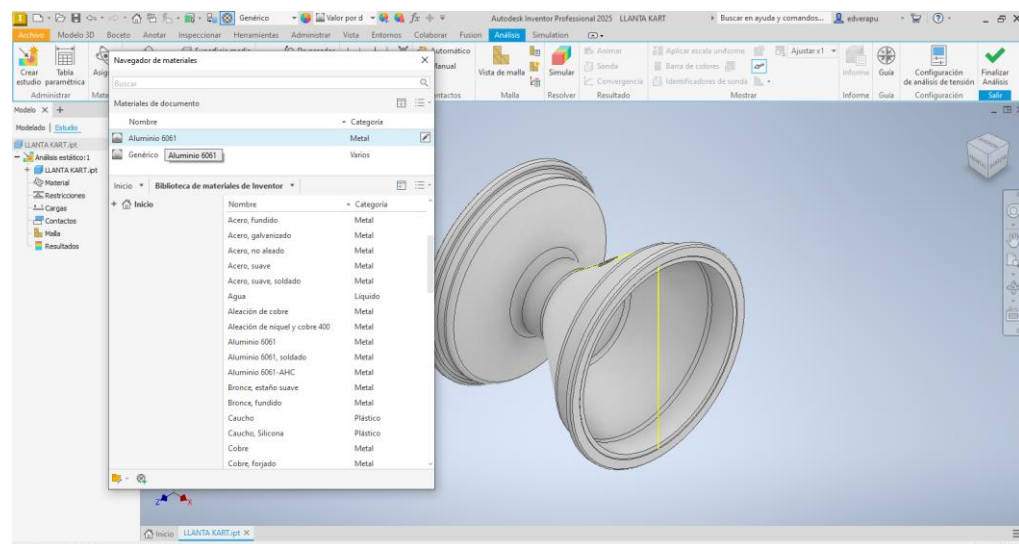
Dentro de las propiedades con que cuenta el aluminio 6061 es que es uno de los materiales que pertenece a la familia de aleaciones tratables térmicamente y contiene principalmente magnesio y silicio como elementos de aleación. En su estado tratado térmicamente más común (T6), presenta una resistencia a la tracción aproximada de 310 MPa, un límite elástico de 275 MPa, y una densidad de 2.7 g/cm^3 , lo que contribuye significativamente a mantener bajo el peso de la llanta sin comprometer su rigidez. Además, tiene un módulo de elasticidad de 68.9 GPa, lo que permite una adecuada respuesta frente a cargas laterales en el análisis cuasiestático.

Para la simulación FEM realizada en Autodesk Inventor, el programa tiene almacenada en su biblioteca de materiales cada una de las propiedades mecánicas al modelo tridimensional de la llanta, asegurando que el comportamiento bajo carga lateral sea representativo del material real. Se establecieron también parámetros adicionales como el coeficiente de Poisson el cual es de 0.33, el mismo que es necesario para evaluar las deformaciones en múltiples direcciones, y el límite de esfuerzo bajo el criterio de Von Mises, para identificar zonas propensas a falla.

El uso del aluminio 6061 garantiza un análisis estructural confiable, dado que es un material comúnmente utilizado en llantas de vehículos ligeros. Su implementación en este estudio permite no solo evaluar su desempeño frente al impacto lateral, sino también explorar posibles mejoras de diseño sin necesidad de reemplazar el material base, conservando así su eficiencia y facilidad de fabricación, la designación del material se puede apreciar de forma clara en la figura 9.

Figura 9

Designación de material



3.5. Condiciones de frontera y restricciones del modelo

Teniendo en cuenta que la presente simulación es cuasiestática de la llanta delantera del kart, se procede a establecer condiciones de frontera y restricciones que representan el comportamiento casi real del componente ante un impacto lateral. Dado que se trata de un

análisis cuasiestático, se asume significativamente que las cargas se aplican de forma progresiva y lenta, evitando de esta manera efectos dinámicos o inerciales.

