

Universidad Internacional Del Ecuador

Escuela de Ingeniería Automotriz



**Análisis por Elementos Finitos para Determinar el
Comportamiento de Distintos Tipos de Pastillas Usadas en un
Vehículo Chevrolet Aveo Emotion**

Proyecto previo a la obtención del Título de Ingeniero en Mecánica Automotriz

Almeida Arboleda Erick Enrique

Director: Ing. Alex Fernando Llerena Mena; MSc.

Guayaquil – Ecuador

Julio 2021

Universidad Internacional del Ecuador
Escuela de Ingeniería Mecánica Automotriz

Certificado

Ing. Alex Llerena Mena, MSc.

CERTIFICA

Que el trabajo titulado “Análisis Por Elementos Finitos Para Determinar El Comportamiento De Distintos Tipos De Pastillas Usadas En Un Vehículo Chevrolet Aveo Emotion”, realizado por el estudiante: Almeida Arboleda Erick Enrique, ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple las normas estatutarias establecidas por La Universidad Internacional del Ecuador, en el Reglamento de Estudiantes.

Debido a que constituye un trabajo de excelente contenido investigativo, contribuirá a la aplicación de conocimientos y al desarrollo profesional. El mencionado trabajo consta de un empastado que contiene toda la información del mismo. De igual manera, autoriza al señor Almeida Arboleda Erick Enrique, que lo entregue a biblioteca de la Escuela, en su calidad de custodia de recursos y materiales bibliográficos.

Guayaquil, 26 mayo del 2021

Ing. Alex Llerena Mena, MSc.
Director de Proyecto

Universidad Internacional del Ecuador
Escuela de Ingeniería Automotriz
Certificado y Acuerdo de Confidencialidad

Yo, Almeida Arboleda Erick Enrique, 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.

Almeida Arboleda Erick Enrique
CI: 0930475710

Dedicatoria

Dedico este trabajo principalmente a Dios por brindarme la salud y el bienestar, por haberme permitido llegar a este momento tan importante de mi formación profesional.

A mis padres quienes con sus consejos han sabido guiarme para culminar mi carrera profesional. A mi esposa e hijo que me acompañaron durante todo este arduo camino y compartir conmigo alegrías y fracasos. A mis profesores gracias por su tiempo, por su apoyo, así como por la sabiduría que me transmitieron en el desarrollo de mi formación profesional.

A mis compañeros que gracias al equipo que formamos logramos llegar hasta el final del camino.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por ser mi guía y acompañarme en el transcurso de mi vida, a mi familia quienes han puesto toda su confianza para lograr un objetivo más en mi vida.

De manera especial a mi tutor de tesis por haberme guiado, brindarme el apoyo para desarrollarme profesionalmente y seguir cultivando mis valores.

Resumen

Uno de los sistemas principales de la seguridad del vehículo es el sistema de frenado. Los frenos, al reducir la velocidad o detener en un instante al vehículo, pueden ayudar a evitar accidentes graves. Uno de los elementos más importante de este sistema son las pastillas, las cuales pueden tener distintos tipos de composiciones.

El objetivo de este proyecto es analizar el comportamiento de las pastillas de freno de un vehículo Chevrolet Aveo Emotion en distintas condiciones de frenado, siendo el coeficiente de fricción uno de los parámetros más importante para realizar este trabajo.

Para la modelación de los elementos de interés, se revisó conceptos básicos e importantes del sistema de freno de disco como modelos de fabricación o ensamble. La simulación se realiza utilizando herramientas computacionales tan versátil como lo es el software de Autodesk Inventor para el modelo CAD y herramienta CAE Nastran de Autodesk.

Con la recopilación de información, acerca de distintos materiales de fricción en distintas pastillas de freno ya sea por el fabricante o aplicación. Se realiza el modelado de las piezas involucradas en la simulación como son las pastillas y el disco. Las pastillas cerámicas y semimetálicas son seleccionadas para realizar los análisis.

Estas herramientas de software utilizadas para realizar este tipo de simulación son ventajosas ya que se puede usar los parámetros necesarios que se desean estudiar. Los resultados de estas simulaciones son analizados y comparados para determinar el comportamiento de cada una de las pastillas.

Palabras clave: CAD, CAE, FEM, Pastillas, Sistema de frenado.

Abstract

One of the main safety systems of the vehicle is the braking system. Braking, slowing down or stopping the vehicle in an instant, can help avoid serious accidents. One of the most important elements of this system are the pads, which can have different types of compositions.

The objective of this project is to analyze the behavior of the brake pads of a Chevrolet Aveo Emotion vehicle under different braking conditions, the coefficient of friction being one of the most important parameters to carry out this work.

For the modeling of the elements of interest, basic and important concepts of the disc brake system were reviewed as manufacturing or assembly models. The simulation is performed using computational tools as versatile as Autodesk Inventor software for the CAD model and the CAE tool Nastran from Autodesk.

The information about different friction materials in different brake pads, either by the manufacturer or by the application were collected. The parts involved in the simulation are modeled, such as the pads and the brake disc. Ceramic and semi-metallic pads are selected for this analysis.

These software tools used to perform this type of simulation are advantageous since you can use the necessary parameters that you want to study. The results of these simulations are analyzed and compared to determine the behavior of each of the brake pads.

Keywords: CAD, CAE, FEM, Pads, Braking system.

Índice General

Certificado	ii
Certificado y Acuerdo de Confidencialidad	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimientos	v
Resumen	vi
Abstract.....	vii
Índice General.....	ii
Índice de Figuras.....	vi
Índice de Tablas.....	viii
Capítulo I.....	1
1 Antecedentes	1
1.1 Definición del Problema	1
1.1.1 Objetivo General.....	1
1.1.2 Objetivos Específicos.....	2
1.2 Justificación y Delimitación de la Investigación	2
1.2.1 Justificación Teórica	2
1.2.2 Justificación Metodológica	2
1.2.3 Justificación Práctica.....	3
1.2.4 Delimitación Temporal	3

1.2.5	Delimitación Geográfica.....	3
1.2.6	Delimitación del Contenido.....	3
1.3	Hipótesis.....	3
1.4	Variables de Hipótesis.....	3
1.4.1	Variable Independiente.....	3
1.4.2	Variable Dependiente.....	4
Capítulo II	5
2	Marco Teórico.....	5
2.1	Introducción.....	5
2.2	Disco de Freno.....	5
2.2.1	Tipos de Discos de Frenos.....	6
2.2.2	Problema de Disco.....	7
2.3	Pastillas de Freno.....	7
2.3.1	Composición de las Pastillas de Freno.....	8
2.3.2	Material de Fricción.....	9
2.3.3	Tipos de Pastillas de Freno.....	10
2.4	Software CAD.....	10
2.4.1	Tipos de Software CAD.....	10
2.4.2	Elementos de Sistemas CAD.....	12
2.4.3	Autodesk Inventor.....	12

2.4.4	Funciones de Autodesk Inventor para el Diseño de Producto	13
2.5	Conceptos Básicos de FEM (Finite Element Method)	14
2.5.1	Formulación Matemática	17
CAPITULO III.....		23
3	Metodología	23
3.1	Método de Investigación.....	23
3.2	Fricción	23
3.3	Coefficiente de Fricción.....	24
3.3.1	Clasificación de los Coeficientes de Fricción en las Pastillas.	24
3.4	Norma INEN 2185:2012.....	26
3.4.1	Coefficiente de Fricción Normal (μ_n).	26
3.4.2	Coefficiente de Fricción Caliente (μ_c).	26
3.5	Deformación y Esfuerzo Térmico.....	27
3.5.1	Deformación por Efectos Térmicos o por Carga.	28
3.5.2	Esfuerzo Térmico	29
3.6	Comportamiento Mecánico del Disco	29
3.6.1	Propiedades Mecánicas del Disco de Freno.....	30
3.7	Comportamiento Térmico del Disco.....	31
3.7.1	Entrada de Calor en el Disco de Freno.	32
3.8	Dimensiones del Disco de Freno.	32

3.9	Dimensiones de la Pastilla de Freno	33
3.10	Fuerza de Frenado en la Rueda.	34
3.11	Modelado de Disco y Pastillas de Freno.	35
CAPITULO IV		42
4	Análisis de Resultados	42
4.1	Presión en el Pedal.....	42
4.2	Modelado de Contactos	43
4.2.1	Tipos de Contactos.....	43
4.2.2	Restricciones y Cargas	44
4.3	Tipo de Análisis	45
4.4	Mallado de los Elementos.....	45
4.5	Asignación de materiales	46
4.6	Análisis Térmico del Disco.....	48
4.7	Análisis de Resultados de las Pastillas	48
4.8	Comparación de las Pastillas Cerámicas y Semimetálicas	51
Conclusiones.....		52
Recomendaciones		53
Bibliografía.....		54
Anexo A - Planos.....		60

Índice de Figuras

Figura 1	<i>Partes del disco</i>	5
Figura 2	<i>Tipos de disco de freno.....</i>	6
Figura 3	<i>Fallas en el disco de freno por temperatura</i>	7
Figura 4	<i>Composición de material de fricción</i>	9
Figura 5	<i>Partes de una pastilla.....</i>	9
Figura 6	<i>Descripción de un modelo en 2D</i>	11
Figura 7	<i>Diseño en 3D de un objeto</i>	11
Figura 8	<i>Vista de software Autodesk Inventor</i>	13
Figura 9	<i>Procedimiento del uso del FEM.....</i>	14
Figura 10	<i>Cálculo del área circular por aproximación geométrica.....</i>	15
Figura 11	<i>Métodos de selección de elementos finitos</i>	16
Figura 12	<i>Aproximación FDM y FEM para problemas elastostática</i>	17
Figura 13	<i>Comparación de FEM, FDM, BEM.....</i>	18
Figura 14	<i>Área 2D con una red de elementos triangulares finitos.....</i>	19
Figura 15	<i>Función en un área bidimensional</i>	21
Figura 16	<i>Rangos del coeficiente de fricción.....</i>	25
Figura 17	<i>Comportamiento de la temperatura de frenado vs. tiempo.....</i>	31
Figura 18	<i>Gráfico de capacidad térmica-temperatura</i>	32
Figura 19	<i>Medidas del disco de freno.....</i>	33
Figura 20	<i>Fuerzas que actúan en las ruedas en un vehículo en movimiento</i>	34
Figura 21	<i>Desarrollo de un modelo por análisis de Elementos Finitos</i>	35
Figura 22	<i>Menú para crear la modelación de la pieza.....</i>	36
Figura 23	<i>Pantalla principal de Autodesk inventor</i>	36

Figura 24	<i>Creación de boceto 2D</i>	37
Figura 25	<i>Operaciones en 3D Autodesk Inventor</i>	38
Figura 26	<i>Modelado del disco de freno</i>	39
Figura 27	<i>Modelado de Pastilla de freno</i>	39
Figura 28	<i>Inserción de piezas</i>	40
Figura 29	<i>Unión de pastilla con el disco de freno</i>	40
Figura 30	<i>Ambiente de estudio Autodesk Inventor Nastran</i>	41
Figura 31	<i>Selección de las superficies en contactos</i>	43
Figura 32	<i>Configuración de restricción</i>	44
Figura 33	<i>Tipos de análisis empleados</i>	45
Figura 34	<i>Mallado de disco y pastilla</i>	46
Figura 35	<i>Temperatura que va a estar sometido el disco</i>	48
Figura 36	<i>Distribución de esfuerzo de von mises en las pastillas</i>	50
Figura 37	<i>Gráfica de esfuerzo a la deformación de las pastillas</i>	50

Índice de Tablas

Tabla 1	<i>Códigos que aparecen en las pastillas</i>	25
Tabla 2	<i>Código de clasificación de los materiales de fricción</i>	26
Tabla 3	<i>Propiedades del hierro fundido</i>	30
Tabla 4	<i>Dimensiones del disco</i>	33
Tabla 5	<i>Descripción de especificación de las pastillas de freno</i>	33
Tabla 6	<i>Presiones alcanzadas en el circuito hidráulico con y sin servofreno</i>	42
Tabla 7	<i>Resultados sobre las pastillas las pastillas metálicas</i>	48
Tabla 8	<i>Resultados sobre las pastillas cerámicas</i>	49
Tabla 9	<i>Comparación de pastillas cerámicas y semimetálicas</i>	51

Capítulo I

Antecedentes

1.1 Definición del Problema

El sistema de frenado del automóvil, cuando entra en acción; atenúa la energía cinética del automóvil debido a la fuerza de fricción generada al existir el contacto entre la superficie del disco de freno y el material de la pastilla. La presión de contacto entre las dos superficies de también varía en cada momento del frenado. Se puede estimar esta posición y distribución de la presión durante la aplicación del frenado, debido a que el sistema de frenos en el vehículo es uno de los sistemas más importantes en cuanto a seguridad. Los frenos, al reducir la velocidad o detener en un instante al vehículo, pueden ayudar a evitar accidentes graves.

Los elementos de fricción usados en el sistema de frenos pueden ser conformados de distintas composiciones. Dependiendo de esta composición, la eficiencia del frenado puede variar. Cabe recordar que la ciencia de los materiales es un amplio campo donde se analizan las distintas propiedades mecánicas de los materiales.

Los fabricantes se han preocupado por aumentar la seguridad de los mismos, tomando al sistema de frenos como el factor importante, ya que el mercado actual es muy competitivo y demanda conocimientos de nuevas tecnologías, es necesario obtener un cierto grado de experiencia con estos sistemas.

Este caso de estudio va enfocado a las pastillas de frenado de un vehículo Chevrolet Aveo, para determinar la eficiencia que existe en el frenado al ocupar dos distintos tipos de materiales de fricción.

1.1.1 Objetivo General

Determinar el comportamiento de las pastillas de frenado con distintos materiales de fricción mediante simulación por métodos de elementos finitos usados en un Vehículo Chevrolet Aveo Emotion para examinar la eficiencia del frenado.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Analizar los componentes y propiedades mecánicas de al menos dos tipos de pastillas mediante métodos de investigación
- Modelar el sistema de prueba para las pastillas en un software CAD (Computer Aided Design)
- Determinar el comportamiento de las pastillas usando software CAE (Computer Aided Engineering)
- Comparar los resultados obtenidos de cada pastilla mediante análisis de datos

1.2 Justificación y Delimitación de la Investigación

1.2.1 Justificación Teórica

La base teórica del trabajo se justifica en la simulación por método de elemento finitos de diferentes tipos de materiales en el sistema de freno (material de fricción), en función del diseño y material de su estructura incluyendo sus componentes anexos los cuales se tienen que incluir para realizar el proyecto.

1.2.2 Justificación Metodológica

Es idóneo la opinión de los especialistas en el área del diseño y comprobación, ya que basado en sus experiencias también se puede desarrollar la propuesta de la investigación y definir las técnicas de diseño y elaboración, así como los instrumentos en donde se recibe la información o sea el software donde se va a procesar el diseño y simulación de las pastillas de freno y mallado.

El método científico nos ayuda en el trabajo de investigación, donde visualizaremos el respaldo de la información, de datos obtenidos durante las pruebas que dieron resultados específicos. Este proceso nos guía a que las directrices investigativas sean las adecuadas, para obtener la información esperada.

1.2.3 Justificación Práctica

Este análisis lo realizaremos para comprender y obtener datos importantes sobre los distintos materiales de fricción, realizando a través de un modelado CAD y obteniendo resultados de la simulación mediante el software CAE, esta simulación nos ayudará de guía para determinar la eficiencia de los materiales de fricción. Este análisis ocupara datos provenientes de las normas ISO/INEN relacionadas con los elementos del sistema de frenado.

1.2.4 Delimitación Temporal

El trabajo se desarrollará desde el mes de noviembre del 2020 hasta mayo del 2021, lapso que permitirá realizar la investigación, así el proceso de simulación.

1.2.5 Delimitación Geográfica

El trabajo se desarrollará en la ciudad de Guayaquil, en el sector sur.

1.2.6 Delimitación del Contenido.

La información contenida en el presente trabajo está apoyada de información proveniente de libros, artículos, investigaciones y demás documentación donde se trate acerca del funcionamiento, diseño y materiales de fricción usados en el sistema de frenado. Así como los resultados obtenidos de este estudio.

1.3 Hipótesis

¿Determinar el comportamiento de las pastillas de frenado con distintos materiales de fricción mediante análisis de métodos de elementos finitos usados en un Vehículo Chevrolet Aveo Emotion, ayudará a determinar la eficiencia en el frenado de las pastillas?

1.4 Variables de Hipótesis

Es importante tener a consideración las variables presentes en la investigación.

