



MÁSTER EN INGENIERÍA DE AUTOMOCIÓN

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE MÁSTER

OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE UNA PINZA DE FRENO MEDIANTE EL ANÁLISIS ESTÁTICO Y EL USO DE NUEVOS MATERIALES

Autor: D. Sergio Ramos Barrio

Tutora: Dra. Marta Herráez Sánchez

Tutor Colaborador: Pedro Diez Vielba – Lingotes Especiales S.A

Valladolid, Junio de 2020

Escuela Ingenierías Industriales

Depto. Ing^a Energética y Fluidomecánica

Paseo del Cauce 59

47011 Valladolid
(España)



Fundación Cidaut

Parque Tecnológico de Boecillo, 209

47151 Boecillo (Valladolid)

España





Escuela Ingenierías Industriales

Depto. Ing^a Energética y Fluidomecánica

Paseo del Cauce 59

47011 Valladolid
(España)



Fundación Cidaut

Parque Tecnológico de Boecillo, 209

47151 Boecillo (Valladolid)

España



OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE UNA PINZA DE FRENO MEDIANTE EL ANÁLISIS ESTÁTICO Y EL USO DE NUEVOS MATERIALES

RESUMEN BREVE

Palabras clave: Pinza de freno, análisis estático, tensión, fallo, fuerzas de frenado

Para el correcto funcionamiento de un vehículo, el sistema de frenos debe operar de forma óptima garantizando la seguridad de los ocupantes. Durante la fase de diseño de los diferentes componentes del conjunto de freno, se tiene como objetivo evitar que estos elementos fallen cuando se les somete a diferentes cargas. En el presente proyecto se trata este tema desde la elección del material adecuado para la pinza para cumplir satisfactoriamente las condiciones de funcionamiento. Se proponen diferentes materiales con las características necesarias para que la pinza pueda soportar los esfuerzos generados durante la frenada. Se realiza a la pinza de freno a un análisis estático con el fin de estudiar si los materiales cumplen los criterios de fallo específicos del análisis estático. Una vez obtenidos los resultados se comparan y se selecciona aquel material que mejor se adecue para la fabricación y funcionamiento de la pinza de freno.

OPTIMIZATION OF THE DESIGN OF A BRAKE CALIPER THROUGH STATIC ANALYSIS AND THE USE OF NEW MATERIALS

SHORT ABSTRACT

Keywords: Brake caliper, static analysis, tension, failure, braking forces

For the correct operation of the vehicle, the brake system must operate correctly, guaranteeing the safety of the occupants. During the design phase of the different components of the brake assembly, the objective is to prevent these elements from falling when given a different load. In the present project, this topic is treated from the choice of the appropriate material to satisfactorily fulfil with the operating conditions. Different materials are proposed with the necessary characteristics to withstand the efforts generated during braking. The brake caliper is subjected to a static analysis in order to study whether the materials meet the specific failure criterion of the static analysis. Once the results are obtained, the material that is best suited for the manufacture and operation of the brake caliper is compared and selected.

OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE UNA PINZA DE FRENO MEDIANTE EL ANÁLISIS ESTÁTICO Y EL USO DE NUEVOS MATERIALES

RESUMEN EJECUTIVO

El vehículo es un dispositivo muy complejo y su funcionamiento se debe al equilibrio de todos los conjuntos que lo conforman. Dependiendo de la función particular que tengan estos conjuntos se tienen diferentes grupos, el grupo de propulsión, grupo de transmisión, grupo de seguridad pasiva, grupo de seguridad activa, etc. El presente proyecto se centra en el diseño de uno de los principales elementos que hacen, que el conjunto de la seguridad activa y en concreto el sistema de los frenos, funcione correctamente para garantizar así la seguridad de los ocupantes del vehículo.

El diseño de una pieza se divide en múltiples fases, con el objetivo de conseguir que el producto final cumpla con la función para la cual ha sido diseñado. Una vez que se haya obtenido el prototipo de la pieza a fabricar, se le somete a una serie de pruebas para comprobar que se ha diseñado correctamente. El proyecto consiste en la realización de una de las pruebas para comprobar el cumplimiento de las condiciones futuras de funcionamiento para las que ha sido diseñada una pinza de freno y ver si es necesario realizar alguna modificación en las fases previas.

El objetivo del proyecto es llevar a cabo la optimización del diseño de la pinza de freno, concretamente en la fase de elección del material de fabricación, realizando pruebas preventivas sobre el prototipo 3D obtenido, específicamente mediante la realización de análisis estáticos. Estos análisis permitirán estudiar el comportamiento de los diferentes materiales propuestos durante la aplicación de diferentes esfuerzos.

Se estudian diferentes materiales teniendo en cuenta sus propiedades mecánicas con el objetivo de sustituir el material elegido originalmente en el diseño de la pieza, la fundición gris. El hecho de que se propongan nuevos materiales se debe al deseo que tienen los fabricantes de automóviles de reducir el peso de los vehículos, con el fin de reducir tanto el consumo como las emisiones de gases contaminantes. Esta es la principal razón por la que se proponen nuevos materiales para su producción, en especial aleaciones de metales menos pesados que el hierro, principal componente de la fundición gris. Las aleaciones que se proponen y se someterán a estudio mediante un análisis estático de forma simulada son, la aleación de aluminio A356.0 T6 y la aleación de magnesio AZ91D.

Los esfuerzos que se aplican en el cálculo estático se obtienen previamente analizando el proceso de frenada de un vehículo, a través de un modelo en el que se identifican las fuerzas que intervienen en el momento en el que se active el sistema de frenos. A la hora de sacar las fuerzas que se producen durante la frenada, se consideran dos situaciones en las que se puede encontrar el vehículo. En la primera situación se considera que al superar el límite de adherencia las cuatro ruedas del vehículo se bloquean, es un caso ideal. Y en la segunda, mucho más realista, se establece que al superarse el límite de adherencia solo se bloquean las ruedas delanteras y en las traseras se calcula la fuerza mínima necesaria para garantizar la estabilidad del vehículo.

La realización del análisis estático de la pinza de freno con los diferentes materiales propuestos se realiza mediante un programa de elementos finitos. El programa muestra los resultados de forma gráfica y visual para que sean más fáciles de comprender. Una vez realizada la comparación de resultados, el proyecto finaliza con la elección del material adecuado para la fabricación de la pinza.

OPTIMIZATION OF THE DESIGN OF A BRAKE CALIPER THROUGH STATIC ANALYSIS AND THE USE OF NEW MATERIALS

EXECUTIVE ABSTRACT

The vehicle is a very complex device and its operation is due to the balance of all the assemblies that comprise it. Depending on the function that these sets have, there are different groups, the propulsion group, the transmission group, the passive security group, the active security group, etc. This project focuses on the design of one of the main elements that make active safety as a whole and specifically the brake system work correctly to configure the safety of vehicle occupants.

The design of a piece is divided into multiple phases, with the aim of ensuring that the final product fulfills the function for which it was designed. Once the prototype of the part to be manufactured has been obtained, see some series of tests to verify that it has been designed correctly. The project consists of carrying out one of the tests to verify compliance with future operating conditions for which a brake caliper has been detected and if it is necessary to carry out any modification in the previous phases.

The objective of the project is to carry out the optimization of the design of the brake caliper, specifically in the phase of choosing the manufacturing material, carrying out preventive tests on the 3D prototype obtained, specifically by performing static analyzes. These analyzes will allow studying the behaviour of the different materials proposed during the application of different efforts.

Different materials are studied taking into account their mechanical properties with the aim of replacing the material originally chosen in the design of the piece, grey cast iron. The fact that new materials are proposed is due to the desire of car manufacturers to reduce the weight of vehicles, in order to reduce both consumption and emissions of polluting gases. This is the main reason why new materials are proposed for its production, especially metal alloys less heavy than iron, the main component of grey cast iron. The alloys that are proposed and will be studied by simulated static analysis are the A356.0 T6 aluminium alloy and the AZ91D magnesium alloy.

The efforts that are applied in the static calculation are obtained previously by analyzing the braking process of a vehicle, through a model that identifies the forces that intervene at the time the brake system is activated. When removing the forces that occur during braking, two situations are considered in which the vehicle can be found. In the first situation, it is considered that when the adherence limit is exceeded, the four wheels of the vehicle are blocked, it is an ideal case. And in the second, much more realistic, it is established that when the adherence limit is exceeded, only the front wheels are locked and the minimum force necessary to guarantee the stability of the vehicle is calculated in the rear ones.

The static analysis of the brake caliper with the different proposed materials is carried out using a finite element program. The program displays the results graphically and visually to make them easier to understand. Once the comparison of results has been carried out, the project ends with the choice of the appropriate material to manufacture the caliper.

AGRADECIMIENTOS

Quiero dar las gracias en primer lugar a mi tutora del proyecto, Dra. Marta Herráez Sánchez, a mi familia y amigos

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	1
1.1	Antecedentes y justificación del TFM.....	1
1.2	Objetivos.....	2
1.3	Alcance y desarrollo del TFM.....	3
1.4	Competencias.....	4
2	ESTADO DEL ARTE.....	7
2.1	Pinza de freno.....	7
2.2	Materiales seleccionados para sustituir a la fundición gris.....	9
2.2.1	Aleaciones de magnesio.....	9
2.2.2	Aleaciones de aluminio.....	11
2.3	Análisis estático.....	14
2.3.1	Material dúctil.....	14
2.3.2	Material frágil.....	16
3	PROGRAMA DE CÁLCULO Y METODOLOGÍA.....	17
3.1	Programa de elementos finitos: ANSYS.....	17
3.2	Metodología que seguir durante el proyecto.....	19
4	DESARROLLO DEL PROYECTO TFM.....	21
4.1	Cálculo de las fuerzas de frenado.....	21
4.1.1	Datos de partida y parámetros necesarios para el cálculo de las fuerzas de frenado ...	21
4.1.2	Cálculo de las fuerzas de frenado en las ruedas.....	28
4.1.3	Cálculo de fuerzas y momentos entre el disco de freno y las pastillas.....	34
4.2	Análisis estático teórico de la pieza.....	36
4.2.1	Materiales dúctiles.....	36
4.2.2	Materiales frágiles.....	37
4.3	Procedimiento de ensayo.....	38
5	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	41
5.1	Aluminio.....	41
5.1.1	Situación 1.....	42
5.1.2	Situación 2.....	44
5.2	Magnesio.....	46
5.2.1	Situación 1.....	46
5.2.2	Situación 2.....	48
5.3	Fundición gris.....	49
5.3.1	Situación 1.....	50
5.3.2	Situación 2.....	52
5.4	Análisis.....	55
6	CONCLUSIONES.....	57

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59
---------------------------------	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: esquema de la pinza de freno y el resto de los elementos del conjunto de frenado [1]	7
Figura 2: Principio de Pascal en la fuerza de frenada [2]	8
Figura 3: funcionamiento del pistón en la pinza de freno [4]	8
Figura 4: diferencias entre fallo dúctil y fallo frágil [18]	14
Figura 5: diagrama de la teoría del fallo de Von Mises [17]	15
Figura 6: teoría de fallo frágil Coulomb Mohr [19]	16
Figura 7: Display de ANSYS Workbench	17
Figura 8: Display módulo ANSYS Mechanical	19
Figura 9: fuerza de impulso y fuerza de fricción cuando el vehículo se encuentra parado [22]	21
Figura 10: fuerza de impulso y fuerza de fricción cuando el vehículo se encuentra en movimiento [23]	21
Figura 11: dimensión de la pinza de limita el diámetro del disco	22
Figura 12: dimensiones del disco de freno [25]	24
Figura 13: distancia que limita el ancho del disco de freno	24
Figura 14: designación tipo de neumático [26]	25
Figura 15: reparto de peso en función de la tracción [27]	26
Figura 16: diagrama de fuerzas en el vehículo en estado estático [28]	26
Figura 17: esquema equilibrio de fuerzas del vehículo con las ruedas posteriores elevadas [29]	27
Figura 18: esquema fuerzas de frenado [28]	29
Figura 19: representación de la transferencia de carga durante la frenada [31]	30
Figura 20: definición de las propiedades del material	38
Figura 21: mallado y definición del tamaño de elemento de la malla	39
Figura 22: fijaciones de la pinza de freno	39
Figura 23: aplicación de la fuerza	40
Figura 24: representación gráfica de los resultados, tensión equivalente de Von Mises	40
Figura 25: superficie en la que se aplica la fuerza	41
Figura 26: deformación de la pieza aluminio situación 1	42
Figura 27: tensión equivalente de Von Mises	43
Figura 28: concentración de tensiones y representación de la tensión equivalente de Von Mises	43
Figura 29: deformación de la pieza aluminio situación 2	45
Figura 30: tensión equivalente de Von Mises situación 2	45
Figura 31: concentración de tensiones y representación de la tensión equivalente de Von Mises	46
Figura 32: deformación de la pinza de magnesio, situación 1	47
Figura 33: tensión equivalente de Von Mises, magnesio (situación 1)	47
Figura 34: tensión equivalente de Von Mises, magnesio (situación 2)	49
Figura 35: deformación de la pinza, fundición gris (situación 1)	50
Figura 36: máxima tensión de cortadura, fundición gris (situación 1)	50
Figura 37: Máxima tensión principal, fundición gris (situación 1)	51
Figura 38: mínima tensión principal, fundición gris (situación 1)	51
Figura 39: máxima tensión de cortadura, fundición gris (situación 2)	53
Figura 40: Máxima tensión principal, fundición gris (situación 2)	54
Figura 41: mínima tensión principal, fundición gris (situación 2)	54

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: propiedades mecánicas de la fundición gris [5].....</i>	9
<i>Tabla 2: comparación de las propiedades del magnesio con otros materiales [6]</i>	10
<i>Tabla 3: propiedades de la aleación AZ91D [7] [8]</i>	11
<i>Tabla 4: designación de las aleaciones de aluminio en función de los elementos principales [12].....</i>	12
<i>Tabla 5: aleaciones aluminio-silicio-magnesio [13].....</i>	13
<i>Tabla 6: nomenclatura aleación seleccionada en los diferentes sistemas [15]</i>	13
<i>Tabla 7: propiedades de la aleación A356.0 T6 obtenida mediante la fundición en un molde de arena [16], [15].....</i>	13
<i>Tabla 8: modelos vehículos consultados [24]</i>	22
<i>Tabla 9: valores obtenidos a partir de los datos recogidos de los vehículos de referencia de la clase berlina [24]</i>	23
<i>Tabla 10: parámetros necesarios para el cálculo de las fuerzas de frenado</i>	23
<i>Tabla 11: valores parámetros necesarios para el cálculo de las fuerzas de frenado</i>	28
<i>Tabla 12: variables necesarias en el cálculo de las fuerzas de frenado</i>	29
<i>Tabla 13: coeficientes de adherencia en función de la velocidad, estado de los neumáticos y del terreno [32].....</i>	31
<i>Tabla 14: fuerzas de frenado para la situación 1</i>	33
<i>Tabla 15: fuerzas de frenado para la situación 2</i>	34
<i>Tabla 16: par de frenado y fuerza de fricción entre el disco y la pastilla, situación 1</i>	35
<i>Tabla 17: par de frenado y fuerza de fricción entre el disco y la pastilla, situación 2</i>	35
<i>Tabla 18: fuerzas correspondientes a los cálculos realizados en la primera situación</i>	42
<i>Tabla 19: fuerzas correspondientes a los cálculos realizados en la segunda situación</i>	44
<i>Tabla 20: resumen de los datos obtenidos en el análisis estático.....</i>	55

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 *Antecedentes y justificación del TFM*

La preocupación de los fabricantes de piezas para el sector de la automoción por su durabilidad se ha incrementado considerablemente en los últimos años. Este fenómeno desemboca en la creación de múltiples ensayos gracias a los cuales se testean las piezas con el fin de calcular su vida útil y hacerlas más duraderas. A través de las diferentes pruebas y los resultados obtenidos se realizan modificaciones en los diseños originales para que aguanten las condiciones impuestas durante su funcionamiento. Uno de los test preventivos que se está realizando en la actualidad con la intención de evitar posibles rupturas durante su funcionamiento, es el análisis dinámico y estático con el propósito de estudiar el comportamiento de la pieza ante la aplicación de determinadas cargas tanto en movimiento como en parado, siempre y cuando las condiciones de funcionamiento de la pieza lo permitan.