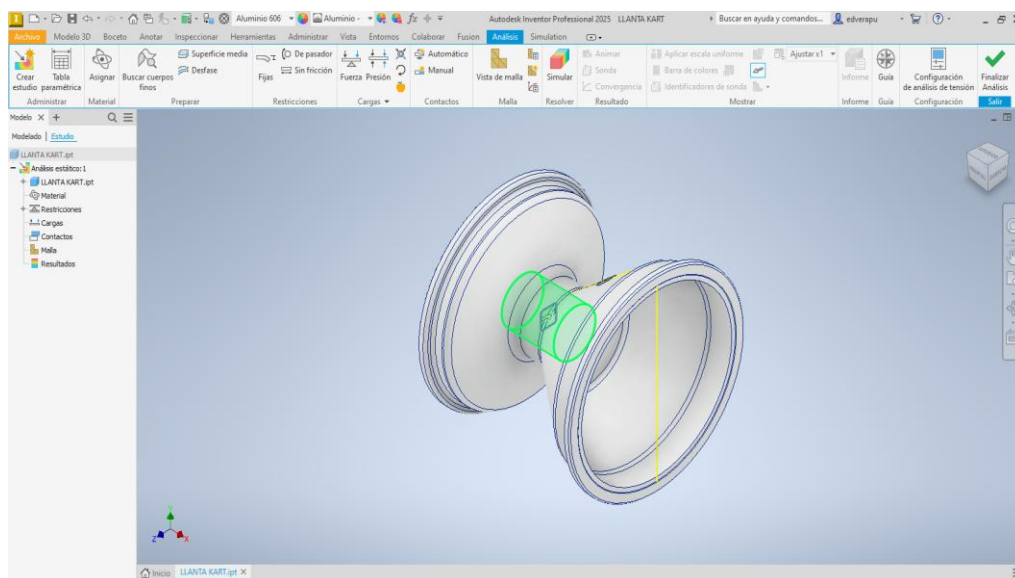
La restricción para este caso de estudio se aplica en el orificio de fijación de la llanta al buje, limitando completamente los grados de libertad (traslaciones y rotaciones) en dicho punto. Esto simula la condición de fijación rígida de la llanta al eje del kart, lo cual es crucial para garantizar estabilidad durante el análisis.

En cuanto a las condiciones de carga, se aplicó una fuerza lateral distribuida sobre el borde exterior de la llanta, simulando el efecto de un impacto contra un bordillo o superficie lateral. Esta carga se mantuvo constante durante la simulación, permitiendo evaluar cómo responde la geometría y el material ante el esfuerzo.

Estas condiciones aseguran una representación realista del comportamiento estructural de la llanta y el cual se muestra en la figura 10.

Figura 10

Restricción de la llanta



3.6. Aplicación de cargas

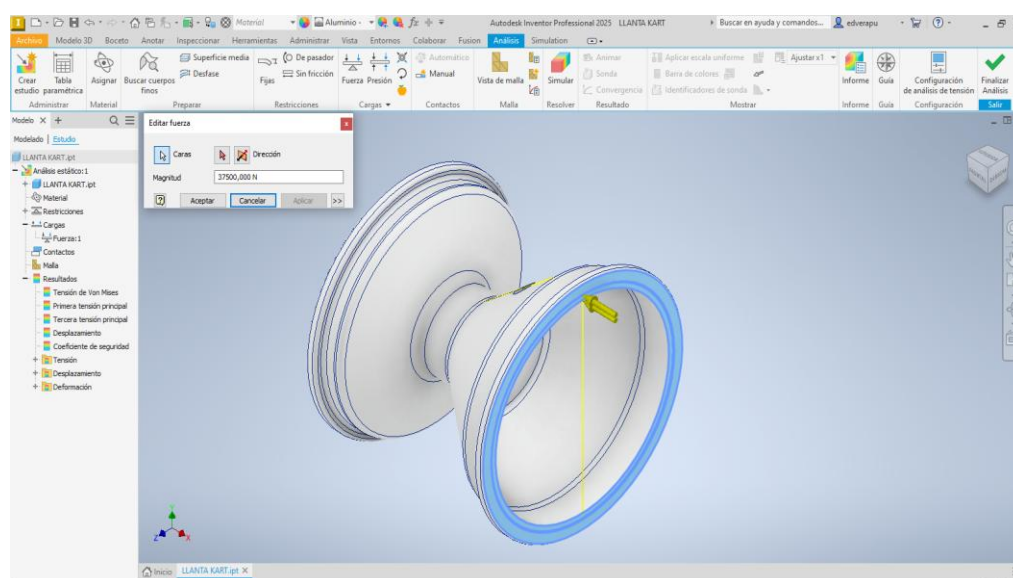
Continuando con la metodología del análisis cuasiestático, se procede a aplicar una carga lateral de 37.500 N sobre el perfil externo de la llanta delantera del kart, representando el efecto de un impacto brusco durante condiciones de competencia. Este valor fue calculado previamente en el desarrollo del documento, en el que se utilizó modelos matemáticos

basados en datos reales de este tipo de competencia como lo es el karting, como la masa total del kart y piloto, velocidades alcanzadas y ángulos de impacto, junto con coeficientes de transferencia de carga y distribución del peso.

En la figura 11 se puede apreciar de manera clara donde es aplicada la carga de manera distribuida sobre la superficie lateral de la llanta, en el área de contacto con el neumático, asegurando una representación adecuada de las condiciones reales. Esta configuración permite evaluar con mayor precisión la respuesta estructural del material (aluminio 6061) ante solicitaciones severas.