1.4.1 Variable Independiente

- Materiales de elementos frenantes (pastillas de freno)

1.4.2 Variable Dependiente

- Eficiencia de las pastillas de freno.
- Mallado en la simulación
- Modelo CAD – Geometría

Capítulo II

Marco Teórico

2.1 Introducción

Cuando dos cuerpos entran en contacto por fricción se crea una disipación de energía y, por tanto, produce calor. Esto produce una dilación al aumentar el campo de presión. Este fenómeno aumenta si sus restricciones tangenciales y sus velocidades relativas entre los cuerpos son significativas.

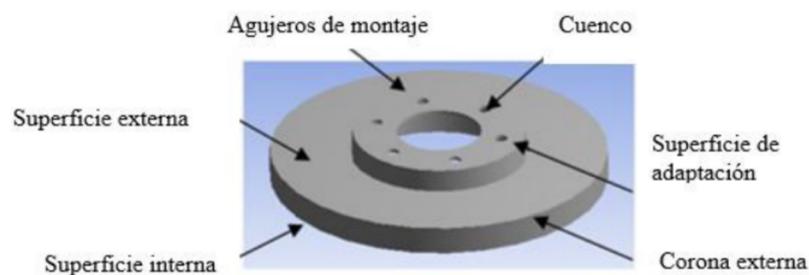
Estos efectos termodinámicos se producen en zonas ubicadas con gradientes térmicos muy altos, los puntos calientes. También encontramos deformaciones térmicas y concentraciones de tensiones, donde pueden producirse fisura, vibraciones.

2.2 Disco de Freno

Es una pieza encargada de hacer fricción suficiente para detener o disminuir el avance por completo del vehículo. El disco, como se puede observar en la figura 1; consta de un anillo macizo con dos pistas (superficie) de fricción, una cavidad que se fija a la llanta y una conexión entre la cavidad y los carriles. Esta conexión es necesaria por motivo de obstrucción y alojamiento de las pastillas y las mordazas. En efecto el disco tiende a ponerse en cono, debido a las dilataciones de las pistas más calientes, pero este desplazamiento se retiene por la presencia de la cavidad que está menos caliente y por las mordazas. Entonces de grandes concentraciones de estrés nacen en esta zona. (Juárez, 2020)

Figura 1

Partes del disco



Fuente: (Belhocine Ali F. o., 2017)

2.2.1 Tipos de Discos de Frenos

En la actualidad hay diferentes tipos de discos de freno, como se indica en la figura 2, los cuales se detallan brevemente a continuación:

- Discos sólidos: Tradicionales donde la superficie de la cara es lisa.
- Discos Ventilados: En medio de las caras que hace contacto, hay una especie de alabes que permiten entrar aire rápidamente y evacuar la temperatura generada por la fricción.
- Discos perforados: Traen una superficie perforada y evacúa eficientemente el calor.
- Discos rayados: Tienen como función limpia restos acumulados entre pastillas y disco, y no son muy eficientes para evacuar calor.
- Discos mixtos: Incorporan diferentes características de los antes mencionados, logrando equilibrio en sus cualidades de cada uno.

Figura 2

Tipos de disco de freno



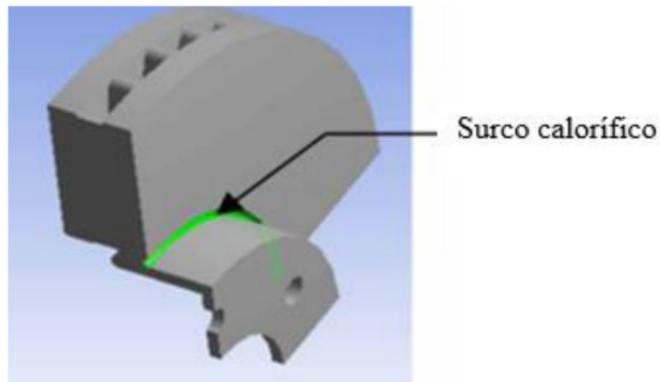
Fuente: (menna, 2020)

2.2.2 Problema de Disco

De acuerdo con los fenómenos de frenado muestra que la demanda principal proviene de las fuertes variaciones de temperatura inducidas por la fricción de las pastillas contra el disco. El cambio de temperatura en la estructura del freno de disco provoca estrés térmico y se define como efecto de la carga térmica, de hecho, la temperatura puede variar de 20° a 700° en solo unos segundos. Durante pruebas en banco dinamométrico, se puede ver aparecer grietas circunferenciales como se puede observar en la figura 3 (lado interno o lado externo del disco) que puede llegar a la ruptura brutal del cuenco. (Bayón, 2020)

Figura 3

Fallas en el disco de freno por temperatura



Fuente: (Belhocine Ali F. o., 2017)

2.3 Pastillas de Freno

Las pastillas son importantes en el sistema de frenado del vehículo ya que con ellas podremos tener la fricción necesaria sobre los discos de freno de tal forma que cuando accionamos el pedal, el vehículo disminuya su velocidad o se detenga por completo de una manera eficiente y rápida.

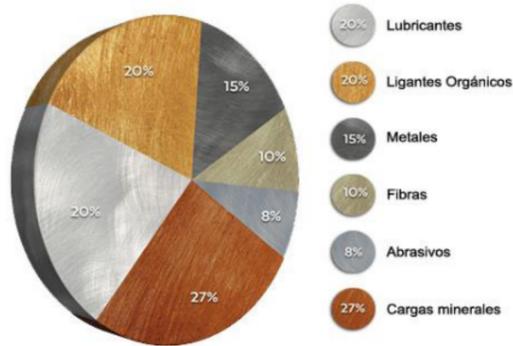
“Es fundamental que las pastillas de freno se encuentren en buen estado, ya que de lo contrario se aumentará la distancia de frenado y podrían ocasionarse derrapes indeseados.”
(Gonzalez, 2017)

2.3.1 *Composición de las Pastillas de Freno.*

Durante mucho tiempo se ha realizado transformaciones en la producción de estos elementos con diversos tipos de materiales, estas transformaciones tuvieron lugar debido a los diversos métodos de fabricación. Por el ejemplo, el amianto es un compuesto que luego de muchas pruebas y estudios se verificó que es un material dañino para la salud, aunque haya funcionado excelente en las pruebas realizadas en laboratorio.

A continuación, se detalla la composición de cada uno de los materiales de fricción, al igual que se puede observar en la figura 4 una distribución general de estos elementos.

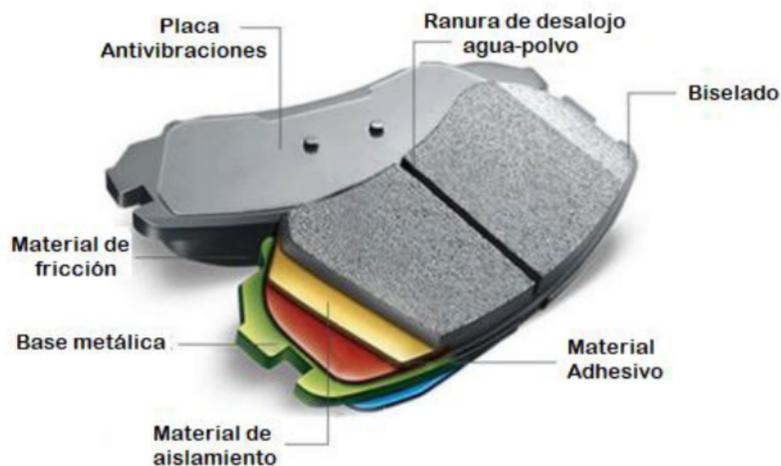
- Lubricante o modificador de cociente: Modifica el coeficiente de fricción, dependiendo de la temperatura de funcionamiento.
- Abrasivo: Aumenta el coeficiente de fricción, y su función primordial la de crear una capa intermedia, permitiendo la limpieza de la superficie del disco.
- Componente metálico: Bronce, cobre, latón u otros elementos son añadido de forma de polvo o viruta homogenizando el coeficiente de fricción.
- Fibras: Pueden ser de material sintético o minerales, son encargadas de ligar los demás componentes con sus ramificaciones.
- Material orgánico: Son de tipo resina fenólicas y termo endurecibles, también se añade tipos de ceras, caucho o aceite, cuando aumenta la temperatura fluye y lija el resto de los componentes.
- Cargas Minerales: Estos son aquellos que dan resistencia a la abrasión y a altas temperaturas de trabajo. (Mecanicos, 2018)

Figura 4*Composición de material de fricción*

Fuente: (mecánicos, 2018)

2.3.2 *Material de Fricción.*

El material de fricción se encuentra unido con un soporte mediante un adhesivo, este debe ser un material de alta resistencia térmica. Dicha unión se debe a la adhesión de materiales con remaches y taladrados, el material de fricción de las pastillas puede presentar una o varias ranuras que nos ayuda a la absorción y dilatación de los compuestos de fricción a altas temperaturas que se encuentran sometidas, además ayuda a limpiar el polvo producido por la fricción. (Azaña Moriones, 2012)

Figura 5*Partes de una pastilla*

Fuente: (Xingtai Yixuan Electronic Technology Co., 2021)

2.3.3 Tipos de Pastillas de Freno

- **Semimetálicas:** Combinación metálica en una proporción entre 30% y 60%, utilizándose por lo general polvo de hierro o cobre y lana de acero, es más duradero y permite más transferencia de calor.
- **Orgánicas:** Realizadas a partir de fibra de vidrio, caucho, kevlar y carbono, son aptas para conducción altamente exigente. Son silencioso y más suave al frenar, por su desgaste es más rápido y genera más polvo de freno.
- **Bajas en metal:** cuentan con una composición similar a las orgánicas, aunque incorporan un 10%y 30% de elementos metálicos. Proporcionan un mejor frenado y transferencia de calor.
- **Cerámicas:** utilizan fibras de cerámicas, así como agentes de unión y materiales no ferrosos, son más silenciosas y limpias, pero más caras. (motor.es, 2021).

2.4 Software CAD

El software CAD (Computer Aided Design), es un programa de diseño que se ocupa ampliamente en las distintas ramas de la ingeniería, el cual ayuda a modificar, crear, documentar, analizar u optimizar un diseño de representaciones gráficas (2D o 3D) de objetos físicos. El CAD se utiliza mucho en el diseño industrial y de productos.

2.4.1 Tipos de Software CAD

El CAD 2D es el pionero del software CAD y se desarrolló a principios de los años 70. En ese momento, las principales empresas de ingeniería del automóvil, aeroespacial y de otro tipo desarrollaron herramientas internas para automatizar los requisitos repetitivos de dibujo. El CAD 2D se basa en formas geométricas básicas como líneas, rectángulos, círculos, etc. para producir dibujos planos como se muestra en la figura 6.

El rápido avance del software 3D en la actualidad ha ayudado a acelerar el proceso de diseño de productos, dando origen al concepto de gestión del ciclo de vida del producto (PLM). (Design Tech, 2021)

2.4.2 Elementos de Sistemas CAD

- **Modelado geométrico:** Un objeto físico se puede describir de forma matemática o analítica. Cuando se diseña un modelo geométrico se utiliza comandos con los cuales se crean líneas, superficies, dimensiones, etc. Los comandos aplicados dan una representación exacta en dos o más dimensiones del objeto diseñado. La representación con líneas abarca todas las aristas del modelo, muchas veces trae confusión por lo que también puede representarse con colores para distinguir las líneas de las piezas y poder tener mejor visualización.
- **Análisis y optimización del diseño:** Luego de realizar y haber determinados la geometría, se examina el modelo virtual para verificar que no exista falla en el modelado (formas, geometrías, etc.).
- **Revisión y evaluación del diseño:** En este punto se verifica que no exista interferencia entre componentes en base a sus mecanismos en caso de que sea un cuerpo sólido. Esta etapa es muy importante, ya que nos ayuda a futuro a que no exista problema de producción sea en el armado o en el uso del objeto.
- **Documentación y dibujo:** En este punto se realiza planos técnicos, en representación de vistas de las piezas y perspectivas, esto se adjunta en la documentación en las memorias descriptivas que sean necesarias en su producción. (Olivero, 2017)

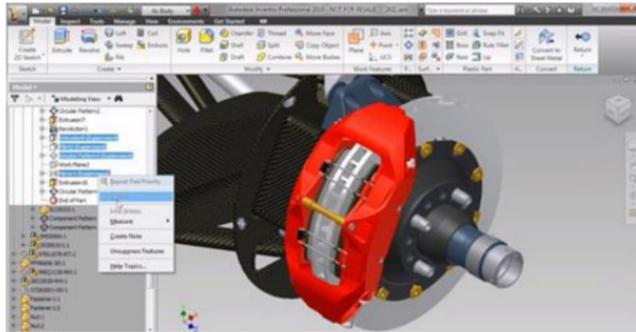
2.4.3 Autodesk Inventor

Es un software CAD inventor (figura.8), que proporciona herramientas de calidad profesional para diseño mecánico 3D, documentación y simulación de productos. Trabaja de

manera eficiente con una combinación potente de capacidades de diseño paramétrico, directo, de formas libres y basado en reglas.

Figura 8

Vista de software Autodesk Inventor



Fuente. (INVENTOR, 2021)

Este programa al ser específicos para diseños tiene opciones de acceder a funciones paramétricas, herramientas rápidas, simulador 3D, y otras diversas opciones que en otros programas CAD eran secundarias.

2.4.4 Funciones de Autodesk Inventor para el Diseño de Producto

Entre las funciones de Autodesk Inventor detalla las funciones específicas y ventajas.

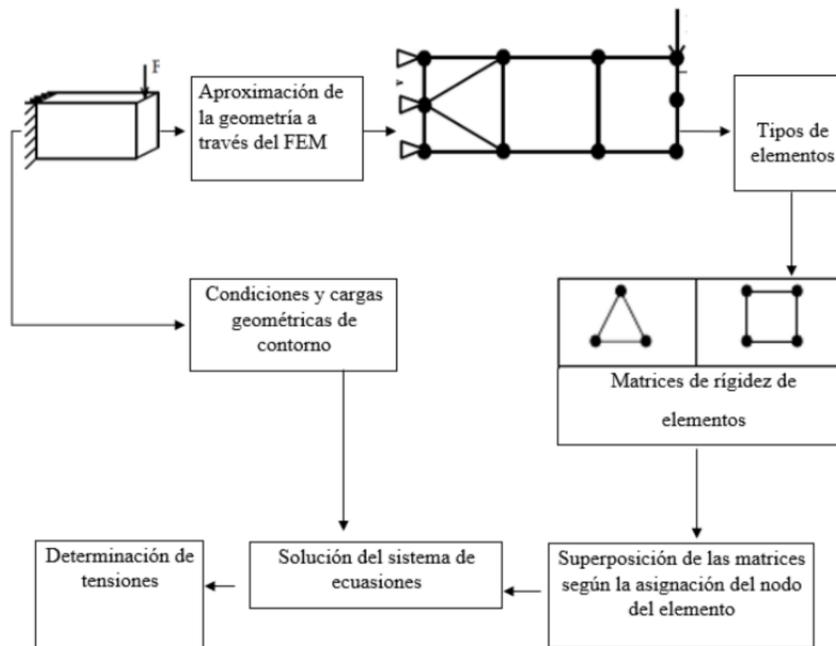
- Modelado paramétrico. -Autodesk Inventor ha trabajado constantemente en el proceso de ensambles ayudando a la inserción de componentes en específico en estructuras, dando opción a la creación de nuevos componentes en el omento de ensambles de estos, completando el diseño de los componentes, normalizados y manteniendo los estándares.
- Flujo de trabajo. - Además de pasar a un programa profesional y específico para diseño de un producto mecánico o a un diseño de producto general, es algo inevitable utilizar todas las ventajas de visualización, automatización, bocetaje. Al dar paso a la imaginación nos ayuda a una creatividad en diseño de producto, manteniendo los estándares de piezas y su geometría. (Perdomo, 2020)

2.5 Conceptos Básicos de FEM (Finite Element Method)

El FEM es una técnica computacional utilizada para obtener soluciones aproximadas de problemas de valores de frontera en ingeniería. El procedimiento que utiliza este método permite discretizar el continuo en un número finito de partes (o elementos) y enfatiza que las características del dominio continuo pueden estimarse ensamblando propiedades similares de elementos discretizados por nodos. Como resultado, este método se ha implementado rigurosamente para resolver una amplia variedad de problemas en ciencias aplicadas e ingeniería y se ha desarrollado rápidamente a lo largo de los años (Kumar & Snehashish, 2019).