Una de las principales empresas del sector de la automoción de la ciudad de Valladolid, Lingotes Especiales S.A, se dedica a la fabricación de discos de freno para los automóviles entre otros productos. Se ha propuesto realizar estos ensayos preventivos a una nueva pieza que recibieron para proceder a su fabricación, un estudio estático de un prototipo de una pinza de freno ante la aplicación de diferentes cargas durante su funcionamiento.

Lingotes Especiales es una importante empresa en la fabricación de componentes para automóviles tanto al nivel local como nacional. Su actividad se centra en la fabricación de discos de freno para automóviles obteniéndolos a partir del proceso de la fundición. El producto que ocupa la mayor parte de la producción es el disco de freno, pero la empresa también se dedica a producir otro tipo de piezas destinadas al mercado de vehículos industriales y agrícolas, al mercado de los vehículos pertenecientes a la obra civil hasta para el ámbito de las comunicaciones fabricando así cableado submarino.

El proceso de fabricación que utilizan en la empresa para la obtención de todos sus productos es el de la fundición. El material escogido para fundir y posteriormente introducirlo sobre unos moldes con el objetivo de producir los discos de freno, es la fundición gris. Este material consiste en una aleación de hierro con concentraciones de carbono desde el 2-5%, silicio con concentraciones de 2-4% y por último concentraciones pequeñas de manganeso de hasta el 1%. Dependiendo de las concentraciones de carbono, silicio y manganeso obtenidas, el material (fundición gris) tendrá diferentes valores de las propiedades características.

Con la introducción del diseño de una nueva pieza, la pinza de freno, en cuanto a la fabricación, la actividad de la empresa se centrará en la producción de pinzas de freno en bruto por medio del proceso de la fundición. Una vez obtenido la pinza en bruto se le hace pasar por una serie de procesos de mecanizado antes de que sea entregado al cliente. Una vez fabricadas las pinzas se envían a determinadas empresas con el objetivo de que se mecanicen las superficies que estarán en contacto con otros componentes del conjunto de frenos, garantizando así una buena adherencia entre ellos. Principalmente se mecanizan las camisas donde van alojados los cilindros que ejercen la fuerza sobre las pastillas. También se mecanizan las superficies interiores de la pinza de freno con el fin de que se haga un buen contacto con el soporte de las pastillas. Se exige que el mecanizado de estas superficies sea muy preciso obteniendo una incertidumbre muy pequeña, llegando a hablar hasta de micras.

El mecanizado de las diferentes superficies de la pinza también permite una reducción de peso. La disminución de peso se agradece a lo largo de su conducción, debido a que a mayor peso se produce un mayor consumo. Debido a esto los fabricantes de piezas del automóvil están ajustando y mejorando sus diseños con el objetivo de reducir el peso de sus productos y que se vea proyectado en la reducción de emisiones contaminantes durante la vida del automóvil. Esta práctica de reducir el peso de los componentes de los vehículos, pero conservando o incluso mejorando sus propiedades mecánicas y prestaciones, implica la investigación y estudio de nuevos materiales con los que fabricar los diferentes componentes.

El proceso de fundición del material (fundición gris), que lleva a cabo la empresa es un ciclo cerrado ya que la materia prima que se funde procede de los recortes y desechos de las empresas en las que se mecanizan piezas de este material, reduciendo y reutilizando el material sobrante para la producción de una nueva serie de discos de freno y a partir de ahora pinzas de freno. Con este hecho se pretende reducir la cantidad de desechos industriales que contribuyen a la contaminación de medio ambiente, consiguiendo así que sea una empresa sostenible.

Anteriormente se ha mencionado que las empresas dedicadas a la fabricación de piezas del automóvil, consideran la necesidad de realizar ensayos preventivos para estudiar la vida útil de la pieza y ver si durante las condiciones de funcionamiento se puede producir la ruptura. Uno de los ensayos típicos a realizar es el análisis estático de la pieza ante diferentes situaciones de funcionamiento. En el caso del actual proyecto se realizará el análisis estático teniendo en cuenta los diferentes materiales elegidos para su fabricación y posterior estudio de los resultados de una pinza de freno. De esta forma se optimizará el diseño de la pieza eligiendo el mejor material para su fabricación.

La única inversión que se debe realizar es en la fabricación de nuevos moldes en los que se vierte el material fundido para la obtención de la pinza.

El tema del proyecto a realizar es un reto para el estudiante ya que el resultado de este proyecto podría cambiar el proceso de fabricación y conseguir pinzas de freno fabricadas en diferentes materiales con unas características idénticas a las obtenidas con el material antiguo, la fundición gris. El tema requiere la investigación y el estudio de nuevos materiales que sustituyan de forma satisfactoria la fundición gris conservando las propiedades mecánicas. El análisis de la pinza de freno, en este caso en una situación estática, teniendo en cuenta los diferentes materiales elegidos para su fabricación. Dicho estudio estático se realizará mediante programas de elementos finitos a través de los cuales se estudiará la pinza de freno bajo diferentes condiciones de funcionamiento.

1.2 **Objetivos**

El objetivo fundamental del proyecto es optimizar el diseño de la pinza de freno en cuanto a la elección del material se refiere. Esto se conseguirá testeando los diferentes materiales propuestos, al someter a la pinza de freno a un análisis estático donde se analizará el comportamiento de la pieza con cada material. Un análisis estático tiene la capacidad de incluir diferentes cargas constantes y, en algunos casos, también incluyen un modelo de las distintas cargas aplicadas que varían en el tiempo durante su funcionamiento, pero que pueden ser aproximadas a un equivalente estático. Las fuerzas aplicadas en el análisis estático previamente se calculan realizando un estudio del fenómeno de la frenada. La aplicación de nuevos materiales conllevaría aligerar peso, manteniendo las propiedades mecánicas de resistencia de la pieza y el proceso de fabricación de ésta. Para conseguir el objetivo será necesario cumplir primero una serie de objetivos secundarios.

- Realizar una investigación de los materiales que dispongan propiedades similares a la fundición gris y que se obtengan a partir del mismo proceso de fabricación, la fundición. Los materiales elegidos se analizan con el fin de utilizarlos en la fabricación de la pinza de freno.
- Investigar y establecer las condiciones de contorno y de funcionamiento de la pinza de freno en la frenada. Estas condiciones de funcionamiento afectarán al comportamiento de la pieza durante el ensayo del análisis estático, las cuáles después serán reproducidas en el programa de elementos finitos donde se simulará el ensayo con el fin de obtener los resultados para la pieza

con los diferentes materiales ensayados, compararlos y decidir que material se adecua mejor para cumplir satisfactoriamente la función de la pinza de freno.

- Conocer la arquitectura del vehículo y los datos geométricos necesarios para realizar el modelo dinámico de fuerzas de frenado del vehículo.
- Establecer un modelo dinámico que permita conocer el proceso de frenada del vehículo y a partir del cual se obtengan las fuerzas generadas tanto en la rueda como en la pinza de freno durante el proceso.
- Realizar un análisis estático mediante un programa de simulación de elementos finitos, donde se reproduzcan tanto las condiciones de contorno y funcionamiento de la pinza como las cargas generadas durante las frenada.
- A partir de los resultados alcanzados de las concentraciones de tensiones en toda la pinza, estudiar y comparar los materiales analizados y decidir cual es el adecuado para la fabricación de la pinza de freno. la selección del material adecuado se realizará basándose en una serie de criterios, el principal es que no se produzca el fallo, seguido de la superación del factor de seguridad en el calculo de tensiones del análisis estático y la más que tendría la pinza de freno con dicho material.

1.3 Alcance y desarrollo del TFM

El presente trabajo parte del diseño 3D de un prototipo de una pinza de freno la cual se quiere fabricar mediante el proceso de fundición. El material escogido por la empresa para su producción es la fundición gris. La fundición gris presenta muy buenas características mecánicas como, por ejemplo, la resistencia a tracción o el módulo elástico, ya que es una aleación de hierro con un porcentaje de carbono que le da sus propiedades mecánicas tan características. La aleación también tiene otros componentes, pero con unos porcentajes menores como silicio o manganeso.

El proceso de fabricación de la pinza de freno todavía está en fase de diseño, por lo que es necesario someter al prototipo a numerosos análisis con el objetivo de estudiar su comportamiento y examinar que no se produzca el fallo ante las diferentes condiciones de funcionamiento. El análisis llevado a cabo en el actual proyecto consiste en estudiar el comportamiento, analizar las deformaciones que sufre la pieza ante la aplicación de diversas fuerzas y momentos estáticos. Dichos estudios se ejecutarán por medio de programas de simulación en los que se someterá a la pinza a un análisis estático. Mediante el análisis estático se pretende optimizar el diseño de la pinza en cuanto a material seleccionado se refiere. Para ello, se establece que se examinarán diferentes materiales, en este caso aleaciones, con el fin de utilizarlos en la fabricación de la pieza. En función de los resultados obtenidos para los distintos materiales testados, se decidirá si el material que mejor se comporta ante diferentes condiciones se utiliza para la producción de la pinza de freno. El proyecto se dividirá en diferentes fases para poder llevar a cabo la optimización de la pinza de freno, sometiéndola a un análisis estático de forma simulada en el que se evaluarán diferentes materiales para llevar a cabo su producción.

La primera fase comprende la investigación y el estudio de materiales sustituyentes a la fundición gris, material seleccionado para la fabricación la pieza en el proceso de diseño. Debido a la intención de optimizar el diseño de ésta, en cuanto a la selección de diferentes materiales se refiere, se inicia una búsqueda con el fin de encontrar aleaciones que contengan propiedades mecánicas similares a la fundición gris y que contengan densidades bajas, consiguiendo así una reducción del peso de la pieza. La búsqueda se centra en las aleaciones de aluminio y magnesio, materiales con buenas propiedades mecánicas capaces de reemplazar el material seleccionado inicialmente. Las aleaciones mencionadas tienen un amplio rango de aplicación. Diversas variedades de aleaciones de aluminio y magnesio se

utilizan para fabricar diferentes piezas en el sector de la aeronáutica y de la automoción, debido a su baja densidad y elevadas prestaciones mecánicas. Para que las aleaciones seleccionadas puedan reemplazar el material inicialmente elegido para la fabricación de la pinza de freno, tiene que cumplir los criterios de fallo impuestos en el análisis estático realizado al diseño del prototipo de la pieza. Para ello es necesario realizar el análisis estático con las mismas condiciones de contorno y funcionamiento junto a las cargas y momento aplicados a los distintos materiales a estudiar. Una vez obtenidos los resultados para los diferentes casos, se comparan y se decide que material es el más apropiado para la fabricación de la pinza de freno.

La segunda fase del proyecto comprende el estudio del proceso de frenada y las condiciones para que se produzca dicha situación, las cuales afectarán al estudio de las fuerzas de frenado originadas. El cálculo de las fuerzas de frenada se realiza sobre un modelo dinámico en el que se representan el diagrama de fuerzas que aparecen cuando el vehículo empieza a frenar. A partir de este modelo y las diferentes situaciones en las que se produce la frenada se calculan las fuerzas obtenidas en las ruedas. A la hora de realizar el cálculo se tienen en cuenta dos situaciones determinadas. Se calcula las fuerzas de frenado máximas generadas durante la frenada antes de que se bloqueen simultáneamente las cuatro ruedas. En la segunda situación, se obtienen las fuerzas de frenado en las ruedas delanteras en el momento en el que se bloquean junto con las fuerzas mínimas necesarias en las ruedas traseras para mantener la estabilidad del vehículo cuando se bloquean las ruedas delanteras. Dichas fuerzas calculadas junto con los datos correspondientes al disco de freno que irá instalado en el interior de la pinza se utilizarán para obtener las cargas que se aplican a la pinza de freno durante el proceso de frenada.

La tercera fase abarca el estudio de los diferentes criterios del análisis estático y su aplicación en función de la naturaleza de cada uno de los materiales escogidos para realizar la optimización de la pinza en función del análisis estático. Una vez estudiado en que consiste el análisis, se procede a simular las diferentes condiciones de contorno y funcionamiento de la pieza en un programa de elementos finitos. El siguiente paso será la aplicación en la pinza de freno de las fuerzas de frenado calculadas. El programa utilizado para llevar a cabo dicho estudio es ANSYS. Una vez realizado el cálculo se representan de forma gráfica los resultados, en los que se pueden estudiar, la deformación que experimenta la pinza ante la aplicación de las cargas en diversas situaciones, la dilatación térmica y la concentración de tensiones. Esta última representación nos indicará si la pieza es apta o no, es decir, si rompe ante las determinadas condiciones de funcionamiento basándose en los diferentes criterios de fallo escogidos por la naturaleza de cada material. Los resultados obtenidos en las concentraciones de tensiones de los materiales seleccionados se comparan entre sí con el objetivo de dar con el material más adecuado para la fabricación y optimización de la pinza de freno.

1.4 Competencias

Este TFM también contribuye al desarrollo de las siguientes competencias del Máster en Ingeniería de Automoción, además de las ya obtenidas durante el desarrollo de las demás asignaturas

- **Competencias generales:**
 - **G.1.** Poseer, comprender y aplicar conocimientos para concebir, diseñar, organizar actuaciones, poner en práctica y adoptar un proceso sustancial de creatividad e innovación para el desarrollo de nuevos conceptos e ideas.