Figura 11

Carga aplicada en la llanta



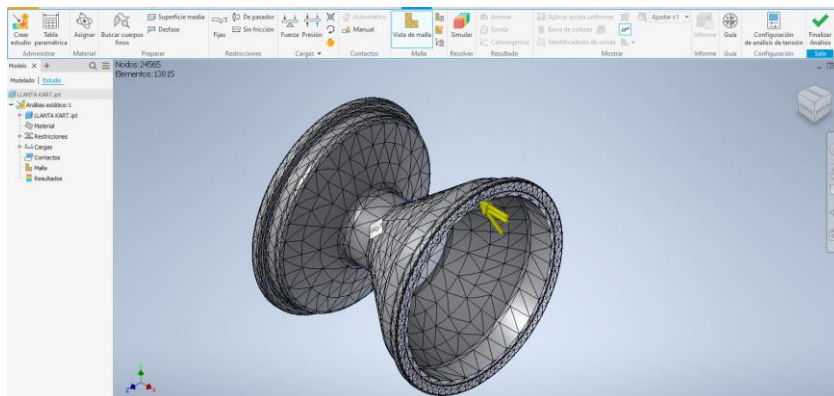
3.7. Mallado y refinamiento

Una de las fases más importantes antes de la realización de la simulación lo es la configuración de la malla el cual es un paso fundamental en el análisis por elementos finitos, ya que determina la precisión y eficiencia de la simulación de la llanta al momento de un impacto. En el presente estudio a través de Autodesk Inventor, se aplicó una malla del tipo mixta, combinando zonas con elementos más gruesos y otras con refinamiento local fino, especialmente en áreas críticas como los bordes de los orificios de fijación, zonas de contacto lateral, orificio para la válvula de inflado y puntos de concentración de esfuerzos, como se puede observar en la figura 12, se debe tener en cuenta que el proceso de mallado suele

ocupar cierta cantidad de recursos para el procesamiento y los cálculos respectivos por parte del ordenador para generar dicho mallado.

Figura 12

Generación de mallado en la llanta

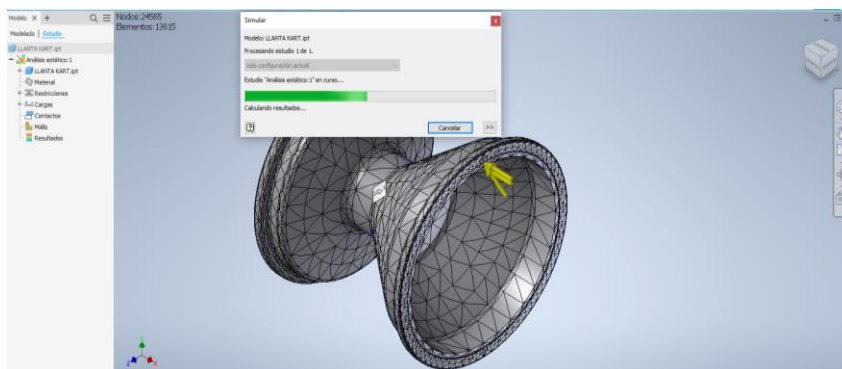


Lo que si se debe tener muy en cuenta es que las mallas gruesas ofrecen tiempos de simulación más cortos, pero pueden perder detalle o precisión en ciertas zonas con geometría compleja o alta variación de esfuerzos. Por el contrario, las mallas finas proporcionan mayor precisión en los resultados, aunque a costo de uso de mayor cantidad de recursos para el procesamiento de cálculos y por ende mayor tiempo de procesamiento.

Para el caso de la llanta, se procede a la aplicación y generación de una malla refinada en zonas sensibles y una más gruesa en áreas de baja carga, logrando un equilibrio entre exactitud y rendimiento. En la figura 13 se puede apreciar el procesamiento por parte del computador en este tipo de estrategia la cual permite una simulación eficiente sin comprometer la calidad de los resultados obtenidos.

Figura 13

Procesamiento de mallado en la llanta



3.8. Procesamiento y obtención de resultados

La fase final de la simulación lo es el procesamiento lo cual se realizó por medio de Autodesk Inventor utilizando las condiciones previamente definidas: el bocetaje en 2D con sus respectivas medidas, geometría 3D de la llanta, propiedades del material (aluminio 6061), carga de 37.500 N y restricciones de fijación en el eje central de la llanta. Una vez generada la malla y configurado el modelo de la llanta, se ejecutó el análisis cuasiestático para evaluar su respuesta estructural frente al impacto lateral.