Figura 9

Procedimiento del uso del FEM



Fuente. (Gabbert, 2002)

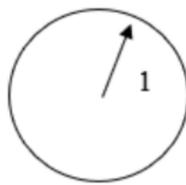
Después de que se ha creado el modelo, la geometría de la estructura se considera primero como subzonas individuales (elementos finitos) desglosadas. La viga en voladizo tratada en la Figura 9 es considerada para esta descripción, por ejemplo, como un problema de

disco plano (diseño de modelos en Corte). La superficie media de la viga en voladizo se divide en elementos finitos.

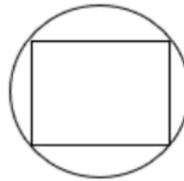
Como analogía simple, en la figura 10 se pretende calcular el área circular. Si se mira un círculo con radio $r = 1$, la solución exacta es $A = \pi$. Si se reemplaza este círculo con una n -esquina, el contenido de un círculo solo se puede aproximar con el conocimiento de la fórmula para el área de un triángulo. El área de la superficie se puede aproximar con la precisión necesaria mediante una subdivisión (malla) cada vez más fina en triángulos.

Figura 10

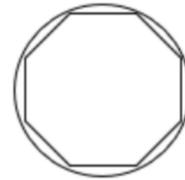
Cálculo del área circular por aproximación geométrica.



$$A = \pi$$



$$\begin{aligned} n &= 4 \\ A &= 2 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} n &= 8 \\ A &= 2.828 \end{aligned}$$

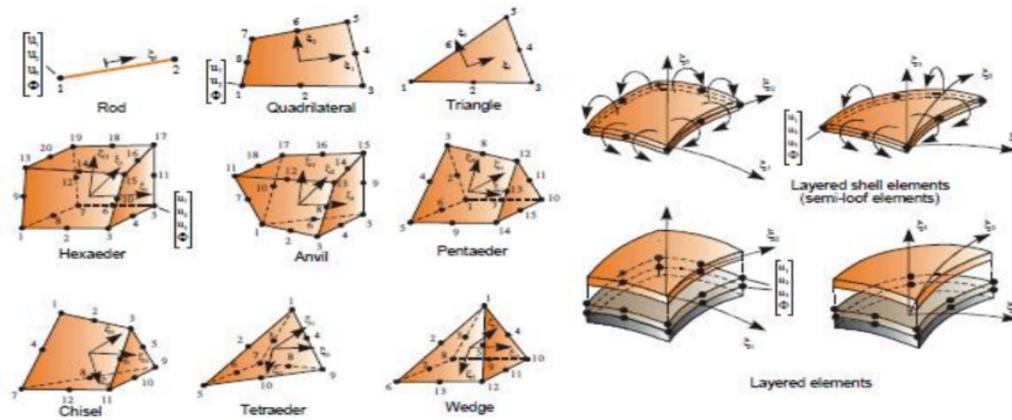
Otras subdivisiones producen: $n = 64$: $A = 3,136$; $n = 128$: $A = 3,1400$; $n = 256$: $A = 3,1412$; $n = 1000$: $A = 3,1415$

Fuente: (U.Gabbert, 2021)

El comportamiento de rigidez de la estructura general se describe mediante la suma de las matrices de rigidez de los elementos finitos individuales. Estos se agregan a la matriz de rigidez general. En relación con las condiciones de contorno geométricas y las cargas, a partir de la matriz de rigidez general resulta un sistema lineal de ecuaciones. Las cantidades desconocidas a calcular en este sistema de ecuaciones son las deformaciones en los denominados puntos nodales. A partir de las deformaciones, las tensiones se pueden calcular en cada elemento finito individual utilizando las funciones de forma.

Figura 11

Métodos de selección de elementos finitos



Fuente. (Gabbert, 2002)

Es muy importante a la hora de utilizar el FEM la selección de la malla para utilizar tipos de elementos. Se hace una distinción básica en las estructuras mecánicas con los siguientes modelos:

- Modelos de varilla
- Modelos de vigas
- Modelos de disco (modelos 2D)
- Modelos de placa
- Modelos de carcasa (modelos 2.5D)
- Modelos rotacionalmente simétricos y axialmente simétrico
- Modelos de volumen (modelos 3D)
- Modelos especiales (por ejemplo, para tuberías, carcasas de varillas, etc.)

Los diversos elementos que se requieren para el cálculo de los modelos estructurales mencionados anteriormente difieren en su geometría, el número y tipo de grados de libertad y las funciones de forma. La figura 11 muestra una selección de elementos finitos que están disponibles en el sistema de programas COSAR y otros softwares.

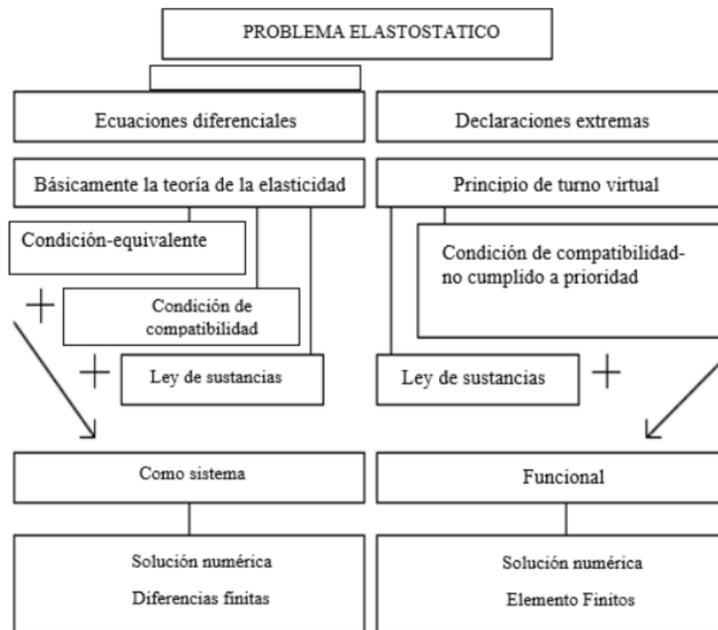
2.5.1 Formulación Matemática

La solución analítica de una ecuación diferencial que plantea un problema computacional normalmente solo es posible en casos especiales. Las dos formas esenciales para eso es una solución numérica del problema elastostática: el uso de FDM (Finite Difference Method) o el uso del FEM se muestra en la figura 12. La rama izquierda de la representación muestra la forma de resolver la ecuación diferencial y sobre la aproximación de diferencias conduce a la solución de un sistema de ecuaciones.

El método de los elementos finitos se basa principalmente en el principio de los desplazamientos virtuales. La introducción de enfoques aproximados para los desplazamientos desconocidos definidos en ciertas áreas conduce al método de elementos finitos, que también requiere la solución de un sistema de ecuaciones para calcular la incógnita.

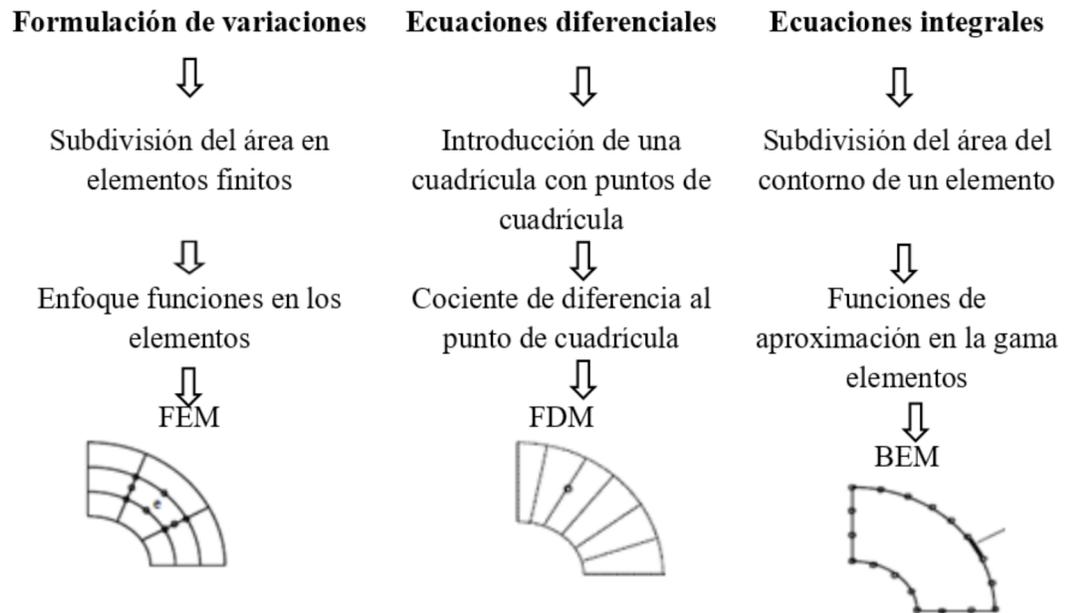
Figura 12

Aproximación FDM y FEM para problemas elastostática



Fuente. (U.Gabbert, METODO DE ELEMENTOS FINITOS, 2001)

En la figura 13, se comparan el FEM y el FDM, y aquí también el método del elemento de contorno (BEM) se menciona como otro método importante.

Figura 13*Comparación de FEM, FDM, BEM*

Fuente. (Gabbert, 2002)

Si el problema se formula en términos de los desplazamientos, se obtienen las ecuaciones de Navier, que consisten en tres ecuaciones diferenciales parciales para los tres desplazamientos en el espacio. Si se introducen las tensiones como incógnitas, se obtienen las ecuaciones de Beltrami. Una solución analítica de las ecuaciones diferenciales solo es posible para casos especiales.

En las ecuaciones de Navier las incógnitas son los desplazamientos u , v , w en cualquier punto del sólido. Estas ecuaciones expresan el equilibrio como una función del desplazamiento, las cuales se presentan a continuación:

$$X + (\lambda + G) \frac{\partial}{\partial x} (\text{div} \vec{\delta}) + G \Delta u = 0$$

$$Y + (\lambda + G) \frac{\partial}{\partial y} (\text{div} \vec{\delta}) + G \Delta v = 0$$

$$Z + (\lambda + G) \frac{\partial}{\partial z} (\text{div} \vec{\delta}) + G \Delta w = 0$$

Donde: $\vec{\delta} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$

Finalmente, las ecuaciones de equilibrio se convierten en:

$$\vec{f}v + (\lambda + G) \nabla \vec{d}(\text{div}\vec{\delta}) + G\Delta\vec{\delta} = 0$$

Así como las ecuaciones de Navier representan una relación de "desplazamiento", podemos desarrollar alternativamente una relación de "tensión", conocida como las ecuaciones de Beltrami-Michell, las cuales se presentan a continuación:

$$\begin{aligned} (1 + \nu)\nabla^2\sigma_x + \frac{\partial^2 I_1}{\partial x^2} &= 0 & (1 + \nu)\nabla^2\sigma_{yz} + \frac{\partial^2 I_1}{\partial y\partial z} &= 0 \\ (1 + \nu)\nabla^2\sigma_y + \frac{\partial^2 I_1}{\partial y^2} &= 0 & (1 + \nu)\nabla^2\sigma_{zx} + \frac{\partial^2 I_1}{\partial z\partial x} &= 0 \\ (1 + \nu)\nabla^2\sigma_z + \frac{\partial^2 I_1}{\partial z^2} &= 0 & (1 + \nu)\nabla^2\sigma_{xy} + \frac{\partial^2 I_1}{\partial x\partial y} &= 0 \end{aligned}$$

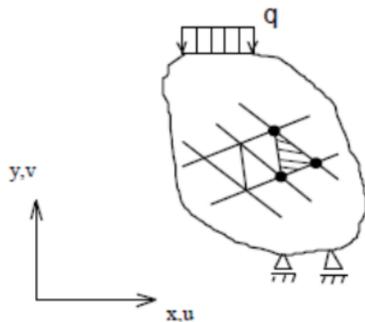
Donde $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ y $I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$ es la primera invariante del tensor de estrés.

Una vez que se han encontrado las tensiones, se puede utilizar la ley constitutiva para determinar las deformaciones y las relaciones deformación-desplazamiento para calcular los desplazamientos. (MIT, 2013)

A continuación, esta situación se lo presentará con más detalle para el FEM. Para hacer esto, consideramos cualquier área 2D (vea la Figura 14).

Figura 14

Área 2D con una red de elementos triangulares finitos



Fuente. (Gabbert, 2002)

En los triángulos de la figura 14, el estado de desplazamiento debe estar representado por un enfoque para poder aproximar. La siguiente formula se aplica a los desplazamientos en cada elemento.

$$u(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y$$

$$v(x, y) = a_4 + a_5x + a_6y$$

Una mejor aproximación para representar el estado de desplazamiento sería el uso, por ejemplo, de un polinomio de orden superior escrito para $u(x, y)$ de la siguiente manera

$$u(x, y) = [1x \ y \ x^2 \ xy \ y^2 \ \dots] \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \cdot \\ a_n \end{bmatrix}$$

Las cantidades de a_1 a a_n son los coeficientes desconocidos del enfoque. Para determinar estas incógnitas, se utiliza aquí el principio del mínimo del potencial elástico, que se puede formular de la siguiente manera:

Entre todos los desplazamientos cinemáticamente permisibles, el potencial elástico π asume un valor mínimo para la solución exacta.

Las incógnitas se determinan así de tal manera que el potencial elástico, que ha sido expresado por las funciones de forma introducidas y las incógnitas, asume un valor mínimo. Para un miembro (módulo de elasticidad E , área A , longitud l) que está cargado por una carga de volumen p , el potencial elástico es, por ejemplo:

$$\pi = \frac{1}{2} \int_l E A \left(\frac{du}{dx} \right)^2 dx - \int_l A u p dx$$

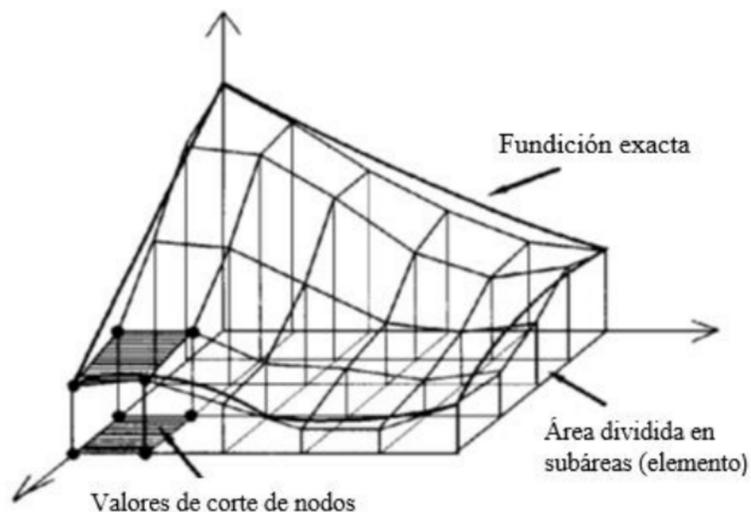
Después de insertar las funciones de forma y la integración se minimiza, es decir, se diferencia según cada a_i desconocido individualmente y el resultado se iguala a cero. El resultado es el sistema de ecuaciones.

$$\frac{\partial \pi}{\partial a_i} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n$$

En resumen, se da una ecuación diferencial o un sistema de ecuaciones diferenciales para una Función $u(x, y, z)$. El método de los elementos finitos es un proceso numérico que convierte esta ecuación diferencial, que tiene una solución continua, en una algebraica, como un sistema de ecuaciones con un número finito de incógnitas. Desde un punto de vista físico, la ecuación diferencial es una declaración de equilibrio. En vez de la ecuación diferencial se resuelve un problema de variación dual. En ella se realiza un sistema algebraico de ecuaciones. En nuestro ejemplo, el requisito mínimo de la energía potencial del sistema elástico es equivalente al enunciado de equilibrio de la ecuación diferencial. El principio de variación es una forma débil del Equilibrio, es decir, cuando se utilizan funciones de aproximación permisibles, el equilibrio solo se cumple en medida integral, pero no localmente. La función desconocida que se está buscando es aproximada por funciones de definición específicas de área, como se muestra en la figura 15, debe cumplir ciertos requisitos de continuidad y resultado de la formulación de variaciones.