- **G.2.** Capacidad de integrar y aplicar conocimientos y su comprensión para la resolución de problemas en entornos nuevos o poco conocidos dentro de contextos más amplios y multidisciplinares a partir de la información disponible.
 - **G.3.** Capacidad de comunicar sus conclusiones, conocimientos y razones últimas que las sustentan tanto a destinatarios especializados, mediante informes y documentos técnicos, como a públicos no especializados.
 - **G.4.** Capacidad de aprendizaje para el futuro de un modo que habrá de ser en gran medida autodirigido o autónomo.
 - **G.7.** Capacidad de promover y fomentar el avance tecnológico desde una perspectiva social justa y medioambientalmente sostenible.
- **Competencias específicas:**
 - **E.3.** Poseer y comprender conocimientos sobre los vehículos automóviles, su arquitectura, su comportamiento, y los sistemas que los integran.

El conocimiento de la arquitectura y estructura del vehículo permitirá conseguir el resto de las competencias descritas a continuación, sin el estudio de la arquitectura y cálculo de parámetros geométricos del vehículo no sería posible llevar a cabo el proyecto.
 - **E.7.** Poseer y comprender conocimientos relacionados con la seguridad del transporte en sus tres aspectos: seguridad activa, seguridad pasiva y protección de peatones, incluyendo nociones de accidentología.

Para ello se realizará un modelo dinámico en el que se obtengan los esfuerzos generados durante el proceso de frenada llevado a cabo por uno de los principales sistemas de la seguridad activa, el sistema de frenos.
 - **E.9.** Poseer, comprender y aplicar conceptos sobre el diseño de componentes, y los procesos de innovación.

Esta competencia se conseguirá al someter los materiales propuestos para la optimización del diseño de la pieza a un análisis estático con el objetivo de estudiar su comportamiento ante la aplicación de diferentes esfuerzos.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Pinza de freno

El sistema de frenos probablemente sea el sistema más importante del vehículo en cuanto a garantizar la seguridad de los ocupantes. Su accionamiento permite que el vehículo disminuya la velocidad e incluso consiga detenerse cuando el conductor se topa con algún obstáculo o se encuentra con algún peligro repentinamente. El conjunto de frenos está formado por varios elementos, de los cuales cada uno tiene una función clave para el buen funcionamiento del sistema de frenos. En este apartado se describe en que consiste una pieza fundamental en el sistema, la pinza de frenos. También se aborda la función que realiza en el conjunto y con qué elementos interacciona.

La pinza de freno o caliper estudiada corresponde a un sistema de frenos de disco, es decir, la disminución de la energía cinética del vehículo se produce por la utilización de un disco como elemento de frenado. En el mecanismo de frenada, la pinza de freno juega un papel muy importante debido a que la pinza alberga a otras piezas necesarias para realizar la frenada, así como los pistones, las pastillas, el porta-pastillas, etc. Las pastillas hacen contacto con las pistas de los discos dando lugar a la fricción provocando la transformación de la energía cinética del automóvil en energía térmica, disminuyendo así la velocidad del vehículo incluso consiguiendo la detención total de éste.

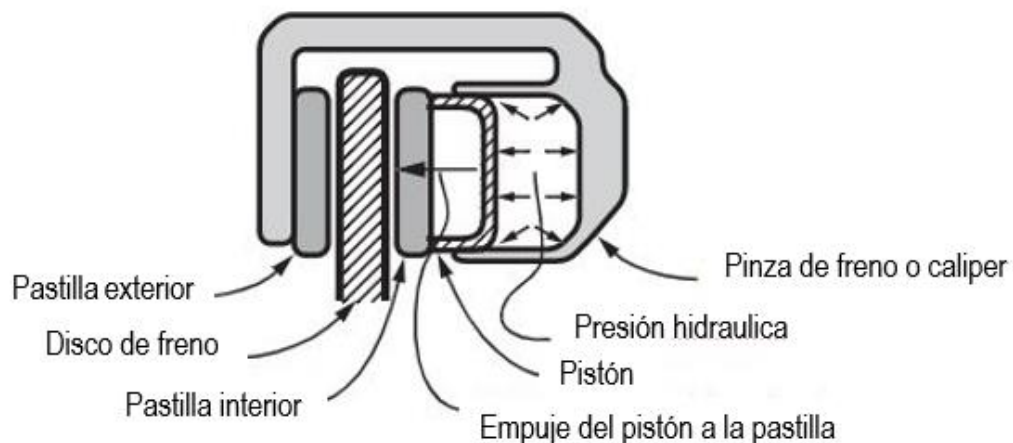


Figura 1: esquema de la pinza de freno y el resto de los elementos del conjunto de frenado [1]

La pinza de freno es una pieza esencial en el conjunto de freno de la rueda. La pinza entre otras cosas cuenta con los cilindros donde van colocados los pistones. Dependiendo del tipo y del tamaño de la pinza, esta puede presentar cilindros en ambos lados, es decir, en las caras donde se posicionan las pastillas. También la pinza puede tener más de un cilindro produciendo así un mejor reparto de la carga aplicada sobre las pastillas para generar el frenado. Al contar con más de un cilindro en el conjunto de freno, se aplica una carga más uniforme sobre la pastilla, lo que desemboca en una fuerza de frenado sobre la pista de la disco más repartida que en los casos en los que se tiene un solo cilindro. En definitiva, cuanto mayor sea el número de pistones (número limitado por el tamaño de la pinza) mejor repartida estará la fuerza aplicada sobre las pistas del disco, por lo tanto, una frenada más uniforme produciendo una sensación suave en la conducción.

Los pistones que se encuentran en la pinza de freno aplican la fuerza lineal de frenado sobre las pastillas cuando el líquido de frenos ejerce una determinada presión hidráulica sobre su superficie. Esta presión es generada por la bomba, al incidir sobre la superficie del pistón interno, la fuerza ejercida sobre el pedal del freno. La presión generada por la fuerza ejercida sobre el pedal es la misma que la presión que se ejerce sobre el pistón de la pinza, por lo que el frenado del vehículo se rige por el principio de Pascal.

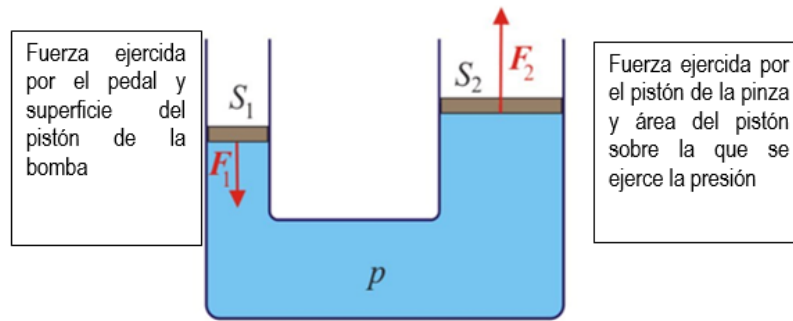


Figura 2: Principio de Pascal en la fuerza de frenada [2]

Una vez recibida la fuerza transmitida a través del líquido de frenos, los pistones mediante la ejecución de un movimiento lineal desplazan las pastillas de freno, las cuáles ejercen una fuerza de compresión contra el disco dando lugar a la fricción que conseguirá disminuir la energía cinética del vehículo. Una vez concluida esta fuerza los pistones recuperan su posición original ayudados por unas juntas de los que están dotados. Además, al desgastarse el material de las pastillas, los pistones tienen más recorrido y se deslizan a través de la junta al frenar, con lo que se compensa el desgaste producido en las pastillas [3].

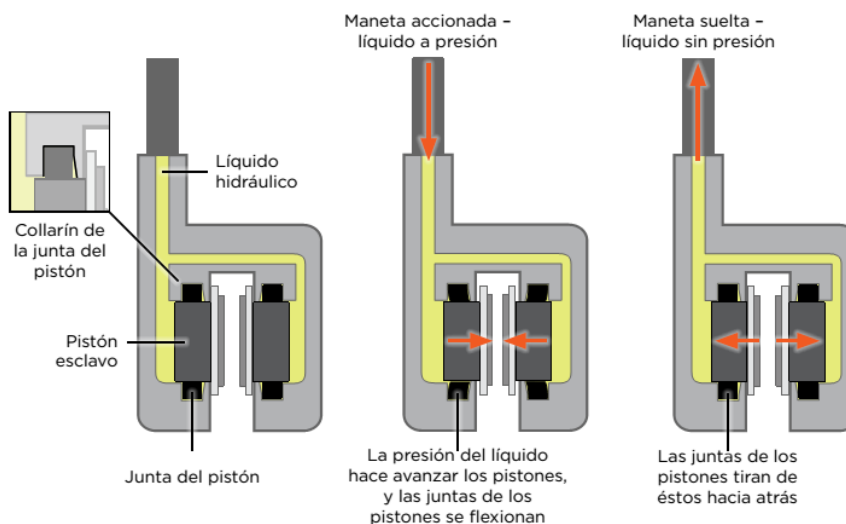


Figura 3: funcionamiento del pistón en la pinza de freno [4]

La pinza no solo es fundamental porque alberga a los pistones que aplican la fuerza de frenado sino también porque en ella se localizan las pastillas.

Las pastillas no están colocadas directamente sobre el caliper (pinza de freno), sino que se encuentra en un porta pastillas. La función de esta pieza es permitir el desplazamiento de las pastillas para generar el contacto con el disco y no transferir el calor producido en la fricción entre disco y la pastilla, a la pinza. El elemento existente entre la pastilla y el soporte tiene como función, aparte de la de no transferir el calor producido hacia la pinza, de fijar el material de fricción (pastilla) con el soporte, el cual este último se coloca sobre una de las superficies internas de la pinza para realizar la acción de la frenada.

2.2 Materiales seleccionados para sustituir a la fundición gris

Se proponen dos materiales distintos con propiedades similares a las de la fundición gris, con el objetivo de estudiar y comparar los resultados obtenidos en el análisis estático que se le realizará a la pinza de freno. Los materiales propuestos son dos aleaciones, de magnesio y aluminio (a continuación, se explicarán). Las aleaciones de magnesio y aluminio en función de los elementos que la compongan tienen propiedades similares a las de la fundición gris. Una de las principales ventajas de estas aleaciones es la baja densidad. La densidad de las aleaciones de magnesio es una cuarta parte de la densidad de la fundición gris y la del aluminio una tercera parte. Debido a la baja densidad que presentan dichas aleaciones se reduce el peso de la pieza influyendo de forma positiva en el funcionamiento del vehículo. Una reducción de peso de los componentes del vehículo supone un ahorro en combustible y una reducción considerable en la emisión de gases contaminantes, entre otras ventajas.

En la siguiente tabla 1 se presentan las propiedades características de la fundición gris. Estos valores se compararán con los correspondientes de las aleaciones de magnesio y aluminio. Dichos valores serán necesarios para realizar el análisis estático de la pinza de freno. Una de las principales propiedades de la fundición gris a tener en cuenta es su reducida ductilidad.

Tabla 1: propiedades mecánicas de la fundición gris [5]

FUNDICION GRIS		
Propiedad		Unidades
Densidad	7200	Kg/m ³
Dureza Brinell	217	
Resistencia ultima a traccion (S _{ut})	310	MPa
Resistencia a traccion (S _{yt})	124	MPa
Resistencia ultima a compresion (S _{uc})	1034	MPa
Resistencia a la compresion (S _{yc})	943	MPa
Elongacion	6,67	%
Modulo de elasticidad	118	GPa
Resistencia a flexion	575	MPa
Coef. Poisson	0,294	
Resistencia a fatiga	119	MPa

Siendo “S_{ut}” y “S_{uc}” las resistencias ultimas a la tracción y a la compresión, respectivamente. De igual manera “S_{yt}” y “S_{yc}” son las resistencias a fluencia a la tracción y a la compresión, respectivamente.

2.2.1 Aleaciones de magnesio

Hoy en día existe la necesidad de reducir costes de producción conservando los rigurosos requisitos de calidad de los productos fabricados. Las aleaciones de magnesio junto a las de aluminio (más adelante se hablará de esta otra aleación) satisfacen las actuales demandas que se exigen a un material estructural en la industria, específicamente en la aeronáutica y en la del automóvil. El uso del magnesio necesita el desarrollo de procesos de producción adecuados a sus características específicas en los distintos sectores industriales.

La utilización del magnesio como material estructural se encuentra en aleaciones. Sin lugar a duda, la propiedad mecánica más interesante y característica del magnesio es su baja densidad (1740 kg/m³), inferior a la de otros materiales estructurales. Comparando con otros metales de similares características y aplicaciones, su densidad es dos tercios de la del aluminio y un cuarto de la del acero [6]. En la tabla 2

se muestran las propiedades del magnesio en comparación con otros materiales estructurales de uso común.

Tabla 2: comparación de las propiedades del magnesio con otros materiales [6]

Propiedad	Acero	Aluminio	Magnesio	Titanio
Densidad (kg/m ³)	7830	2800	1740	4500
Módulo de Elasticidad (GPa)	210	70	45	110
Resistencia a tracción (10 ⁵ N/m ²)	300 – 1200	150 – 680	100 – 380	910 - 1190
Resistencia específica (10 ³ Nm/kg)	38 – 153	54 – 243	57 – 218	202 - 264
Rigidez específica (10 ⁵ Nm/kg)	26.8	25.0	25.9	24.4

El magnesio contiene grandes ventajas, presenta una de las densidades más bajas entre los materiales estructurales; reducido módulo de elasticidad, lo que le convierte en un material rígido, pero a su vez le aporta una gran capacidad de amortiguamiento de vibraciones. También presenta una elevada fluidez y una excelente capacidad de ser reciclado. Esta última característica será clave a la hora de reducir la energía empleada en la obtención de nuevas piezas [6].

El magnesio también presenta algunos inconvenientes como, baja resistencia mecánica, cuando se encuentra a temperaturas superiores a 100°C cuenta con una baja resistencia a fluencia. El módulo de elasticidad del magnesio es bajo, cuenta con una reducida ductilidad y baja resistencia a la corrosión [6]. Algunas de las aleaciones que mejor comportamiento tienen frente a la corrosión son: AZ91D, AZ91E, WE54, WE43.

Otro de los principales inconvenientes del magnesio, es que presenta dificultades en el conformado por fundición, debido a que se trata de un material que en estado líquido se oxida rápidamente. Esto conlleva la necesidad de trabajar en atmósferas no oxidantes. Por último, su coste económico respecto a otros metales de funcionalidad parecida, como el aluminio, son superiores. Esto presenta un gran inconveniente frente a las aleaciones de aluminio ya que supone una mayor inversión económica para adecuar la cadena de producción de piezas a partir de la fundición del magnesio.

Elementos aleantes del magnesio y designación de las aleaciones

- Aluminio

La adición de aluminio aumenta la dureza y la resistencia mecánica de la aleación. Al incrementar el porcentaje de aluminio en la aleación, gradualmente disminuyen la ductilidad y la resistencia a la fractura.