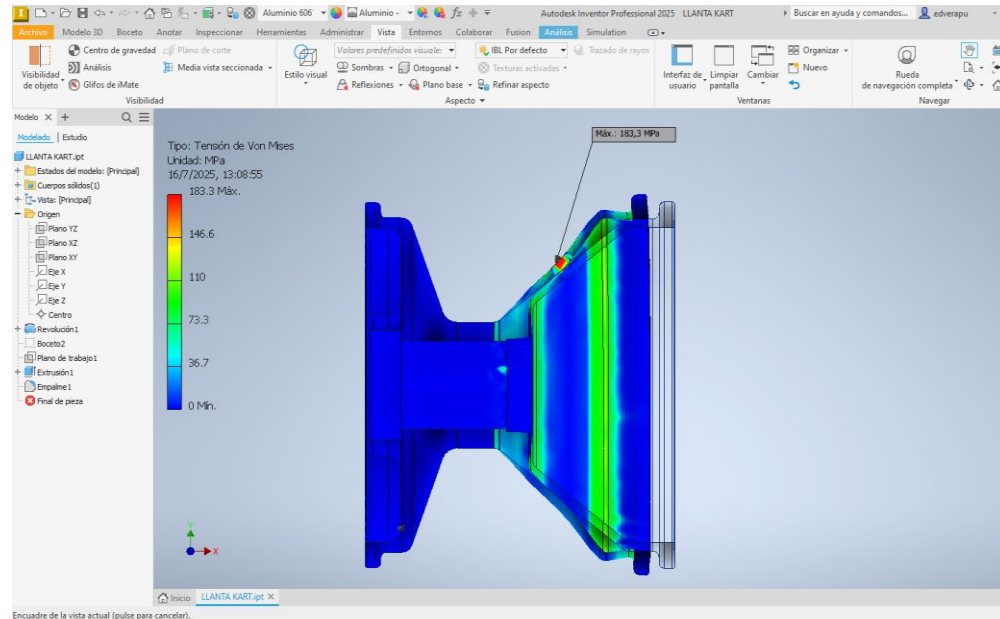
Durante este procesamiento, Autodesk Inventor calcula la distribución de esfuerzos, deformaciones, desplazamientos y coeficiente de seguridad en todo el modelo. Así mismo con los resultados obtenidos se procede al monitoreo del comportamiento en zonas críticas como el orificio de colocación de la válvula de inflado, eje de sujeción, el perfil externo y el cuerpo central de la llanta.

Los resultados obtenidos se presentan en forma de gráficos con escala de colores y con valores numéricos de esfuerzos equivalentes de Von Mises, deformaciones, mapas de desplazamiento y coeficiente de seguridad, los cuales permiten interpretar con claridad el rendimiento del diseño bajo la carga aplicada. Estos datos son esenciales para la etapa de análisis y la propuesta de mejoras estructurales, los cuales se exponen a continuación:

3.8.1. Resultados de tensión de Von Mises

En la figura 14 se puede observar de manera clara los resultados obtenidos por parte del programa computacional del análisis cuasiestático donde se muestra la distribución de tensión de Von Mises en toda la geometría de la llanta bajo la carga lateral aplicada. El valor máximo registrado fue de 183.3 MPa, concentrándose específicamente en el área del orificio donde se instala la válvula de inflado, una zona con característica geométrica circular que tiende a generar concentración de esfuerzos.

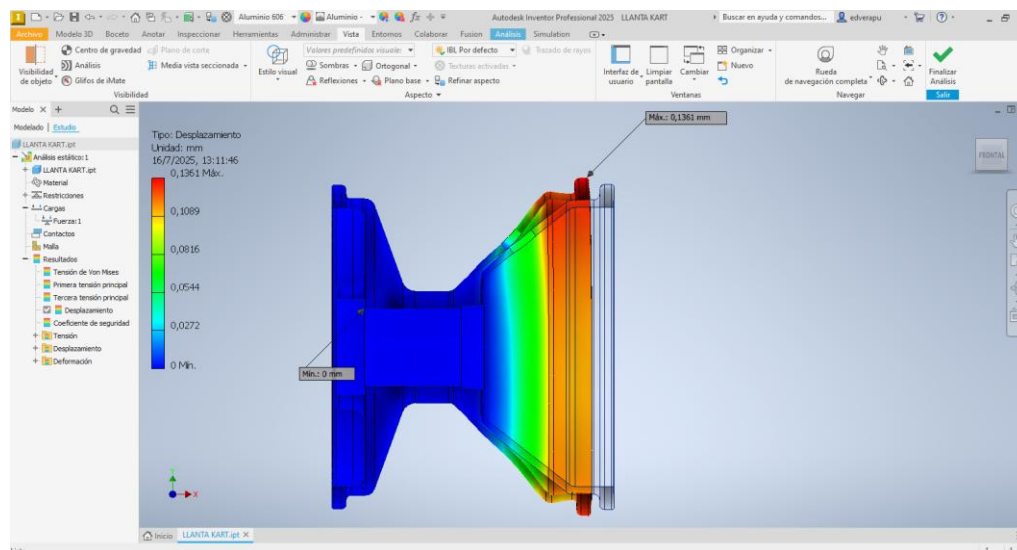
Por otro lado, se puede observar, el valor mínimo el cual es de 0 MPa, ubicado en la zona opuesta a la superficie de contacto de la llanta, donde no actúa la carga y no se generan restricciones. Estos resultados fueron representados mediante un mapa de colores que indica la magnitud de los esfuerzos en distintas zonas del modelo, facilitando su interpretación.