Figura 15

Función en un área bidimensional



Fuente. (Gabbert, 2002)

Hay varias opciones disponibles para aumentar la precisión, por ejemplo, el método-h, método-p o método-r. Entendido por el término método h el aumento en el número de

elementos en el área de la red (h - es una medida de tamaño del elemento). Se entiende por método p el aumento del grado del polinomio y las funciones de forma en el elemento (p - es una medida del grado del polinomio). Finalmente, el método r tiene la compactación de la malla con el mismo número de elementos en áreas de altos gradientes de tensión. Los métodos individuales también se pueden combinar. El factor decisivo para la selección de un método es su influencia en el comportamiento de convergencia de la solución de elementos finitos. La disponibilidad de estimadores de errores y el uso de conocimientos a priori permiten, por ejemplo, controlar el sistema de elementos finitos de tal manera que la malla se refina automáticamente en áreas con grandes errores. (Gabbert, 2002)

CAPITULO III

Metodología

3.1 Método de Investigación

La metodología realizada en el proyecto investigativo se basó en obtener características importantes de diferentes tipos de materiales de fricción. La observación se la pudo determinar por medio de catálogos, libros, luego a eso evidenciamos físicamente el material de los ferodos de pastillas.

En lo que corresponde al método de investigación, se determina el trabajo de una investigación por modelo de simulación, debido a que los datos obtenidos serán de manera directa por la creación del modelo CAD y análisis FEM usando CAE.

Según el nivel de investigación que se desarrolló en el proyecto, desarrollaremos un tipo de investigación exploratoria, ya que, con la simulación realizada, se obtendrá datos de que ayudaran a comprender el comportamiento de diferentes tipos de materiales de fricción al momento de usar el sistema de frenos en el vehículo.

3.2 Fricción

Al tener el rozamiento entre dos materiales, se puede expresar como la calidad de frenado del vehículo, siendo, la presión, el área de contacto y el coeficiente de fricción el más importante que actúe en ello.

La fricción también se puede expresar en términos relativos de fuerza, quiere decir entre la fuerza de fricción y la carga nominal, entre las dos superficies de contacto. La fricción se puede distinguir en dos situaciones:

La Fuerza de fricción estática es importante para empezar el movimiento. Ya que si la fuerza aplicada a este valor es menor no habrá movimiento y la fuerza de fricción será igual o mayor a la tangencial aplicada.

La fuerza de fricción cinética o dinámica es la indicada para mantener el movimiento, del valor menor a la anterior. (Falasca, 2021)

3.3 Coeficiente de Fricción

Es la resistencia que tienen los materiales para deslizar con la aplicación de una fuerza normal, aquella fuerza es perpendicular al plano de trabajo, cada tipo de material el valor del coeficiente de fricción es variable y son diferentes, ya que este valor variable puede ser afectado con la temperatura. El coeficiente de fricción es la fuerza multiplicada de la mordaza de frenos para obtener la fuerza de fricción.

El coeficiente de fricción depende mucho de la temperatura, de la superficie del disco de freno y no solo de las pastillas, también podemos depender de los materiales que están en contacto, el coeficiente de fricción se encuentra normados por el INEN, las pastillas por lo general tienen unos códigos que son rangos y son representados con dos letras, una es el coeficiente en frío con temperatura de 121°C y la segunda letra es el coeficiente en caliente con una temperatura de 121°C a 315°C que es un rango del cual son diseñada. (García, 2010)

3.3.1 Clasificación de los Coeficientes de Fricción en las Pastillas.

Esta clasificación es importante, debido a la relación que tiene entre temperatura, velocidad, presión e incluso otros factores externos que tienen. Se los clasifica de la siguiente manera:

- Baja fricción EE, de un material metálico
- Media fricción EF o FE, semimetálico
- Alta fricción FF (FF se usa en repuestos originales), cerámicos
- Para competencia GG, asbesto
- Fricción industrial

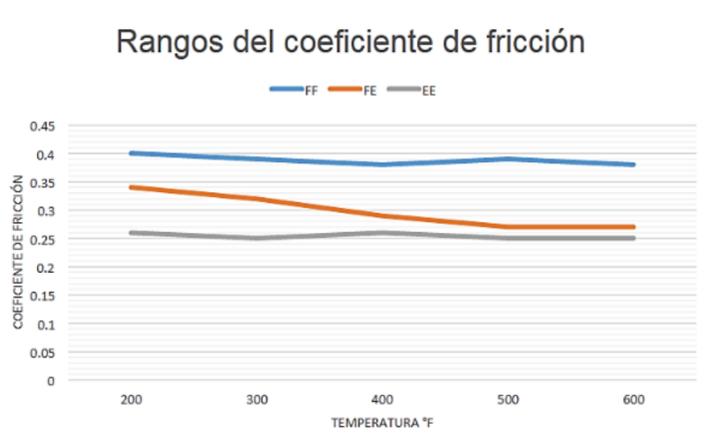
En la tabla 1 aparecen los valores del coeficiente de fricción en frío y en caliente, esto es un indicador de estabilidad de las pastillas en el frenado, se puede decir que una pastilla EE frena igual en frío como en caliente, pero una FE frenará más en frío que en caliente.

Tabla 1*Códigos que aparecen en las pastillas*

Denominación	Coefficiente de Fricción en FRÍO	Coefficiente de fricción en CALIENTE
EE	0.25 a 0.35	0.25 a 0.35
FE	0.35 a 0.45	0.25 a 0.35
FF	0.35 a 0.45	0.35 a 0.45
GF	0.45 a 0.55	0.35 a 0.45
GG	0.45 a 0.55	0.45 a 0.55
HH	0.55 a 0.65	0.55 a 0.65

Fuente. (one, 2018)

Estos rangos del coeficiente de fricción antes mencionados son importantes, también es importante observar el comportamiento del este coeficiente en distintos ambientes y condiciones de temperatura como muestra la figura 16, esto garantiza seguridad y eficiencia en las pastillas de freno.

Figura 16*Rangos del coeficiente de fricción*

Fuente. (High Power Brake, 2021)

3.4 Norma INEN 2185:2012

Esta norma establece los requisitos que debe cumplir y los ensayos a los cuales debe someterse el material de fricción empleado en los sistemas de freno de los vehículos automotores.

Los materiales de fricción se clasifican de acuerdo con el coeficiente de fricción (μ) y en base a la letra del código establecido. Este código de clasificación de los materiales de fricción se puede observar en la tabla 2.

La designación del material de fricción se realiza de acuerdo con dos caracteres establecidos en el código, la primera letra representa el coeficiente de fricción normal (μ_n), ver numeral 3.4.1, y la segunda representa el coeficiente de fricción en caliente, ver numeral 3.4.2.

Tabla 2

Código de clasificación de los materiales de fricción

Letra del código	Coefficiente de fricción
C	$\mu \leq 0,15$
D	$0,15 < \mu \leq 0,25$
E	$0,25 < \mu \leq 0,35$
F	$0,35 < \mu \leq 0,45$
G	$0,45 < \mu < 0,55$
H	$\mu > 0,55$
Z	Sin clasificación

Fuente. (INEN, 2010)

3.4.1 Coeficiente de Fricción Normal (μ_n).

Es la media aritmética de cuatro valores obtenidos de la gráfica de control en la máquina Fast a 93°C, 121°C, 149°C y 204°C.

3.4.2 Coeficiente de Fricción Caliente (μ_c).

Es la media aritmética de cinco valores obtenidos en cinco puntos a 149°C, 204°C, 232°C, 260°C, 293°C.

3.5 Deformación y Esfuerzo Térmico

Deformación es un cambio de tamaño o forma de un material ya sea por una fuerza externa o temperatura. Es importante poder calcular en un diseño mecánicos la magnitud de deformación.

Para calcular la deformación de un material, el cual este sometido a fuerzas axial o a tensiones, debemos tener en cuenta conceptos básicos, la deformación unitaria podemos relacionarla como la relación entre deformación inicial y la deformación total, esto dará la deformación de un material sometidos a compresión axial o tensiones.

La fórmula de deformación unitaria la podemos definir de esta manera:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L}$$

Donde:

ε = Deformación Unitaria.

L = Longitud inicial.

δ = Deformación Unitaria.

La rigidez de un material es en base a la función de su elasticidad E definida así:

$$E = \frac{\text{esfuerzo}}{\text{deformación}} = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Al realizar la ecuación para la deformación unitaria obtenemos:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

Igualamos las ecuaciones:

$$\frac{\delta}{L} = \frac{\sigma}{E}$$

Resolución para la deformación obtenemos:

$$\delta = \frac{\sigma L}{E}$$

En estas fórmulas se aplican elementos sometidos a fuerzas directas de compresión, entonces para calcular el esfuerzo $\sigma = F/A$, donde F es la carga aplicada y A es el área de la sección del elemento.

$$\delta = \frac{\sigma L}{E} = \frac{FL}{AE}$$

Esta fórmula nos ayuda a obtener resultados como la deformación total de un elemento de carga siempre y cuando cumpla con las condiciones de esfuerzo y compresión, es decir, un elemento recto y se sección transversal: que el material sea homogéneo, la carga directa axial y el esfuerzo menor al límite proporcional del material. (el valor proporcional es aproximado a la resistencia de la cedencia). (MOTT, 2021)

3.5.1 Deformación por Efectos Térmicos o por Carga.

Las propiedades de los materiales pueden variar con la temperatura. En la mayoría de los casos que se usa la temperatura o esfuerzo en materiales vamos a depender de las propiedades físicas o mecánicas en la cual pueden ser sometidos y podría ser deformadas.

Algún material o componente que esté en funcionamiento pueden estar sufriendo algún cambio de temperatura, este cambio de temperatura es el cual hace producir deformaciones en el componente, puede ser una deformación axial o térmica. Si la deformación es controlada no puede presentar deformación sino un esfuerzo. (Canet, 2012)

La temperatura en un componente puede ocasionar que el material sufra cambio en sus dimensiones, ya que si la temperatura aumenta el material se dilata o si disminuye se contrae. Frecuentemente un componente empieza a trabajar con temperatura ambiente posterior comienza a calentarse a medida que va trabajando; ejemplo componentes de motor, etc.

A medida que un componente se caliente se expande, las dimensiones aumentarán, pero no se genera ningún esfuerzo, ya que hay casos piezas que restringe, lo que impide que cambien sus dimensiones. El coeficiente de expansión térmico es el punto donde rige la deformación y el esfuerzo térmico del material.

3.5.2 Esfuerzo Térmico

Las piezas estructurales que se encuentran sometidas a variaciones de temperatura se encuentran libres, de manera que pueden contraerse o dilatarse, si el componente está bien sujeto e impidió la deformación del material, entonces se generarían esfuerzos, provocando un aumento o disminución de sus dimensiones entre puntos de su estructura, este efecto de la deformación es relacionado por los elementos de contacto con el elemento dilatado, el cual a producido fuerzas adicionales en los elementos por el efecto térmico. Deformación unitaria:

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} = \frac{\alpha \cdot L \cdot \Delta t}{L} = \alpha \Delta t$$

El esfuerzo resultante se encontrará a través de esta fórmula:

$$\sigma = E\epsilon \rightarrow \sigma = E\alpha\Delta t$$

3.6 Comportamiento Mecánico del Disco

En los discos de freno, debido a su constante esfuerzo de trabajo al que se encuentra sometidos, a la tensión o a la deformación de esfuerzos térmicos. Se genera dos tipos de fuerzas, de tracción y de compresión.

La fuerza de compresión se genera a través del contacto de las pastillas de freno, es un movimiento perpendicular al disco de freno, siendo accionadas por el pistón de la mordaza de freno, que es actuado por el líquido a presión, que viene del cilindro maestro.

La segunda fuerza generada es la de tracción que es la resultante de la fuerza de frenado, dicha fuerza es aquella generada entre las pastillas de freno y el disco, el cual es una tracción opuesta a la del movimiento rotatorio del disco, y la cara que no tiene contacto es arrastrada en sentido de giro del disco.

El esfuerzo de tracción es de 10 a 20 MPA, puesto que la resistencia a la tracción de fundición es de 200 MPA, este esfuerzo es repartido en toda la superficie de las pastillas de

freno, el aumento de temperatura reduce el límite de ruptura, es por eso es un factor primordial para el diseño de un disco de freno. (Cueva E. C., 2018)

3.6.1 *Propiedades Mecánicas del Disco de Freno*

Generalmente el material del disco es de hierro fundido gris, pero identificando con un conjunto de aleaciones ferrosas, que se solidifican con un eutéctico. En presencia de un 95% de hierro, y los demás elementos principales de aleación son el carbono y el silicio. La cantidad requerida de carbono en el hierro fundido es el 2.1 al 4 % y las cantidades permisibles de silicio normalmente es del 1 al 3%, estas aleaciones son denominadas ternarias Fe-C-Si. En este componente el grafito se encuentra presenta de forma de escama. Por lo que comúnmente los discos de freno de un material llamado hierro fundido gris. (Alvisvlad, Marianovich, Quintana, & Sarmiento., 2017). La tabla 3 muestra las propiedades físicas y mecánicas de la fundición de hierro gris.

Tabla 3

Propiedades del hierro fundido

Propiedades mecánicas del hierro fundido	
Nombre	Hierro fundido
Tipo de modelo	Elástico lineal isotrópico
Fuerza de fluencia	2.75742e+0.008 N/m ²
Fuerza de tensión	4.13613e+0.008 N/m ²
Módulos elásticos	1.9e+0.11 N/m ²
Coefficiente de Poisson	0.27
Densidad de masa	7300 kgg/m ³
Módulo de corte	5.6e+0.10N/m ²
Conductividad térmica isotrópica	W/mC
Calor específico	447 J/KgC

Fuente. (YENIER & Gunaydin, Facultad de Ingeniería Mecánica , 2019)

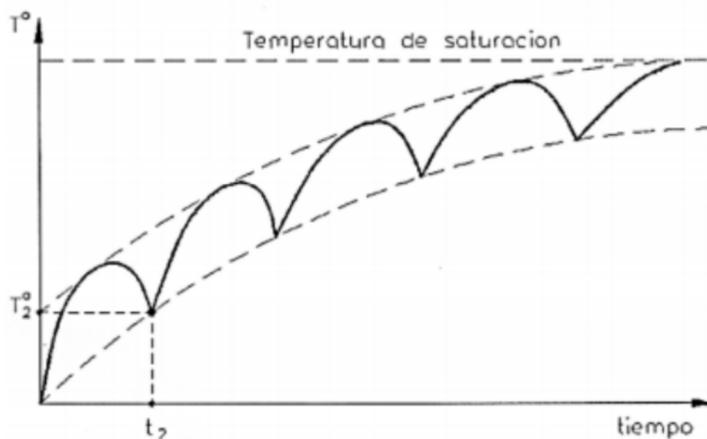
3.7 Comportamiento Térmico del Disco

En el disco se crea una transformación de energía cinética en calor, durante el frenado. Entonces al haber fricción, hay temperatura y en altas temperaturas y en periodos de frenado se generan puntos calientes en el disco de freno en un 95%, estos puntos calientes pueden provocar deformaciones.

Durante los periodos de tiempos de frenado, la temperatura puede alcanzar el límite máximo llamado temperatura de saturación, pero es un proceso. Dicho proceso consta de una serie de frenado, debido que comienza con una temperatura inicial ambiente y constantemente aumenta de acuerdo con la cantidad de frenado en el disco. Así mismo la temperatura disminuye hasta llegar a la temperatura inicial, la temperatura inicial no siempre será la misma, porque necesita haber pasado un cierto periodo de tiempo. Entonces el frenado que se presenta en distintos tiempos es menor al periodo antes descrito, la temperatura inicial es mayor y llega alcanzar una mayor temperatura, hasta llegar a la temperatura de saturación como se muestra en la figura 17. (Carpio, 2018)

Figura 17

Comportamiento de la temperatura de frenado vs. tiempo



Fuente. (Cueva D. E., Universidad Politecnica Salesiana, 2021)

3.7.1 Entrada de Calor en el Disco de Freno.

Al existir el contacto entre la pastilla y el disco de freno se produce y se distribuye el calor por conducción y aumenta la temperatura del disco y la podemos calcular mediante la siguiente ecuación:

$$C_p m_{\text{disc}} \frac{dT}{dt} = Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}}$$

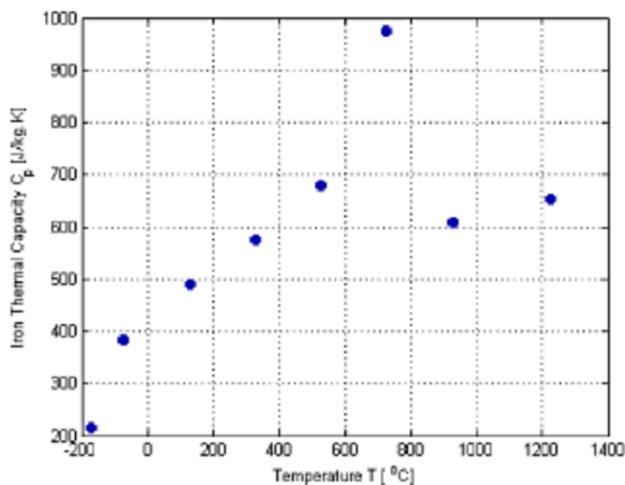
La entrada de calor en Q es causada por el par de frenado está dada por:

$$Q_{\text{in}} = \sigma \cdot T_{\text{brake}} \cdot \omega$$

La capacidad térmica de un disco de freno depende de la temperatura, En la figura 18 se muestra la dependencia que existe entre la temperatura de la capacidad térmica del hierro.