- Zinc

El zinc tiene una buena aptitud para el moldeo, mejora la resistencia a la corrosión y proporciona una mejor capacidad de deformación permanente. Se suele emplear junto con el aluminio mejorando la resistencia de la aleación magnesio-aluminio-zinc.

La designación de la aleación de magnesio nos indica que los principales metales de la aleación vienen definidos por las dos primeras letras seguidas de dos números, los cuales representan los porcentajes en peso correspondientes a los elementos citados. En el caso de que la aleación haya sufrido un cambio en los elementos de la aleación de menor proporción, después de las letras y los números, se incluye otra letra a en el orden en que las aleaciones se han ido normalizando (A, B, C...)

Un ejemplo de una aleación que contiene aluminio y zinc es, la aleación AZ91D. Se utiliza en automoción, siendo el material con el que se fabrican las cajas de transmisión de varios vehículos entre otras aplicaciones. A continuación, tabla 3, se muestran las propiedades de la aleación AZ91D.

Tabla 3: propiedades de la aleación AZ91D [7] [8]

Magnesio AZ91D		
Propiedad		Unidades
Densidad	1810	Kg/m ³
Dureza Brinell	63	
Resistencia ultima a traccion (S _{ut})	230	MPa
Resistencia a traccion (S _{yt})	150	MPa
Resistencia ultima a compresión (S _{uc})	2,9	MPa
Resistencia a la compresion (S _{yc})	165	MPa
Elongacion	3	%
Modulo de elasticidad	44,8	GPa
Coef. Poisson	0,35	
Resistencia a fatiga	97	MPa

Siendo “S_{ut}” y “S_{uc}” las resistencias ultimas a la tracción y a la compresión, respectivamente. De igual manera “S_{yt}” y “S_{yc}” son las resistencias a fluencia a la tracción y a la compresión, respectivamente.

Usos del magnesio

El gran desarrollo experimentado en el ámbito de las aleaciones de magnesio y sus excepcionales características ha permitido el empleo del magnesio en sectores tan diversos como el aeronáutico, la automoción, la industria electrónica o la industria médica. Una de las principales ventajas es que las aleaciones usadas para aplicaciones estructurales pueden ser recicladas en nuevos productos mostrando las mismas características químicas, físicas y mecánicas que el material primario, utilizando así sólo un 5% de la energía que se precisaría para obtener el producto primario [9].

La reducción del peso de los automóviles mediante el uso de materiales cada vez más ligeros ha conseguido que el uso del magnesio se fuera introduciendo de forma progresiva en la industria de automoción.

El uso de aleaciones de magnesio en la fabricación de vehículos mejora las características de las aleaciones de aluminio en aspectos que incluyen una mayor resistencia al choque y a la abolladura, aumentando la capacidad de amortiguar ruidos y vibraciones. Las aleaciones de magnesio empleadas en la industria automovilística son, principalmente, aleaciones magnesio-aluminio-zinc (AZ81, AZ91 y AZ92).

La aleación que se analizará en el presente proyecto será **AZ91D** debido a las características mecánicas y sus aplicaciones en el sector del automóvil estudiadas anteriormente.

2.2.2 Aleaciones de aluminio

Las aleaciones de aluminio que contienen diferentes elementos en función de la aplicación para la que se ha obtenido. Concretamente las aleaciones de aluminio con presencia de magnesio se utilizan en la industria del automóvil, siendo su principal uso la producción de chapas de vehículos o la producción de cabezas de cilindros, pistones y bloques de motor, entre otras aplicaciones. En las aleaciones de aluminio en función de los elementos que se añadan se obtendrán unas propiedades u otras. Para conseguir

buenas propiedades mecánicas, las principales aleaciones utilizadas son aquellas que tienen como componentes fundamentales el silicio y magnesio entre otros.

Aleaciones aluminio silicio

En las aleaciones de aluminio se utiliza fundamentalmente el silicio como elemento aleante debido a que concede una elevada fluidez, crea una alta resistencia a la corrosión y disminuye el coeficiente de expansión térmica. A pesar de todas estas características, el maquinado puede producir dificultades, debido a la presencia de partículas de silicio en la microestructura.

Las aleaciones de aluminio-silicio son de las más utilizadas para fabricar piezas vaciadas de uso doméstico, militar, automotriz, y para fabricar componentes espaciales.

Aleaciones de aluminio con silicio y magnesio

Los elementos de adicción de esta aleación son el magnesio y el silicio. Las aleaciones de este tipo pueden ser fundidas para espesores pequeños que pueden llegar hasta aproximadamente los 12 mm, ideal para elementos estructurales sujetos a vibraciones. Una de las principales finalidades del magnesio es hacer que la aleación sea tratable térmicamente. Esto se consigue endureciendo la aleación por envejecimiento, debido a la formación de un compuesto con el silicio, incrementando la resistencia mecánica y mejorando la resistencia a la corrosión. Una de las razones por las que las aleaciones de aluminio aparte de incorporar el silicio como elemento aleante también introducen el magnesio, es para mejorar las prestaciones mecánicas de la aleación. Como inconveniente, el magnesio forma escoria y óxidos que disminuyen la fluidez [10].

Todas las variantes del grupo de aleaciones Al-Si-Mg tienen excelentes características y son resistentes a la corrosión. Estas aleaciones son tratadas térmicamente para conceder varias combinaciones de propiedades de tensión y propiedades físicas que son interesantes para varias aplicaciones, incluyendo partes aeroespaciales y automotrices. El grupo aluminio-silicio-magnesio incluye aleaciones que se designan como 356. Dentro de este sistema existen varias aleaciones que se diferencian en la composición química [11].

A continuación, tabla 4, se muestra las diferentes aleaciones en función de los elementos principales en la aleación y las aleaciones con mayor número de aplicaciones en la industria del automóvil, lo que realmente interesa a la hora de realizar este proyecto.

Tabla 4: designación de las aleaciones de aluminio en función de los elementos principales [12]

DESIGNACIÓN	ELEMENTO PRINCIPAL DE LA ALEACIÓN
1XX	Aluminio puro, mínimo 99%
2XX	Cobre (Cu)
3XX	Si-Mg; Si-Cu; Cu-Mg
4XX	Silicio (Si)
5XX	Magnesio (Mg)
7XX	Zinc (Zn)
8XX	Estaño (Sn)
9XX	Otros elementos

Las aleaciones de aluminio con el silicio y el magnesio como principales elementos de aleación se conocen como aleaciones serie 3XX, tabla 5.

Tabla 5: aleaciones aluminio-silicio-magnesio [13]

355.0 De arena: pistones de compresores de aire; planchas de fondo de prensas de imprenta; camisas de agua; cárteres. Permanente: impulsores, accesorios de aviación; engranajes de distribución; carcasas de compresores de motor de reacción
356.0 De arena: volantes fundidos; cajas de transmisión de automóvil; colectores de aceite; cuerpos de bomba.
A356.0 Piezas estructurales que requieren gran resistencia mecánica; piezas de máquinas; piezas de chasis de camión

La aleación que más aceptación tiene es la 356 (7%Si-0,3%Mg) y la A356, de mayor pureza. Estas aleaciones presentan excelentes características como, moldeabilidad, soldabilidad, estanqueidad a la presión y resistencia a la corrosión [14]. Son termotratables con el objetivo de conseguir diversas combinaciones de propiedades de tensión y físicas que son atractivas para muchas aplicaciones, incluso piezas de aviones y de automóviles. Las versiones de alta pureza de ambas aleaciones, A356 y A357, ofrecen mayor ductilidad y se cuentan entre los materiales de primera calidad para fundición en arena y en moldes permanentes que se especifican para aplicaciones militares y de aviación [13].

Puesto que la aleación **A356.0 T6** presenta mayor ductilidad se escogerá para realizar el análisis de tensiones de la pinza de freno y comparar los resultados con el material actualmente empleado para su fabricación y con la aleación de magnesio elegida.

Tabla 6: nomenclatura aleación seleccionada en los diferentes sistemas [15]

	Aleacion Al-Si-Mg
EN 1706, denominación numérica	AC-42000
EN 1706, denominación simbólica	AC-ALSi7Mg
AA (Aluminium Association)	A 356.0 T6

Tabla 7: propiedades de la aleación A356.0 T6 obtenida mediante la fundición en un molde de arena [16], [15]

Aluminio A356.0 T6		
Propiedad		Unidades
Densidad	2680	Kg/m ³
Dureza Brinell	75	
Resistencia ultima a traccion (S _{ut})	270	MPa
Resistencia a traccion (S _{yt})	220	MPa
Resistencia ultima a compresion (S _{uc})	220	MPa
Resistencia a la compresion (S _{yc})	180	MPa
Elongacion	2,4	%
Modulo de elasticidad	72,4	GPa
Coef. Poisson	0,33	
Resistencia a fatiga	70	MPa

Siendo "S_{ut}" y "S_{uc}" las resistencias ultimas a la tracción y a la compresión, respectivamente. De igual manera "S_{yt}" y "S_{yc}" son las resistencias a fluencia a la tracción y a la compresión, respectivamente.

Dentro del sector de la automoción este tipo de aleaciones tienen un amplio rango de aplicaciones como, por ejemplo, producción de los bloques de cilindros de los motores de combustión interna, dicha aleación también es adecuada para la fabricación de llantas de automóviles con pequeños espesores en su parte más crítica. Es una de las aleaciones que más se está utilizando en la industria automotriz desde la década del cincuenta.

2.3 Análisis estático

El estudio del comportamiento de las piezas ante la aplicación de esfuerzos en un estado estático en función de diferentes criterios dependiendo de la naturaleza del material, recibe el nombre de análisis estático. Uno de los objetivos que se tienen a la hora de realizar un análisis estático a una determinada pieza, es determinar si la pieza ante la aplicación de unos determinados esfuerzos produce fallo. En cuanto a fallo se refiere a la aparición de cualquier comportamiento que convierta la pieza inadecuada para cumplir la función que se le había otorgado.

El estudio del comportamiento de una pieza se realizará por medio de diferentes criterios en función de la naturaleza del material del que está hecho. Se tienen dos tipos de criterios de fallo en función de la naturaleza, fallo dúctil y fallo frágil [17].

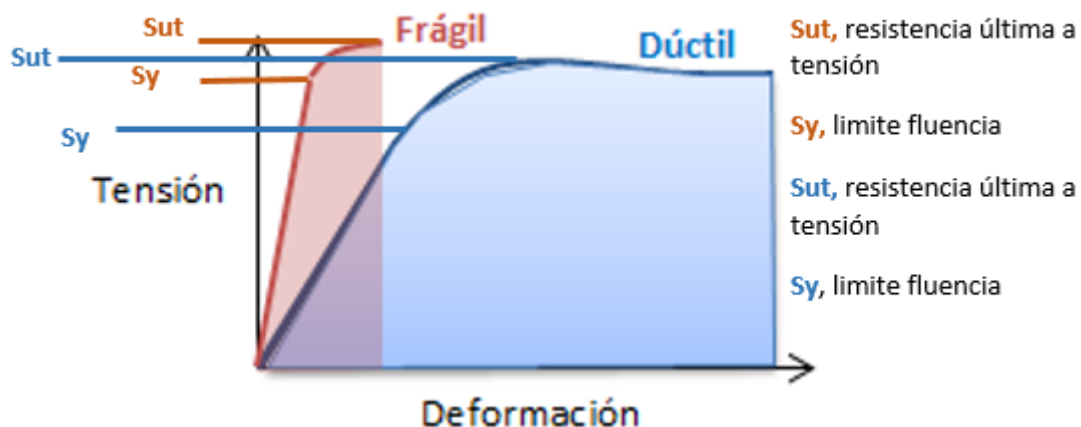


Figura 4: diferencias entre fallo dúctil y fallo frágil [18]

2.3.1 Material dúctil

El fallo dúctil se da cuando el material supera el límite de fluencia y se produce una deformación plástica permanente en la pieza provocando un cambio en el comportamiento y en las propiedades. [17]. El fallo dúctil se produce por fuerzas tangenciales.

El fallo dúctil cuenta con 3 criterios de análisis, criterio de esfuerzo cortante máximo, criterio de Von Mises y criterio de la fricción interna, Coulomb Mohr dúctil. El criterio elegido para realizar el análisis estático de la pinza de freno es el de Von Mises. A continuación, se muestra una breve explicación de este criterio.

Criterio de fallo dúctil, teoría de Von Mises

“El fallo ocurre cuando la energía de distorsión total en un volumen unitario es mayor que el valor de energía de distorsión correspondiente a la resistencia a fluencia en ese mismo volumen” [17]. El caso general viene dado por tres tensiones principales, que tras el desarrollo matemático correspondiente se consigue una expresión en la que se obtiene una tensión equivalente cuyo valor deberá ser menor que el valor de la resistencia a fluencia para conseguir que el material no falle, ecuación (2.1). Si el estado tensional es biaxial, $\sigma_3 = 0$.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{0,5[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]} \leq \sigma_{yp} \quad (2.1)$$

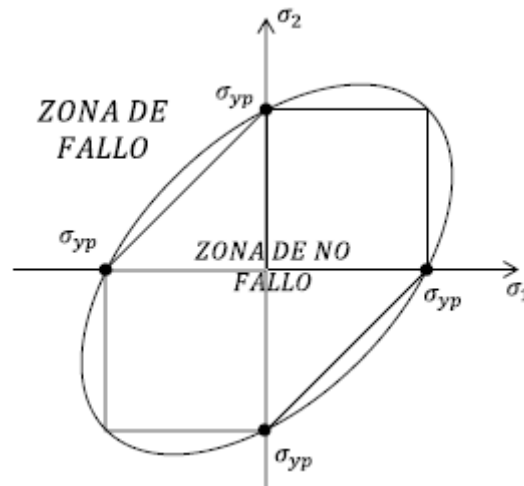


Figura 5: diagrama de la teoría del fallo de Von Mises [17]

Si el punto determinado por las tensiones principales σ_1 y σ_2 , se encuentra fuera de la zona descrita por la teoría Von Mises, no se produce el fallo del material. Las tensiones principales se obtienen mediante las siguientes expresiones.

$$\sigma_1, \sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (2.2)$$

Existe un caso particular para aquellas piezas que trabajan a cortadura pura en el momento en que se produzca el fallo. En este caso la tensión equivalente de Von Mises que en función de la resistencia de fluencia a la cortadura " S_{sy} " y la expresión de la falla del material es la siguiente.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{3\tau_{xy}^2} \leq S_{yt} \quad (2.3)$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{3} \tau_{xy} \leq S_{yt} \quad ; \quad \sigma_{eq} = \sqrt{3} S_{sy} \leq S_{yt} \quad (2.4); (2.5)$$

$$S_{sy} = \frac{1}{\sqrt{3}} * S_{yt} \quad (2.6)$$

Por lo tanto, la tensión equivalente de Von Mises obtenida durante el análisis estático debe ser menor a la resistencia de fluencia a la cortadura. De la otra forma, si la tensión equivalente es igual o mayor que la resistencia de fluencia a cortadura conlleva la falla del material y como consecuencia, el fallo de la pieza.