Figura 14**Resultado de tensión de Von Mises****3.8.2. Resultados de deformación**

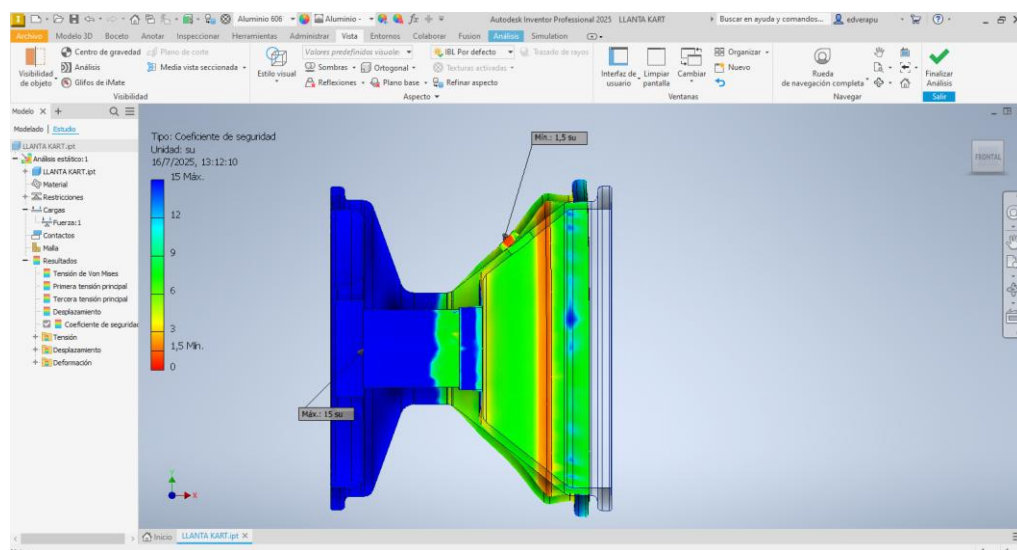
Otro de los resultados importantes es el análisis cuasiestático realizado por Autodesk Inventor, en el cual se obtuvo como solución la distribución de deformaciones en la geometría de la llanta ante la carga lateral aplicada. El valor máximo de deformación fue de 0.1361 mm, el cual se concentró principalmente en la superficie de contacto externa de la llanta, zona donde se aplicó la carga de 37500 N. Esta deformación se distribuyó desde el área de impacto hacia el centro de la llanta, siguiendo el trayecto natural de transmisión de esfuerzo dentro del material, como se puede apreciar claramente en la figura 15.

Por otro lado, el valor mínimo de deformación fue de 0 mm, registrado en la zona opuesta al punto de impacto, donde no existe aplicación de carga y se mantiene la fijación rígida del componente, lo que evita desplazamientos.

Los resultados se visualizaron mediante un mapa de colores codificado, que permite identificar de manera clara las áreas más afectadas por la deformación. Esta información es crucial para evaluar el comportamiento estructural del modelo bajo condiciones de carga extremas.

Figura 15**Resultados de deformación****3.8.3. Resultado de coeficiente de seguridad**

Finalmente, el resultado obtenido para el coeficiente de seguridad en el análisis cuasiestático de la llanta muestra una distribución variable según la zona evaluada. El valor mínimo registrado fue de 1.5, localizado en la zona adyacente a la superficie de contacto, área directamente expuesta al impacto lateral y, por lo tanto, sometida a las mayores exigencias mecánicas, como se aprecia en la figura 16.

Figura 16**Resultado de coeficiente de seguridad**

En contraste, el valor máximo alcanzó 15, correspondiente a superficies donde no se presenta deformación ni concentración significativa de esfuerzos, generalmente alejadas del punto de aplicación de la carga y en regiones con menor influencia de las restricciones.