Figura 18

Gráfico de capacidad térmica-temperatura



Fuente. (Yenier & Gunaydin, 2019)

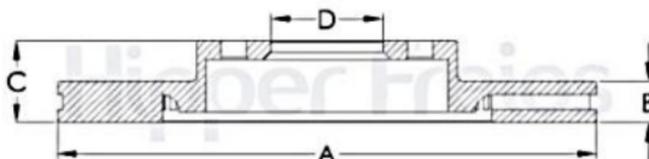
3.8 Dimensiones del Disco de Freno.

Los discos de freno deben tener una revisión constante, debido a la fricción que están sometidos, al realizar el reemplazo de las pastillas de freno se debe rectificar o el reemplazo de los discos de freno, ayudando a un mejor asentamiento, reducción de chirrido, cuando se realice una rectificación en los discos de freno no debe sobrepasar el límite máximo de las especificaciones del fabricante y tampoco realizar ninguna modificación fuera del área de

contacto con las pastillas. En la figura 19 y en la tabla 4 podemos identificar las dimensiones del disco de freno del Aveo Emotion. (Bosch, 2016)

Figura 19

Medidas del disco de freno



Fuente. (Disproauto, 2021)

Tabla 4

Dimensiones del disco

Descripción	Parámetro	Dimensión
Diámetro eterno	A	256,00 mm
Espesor de la pista	B	24,00 mm
Espesor mínimo de la pista	TH	22,00 mm
Altura total	C	41,00 mm
Diámetro del orificio central	D	60,00 mm
Cantidad de orificios	E	4

3.9 Dimensiones de la Pastilla de Freno

Las pastillas de freno no hay un kilometraje de reemplazo, pero si debemos controlar este componente cada 20.000 km, este desgaste va a depender de las frenadas bruscas y el tipo de conducción, cuando están desgastadas se produce un chirrido al frenar. En la Tabla 5 podemos describir las especificaciones de las pastillas de freno del Aveo Emotion. (MARCELA, 2020)

Tabla 5

Descripción de especificación de las pastillas de freno

Descripción	Dimensión
Espesor	16.50 mm
Longitud total	140.00 mm
Altura	55.00 mm

3.10 Fuerza de Frenado en la Rueda.

Para las fuerzas generadas durante el frenado y la fuerza aerodinámica necesitamos una fuerza que sea por lo menos igual a la suma de todas las fuerzas de las ruedas, éstas son producidas durante la rotación de las ruedas. Esta fuerza requerida es como:

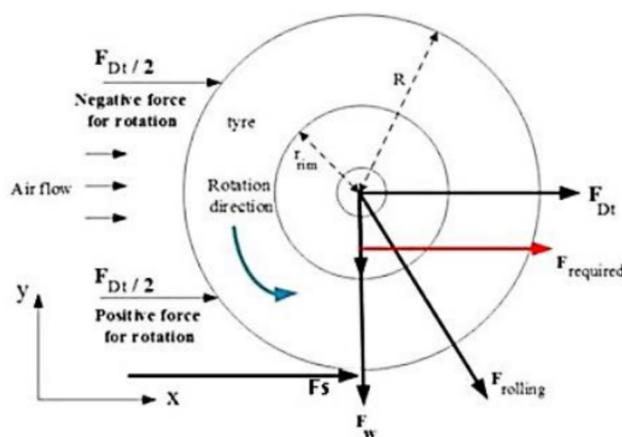
$$F_{requerida} = F_{si} + F_{rodadura} + F_D$$

Donde, F_{si} es la fuerza inercial equivalente durante la aceleración (N), F_D es la fuerza de arrastre total, y $F_{rodadura}$ es la resistencia a la rodadura. Existe 2 tipos de fuerzas de arrastre, una es el arrastre de translación en el eje (x). La rueda al ser simétrica tiene dos fuerzas una positiva y la otra negativa (resistencia) en estas 2 fuerzas llega a tener dos efectos que son: igualdad y oposición, teniendo una condición estática y otra que el par resultante en el eje de la rueda se vuelva cero.

La fuerza de fricción del frenado aumenta debido a las variaciones de velocidad del vehículo y el coeficiente de fricción también varía de acuerdo con las condiciones de la carretera, ya que en condiciones de lluvia las ruedas no se detendrían en el asfalto y la distancia de frenado es más larga que en condiciones normales.

Figura 20

Fuerzas que actúan en las ruedas en un vehículo en movimiento



Fuente. (YENIER & Gunaydin, 2019)

A continuación, se detalla las fuerzas que actúan sobre la rueda del vehículo, de igual manera se puede observar estas fuerzas en la figura 20.

F_{si} = Fuerza inercial equivalente durante la aceleración.

F_w = Carga del peso del vehículo hasta las ruedas.

F_{Dt} = Carga de la fuerza de arrastre traslacional.

$F_{rolling}$ = Resistencia a la rodadura.

F_d = Fuerza de arrastre total, incluye los arrastres de traslación y rotación.

$F_{required}$ = Fuerza neta requerida.

R = Radio de la rueda.

R_{min} = Radio de disco.

V = velocidad.

3.11 Modelado de Disco y Pastillas de Freno.

Para tener el modelo real, o el modelo físico simplificado, se debe tener en cuenta las propiedades físicas, mecánicas y geométricas de estos elementos. En base a estos parámetros y asumiendo un material homogéneo e isotrópico se realiza el modelado siguiendo los pasos detallados en la figura 21. Hay que recordar que no se debe colocar geometrías que puedan interferir en la simulación o tener efectos no deseados sobre los resultados.

Figura 21

Desarrollo de un modelo por análisis de Elementos Finitos



Fuente. (Harún, 2006)

Al crear el modelado del disco de freno y pastilla, una vez abierto el software Autodesk Inventor, empezar dando clic en la pestaña “Nuevo”. Luego que se abre una nueva ventana,

dar clic en el tipo de archivo que se va a crear el modelo en tres dimensiones. Las piezas serán diseñadas a partir del archivo “Normal (mm).ipt” como se muestra en la figura 22.

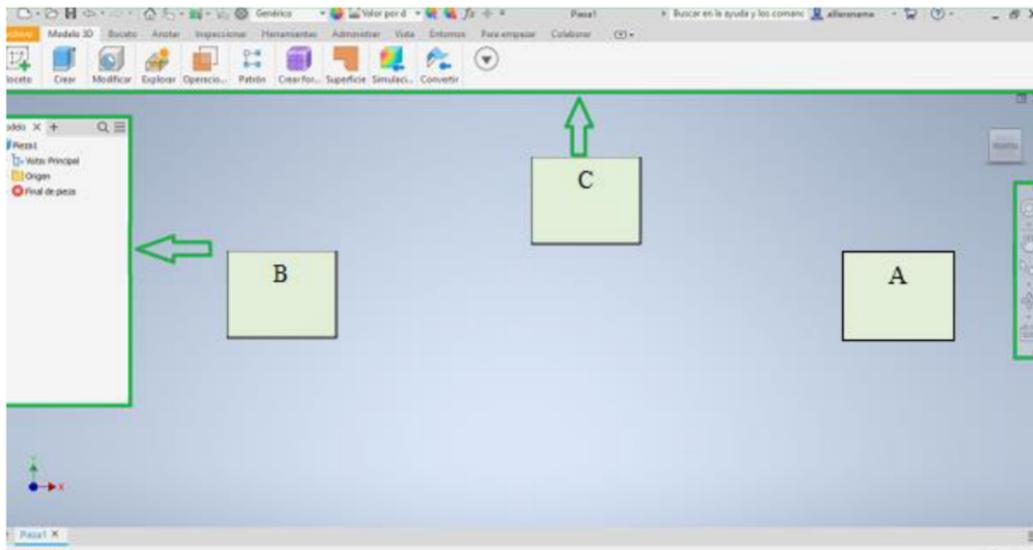
Figura 22

Menú para crear la modelación de la pieza



Figura 23

Pantalla principal de Autodesk inventor



La sección A en la figura 23. Es la parte más grande del interface, donde se interactúa directamente con el modelo. En la esquina izquierda se encuentra un triedro indicando cada dirección principal señalado por un color distinto.

La sección B de la figura 23, es una zona muy importante para el manejo del diseño, esta sección ofrece la lista y secuencia de operaciones que se están realizando en el modelado de la pieza, como los bocetos u operaciones realizadas en la creación del disco o las pastillas.

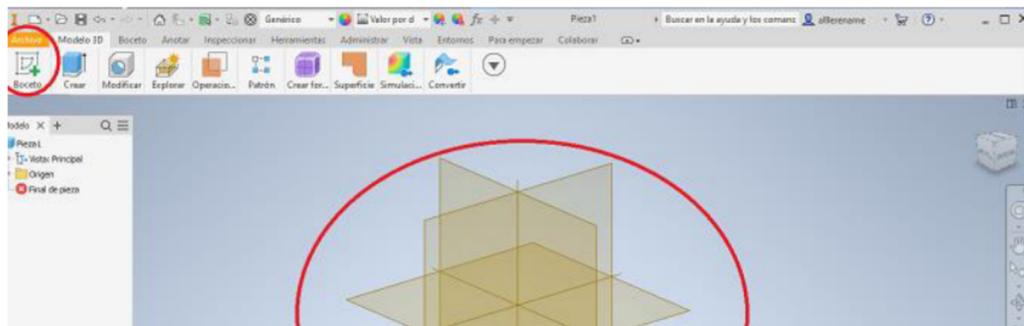
La sección C de la figura 23, está dividida en 2 apartados. En el primer apartado superior, es la zona que nos permite guardar o abrir el archivo. El segundo apartado inferior es

propio del trabajo que se está realizando en las piezas del disco o pastilla, ya que estas son herramientas que corresponden al trabajo activo. Se presentan en distintas pestañas, donde cada una ofrece distintas opciones para interactuar con el software y lograr el modelado final.

Al realizar el modelado de las piezas en Autodesk Inventor, se empieza a realizar bocetos para definir perfiles y rutas. Iniciando con un boceto en 2D, el cual nos permitirá elegir un plano sobre donde queremos plasmar el boceto. (Mario, 2016)

Figura 24

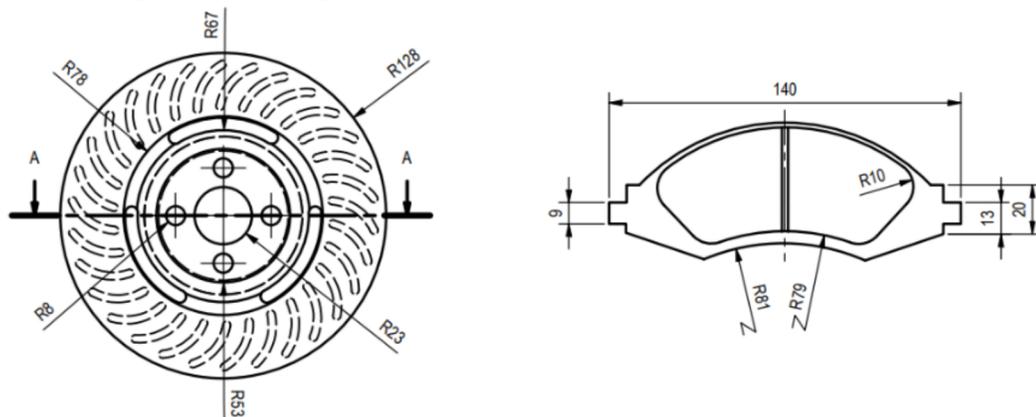
Creación de boceto 2D



Luego se procedió en aplicar la geometría a los bocetos 2D, como se muestra en la figura 24, para posteriormente generar la pieza tridimensional con las medidas establecidas previamente. En la figura 25 se puede apreciar las medidas usadas en los bocetos usados para el disco y la pastilla. En el Anexo A: T-AP-001 y T-AP-002 se puede identificar a detalle las dimensiones, escalas y parámetros usados en esta modelación.

Figura 25

Medidas usadas para el disco y pastilla



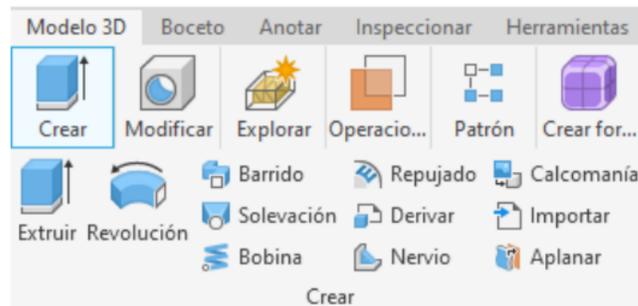
Algunas operaciones, tales como chaflanes, empalmes o vaciados ya son operaciones definidas en donde no se utiliza un boceto para realizar dichas operaciones. En las operaciones de bocetos se puede unir, cortar o intersecar con otras operaciones.

Las combinaciones de operaciones que se utilizó para el modelado de las piezas, es precisamente para crear piezas más complejas, las restricciones y cotas son utilizadas en la creación del modelado. No se puede dejar sin acotar, porque puede existir un cambio de dimensiones dentro del boceto de ciertas partes de la geometría dentro del boceto.

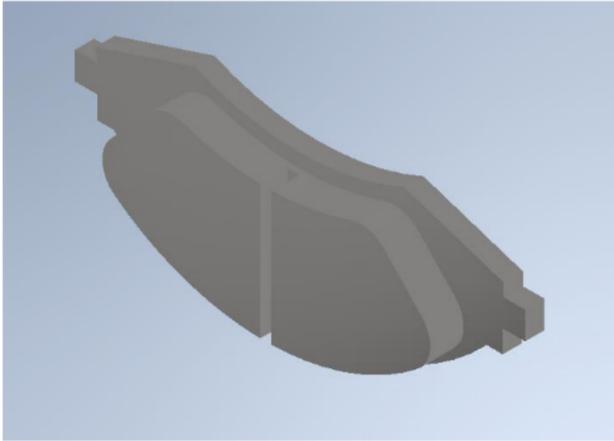
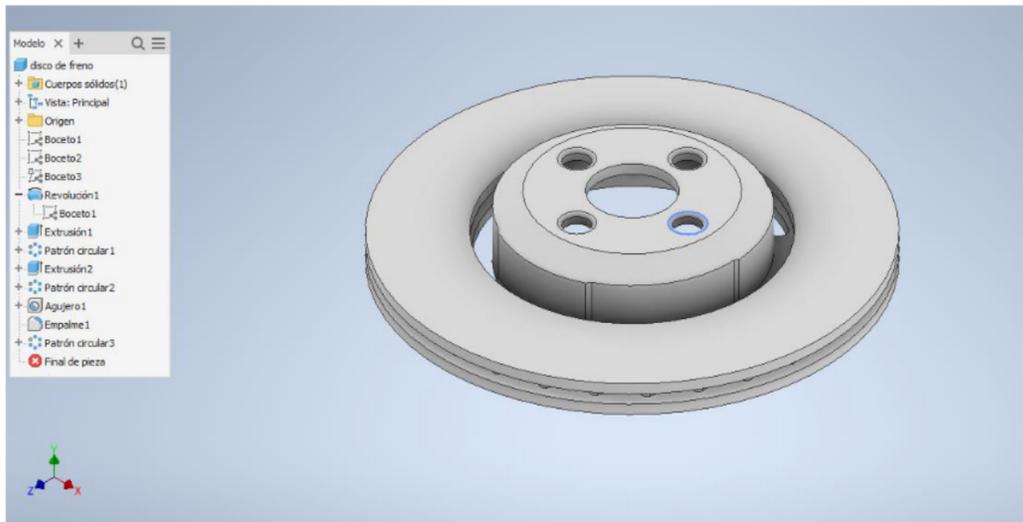
Una vez terminado y restringido el boceto, se pulsa “terminar bocetos”, icono situado en la parte derecha de la barra de herramientas. Culminado este proceso podemos aplicar las operaciones necesarias de modelado en 3D que tiene este software, las cuales se pueden observar en la figura 26.