De los tres materiales explicados anteriormente en el apartado 2, los cuales se estudiarán en el análisis estático de la pinza de freno para ver si cumplen con las condiciones de funcionamiento, solo la aleación de aluminio A356.0 T6 presenta una buena ductilidad. La aleación de magnesio AZ91D también se clasifica como dúctil, aunque tenga una ductilidad reducida. Los valores de las propiedades necesarias para hacer el análisis se han mostrado en las tablas 6 y 7 del apartado 2.2.

2.3.2 Material frágil

El fallo frágil se da cuando el material supera el límite de fluencia y al seguir aumentando la carga se llega al punto de rotura, momento en el que la pieza rompe [17]. Los materiales frágiles presentan una resistencia a la compresión mucha mayor a la resistencia a la tracción.

El fallo frágil cuenta con 2 criterios de análisis, del máximo esfuerzo normal (teoría de Rankine) y la teoría de Coulomb Mohr frágil. El criterio elegido para realizar el análisis estático de la pinza de freno es el de Coulomb Mohr frágil.

Teoría de Coulomb Mohr frágil

Esta teoría establece que el fallo frágil viene dado por las fuerzas normales y a la hora de determinar si se produce el fallo, se tienen en cuenta las resistencias últimas a la tracción y a la compresión, en lugar de la resistencia a la fluencia como pasa en los materiales dúctiles [19]. La expresión que determina si el material falla o no a partir de las tensiones principales, es la siguiente.

$$\text{Para situaciones en las que: } \sigma_1 < 0 < \sigma_2 \quad (2.7)$$

$$\frac{\sigma_1}{S_{ut}} - \frac{\sigma_2}{S_{uc}} = 1 \quad (2.8)$$

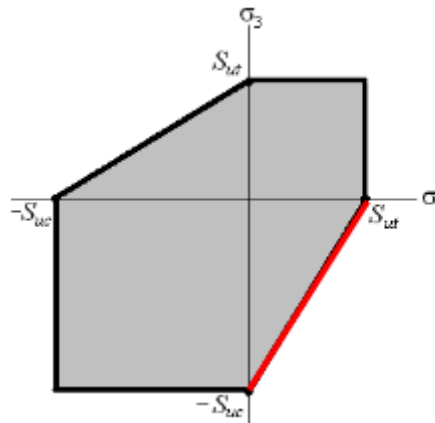


Figura 6: teoría de fallo frágil Coulomb Mohr [19]

Al igual que en los materiales dúctiles, en los criterios de fallo frágil también existe el caso particular de cortadura pura. Para aquellos elementos que estén trabajando bajo condiciones de cortadura pura existe las siguientes expresiones para determinar el fallo de la pieza. El elemento falla cuando se supera su resistencia última a la cortadura, la cual se calcula a partir de las resistencias últimas a tracción y compresión.

$$S_{su} = \frac{S_{uc} * S_{ut}}{S_{uc} + S_{ut}} \quad (2.9)$$

$$\text{Cortadura pura: } \sigma_1 = -\sigma_2 \quad (2.10)$$

$$\sigma_1 < 0 < \sigma_2 \quad ; \quad \frac{\sigma_1}{S_{ut}} - \frac{\sigma_2}{S_{uc}} = 1 \quad (2.11); (2.12)$$

De los tres materiales explicados anteriormente en el apartado 2, los cuales se estudiarán en el análisis estático de la pinza de freno para ver si cumplen con las condiciones de funcionamiento, solo la fundición gris es un material frágil. Los valores de las propiedades necesarias para hacer el análisis se han mostrado en la tabla del apartado anterior.

3 PROGRAMA DE CÁLCULO Y METODOLOGÍA

El programa elegido para realizar los análisis estáticos de la pinza de freno es ANSYS. Es un software que se utiliza a la hora de hacer ensayos y diferentes análisis, no solo mecánicos, sino también estructurales, resolver problemas de fluido mecánica, termodinámica etc.

3.1 Programa de elementos finitos: ANSYS

ANSYS es un software que mediante la teoría de elementos finitos resuelve gran variedad de problemas no solo de ingeniería sino también de física, química, arquitectura y otros ámbitos de la industria. ANSYS desarrolla y presta soporte al mundo de la ingeniería a través de un software capaz de realizar simulaciones con el objetivo de predecir cómo funcionará y cómo se comportará una pieza, un sistema o un ensamblaje bajo unas condiciones reales. El programa añade valor al proceso de proyecto de ingeniería, proporcionando eficiencia, generando innovación y reduciendo restricciones físicas, permitiendo pruebas simuladas que serían prácticamente imposibles de realizar con prototipos físicos.

ANSYS cuenta con el paquete Workbench, desarrollado sobre un marco que permite introducir una nueva manera de trabajar con los proyectos de forma esquemática. ANSYS Workbench es una plataforma de software desde donde se crean los proyectos de análisis CAE en diferentes disciplinas. Workbench despliega gráficamente el intento de la simulación en ingeniería y se establecen las relaciones entre fenómenos físicos y sus módulos incluyendo multifísica. La plataforma ANSYS Workbench incluye software y componentes para diferentes fenómenos [20].

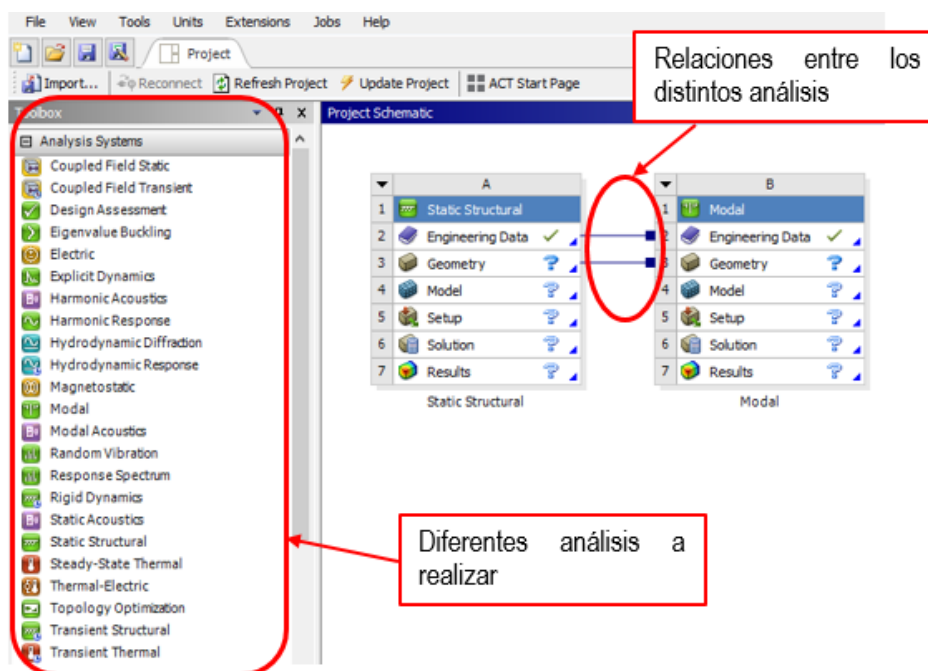


Figura 7: Display de ANSYS Workbench

ANSYS dispone con numerosos módulos con los que obtener la solución a cualquier problema de ingeniería que se presente, como por ejemplo el módulo FLUENT, que abarca la rama del fluido mecánica o MECHANICAL en el que se abordan los problemas mediante conocimientos de la ingeniería mecánica. El presente proyecto consiste en el análisis estático de una pinza de freno ante la aplicación de diferentes fuerzas y momentos obtenidos durante la acción de frenado. El módulo adecuado para realizar el proyecto es el módulo mecánico de ANSYS (ANSYS Mechanical).

ANSYS MECHANICAL es una herramienta de CAE que utiliza el método de elementos finitos (MEF) para el análisis estructural. Ofrece las capacidades necesarias para la simulación y análisis de sistemas estáticos y dinámicos, lineales y no-lineales [20]. Está preparado para simular todos los aspectos estructurales de un sistema, análisis estático lineal con el que se obtienen tensiones o deformaciones (el análisis que se realizará en el presente proyecto), análisis modal que sirve para caracterizar la vibración, fenómenos no lineales transitorios que implican efectos dinámicos complejos. Este módulo proporciona un conjunto completo de materiales y algoritmos de solución para una amplia variedad de problemas de diseño mecánico. Como cualquier herramienta de CAE, permite reducir el tiempo de diseño de un producto y evita en su medida la fabricación de prototipos, mejorando la productividad, ahorrando tiempo y costes.

ANSYS se compone de tres módulos principales: pre-proceso donde se crea la geometría con su correspondiente mallado, procesador basado en el método de elementos finitos y el post-procesador [21]. Con el módulo procesador se pueden conseguir análisis de estructuras dinámicas y estáticas con problemas lineales o no lineales, análisis de transferencia de calor, fluido mecánica, problemas de electromagnetismo y acústica. A continuación, se explican brevemente en que consiste cada uno y las partes que tienen.

Preprocesador

- **Construcción de la geometría:** ANSYS cuenta con un módulo CAD que permite la creación de geometrías. También existe la posibilidad de importar un archivo con la geometría creada en otro programa de diseño CAD.
- **Definición de los materiales:** un material queda definido cuando se determinan los valores de sus parámetros. A cada geometría se la tiene que asignar un determinado material.
- **Generación del mallado:** los nodos están conectados para formar elementos finitos, que en conjunto forman el volumen de material. La generación de la malla se puede realizar de dos formas, automática o manual. La manual es más costosa ya que hay que definir todos los parámetros que influyen en la generación del mallado, el tipo de elemento, el tipo de unión entre nodos, etc. La generación automática de la malla es más rápida y sencilla, ya que la genera directamente al dar la orden de creación de malla. Esta función admite que se modifique algún parámetro característico [21].

Solución del procesador

En este apartado se soluciona el problema a partir de todos los datos especificados anteriormente

- **Aplicación de las cargas:** se definen las condiciones de contorno y se aplican sobre los nodos o elementos. También se determinan la magnitud que incide sobre la geometría ya sea una fuerza, un momento, un desplazamiento, etc.
- **Solución:** la solución se obtiene si se consigue ejecutar el problema debido a que todos los parámetros y condiciones han sido definidas perfectamente [21].

Postprocesador

En este apartado se conocen los resultados del problema y mediante diferentes gráficos de colores en 3D o gráficas en las que se representan una magnitud frente a otra definida anteriormente se interpretan y analizan los resultados del problema.

- **Visualización de los resultados:** permite generar gráficos con el objetivo de poder visualizar mejor los problemas de tensiones, deformaciones, transferencia de calor... generados por las diferentes condiciones a las que está sometida la estructura.

- **Informe con los resultados:** impresión de un informe con los resultados del problema [21].

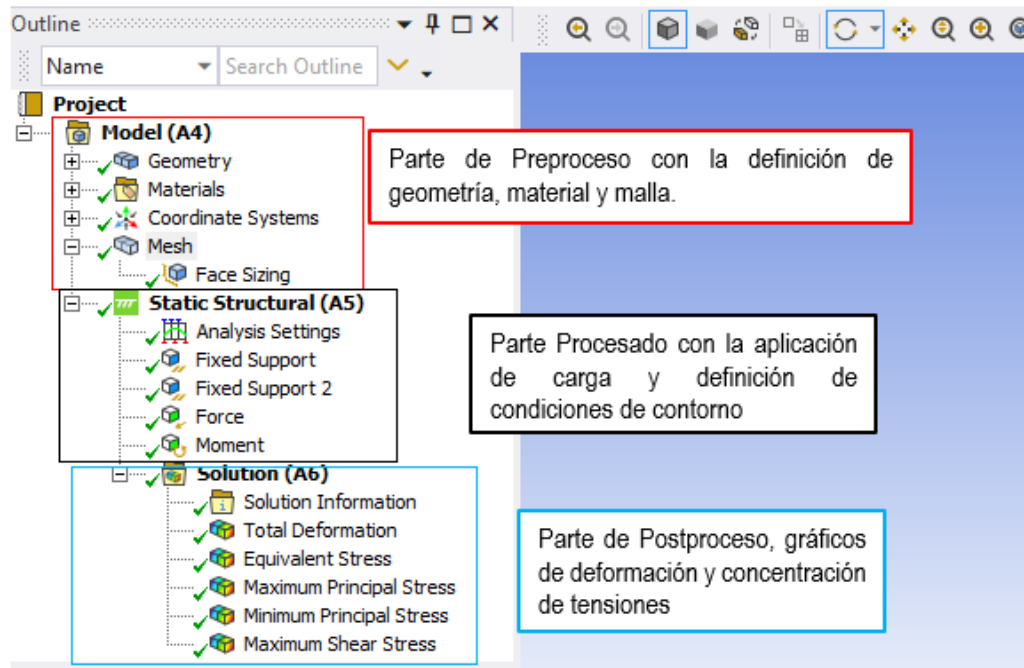


Figura 8: Display módulo ANSYS Mechanical

3.2 Metodología que seguir durante el proyecto

- Dado el diseño en 3D de la pinza del freno, realizar una búsqueda exhaustiva de información con el objetivo de saber en qué consiste la pieza, cuál es su función en el automóvil y más concretamente en el sistema de frenos. También es necesario saber qué papel juega con el resto de los elementos del sistema, estudiando como interactúa con ellos cuando se ejerce la acción de frenado.
- Investigar los materiales que utiliza la empresa para la fabricación de la pieza, estudiar las diferentes propiedades y ver cómo afecta el proceso de fabricación, en este caso la fundición, al comportamiento del material. Debido a que uno de los objetivos principal es optimizar el diseño de la pinza de freno, en cuanto a la elección del material para su fabricación basándose en la realización de análisis estáticos, se inicia una búsqueda de aleaciones que contengan las mismas propiedades mecánicas que el material que se va a sustituir y compartan el mismo proceso de fabricación.
- Revisión bibliográfica de artículos, libros y otros documentos donde encontrar información sobre los análisis estáticos que se le aplican a las piezas de forma preventiva con el fin de estudiar su comportamiento ante la aplicación de diferentes cargas y momentos durante su funcionamiento.
- Realizar el cálculo de las fuerzas de frenado obteniéndolas a partir de un diagrama dinámico en el que se representen todas las cargas que actúan durante la acción de frenado del vehículo que llevará equipada la pinza estudiada. Para obtener dichos valores de las fuerzas es necesario definir los parámetros y valores iniciales de los que dependerá su cálculo, tales como posición del centro de gravedad del vehículo, masa de este, diámetros de ruedas, etc. Una vez obtenidas las fuerzas en las ruedas durante el frenado se procede a calcular el momento producido en el

disco de freno debido a la fricción generada entre las patillas de la pinza y este mismo. De la misma forma se calculan las fuerzas que se producen debida al contacto entre el disco y el conjunto pastillas-pinza de freno. Posteriormente estos valores serán utilizados para realizar el análisis estático de la pinza de freno.