Capítulo IV

Interpretación de resultados

Luego de obtener los resultados de la presente investigación se procede a la interpretación de los resultados los mismos que constituyen una etapa clave para transformar cada uno de los datos numéricos y cualitativos en conclusiones técnicas útiles y aplicables. En esta etapa finalmente se procede a analizar de manera crítica la distribución de tensiones de Von Mises, deformaciones y coeficientes de seguridad obtenidos mediante la simulación por el método de elementos finitos, confrontándolos con cada uno de los criterios de falla y las propiedades del material como lo fue en este caso el aluminio 6061 empleadas en el modelo de la llanta de kart.

De igual forma se hará énfasis en identificar causas físicas y geométricas de concentraciones de esfuerzo, correlacionar zonas de alta deformación con puntos de mayor riesgo posibles y diferenciar entre comportamientos locales y globales de la llanta en estudio. Asimismo, se considerarán las limitaciones del modelo, para ponderar la validez de los resultados y proponer acciones de verificación o refinamiento.

4.1. Análisis de tensiones de Von Mises

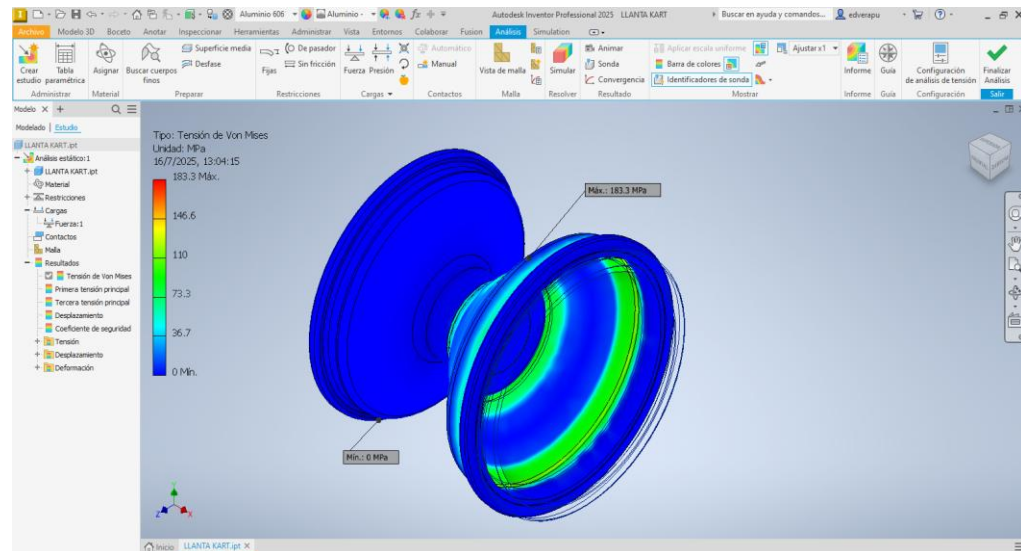
El análisis de los resultados de tensión de Von Mises obtenidos en la simulación FEM evidencia que el valor máximo alcanzado fue de 183.3 MPa, localizado en el orificio destinado a la válvula de inflado, como se aprecia en la figura 17. Esta concentración de esfuerzos se debe a la geometría local y a la proximidad con la zona de transmisión de carga, lo que genera un punto crítico en términos estructurales.

Comparado con el límite elástico del aluminio 6061 (aproximadamente 276 MPa), el valor obtenido representa un 66% de su capacidad, manteniéndose dentro de un margen seguro para condiciones normales de operación, aunque bajo cargas extremas repetitivas podría iniciarse un proceso de fatiga. Las zonas con tensiones bajas, cercanas a 0 MPa, se ubican en la parte opuesta al área de contacto, sin afectación significativa dentro de la

estructura del elemento. Estos resultados permiten identificar la necesidad de revisar o reforzar el diseño en la zona crítica para prevenir fallas prematuras.