Figura 26

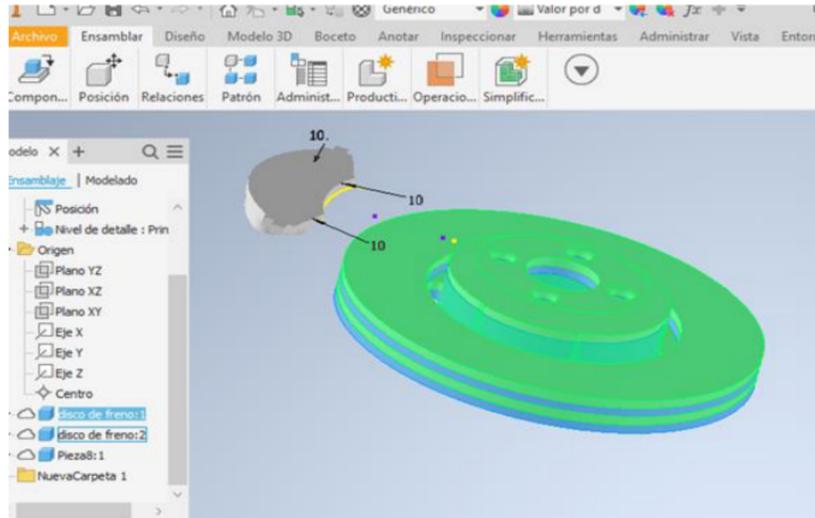
Operaciones en 3D Autodesk Inventor.



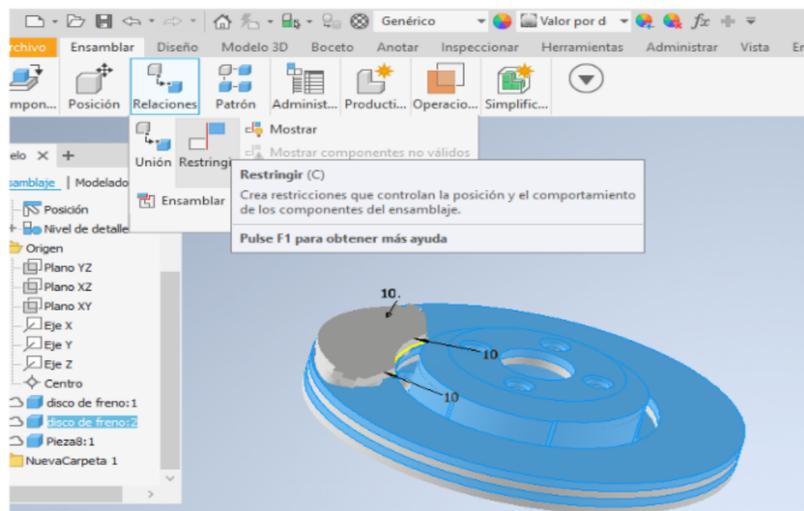
Una vez concluida la modelación, la geometría esta completa. Teniendo como resultado el modelo del disco mostrado en la figura 28 y la pastilla en la figura 27. Luego se procede a realizar el ensamble, que es una compilación de piezas y subensamblajes, los cuales pueden constar de dos o más piezas, que funcionan como una sola unidad. Todos estos elementos están conectados mediante relaciones de ensamblaje que son las que controlan la colocación de los componentes y los grados de libertad.

Figura 27*Modelado de Pastilla de freno***Figura 28***Modelado del disco de freno*

Una vez iniciado el ensamble, es necesario importar las dos piezas de nuestro estudio. Para introducir la pastilla de freno al disco, dar clic en “insertar” y seleccionar la ubicación donde se guardó el archivo. Una vez insertado los dos elementos, como se puede observar en la figura 29, se procede con el siguiente proceso que es realizar las restricciones de movimiento en estas dos piezas.

Figura 29*Inserción de piezas*

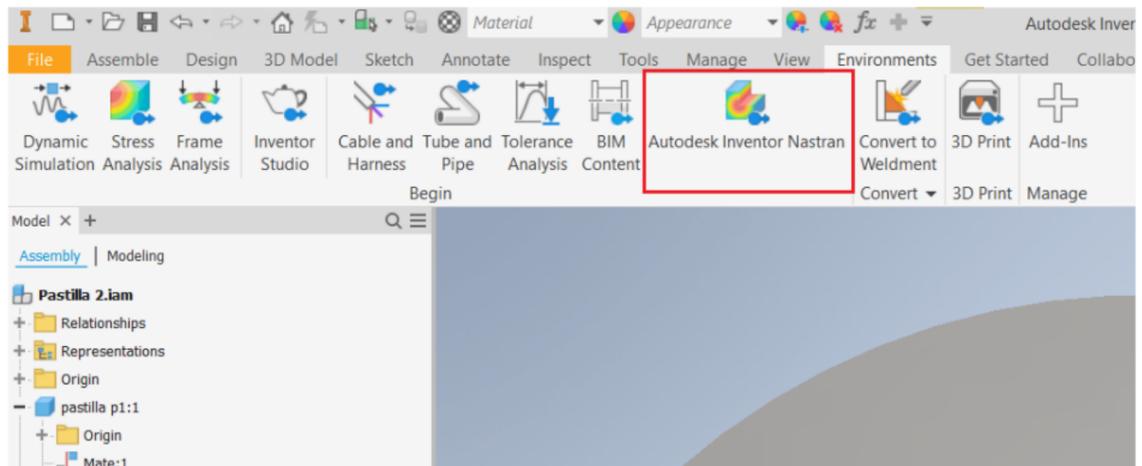
En la figura 30 se puede apreciar las restricciones usadas en el sistema disco pastilla, para unir las piezas para lo cual se identifica la barra de herramienta, la pestaña de relaciones, y luego el icono “restringir”. Se realiza una restricción de contacto la cual se bloquea el movimiento en los ejes x y z , pero en el y no se realiza ninguna restricción, debido a que en el modelo la pastilla irá presionada en contra del disco para lo cual necesita tener libertad de movimiento en dicho eje.

Figura 30*Unión de pastilla con el disco de freno*

Al haber terminado la modelación CAD, se inicia con el siguiente proceso que es el análisis por el método de elementos finitos usando el software CAE, Nastran de Autodesk, el cual puede interactuar directamente como un complemento de Inventor tal y como se puede apreciar en la figura 31. Cabe mencionar que este software CAE debe ser instalado previamente para que pueda funcionar sin inconvenientes en Inventor. Se ocupa las licencias estudiantiles ofrecidas por Autodesk, en los dos softwares ocupados para este estudio.

Figura 31

Ambiente de estudio Autodesk Inventor Nastran



CAPITULO IV

Análisis de Resultados

4.1 Presión en el Pedal

El esfuerzo que se realiza en el pedal sería muy fuerte si no existiera el servofreno, ya que la presión ejercida sería alcanzada solamente con la fuerza de pie. Sin embargo, en la actualidad se cuenta con el servofreno. Es un componente que ayuda a multiplicar la fuerza aplicada en el pedal. En la tabla 7 se describe las presiones alcanzadas mediante el uso progresivo de la fuerza en el pedal, así como las presiones en el sistema hidráulico con y sin servofreno.

Tabla 6

Presiones alcanzadas en el circuito hidráulico con y sin servofreno

Fuerza sobre el pedal (Kg)	Presión en el circuito con servofreno (MPa)	Presión en el circuito sin servofreno (MPa)
0	0	0
10	3.0	1.3
20	6.5	2.4
30	10.4	3.4
40	11.8	4.4
50	13.0	5.3
60	14.0	6.3
70	15.0	7.5
80	16.0	8.6
90	17.0	10.0
100	18.0	11.3

Fuente. (Ingemecanica, 2021)

El servofreno funciona con el vacío generado en el colector de admisión del motor, el servofreno no solo aumenta la presión en el circuito, sino que además permite una mejor dosificación en el frenado. (Motor, 2020)

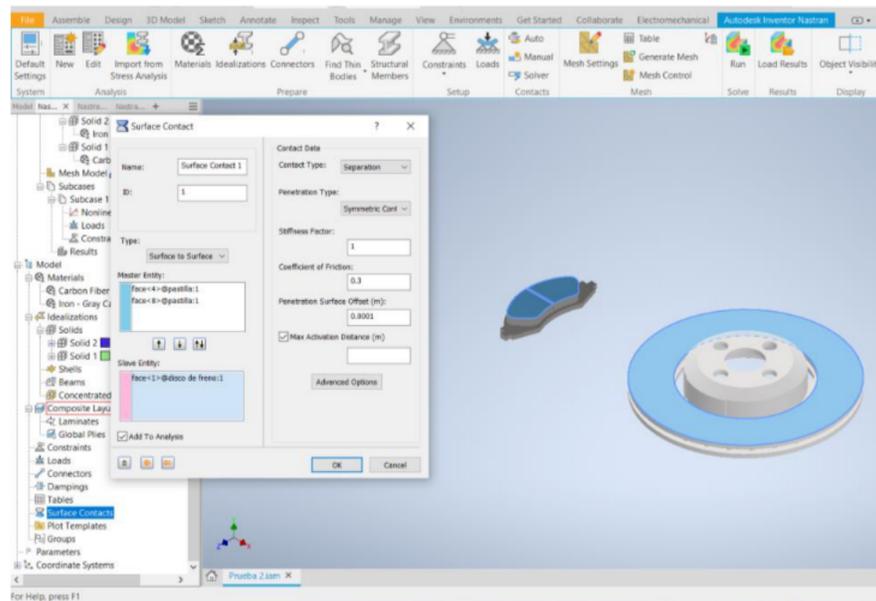
4.2 Modelado de Contactos

Los contactos se utilizan para definir las restricciones de movimiento, así como las relaciones de movimiento existentes entre los elementos, como se muestra en la figura 32. Como en el caso del trabajo entre las pastillas y el disco de freno, una parte es fija y el otro componente en relación de trabajo tiene movimiento rotatorio que sería el disco.

Para ejecutar un cálculo de contacto automático damos clic opción Automático en el panel o bien si requerimos la opción manual podemos realizarlo de la misma manera en el panel. En este estudio se usa los contactos de manera manual, estableciendo contactos entre superficies y de fricción.

Figura 32

Selección de las superficies en contactos



4.2.1 Tipos de Contactos

El tipo de contacto por *separación* se trata de un contacto de superficie a superficie y permite el deslizamiento y la apertura entre las entidades en la ubicación del contacto. Incluirá efectos de fricción.

El contacto *vinculado*, hace que los dos elementos reaccionen de la misma manera en la ubicación del contacto. En la ubicación del contacto, la pareja no puede separarse, ni los elementos pueden moverse entre sí.

El contacto de *deslizamiento/sin separación* en tensión y compresión, permite el deslizamiento a lo largo de la cara de contacto, pero no se permitirá que las piezas se separen.

El contacto por *separación/sin deslizamiento*, permite que las entidades pueden separarse en tensión y compresión, pero no pueden deslizarse entre sí.

El contacto de *compensación* se utiliza para simular conexiones soldadas con una separación significativa entre las superficies en contacto. Funciona para el contacto de borde a superficie, típico de lo que vería con modelos de carcasa o modelos de superficie intermedia. (Autodesk, 2021).

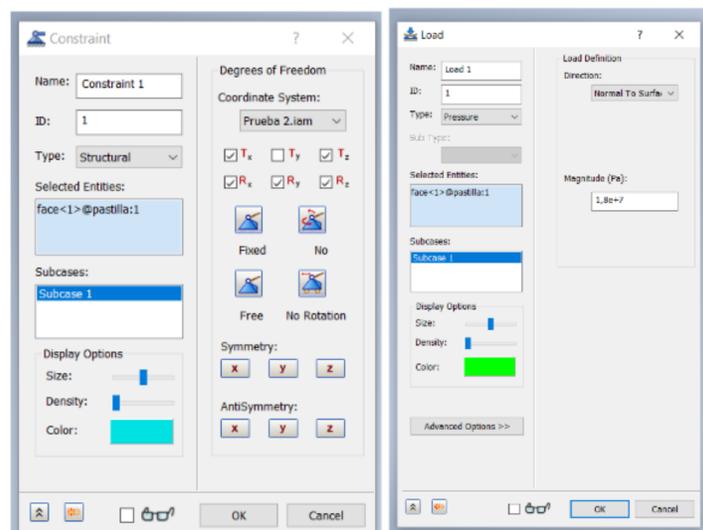
El disco de freno y las pastillas están ensambladas por medio del cáliper, pero al existir una fricción entre ambas se produce temperatura.

4.2.2 Restricciones y Cargas

La configuración de restricciones y de cargas, se realiza en base al modelo previamente establecido, como se puede observar en la figura 33.

Figura 33

Configuración de restricción

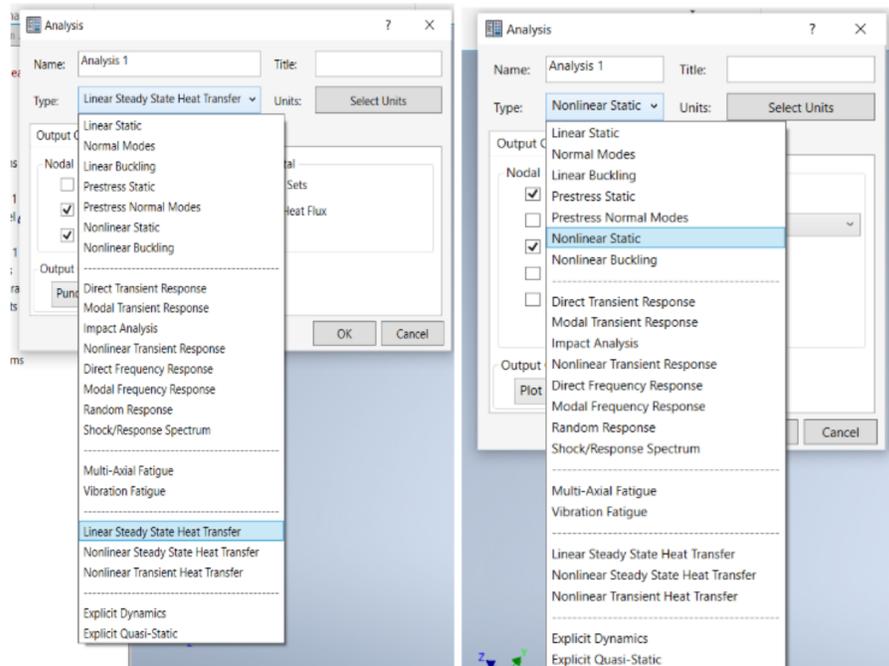


4.3 Tipo de Análisis

Se usan dos tipos de análisis. El análisis lineal de estado estable de transferencia de calor, el cual entrega los datos del disco y el análisis estático no lineal que entregara los datos de las pastillas, esta configuración se puede observar en la figura 34.

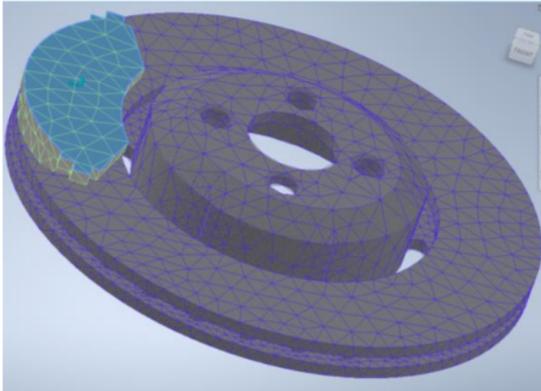
Figura 34

Tipos de análisis empleados



4.4 Mallado de los Elementos

El mallado es importante al momento de realizar la simulación. Los resultados de la simulación dependen del mallado. Con una malla gruesa se tendrá una convergencia muy rápida, pero con resultados con alta incertidumbre. Sucede lo contrario con una malla fina, se tendrá una respuesta con un mínimo de incertidumbres, pero el tiempo de simulación para encontrar la solución será muy largo. En la figura 35 se puede observar el mallado de los elementos. Donde cada pastilla tiene un aproximado de 6340 nodos.

Figura 35*Mallado de disco y pastilla*

4.5 Asignación de materiales

Para la simulación del disco se tomó los datos de las propiedades físicas y mecánicas que se muestran en la tabla 3. Por lo cual se selecciona el como material para la simulación del disco una fundición de acero gris ASTM A48 grado 30 el cual si se encuentra en la librería de materiales de Inventor. Para la asignación de materiales para las pastillas se usa la información de las tablas 7 y 8, los cuales no se encuentran disponibles en la librería de Inventor, por lo cual se procede a la creación de estos.