- Realizar el análisis estático por medio del programa de elementos finitos ANSYS determinando las condiciones de contorno que tendrá la pinza de freno al instalarla y aplicar las fuerzas obtenidas mediante el cálculo anterior. Previamente consultar diferentes artículos de la página oficial de ANSYS para poder utilizar de forma correcta los módulos necesarios para la simulación del análisis estático y la posterior interpretación de los resultados.
- Una vez obtenidos los resultados del análisis estático para los diferentes materiales seleccionados, realizar una comparación estudiando que material tiene mejor comportamiento ante las cargas aplicadas en las diferentes situaciones analizadas. Este estudio se basará en función de las diferentes magnitudes representadas como la concentración de tensiones o la deformación producida.
- El estudio de las concentraciones de tensiones la pinza se llevará acabo basándose en las teorías de fallo estático, dúctil o frágil, dependiendo de la naturaleza de las aleaciones estudiadas.
- Realizada la comparación de los resultados de los análisis, seleccionar el material que mejor se adapte a las condiciones de funcionamiento y proponer la fabricación de la pinza de freno con dicho material.

4 DESARROLLO DEL PROYECTO TFM

4.1 Cálculo de las fuerzas de frenado

4.1.1 Datos de partida y parámetros necesarios para el cálculo de las fuerzas de frenado

Por el principio de acción-reacción de Newton, cuando un vehículo está parado sobre la carretera ejerce una carga hacia abajo desde su centro de gravedad llamado peso. Se ejerce una fuerza de igual módulo y dirección, pero sentido contrario consiguiendo así el equilibrio del vehículo. Esta fuerza contraria al peso del vehículo está repartida entre los 4 puntos de apoyo que tiene el vehículo con el suelo, las ruedas. El vehículo al iniciar la marcha ejerce una fuerza tangencial al suelo llamada fuerza de aceleración o de impulso. Esta acción producirá un efecto contrario dando lugar a la fuerza de fricción, consiguiendo así el avance del vehículo. La marcha del vehículo se consigue porque hay un equilibrio de fuerzas, en el que el peso ejercido por el vehículo sobre la carretera se compensa con las reacciones sobre las cuatro ruedas, también llamadas fuerzas normales. En la dirección de la marcha del vehículo también existe un equilibrio de fuerzas proporcionado por la fuerza de aceleración que será compensada por las fuerzas de fricción ejercidas sobre las cuatro ruedas. En la Figura 10 se muestran las fuerzas ejercidas sobre el vehículo cuando éste está parado y en movimiento.

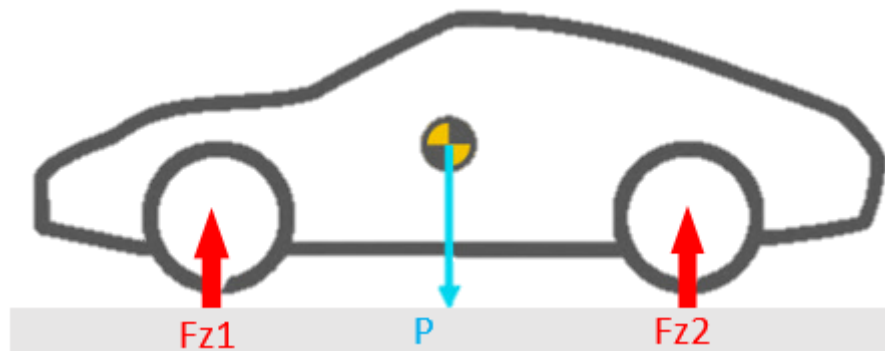


Figura 9: fuerza de impulso y fuerza de fricción cuando el vehículo se encuentra parado [22]

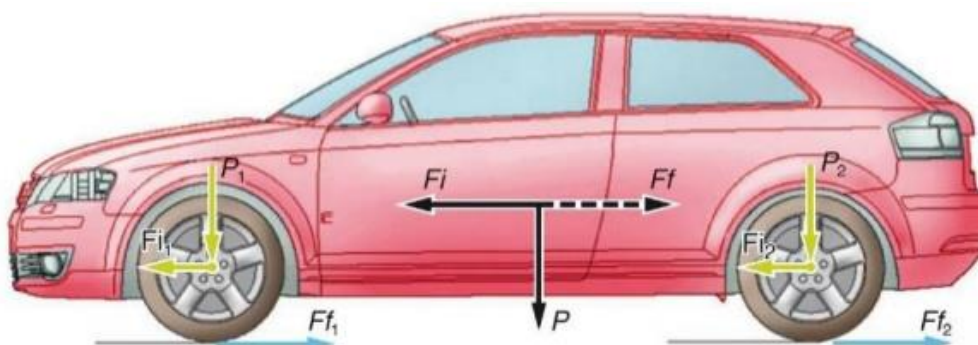


Figura 10: fuerza de impulso y fuerza de fricción cuando el vehículo se encuentra en movimiento [23]

Las fuerzas de frenado dependen de múltiples factores, por ejemplo, de la geometría del automóvil, el reparto de peso, el cual dependerá del tipo de tracción, la deceleración obtenida en la frenada, las condiciones de la carretera y neumáticos, las cuales producirán una mejor adherencia dando lugar a una frenada más eficiente, etc.

Datos específicos como el radio del disco que irá alojado en la pinza de freno permite saber qué tipo de automóvil contará con la pinza de freno analizada. El radio del disco se obtiene realizando diferentes medidas sobre el modelo 3D de la pinza de freno. La superficie señalada en el modelo 3D es la superficie

que limita el diámetro del disco, Figura 12. Tiene un diámetro de 363,6 mm. Tras realizar las medidas adecuadas se establece un diámetro de disco de 320 mm con la intención de dejar una distancia de 40 mm entre los dos elementos para evitar el contacto entre ellos y así no producir el fallo mecánico del conjunto de freno.

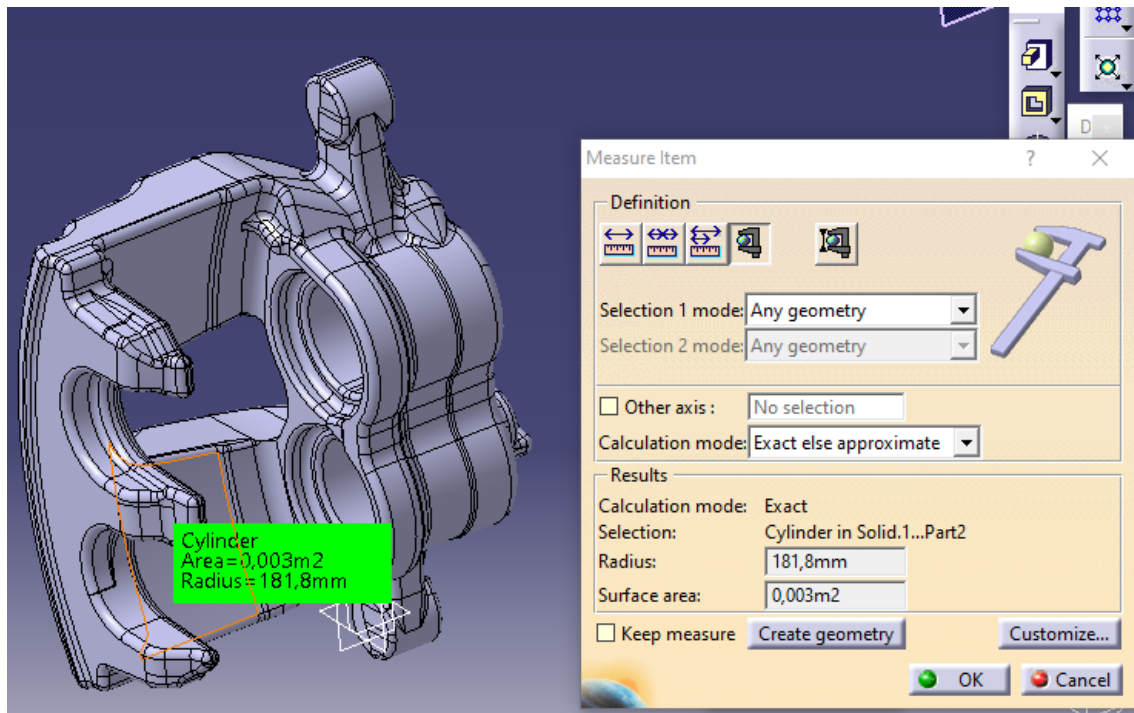


Figura 11: dimensión de la pinza de limita el diámetro del disco

Sabiendo el valor máximo del diámetro del disco se investiga que tipo de vehículos corresponden con las medidas establecidas para los discos, se trata de un automóvil berlina. Para realizar los cálculos correspondientes a la obtención de las fuerzas de frenado, se recogen los datos técnicos de los vehículos tipo berlina más destacados y vendidos del mercado, con el objetivo de definir los parámetros de un vehículo estándar dentro del tipo de vehículo investigado. Se han anotado los datos de 7 automóviles referencia en la clase berlina a partir de los cuales se han obtenido los datos del vehículo estándar, que incorporará la pinza de freno estudiada. Los valores de máxima masa autorizada y la batalla se han obtenido haciendo un promedio de los datos investigados. En cuanto a los neumáticos, se han escogido los más utilizados en los vehículos consultados.

A continuación, se muestran los datos de los automóviles consultados a partir de los cuales se obtendrán los valores correspondientes del vehículo estándar. También se muestra una tabla con los parámetros de partida de los que depende el cálculo de las fuerzas de frenado.

Tabla 8: modelos vehiculos consultados [24]

Audi A4 2019	Audi A4 Advanced 35 TFSI 110 kW (150 CV) (2019)
VW Passat 2019	Volkswagen Passat 1.5 TSI 110 kW (150 CV) (2019)
Renault Talisman 2016	Renault Talisman Life Energy dCi 110 (2015-2016)
Opel Insignia 2020	Opel Insignia Sports Tourer 1.4T 145 CV
Ford Mondeo 2019	Ford Mondeo 5 puertas Trend 2.0 TDCi 110 kW (150 CV)
Peugeot 508 2019	Peugeot 508 Active BlueHDi 130 S&S
Alfa Romeo Giulia 2020	Alfa Romeo Giulia 2.2 JTD 118 kW (160 CV) Super Aut. 8 vel. RWD

Tabla 9: valores obtenidos a partir de los datos recogidos de los vehículos de referencia de la clase berlina [24]

	Audi A4 2019	VW Passat 2019	Renault Talisman 2016	Opel Insignia 2020	Ford Mondeo 2019	Peugeot 508 2019	Alfa Romeo Giulia 2020	Vehículo estandar estudio
Batalla (m)	2,82	2,786	2,808	2,829	2,85	2,793	2,82	2,82
Neumatico	225/50 R17	215/60 R16	225/55 R17	225/55 R17	215/60 R16	215/55 R17	225/50 R17	225/55 R17
MMA (Kg)	1490	1425	1387	1441	1715	1415	1540	1487,57

Tabla 10: parámetros necesarios para el cálculo de las fuerzas de frenado

Vehículo estandar estudio	
g (m/s²)	9,810
L (m)	Batalla
a (m)	Distancia cdg al eje delantero
b (m)	Distancia cdg al eje trasero
h (m)	Altura cdg
m (Kg)	Maxima masa autorizada
W (N)	Peso
Neumaticos	Designacion neumaticos
Relacion altura/base neumatico	Perfil neumatico
r efectivo disco (m)	Radio efectivo frenada disco
R rueda (m)	Radio rueda
Ancho neumatico (mm)	Ancho perfil neumatico
Diametro llanta (mm)	Diametro llanta

La pinza de freno analizada determina el diámetro máximo que debe tener el disco de freno que se coloque en el conjunto de freno. Como se ha indicado anteriormente, el disco de freno tendrá un diámetro de 320 mm. Consultando bibliografía y diferentes catálogos de discos de freno se determinan las dimensiones del disco que instalaría el vehículo estándar [25]. Los catálogos de los discos de freno consultados son los correspondientes a los vehículos nombrados anteriormente. De igual forma que se establecieron los neumáticos para el vehículo estándar establecido, se realiza la determinación de las dimensiones del disco de freno basándose en los discos más usuales en dichos vehículos. Las dimensiones son las siguientes [25].

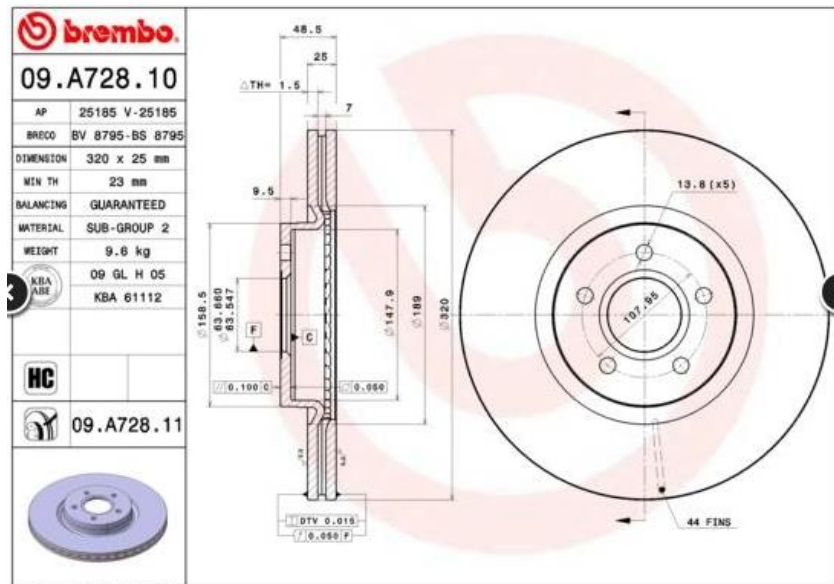


Figura 12: dimensiones del disco de freno [25]

Como se puede apreciar en el plano, el disco tiene un ancho de 48,5 mm (incluida la copa del disco). Después de realizar las correspondientes medidas sobre el modelo de la pinza en 3D se aprecia que el ancho máximo de las pistas del disco de freno permitido será 66,8 mm. Aun añadiendo las dimensiones de las pastillas, el disco seleccionado cumple con las condiciones de anchura.