Figura 17

Análisis de resultado de tensión de Von Mises



4.2. Análisis de deformación máxima

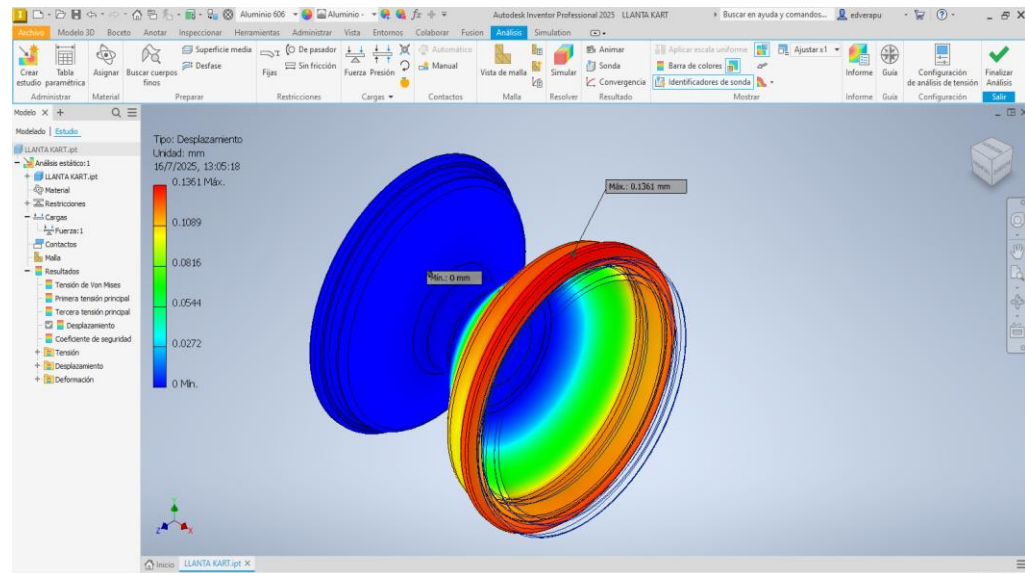
En lo concerniente al análisis de los resultados de desplazamiento máximo indica un valor de 0.1361 mm, concentrado principalmente en la superficie de contacto de la llanta expuesta al impacto lateral, propagándose hacia el centro de la pieza. Este patrón es coherente con la dirección y magnitud de la carga aplicada el cual fue de 37500 N y con las condiciones de restricción impuestas en el modelo, las cuales fijan la zona opuesta, generando un gradiente de deformación desde el punto de impacto hasta el área restringida.

Dentro del análisis se tiene en cuenta que el valor obtenido es relativamente bajo en comparación con las dimensiones generales de la llanta, lo que sugiere que la estructura presenta una buena rigidez global. Sin embargo, la concentración de la deformación en el área de contacto podría, en condiciones de impacto repetitivo, inducir fenómenos de acumulación plástica o iniciar microfisuras, especialmente si la geometría o el espesor no están optimizados, como lo es el orificio donde se aloja la válvula de inflado, esto se puede apreciar en la figura 18, la cual en cada caso de impacto puede fallar.

Estos resultados permiten confirmar que el comportamiento estructural se mantiene estable, pero invitan a evaluar refuerzos locales para mejorar la durabilidad.

Figura 18

Análisis de resultado de deformación máxima



4.3. Análisis de coeficiente de seguridad

Finalmente se realiza el análisis de uno de los aspectos de suma importancia para este proyecto el cual es el del resultado del coeficiente de seguridad por el motivo que con este resultado permite determinar si el elementos diseñado o analizado soporta estructuralmente, así como la conservación de su geometría.

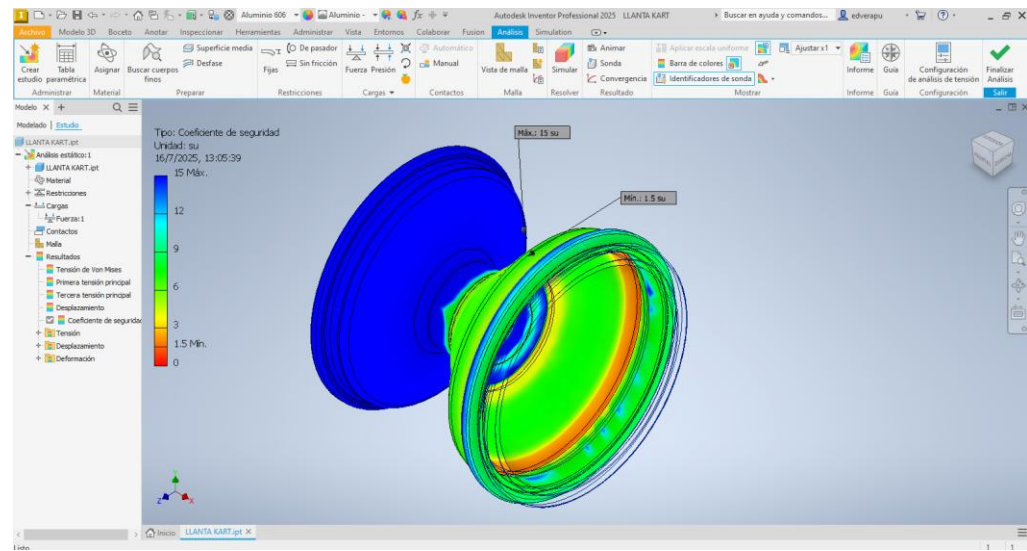
Por lo tanto, el análisis del coeficiente de seguridad muestra un valor mínimo de 1.5 en la zona adyacente a la superficie de contacto, donde el impacto genera la mayor sollicitación estructural. Este valor, aunque seguro debido a que supera la unidad (mayor a 1), indica que el margen de resistencia es reducido frente a incrementos de carga o condiciones extremas.