Tabla 7*Propiedades del material de la pastilla de freno de cerámica*

Propiedad	Unidades de medida	Magnitud
Densidad	Kg/m ³	1600
Módulo elástico	GPa	7e+10
Relación de Poisson	-	0.1
Máxima resistencia a la compresión	GPa	1,9e+8
Temperatura máxima de uso (sin carga)	°C	1750
Conductividad térmica	W/mK	8
Calor específico	J/gK	1,123

Fuente: (Babasaheb, 2018)

Tabla 8

Propiedades del material de la pastilla de freno semimetálicos

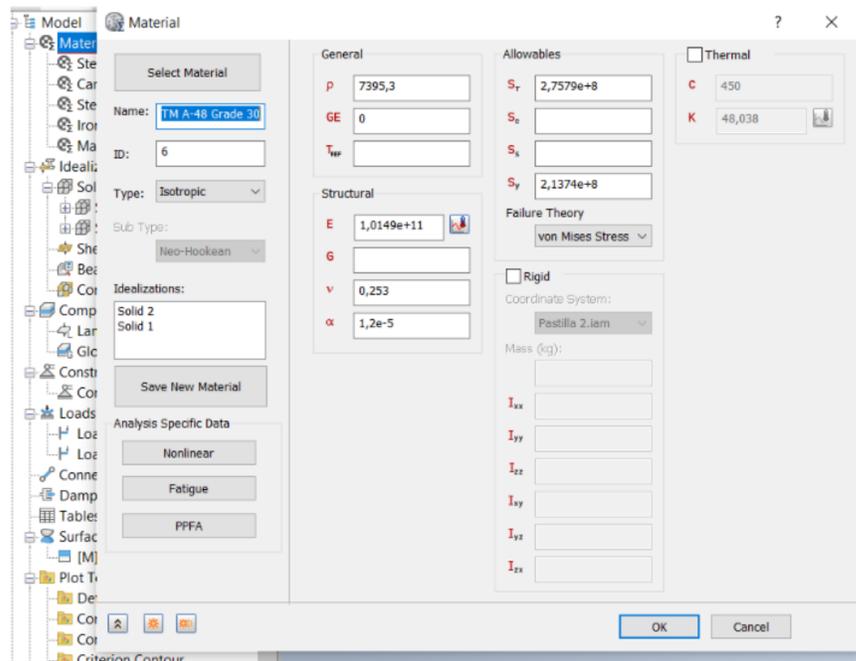
Propiedad	Unidades de medida	Magnitud
Densidad	Kg/m ³	1940
Módulo elástico	GPa	2,07e11
Relación de Poisson	-	0,32
Coefficiente expansión térmica	GPa	9e-6C ⁻¹
Temperatura máxima de uso (sin carga)	---	---
Conductividad térmica	W/mK	0,539
Calor específico	J/gK	1344

Fuente: (LOAYZA, 2017)

La creación de estos materiales se debe realizarlo dentro de la extensión NASTRAN de Inventor, debido a que este complemento es el que realiza el análisis, como se muestra en la figura 36. Se crean los materiales de las pastillas usando los datos de la tabla 7 y 8.

Figura 36

Creación de material para las pastillas

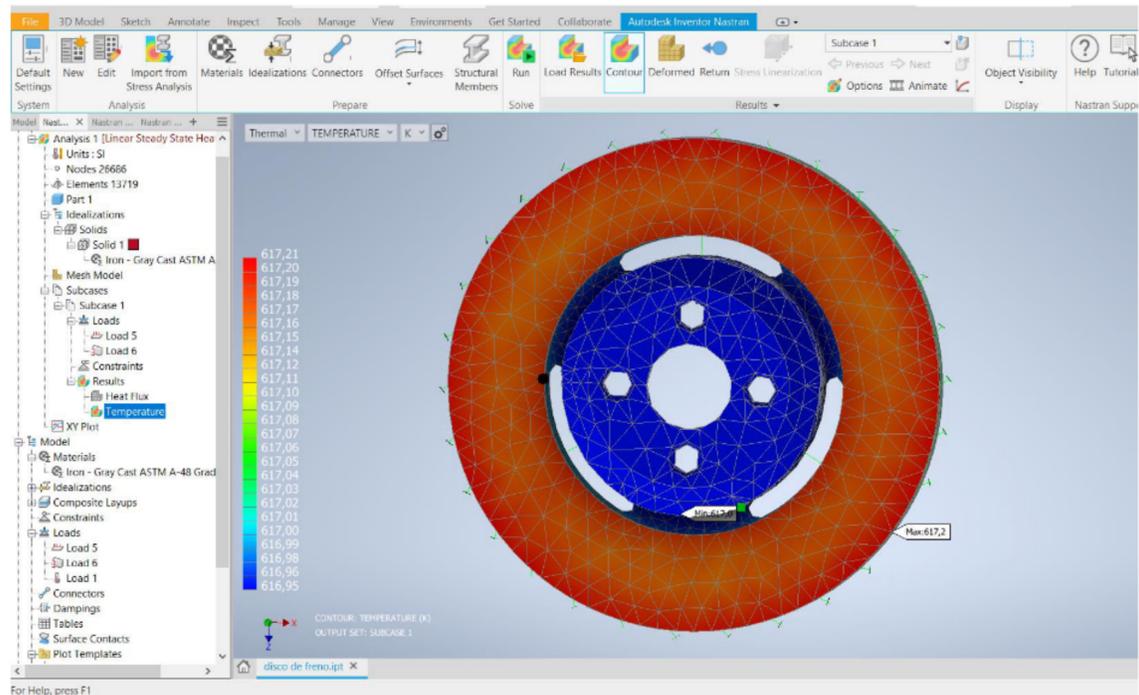


4.6 Análisis Térmico del Disco

Se tiene el resultado del análisis lineal del estado estable de transferencia de calor, una temperatura máxima de 617°K la cual se puede apreciar en la figura 37, bajo condiciones de frenado extremas. Sin embargo, el enfoque de este estudio son las pastillas, donde el comportamiento de los materiales de fricción es de alto interés para este estudio.

Figura 37

Temperatura que va a estar sometido el disco



4.7 Análisis de Resultados de las Pastillas

Para el estudio de las pastillas se realizan múltiples simulaciones bajo distintas condiciones obteniendo los resultados mostrados en las tablas 7 y 8.

Tabla 9

Resultados sobre las pastillas las pastillas metálicas

Fc (N)	Esfuerzo - Von Misses (MPa)	Deformación (m)
3670	2,7	2,60E-05
3404	2,5	2,41E-05
3138	2,3	2,20E-05

2872	2,11	2,03E-05
2606	1,92	1,84E-05
2340	1,72	1,66E-05
2074	1,52	1,47E-05
1808	1,33	1,28E-05
1542	1,13	1,09E-05
1276	0,93	9,04E-06
500	0,3	3,54E-06

Tabla 10

Resultados sobre las pastillas cerámicas

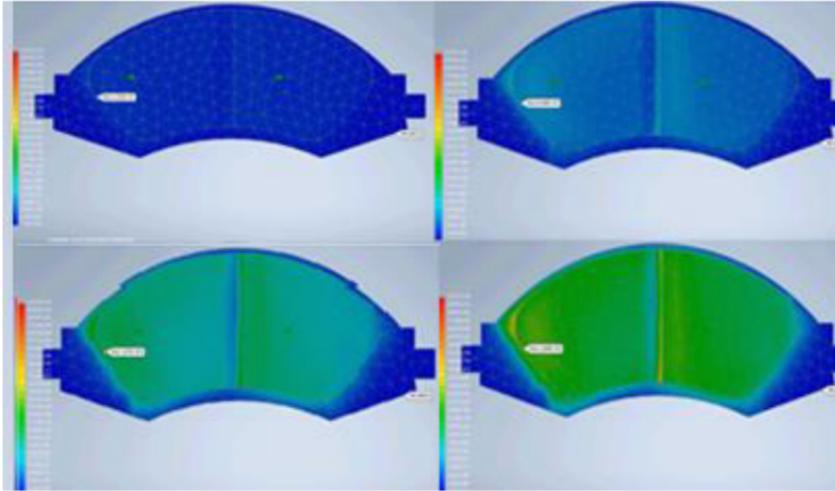
Fc (N)	Esfuerzo - Von Misses (MPa)	Deformación (m)
3670	3,12	2,17E-05
3404	2,89	2,01E-05
3138	2,66	1,85E-05
2872	2,44	1,70E-05
2606	2,21	1,54E-05
2340	1,98	1,38E-05
2074	1,72	1,22E-05
1808	1,53	1,07E-05
1542	1,31	9,12E-06
1276	1,08	7,55E-06
500	0,42	2,96E-06

En la figura 38 se muestra los resultados gráficos que entrega la simulación en Nastran, donde se pueden observar las variaciones de esfuerzo realizadas sobre las pastillas cerámicas en función del tiempo para la condición previamente establecidas en el software.

En la gráfica 39 se puede observar la comparación de las pastillas cerámicas y semimetálicas.

Figura 38

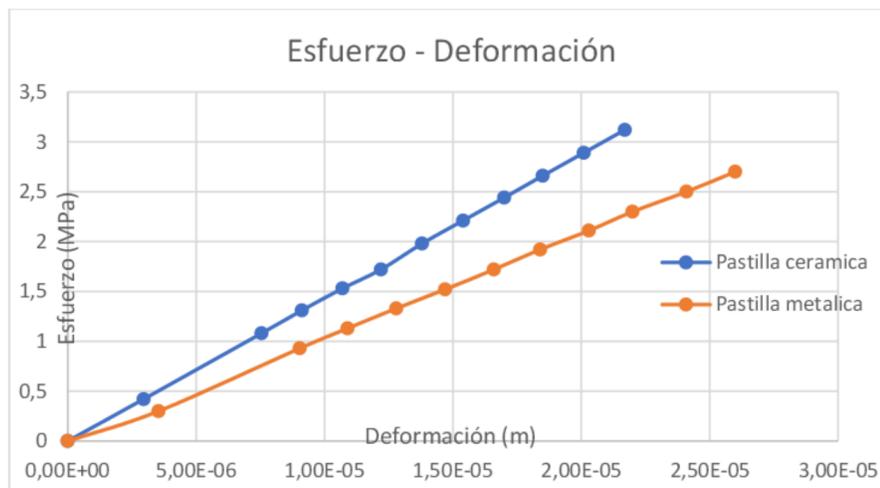
Distribución de esfuerzo de von mises en las pastillas



Con el análisis de las tablas 9 y 10, graficas 38 y 39 se determina que las pastillas cerámicas cumplen de mejor manera su función. Logrando inferir de esta manera que estas son las que mejor eficiencia prestan al momento del frenado.

Figura 39

Gráfica de esfuerzo a la deformación de las pastillas



Al aplicar una fuerza en el pedal de freno se ejerce una fuerza hidráulica sobre las pastillas de freno, donde realiza un esfuerzo de compresión siendo la causa y a la vez existe una deformación elástica.

4.8 Comparación de las Pastillas Cerámicas y Semimetálicas

En los vehículos Chevrolet Aveo Emotion podemos encontrar diferentes modelos de pastillas de freno, teniendo en cuenta la variación de desgaste dependiendo la aplicación y uso.

La Tabla 11 pormenoriza las ventajas y desventajas de los frenos semimetálicos y cerámicos

Tabla 11

Comparación de pastillas cerámicas y semimetálicas

Tipos de pastillas	Ventajas	Desventajas
Cerámica	<ul style="list-style-type: none"> • Elevados rendimientos a altas temperaturas • Fricción suave, en parada consistente. • Capacidad de aislamiento 	<ul style="list-style-type: none"> • Su coste es más elevado • Se desgastan más rápidamente
Semimetálicas	<ul style="list-style-type: none"> • Fuerza • Resistencia • Durabilidad • Rendimiento independiente de las condiciones climatológicas 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor agresividad hacia los discos.

Fuente. (Martín, 2019)

Conclusiones

Se realizó un estudio a través del método exploratorio fundamentada en base a experiencias, problemas y tipos de materiales el cual son fabricadas las pastillas de freno que se pueden usar en el vehículo Chevrolet Aveo Emotion, determinando el comportamiento de estas bajo distintas condiciones.

Se obtuvo toda la información de las evidencias documentadas de las pastillas para lograr generar un modelo que sea lo más aproximado al real.

Se desarrolló el modelado para el sistema de prueba de las pastillas mediante un software CAD, logrando emular las dimensiones y formas reales de estos elementos.

Para determinar el comportamiento de las pastillas, se realizó un conjunto de interacción con herramientas computacionales de la Ingeniería (CAE) para que mediante el análisis por el método de elementos finitos (FEM) determinar el comportamiento de los elementos de fricción. Se requirió trabajar con parámetros bien definidos, tales como las características físicas y mecánicas de los materiales de las pastillas de freno, tipos de contactos entre superficie, para de esta manera conseguir resultados óptimos y exactos.

Para obtener los datos necesarios y realizar el análisis comparativo de las dos pastillas seleccionadas para este proyecto, se realizaron 20 simulaciones secuenciales dentro del software CAE. En cada simulación se varían la presión ejercida sobre las pastillas que está en contacto con el disco de freno, para lograr obtener datos en distintas condiciones de funcionamiento. El tiempo requerido para estas simulaciones fue prolongado, debido a la capacidad computacional disponible al momento de realizar el estudio.

Los resultados obtenidos de las simulaciones de cada pastilla se analizaron, logrando conseguir una comparación del comportamiento de cada una de estas y llegando a determinar que las pastillas de material cerámicas tienen una mejor eficiencia sobre las semimetálicas.

Recomendaciones

Para las simulaciones se recomienda utilizar un computador con las características necesarias, para que el tiempo de convergencia de resultados sea óptimo, debido a que si no se cuenta con un buen equipo computacional estas simulaciones pueden tomar un tiempo prolongado.

Estos modelos de simulación se pueden usar para analizar otros materiales o nuevos componentes para las pastillas y de esta manera analizar su comportamiento.

El uso de licencias estudiantiles facilita mucho el análisis. De no contar con estas licencias, se sugiere realizar este tipo de simulaciones con software libre, en el caso de que estos ayuden a lograr los resultados requeridos por el investigador.

Bibliografía

Alvisvlad, M., Marianovich, Quintana, G., & Sarmiento., A. (09 de marzo de 2017). *Proceso de Producción de los Frenos de Discos Delanteros para un Automóvil Mazda 6*.