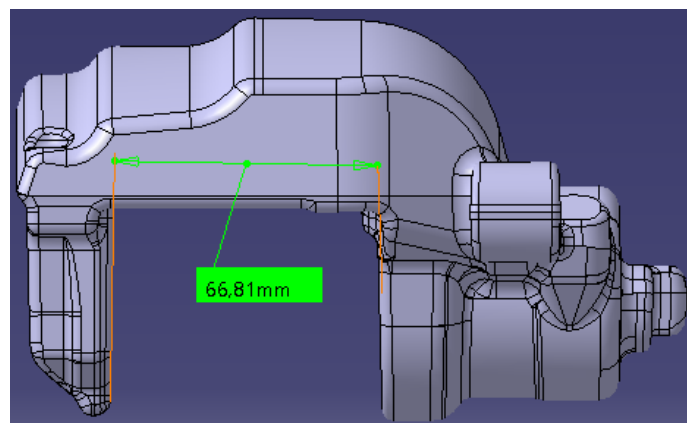


Figura 13: distancia que limita el ancho del disco de freno

Diámetro exterior del disco: 320 mm

Diámetro de la copa del disco de freno: 189 mm

Espesor de la pista del disco (diferencia de los radios que delimitan la zona efectiva de frenado): 65,5 mm

Por lo tanto, el radio efectivo de frenado viene dado por la ecuación (4.1)

$$R_{\text{efect disco}} = \frac{R_{\text{copa}} + (R_{\text{ext}} - R_{\text{copa}})}{2 * 1000} = 0,125 \text{ m} \quad (4.1)$$

Antes de empezar a calcular la ubicación del centro de gravedad es necesario definir el radio de la rueda del vehículo, debido a que su valor influirá en el proceso de cálculo, específicamente en la altura. El radio se obtiene a partir de la designación de los neumáticos que equipará el vehículo. Primero hay que saber

que significa cada elemento de la designación de los neumáticos, a continuación, se explica por medio de una imagen.



Figura 14: designación tipo de neumático [26]

El neumático que montará el vehículo estándar será **225/55 R 17** (Tabla 9). Esto quiere decir que tendrá una anchura de 225 mm, un perfil 55 (relación entre la anchura y la altura del perfil del neumático), el neumático es de tipo radial y el diámetro de la llanta es de 17 pulgadas. A partir del diámetro de la llanta y el perfil del neumático se puede conseguir el radio de la rueda, ecuación (4.3), el cual permitirá calcular la altura del centro de gravedad del vehículo.

$$h_{perfil} = perfil * anchura \quad (4.2)$$

$$R_{rueda} = \frac{2 * perfil * Anchura + 17 * 2,54}{2 * 1000} = 0,340 \text{ m} \quad (4.3)$$

Parámetros geométricos del vehículo

Antes de empezar a describir el procedimiento de cálculo de las fuerzas es necesario explicar cómo se ha obtenido el valor de cada parámetro contenido en la Tabla 10.

Para realizar el cálculo de las fuerzas de frenado es especialmente necesario conocer la localización del punto de gravedad del vehículo. La ubicación del centro de gravedad definirá tres parámetros esenciales. Estos parámetros son: "a", distancia del centro de gravedad al eje delantero, "b" distancia del "cdg" al eje trasero y "h" es la altura a la que se encuentra el centro de gravedad hasta la carretera.

Tanto el valor de "a" como el valor de "b" vienen determinado por el reparto de peso del vehículo y por el tipo de tracción que presenta. Con el motor ubicado en la parte frontal, para los vehículos de tracción delantera se establece un reparto de peso del 60% en el eje delantero y un 40% en el eje trasero. En el caso de los vehículos con tracción trasera el reparto de pesos está más equilibrado de tal forma que las proporciones utilizadas son de 50 % para cada eje. Este reparto de pesos es determinante a la hora de calcular las distancias del centro de gravedad a los ejes delantero y trasero por medio del equilibrio de fuerzas cuando el vehículo está en estado estático.

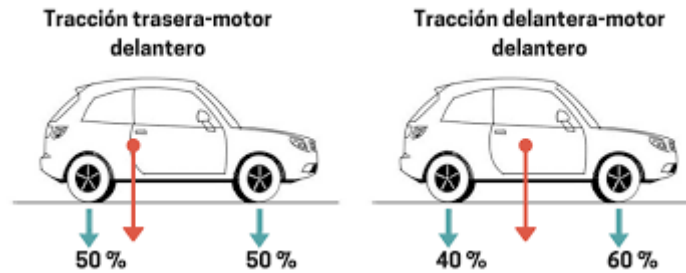


Figura 15: reparto de peso en función de la tracción [27]

Como la mayoría de los automóviles consultados son de tracción delantera, se ha establecido, que el vehículo que contará con la pinza estudiada tenga tracción delantera y un reparto de pesos de 60% y 40%, para el eje delantero y el eje trasero, respectivamente.

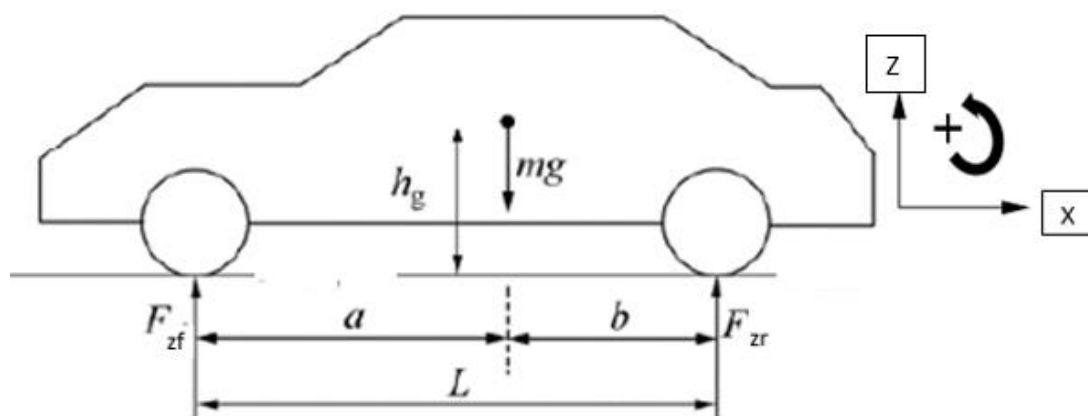


Figura 16: diagrama de fuerzas en el vehículo en estado estático [28]

Realizando el equilibrio de momentos en la rueda trasera se obtienen las distancias del centro de gravedad a los dos ejes.

$$\sum M = 0 \quad (4.4)$$

$$m * g * b = F_{zf} * L \quad (4.5)$$

$$\text{Siendo } F_{zf} = 60\% * m * g \quad (4.6)$$

$$b = 1,689 m \quad (4.7)$$

$$a = L - b = 1,126 m \quad (4.8)$$

El cálculo de la altura del centro de gravedad es más complicado. También se realiza a partir del equilibrio de fuerzas y momentos, pero es un cálculo más complejo. Para determinar la altura a la que se encuentra el centro de gravedad se debe generar un ángulo entre el vehículo y el suelo. Esto se consigue elevando las ruedas posteriores del vehículo una altura conocida. Las dos ruedas elevadas tienen que estar a la misma distancia del suelo. Las ruedas delanteras deben estar niveladas correctamente para que el cálculo se realice de manera efectiva. Se establece que la altura de elevación de las ruedas posteriores del vehículo es de 30 cm. Esta elevación determinará el porcentaje de peso transferido hacia el eje delantero. Dicha transferencia de peso permitirá realizar de forma correcta el cálculo de la altura del centro de gravedad del vehículo aplicando de nuevo, los equilibrios de fuerzas y momentos sobre el esquema del vehículo. A continuación, se muestran los cálculos realizados para la determinación de la altura del centro de gravedad.

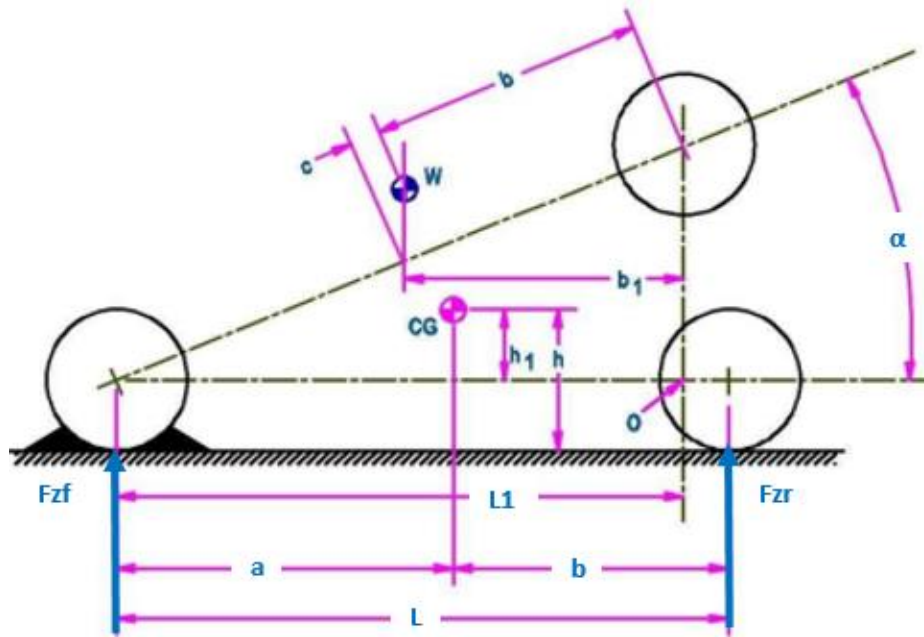


Figura 17: esquema equilibrio de fuerzas del vehículo con las ruedas posteriores elevadas [29]

$$\text{Sen } \alpha = \frac{0,3}{L}; \alpha = 6,4^\circ \quad (4.9)$$

$$L_1 = L * \cos(\alpha) = 2,771 \text{ m} \quad (4.10)$$

Al realizar el equilibrio de momento en el punto O se tiene:

$$F_{zf} * L_1 = b_1 * W \quad (4.11)$$

$$b_1 = 1,718 \text{ m} \quad (4.12)$$

$$\frac{b_1}{b + c} = \cos(\alpha) \quad (4.13)$$

$$c = 0,056 \text{ m} \quad (4.14)$$

Si se aplica que $\tan(\alpha) = c/h_1$, se tiene la siguiente expresión:

$$h_1 = \frac{F_{zf} * L - W * b}{W * \tan(\alpha)} \quad (4.15)$$

$$h_1 = 0,315 \text{ m} \quad (4.16)$$

Como indica el esquema "h1" es la altura del centro de gravedad desde la línea que conecta los centros de las ruedas. Esta línea también representa el suelo del habitáculo del vehículo. Si los radios de las ruedas, tanto delanteras como traseras son iguales, la altura del centro de gravedad se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$h = R_{ruedas} + h_1 \quad (4.17)$$

$$h = 0,655 \text{ m} \quad (4.18)$$

Por la tanto el centro de gravedad del vehículo se encuentra a una altura de 0,655 metros de la carretera, a una distancia de 1,126 m del eje delantero y a 1,689 m del eje trasero. Una vez que se tiene la ubicación del centro de gravedad junto al resto de los datos técnicos del vehículo (radio de la rueda y del disco de freno), se calculan las fuerzas generadas durante la frenada. Las fuerzas que se calculan en el siguiente apartado, son las fuerzas que se generan en la rueda al estar en contacto con la carretera.

Se presentan los valores de los parámetros obtenidos anteriormente necesarios para iniciar el cálculo de las fuerzas originadas en la rueda al estar en contacto con la carretera durante la frenada.

Tabla 11: valores parámetros necesarios para el cálculo de las fuerzas de frenado

Vehiculo estandar estudio	
g (m/s²)	9,810
L (m)	2,815
a (m)	1,126
b (m)	1,689
h (m)	0,655
m (Kg)	1487,57
W (N)	14593,06
Neumaticos	225/55 R 17
Relacion altura/base neumatico	0,55
r efectivo disco (m)	0,125
R rueda (m)	0,340
Base neumatico (mm)	225
Diametro llanta (mm)	431,8

4.1.2 Cálculo de las fuerzas de frenado en las ruedas

El objetivo del estudio de la acción de frenado de un vehículo es calcular la fuerza y el par de frenado que produce el disco de freno para reducir la energía cinética del vehículo e incluso pararlo por completo. Una vez que se tengan los correspondientes valores, se aplicarán a la pinza con la intención de realizar el análisis estático mediante el criterio de fallo dúctil o fallo frágil, dependiendo de la naturaleza de los materiales escogidos para su estudio. Para ello es necesario calcular previamente la fuerza de fricción y la fuerza normal producidas en las ruedas durante la frenada. Los valores de estas fuerzas dependerán en gran medida de factores como, la transferencia de carga durante la frenada, las condiciones de la carretera, entre otros.

Las fuerzas de frenado que se producen al accionar el pedal de freno se pueden obtener a partir de un cálculo teórico. Conociendo las características del vehículo, su comportamiento y los factores externos que afectan a la conducción, se puede calcular teóricamente la fuerza ejercida por cada eje. Para ello se desarrolla un modelo simplificado del vehículo. Para realizar los cálculos con mayor facilidad, se considera un cuerpo rígido sin suspensión, ausencia de fuerzas resistentes al avance como por ejemplo la fuerza aerodinámica del aire y se analiza el proceso de frenado considerando la ausencia de acciones laterales.

Antes de iniciar el cálculo es necesario definir las variables que intervienen en la determinación de las fuerzas de frenado.

Tabla 12: variables necesarias en el cálculo de las fuerzas de frenado

NOMENCLATURA	
a	Distancia del cdg al eje delantero
b	Distancia del cdg al eje trasero
F_{xf}	Fuerza de frenado en el eje delantero
F_{xr}	Fuerza de frenado en el eje trasero
F_{xf,max}	Máxima fuerza de frenado en el eje trasero
F_{xr,max}	Máxima fuerza de frenado en el eje delantero
R_{rueda}	Radio efectivo de la rueda
R_{efect disco}	Radio efectivo del disco de freno
η_c	Eficiencia de frenado
h	Altura del cdg
L	Distancia entre ejes delantero y trasero (batalla)
W	Peso del vehiculo
Z	Desaceleracion (m/s ²)
μ	Coef. Adherencia
q	Coef. Adherencia durante el frenado

Las fuerzas de frenado calculadas cambian de valor en función del tiempo, sin embargo, el análisis estático tiene la capacidad de incluir diferentes cargas constantes y en algunos casos también incluyen distintas cargas aplicadas que varían en el tiempo durante su funcionamiento, pero que pueden ser aproximadas a un equivalente estático, como se produce en este caso [30].