En contraste, se registran valores máximos de 15 en áreas donde no se presentan deformaciones ni esfuerzos significativos, evidenciando un sobredimensionamiento local, como se aprecia en la figura 19. La distribución obtenida sugiere la posibilidad de optimizar material y geometría para equilibrar resistencia y peso en el diseño.

Pero se lo considera que el diseño de la llanta aplicada en la parte delantera para un kart cumple con todas las condiciones estructurales óptimas para su desempeño en competencia y poder soportar este tipo de impactos.

Figura 19

Análisis de resultado de coeficiente de seguridad



Conclusiones

Se analizó por medio del presente estudio el comportamiento estructural de la llanta delantera de un kart ante impactos laterales en condiciones cuasiestáticas mediante el método de elementos finitos a través de programa computacional de Autodesk Inventor en los que se obtuvieron datos importantes como lo son tensiones máximas de Von Mises de 183.3 MPa, desplazamientos máximos de 0.1361 mm y el coeficiente de seguridad, determinando así la afectación de estos parámetros en el componente.

Se recopiló información técnica con la cual se pudo determinar cada una de las características geométricas y físicas que permitieron desarrollar satisfactoriamente la metodología de la simulación de la llanta de kart en condiciones cuasiestática al experimentar un impacto lateral.

También se simuló por medio del programa computacional cada uno de los detalles del elemento en estudio desde su modelado, parametrización y simulación, dando cada una de las características físicas y mecánicas a las que una llanta de kart está sometida en el momento de un impacto lateral.

Las simulaciones permitieron generar y fundamentar propuestas de mejora en la geometría de la llanta, orientadas sobre todo a optimizar su comportamiento estructural y aumentar la seguridad en condiciones de impacto lateral.

Recomendaciones

Se recomienda realizar análisis bajo diferentes magnitudes y direcciones de carga para evaluar el comportamiento estructural de la llanta en diversas condiciones de operación.

Utilizar información técnica proporcionada por fabricantes y propiedades mecánicas actualizadas para incrementar la confiabilidad de futuros modelos de simulación.

Complementar las simulaciones numéricas con ensayos experimentales que permitan validar los resultados obtenidos mediante el método de elementos finitos.

Optimizar la geometría de las zonas críticas identificadas para disminuir las concentraciones de esfuerzos y aumentar el coeficiente de seguridad de la llanta.

Bibliografía

- Bernardi, M. (2 de Septiembre de 2018). *Tkart*. [www.tkart.it: https://tkart.it/es/magazine/consejos-de-los-expertos/llantas-adecuadas-para-agarre-pista#1](https://tkart.it/es/magazine/consejos-de-los-expertos/llantas-adecuadas-para-agarre-pista#1)
- Calle, P., & Cumbe, E. (2016). *Análisis del diseño estructural y los procesos de producción de aros para vehículos livianos*. Cuanca: UDA.
- Cervera, M., & Blanco, E. (2002). *Mecánica de estructuras - Resistencia de Materiales*. Barcelona: UPC.
- Cisilino, A., Márquez, A., Fernández, E., & Mauriño, S. (2005). Análisis por elementos finitos de los nuevos elementos del sistema de suspensión y llanta del TC2000. *Mecánica Computacional*, 1459-1478.
- Colombo, J. (21 de Noviembre de 2023). *Tkart*. [www.tkart.it: https://tkart.it/es/magazine/informe/llantas-de-kart-otk-kart-group-para-tony-kart-kosmic-kart-lin-racing-kart-exprit-la-guia-de-compra-definitiva](https://tkart.it/es/magazine/informe/llantas-de-kart-otk-kart-group-para-tony-kart-kosmic-kart-lin-racing-kart-exprit-la-guia-de-compra-definitiva)
- Jorge, A., & Roa, F. (2008). *Análisis y diseño de rin para un kart*. México: IPN.
- Marcial, A., & Rosero, F. (2012). *Análisis mediante elementos finitos del sistema de suspensión de un automóvil liviano*. Quito: EPN.
- Montes de Oca, A., Ramírez, E., Ruiz, O., & Jacobo, V. (2017). Análisis de la suspensión y la estructura de un vehículo UTV mediante FEM. *UNAM*, 201-209.
- Perles, P. (2021). *Temas de resistencia de materiales*. Buenos Aires: CP67.
- Sanz, F. (2014). *Análisis de tensiones y deformaciones dinámicas en un bogie ferroviario mediante el método de elementos finitos*. Leganés: Universidad Carlos III de Madrid.