Obtenido de:

https://www.academia.edu/31819041/PROCESO_DE_PRODUCCI%C3%93N_DE_LOS_FRENOS_DE_DISCOS_DELANTEROS_PARA_UN_AUTOM%C3%93VIL_MAZDA_6_INGENIERO_HECTOR_ESPINOZA_MAR%C3%8DA_ALVIS_VLAD_MARINOVICH_GABRIEL_QUINTANA_ARANTXA_SARMIENTO

Autodesk. (05 de 08 de 2021). *Autodesk Inventor Nastran*. Obtenido de:

<https://knowledge.autodesk.com/support/inventor-nastran/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/ENU/NINCAD-SelfTraining/files/GUID-6A8370ED-D386-40B0-B34B-3EEA4FA46CFA-htm.html>

Azanza Moriones, I. P. (19 de Abril de 2012). *Proceso de fabricación de pastillas*. Obtenido de

<https://patentados.com/2012/proceso-de-fabricacion-de-pastillas.1>

Bayón, I. T. (25 de Junio de 2020). *Problemas comunes con frenos de disco*. Obtenido de:

<https://www.mtbpro.es/afondo/6-problemas-comunes-en-los-frenos-de-disco-y-como-solucionarlos>

Bosch. (06 de 2016). *Frenos Bosch* . Obtenido de:

http://www.boschautopartes.com/media/la/aa_sites_la/products_and_services/automotive_parts/brakes_2/download_4/LORES_PDF_71597.pdf

Canet, J. M. (Septiembre de 2012). *Resistencia de materiales y estructura*. Obtenido de:

https://portal.camins.upc.edu/materials_guia/250120/2012/Resistencia%20de%20materiales%20y%20estructuras.pdf

Carpio, D. E. (febrero de 2018). *Diseño y construcción de un sistema de frenos de un vehículo de competencia formula SAE eléctrico* . Obtenido de:

<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/15358/1/UPS-CT007549.pdf>

Design Tech. (1 de 04 de 2021). *CAD software types* . Obtenido de:

<https://www.designtechcadacademy.com/knowledge-base/cad-software-types>

Disproauto. (15 de 04 de 2021). *Discos de freno AVEO*. obtenido de:

<https://www.disproauto.com.ec/product/hf-51/?v=3fd6b696867d>

Ecured. (02 de 03 de 2021). *Diseño asistido por computadora*. Obtenido de:

https://www.ecured.cu/Dise%C3%B1o_asistido_por_computadora

Falasca, G. (27 de abril de 2021). *Manual tecnico pastillas de freno* . Obtenido de:

https://www.academia.edu/7457719/Manual_tecnico_pastillas_freno

Gabbert, U. (2002). *Finite Element Methode*. Otto von Guericke University

García, A. F. (12 de 2010). *Rozamiento*. Obtenido de:

<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/dinamica/rozamiento/general/rozamiento.htm>

Gonzalez, L. (5 de diciembre de 2017). *Pastillas de freno, mantenimiento*. Obtenido de:

audioledcar.com: <https://www.audioledcar.com/blog/sobre-coches/las-pastillas-freno-cuanto-cuesta-cambiarlas-cambiarlas-etc/>

Harún, S. P. (01 de 05 de 2006). *Comportamiento termomecánico en un disco de freno macizo y uno auto-ventilado*. Obtenido de:

<http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2006/bmfci1729c/doc/bmfci1729c.pdf>

High Power Brake. (17 de 04 de 2021). *Manual Técnico y de Recomendaciones High Power Brake*. Obtenido de:

https://www.highpowerbrake.com.ec/downloads/manual_tecnico_y_de_recomendaciones_high_power_brake.pdf

INEN. (01 de 2010). *Normas Tecnicas Ecuatorianas* . Obtenido de:

<https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/2185.pdf>

Ingemecanica. (7 de 05 de 2021). *Frenos de Disco en los Vehículos Automóviles*. Obtenido de:

<https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn74.html>

Juárez, M. (11 de Junio de 2020). *Motorpasión* . Obtenido de:

<https://www.motorpasion.com.mx/industria/frenos-disco-vs-frenos-tambor-diferencias>

kashima university. (s.f.). *Sistema de frenos*. Obtenido de:

<http://kashima.campuseina.com/mod/book/view.php?id=7614&chapterid=9459>

Kumar, K., & Snehashish, C. (2019). *Chapter Four - Finite Element Method. Computational Structural Mechanic*, 25-28.

Lazo, O. R., & Rojas, L. R. (junio de 2006). *Diseño asistido por computador*. Obtenido de:

<https://www.redalyc.org/pdf/816/81690102.pdf>

Mapfre, C. (26 de Junio de 2020). *Qué es el servofreno y para que se utiliza*. Obtenido de:

<https://www.motor.mapfre.es/consejos-practicos/consejos-de-conduccion/servofreno-utilidad/>

MARCELA. (30 de 06 de 2020). *Pastillas de Freno*. Obtenido de:

<https://www.ro-des.com/mecanica/pastillas-de-freno-que-son-y-como-realizar-mantenimiento/>

Mario, S. T. (Julio de 2016). *Diseño del mecanismo de un retrovisor de automóvil con Autodesk Inventor Professional*. Obtenido de:

<https://core.ac.uk/download/pdf/211102369.pdf>

Martin, G. G. (febrero de 2019). *Autobrake Demand*. Obtenido de:

http://oa.upm.es/54272/1/TFG_GONZALO_GARCIA_MARTIN.pdf

Mecánicos, b. (9 de Octubre de 2018). *Composición de las pastillas de freno*. Obtenido de:

http://www.blogmecanicos.com/2018/10/composicion-de-las-pastillas-de-freno_9.html

Menna. (16 de 02 de 2020). *Cómo funciona un disco de frenos*. Obtenido de:

<https://como-funciona.co/un-disco-de-frenos/>

Metrópolita, U. t. (14 de julio de 2010). *Tipos de CAD*. Obtenido de:

<http://ti2010utem.blogspot.com/2010/07/tipos-de-cad.html>

MIT. (13 de 3 de 2013). *Boundary value problems in linear elasticity* . Obtenido de:

http://web.mit.edu/16.20/homepage/4_ElasticityBVP/ElasticityBVP_files/module_4_with_solutions.pdf

Mitsubishi. (24 de julio de 2019). *Cómo funciona el sistema de frenos de un vehículo*. Obtenido de:

<https://www.mitsubishi-motors.com.pe/blog/funcionamiento-sistema-frenos-vehiculo/>

Monografías plus. (24 de 05 de 2018). *Esfuerzos y deformaciones por efectos térmicos y por carga*. Obtenido de:

<https://www.monografias.com/docs/Esfuerzos-y-deformaciones-por-efectos-t%C3%A9rmicos-y-PKNFYG7TPNAX#:~:text=DEFORMACI%C3%93N%20QUE%20CAUSAN%20LOS%20CAMBIOS,deformaci%C3%B3n%20axial%2C%20denominada%20deformaci%C3%B3n%20t%C3%A9rmica.>

Motor.es. (16 de 02 de 2021). *Tipos de frenos, pastillas y discos*. Obtenido de:

<https://www.motor.es/que-es/tipos-pastillas-discos-freno>

MOTT, R. L. (28 de 03 de 2021). *Resistencia de materiales* . Obtenido de:

<https://ingcarloszeledonlanuza.files.wordpress.com/2011/03/resistencia-de-materiales-aplicada-mott-3ed1.pdf>

- Naidiuk, O. L., & Jara, P. T. (10 de 2018). *Introducción al análisis térmico*. Obtenido de:
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/17052/1/Introduccion%20al%20analis%20termico%20y%20de%20fluidos%20mediante%20Ansys.pdf>
- Olivero, M. (20 de 01 de 2017). *Elementos de los sistemas CAD*. Obtenido de:
https://docuri.com/download/cad_59c1d671f581710b2866c490_pdf
- One, B. (6 de Noviembre de 2018). *Información Sobre Frenos*. Obtenido de:
<https://www.brakeone.mx/informacion-sobre-frenos/>
- Perdomo, S. (08 de 07 de 2020). *Qué es y para qué sirve Autodesk Inventor en diseño de producto*. Obtenido de:
<https://www.deustoformacion.com/blog/disenio-arquitectonico/que-es-para-que-sirve-autodesk-inventor-disenio-producto>
- Ruiz, M. C., & Diaz, E. B. (Septiembre de 2001). *Mecánica de estructuras* . Obtenido de:
http://cervera.rmee.upc.edu/libros/Mec%C3%A1nica_de_estructuras_I_Resistencia_de_Materiales.pdf
- Ruiz, M. C., & Diaz, E. B. (Septiembre de 2001). *Resistencia de materiales*. Obtenido de:
http://cervera.rmee.upc.edu/libros/Mec%C3%A1nica_de_estructuras_I_Resistencia_de_Materiales.pdf
- TechData, A. (04 de 08 de 2021). *Trabaja con un completo conjunto de herramientas de ingeniería y diseño*. Obtenido de:
<https://www.datech.es/productos-autodesk/inventor/>
- Sampedro, F. G. (2019). *El gran libro de Autodesk Inventor*. Marcombo
- SPGTALLERES. (29 de 03 de 2019). *Diferencias entre los sistemas de frenado del vehículo*. Obtenido de:
https://www.spgtalleres.com/es/noticias/sistemas-frenado-vehiculo/_id:183/

Xingtai Yixuan Electronic Technology Co., L. (14 de 04 de 2021). *Manufacturers Auto Spare Part Ceramic Brake Pads for Japanese Car*. Obtenido de:

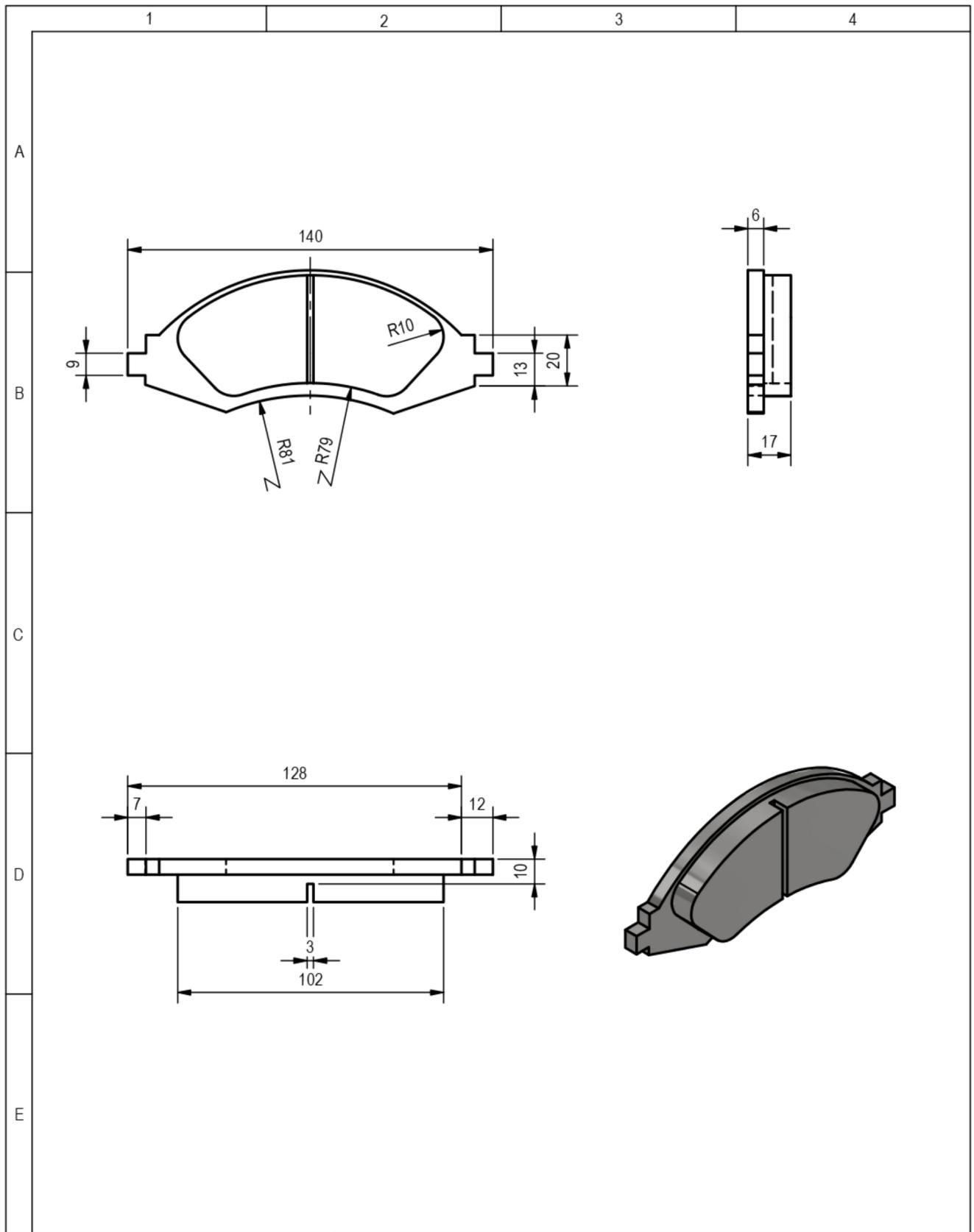
<https://xtyixuan.en.made-in-china.com/product/JXuQTbjAFnGY/China-Manufacturers-Auto-Spare-Part-Ceramic-Brake-Pads-for-Japanese-Car.html>

Yenier, M., & Gunaydin, B. (Mayo de 2019). *Development and Design for Brake Disc in Hydraulic Brake Systems*. Obtenido de:

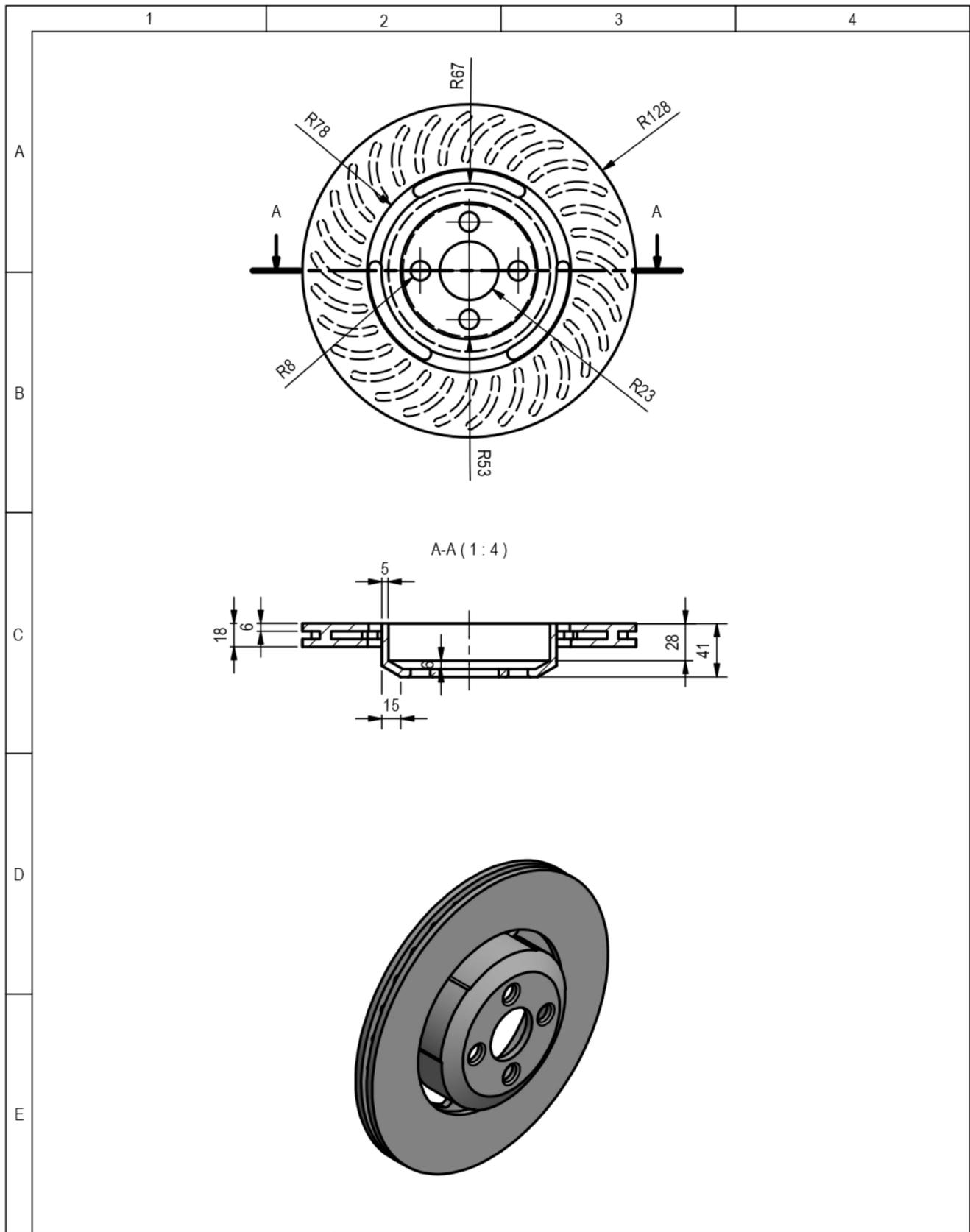
https://www.researchgate.net/publication/344086080_FACULTY_OF_ENGINEERING_MECHANICAL_ENGINEERING_Development_and_Design_for_Brake_Disc_in_Hydraulic_Brake_Systems?enrichId=rgreq-410b55f4581a9750b57850d592708592-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzM0NDA4NjA4MDtB

Anexo A

Planos del disco y la pastilla



				Tolerancias	(Peso)	Ceramico/Semimetálico	
				± 0.3			
					Fecha	Nombre	Pastilla de Freno
				Div.	12.06.21	Almeida E.	
				Rev.	14.06.21	Ing. Llerena A.	
					Apro.	16.06.21	Ing. Llerena A.
1	Edición	Modificación	Fecha	Nombre	Universidad Internacional del Ecuador - EIA - GYE		T-AP-001



				Tolerancias ± 0.3	(Peso)	Fundición de Acero Gris		
				Fecha	Nombre	Disco de Freno	Escala 1:4	
			Div.	12.06.21	Almeida E.			
			Rev.	14.06.21	Ing. Llerena A.			
			Apro.	16.06.21	Ing. Llerena A.			
1	Edición	Uso de normas	Modificación	13.06.21	Almeida	Universidad Internacional del Ecuador - EIA - GYE	T-AP-002	