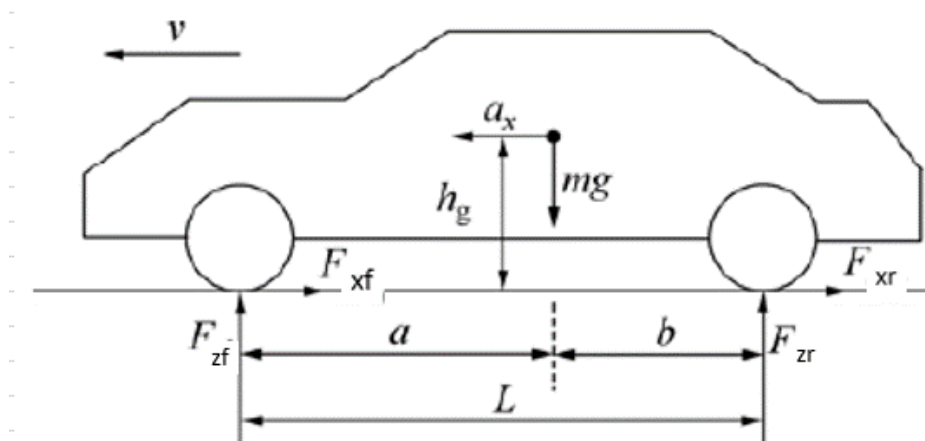


Figura 18: esquema fuerzas de frenado [28]

Se considera que el vehículo se mueve en línea recta y que no existen fuerzas laterales. Al haber un par entre la superficie de rodadura y el centro de gravedad del vehículo, se provoca una transferencia de carga durante el frenado.

Esto provoca una fuerza de frenado distinta en los ejes delantero y trasero. Lo único que provoca la transferencia de carga es la inercia (siguiendo la primera ley de Newton) originada por la deceleración del vehículo, es decir, la carga dinámica por eje. Durante el frenado, el esfuerzo produce por inercia una

reacción igual y de signo contrario aplicada al centro de gravedad. Estas fuerzas desarrollan un momento que produce una transferencia de peso de atrás hacia delante, por lo cual se produce un desplazamiento hacia adelante del centro de gravedad y una sobrecarga adicional sobre el eje delantero.



Figura 19: representación de la transferencia de carga durante la frenada [31]

Adherencia

Uno de los factores más influyentes en la frenada de un vehículo es la adherencia. Al producirse una situación de frenado de emergencia es la adherencia la que marca la diferencia entre mantener la estabilidad del vehículo o tener un accidente por la pérdida del control.

La adherencia determina la eficacia y el límite de la fuerza de frenado real de un vehículo a través del contacto entre el neumático y el terreno [32]. Si se supera el límite de adherencia entre el vehículo y la carretera se producirá el bloqueo de las ruedas desembocando en la pérdida de la estabilidad del vehículo.

Para calcular la fuerza de frenado es necesario obtener el coeficiente de adherencia entre el neumático y el terreno. Para que un cuerpo, en este caso un vehículo, inicie el movimiento es necesario aplicar una fuerza. El resultado de la relación entre el peso del vehículo y la fuerza aplicada para iniciar su movimiento es el coeficiente de adherencia estático. Durante el movimiento del vehículo, debido al contacto de los neumáticos con el terreno se produce una fuerza de fricción, definida por el coeficiente de adherencia. Este coeficiente depende de varios factores de los que hay que destacar, el estado del terreno y de los neumáticos, la velocidad, temperatura, etc.

La adherencia disminuye al aumentar la velocidad ya que la fuerza centrífuga debido a la velocidad angular de la rueda reduce la superficie de contacto [33].

El estado de los neumáticos también aumenta o disminuye la adherencia del vehículo al terreno. Un neumático desgastado sobre una carretera asfaltada tiene mejor adherencia que un neumático nuevo debido a que hay una mayor superficie de contacto. Sin embargo, un vehículo con los neumáticos nuevos sobre una superficie mojada agarra más que con los neumáticos desgastados. Esto se debe a que el relieve de la banda de rodadura del neumático permite evacuar el agua entre el suelo y el neumático. En esta situación un vehículo con neumáticos desgastados no consigue realizar una buena evacuación del agua dando lugar al fenómeno "aquaplaning". Este fenómeno produce la pérdida de control del vehículo debido a la mala evacuación del agua existente en la superficie de contacto. Este fenómeno también puede producirse en vehículos con neumáticos nuevos cuando la velocidad aumenta y la cantidad de agua alcanza un valor máximo.

A continuación, se muestra una tabla con los coeficientes de adherencia para diferentes situaciones de conducción.

Tabla 13: coeficientes de adherencia en función de la velocidad, estado de los neumáticos y del terreno [32]

Velocidad de la marcha	Estado de los neumáticos	Calzada seca	Calzada húmeda	Calzada mojada	Charco de agua	Calzada helada
Km/h	μ	μ	μ	μ	μ	μ
50	Nuevos	0,85	0,65	0,55	0,5	Menor a 0,1
	Desgastados	1	0,5	0,4	0,25	
90	Nuevos	0,8	0,6	0,4	0,2	
	Desgastados	0,95	0,2	0,1	Menor a 0,1	
120	Nuevos	0,75	0,55	0,2	0,1	
	Desgastados	0,9	0,1	Menor a 0,1	Menor a 0,1	

El cálculo de las fuerzas se ve influido en mayor medida por el coeficiente de adherencia, y más concretamente por el estado de la carretera. En función del estado de la carretera la fuerza de frenado obtenida en la superficie de contacto entre el neumático y el pavimento será mayor o menos. Se obtiene un mayor valor de la fuerza cuanto mayor sea el contacto entre las ruedas y el suelo, condición que se da cuando la calzada está seca. A la hora de realizar los cálculos de las fuerzas de frenado se escoge la condición de calzada seca, en la cual se obtendrá una mayor fuerza.

Fuerzas de frenado

A la hora de calcular la fuerza de frenado se consideran situaciones diferentes a las que se podría enfrentar un vehículo durante su movimiento. El primer cálculo realizado corresponde a una situación en la que las 4 ruedas se bloquean simultáneamente. En este primer cálculo se obtiene la fuerza máxima que se produce antes de que se inicie el deslizamiento de las ruedas de ambos ejes. El bloqueo de las ruedas se debe a que se ha superado el límite de adherencia en el contacto entre el neumático y la carretera. Esto se debe a que se ha transferido una fuerza superior a la admitida dada por la adherencia entre superficies.

También se calculan las fuerzas de frenado para el caso en el que las ruedas de un solo eje se bloquean. En esta situación cuando se supera el límite de adherencia las ruedas que se bloquean corresponden al eje delantero. A la hora de diseñar el sistema de frenado los ingenieros determinan que ante una determinada situación de peligro durante la frenada es más seguro que se bloqueen las ruedas delanteras. Esto se debe a que si se bloquean primero las ruedas del eje delantero se garantizan la estabilidad del vehículo. Por el contrario, si se bloqueasen las ruedas traseras, el vehículo experimentaría una situación similar a cuando se acciona el freno de mano perdiendo la estabilidad del vehículo y por lo tanto poniendo en peligro a los ocupantes [28].

De la misma forma se calcula la fuerza mínima necesaria originada en las ruedas del eje trasero para garantizar la estabilidad del vehículo cuando empiezan a deslizarse (bloquear) las ruedas delanteras. Es necesario mantener cierta fuerza de frenado en las ruedas traseras cuando las delanteras se bloquean. [28].

Estas dos situaciones vienen dadas por expresiones diferentes que más adelante en el apartado de cálculo de fuerzas de frenado se mostrarán.

- Situación 1: máxima fuerza de frenado antes de que se bloqueen las 4 ruedas simultáneamente [28].

Cuando las ruedas delanteras y traseras se bloquean simultáneamente, las fuerzas de frenado se calculan de siguiente forma. Para obtener las fuerzas de frenado máximo será necesaria toda la adherencia disponible.

$$\frac{e}{\mu} = 1 \quad (4.19)$$

Siendo “e” la deceleración específica, es decir, la relación entre la desaceleración producida en el frenado y la aceleración de la gravedad. Por lo tanto, tenemos para este caso que la desaceleración producida se obtiene de la siguiente forma:

$$e = \frac{Z}{g} \quad (4.20)$$

$$Z = \mu * g \quad (4.21)$$

Para la obtención de las fuerzas de frenado máximas hay que tener en cuenta una serie de consideraciones. El resultado de la relación entre el peso del vehículo y la fuerza aplicada para iniciar su movimiento es el coeficiente de adherencia estático.

Como se ha comentado anteriormente, el coeficiente de adherencia es la relación entre la fuerza de fricción y el peso del vehículo. Por lo tanto, se calculará la fuerza de fricción máxima debida al frenado junto al peso transferido sobre la rueda, multiplicándolo por el coeficiente de adherencia. Se indica en la expresión:

$$F_{xf} = \mu * \left[\frac{b * W}{L} + \frac{h * W * Z}{g * L} \right] \quad (4.22)$$

$$F_{xr} = \mu * \left[\frac{a * W}{L} - \frac{h * W * Z}{g * L} \right] \quad (4.23)$$

Las cargas estáticas sobre los ejes delantero y trasero respectivamente vienen dadas por el primer sumando, mientras que el segundo término representa la transferencia de carga. Como se observa en sus signos, esta va del eje trasero al delantero. Al multiplicar la carga estática de cada eje por el coeficiente de adherencia se obtiene la fuerza de fricción máxima de frenado [34].

Las fórmulas anteriores permiten calcular las fuerzas de frenado obtenidas en las ruedas de los ejes delantero y trasero. Como el estudio a realizar consiste en el análisis estático de una pinza de freno, es necesario dividir la fuerza de frenado obtenida en dos partes iguales, correspondientes a las dos ruedas que componen el eje delantero del vehículo.

$$F_{xf} = \mu * \left[\frac{b * W}{L} + \frac{h * W * Z}{g * L} \right] \text{ Fuerza de frenado normal} \quad (4.24)$$

- Situación 2: Fuerza de frenado en las ruedas delanteras cuando estas se bloquean y fuerzas de frenado traseras mínimas para garantizar la estabilidad del vehículo en esta situación [28].

Se calculan las fuerzas de frenado para la situación en la que las ruedas delanteras se bloquean antes que las traseras garantizando así la estabilidad del vehículo. También se calcula la fuerza mínima necesarias en las ruedas traseras para garantizar la estabilidad cuando empiezan a deslizar (bloquear) las delanteras.

Para realizar el cálculo hay que tener en cuenta que la relación entre el coeficiente de adherencia durante el frenado y el coeficiente de adherencia durante la marcha del vehículo es la siguiente [28]. En esta situación más realista se utiliza el coeficiente de adherencia durante el frenado para calcular las fuerzas.

$$q \geq 0,1 + 0,85 * (\mu - 0,2) \quad (4.25)$$

Las posteriores expresiones permiten calcular las fuerzas producidas en las condiciones anteriormente descritas. Como en la situación 1, mediante estas fórmulas se calculan las fuerzas de frenado originadas en el eje delantero y trasero. Hay que dividir las fuerzas obtenidas entre dos para así poder obtener las fuerzas que realmente se dan en una rueda del vehículo, necesarias para el cálculo estático de la pinza de freno.

$$F_{xf} = \frac{q + 0,07}{0,85} * \frac{W * (b + q * h)}{L} \quad (4.26)$$

$$F_{xr} = W * q - F_{xf} \quad (4.27)$$

Valores obtenidos de las fuerzas de frenado

A continuación, se muestra una tabla con las fuerzas de frenado obtenidas para las diferentes situaciones.

- Situación 1

Se calculan las fuerzas máximas de frenado que se dan en las ruedas delanteras y traseras antes de que las cuatro ruedas se bloqueen simultáneamente

Tabla 14: fuerzas de frenado para la situación 1

Carretera seca (caso en el que se produce una mayor fuerza)			Z (m/s ²)	F _{xf} max (N)	F _{xr} max (N)	F _{zf} max (N)	F _{zr} max (N)
μ a 50 km/h	Desgastados	1	9,81	6074,97	1221,57	6074,97	1221,57
μ a 90 km/h	Desgastados	0,95	9,3195	5690,61	1241,10	5990,12	1306,42
μ a 120 km/h	Desgastados	0,9	8,829	5314,74	1252,14	5905,27	1391,27
μ a 50 km/h	Nuevos	0,85	8,3385	4947,35	1254,71	5820,41	1476,12
μ a 90 km/h	Nuevos	0,8	7,848	4588,45	1248,78	5735,56	1560,98
μ a 120 km/h	Nuevos	0,75	7,3575	4238,03	1234,37	5650,71	1645,83

- Situación 2

Se calcula la fuerza máxima en las ruedas delanteras antes de que estas se bloqueen y la fuerza mínima en las ruedas traseras necesaria para garantizar la estabilidad del vehículo.

Tabla 15: fuerzas de frenado para la situación 2

Carretera seca (caso en el que se produce una mayor fuerza)			q	F _{xf} (N) Cuando bloquea	F _{xr} (N) minima	F _{zf} (N) Cuando bloquea	F _{zr} (N) minima
μ a 50 km/h	Desgastados	1	0,78	5701,62	2840,49	7309,77	3641,65
μ a 90 km/h	Desgastados	0,95	0,74	5348,02	2707,19	7251,55	3670,76
μ a 120 km/h	Desgastados	0,9	0,70	5001,63	2570,28	7196,60	3698,24
μ a 50 km/h	Nuevos	0,85	0,65	4662,46	2429,76	7145,53	3723,77
μ a 90 km/h	Nuevos	0,8	0,61	4330,50	2285,64	7099,18	3746,95
μ a 120 km/h	Nuevos	0,75	0,57	4005,75	2137,91	7058,59	3767,24

Como se puede observar en la tabla, la fuerza mínima que se debe producir en las ruedas traseras para garantizar la estabilidad del vehículo supone la mitad de la máxima fuerza que se ejercer sobre las ruedas delanteras. El coeficiente de adherencia de frenado se acerca más a la realidad de la frenada que el coeficiente utilizado en la situación 1. Por lo tanto, las fuerzas calculadas en esta situación son más realistas.

4.1.3 Cálculo de fuerzas y momentos entre el disco de freno y las pastillas

Las fuerzas que se utilizarán para realizar el análisis estático de la pinza de freno son las que tienen lugar en el conjunto de freno, es decir, son las fuerzas dadas entre el disco de freno y pastillas. Estas fuerzas se deben a la fricción entre estos dos elementos del sistema de frenos. Se establece que la fuerza de fricción experimentada en la pastilla debido a su contacto con el disco durante la frenada se transfiere íntegramente a la pinza de freno, con el fin de estudiar la pinza en unas condiciones extremas, es decir, se hace un sobredimensionamiento en cuanto a su comportamiento durante la aplicación de cargas estáticas. Si cumple las condiciones establecidas en el estudio, cumplirá las condiciones de funcionamiento reales debido a que los valores obtenidos en la realidad son inferiores a los establecidos en el estudio.

Para poder calcular la fuerza de fricción que se obtiene entre el disco y la pastilla es necesario primero calcular el momento de frenado debido a la fuerza obtenida en la rueda. El par de frenado se obtiene a partir de la fuerza de frenado generada en la rueda y el radio de esta.

$$M_{xf} = F_{xf} * R_{rueda} \quad (4.28)$$

De igual forma se obtiene el par de frenado trasero. Se establece que el par de frenado obtenido también afecta al disco de freno. Dividiendo el par entre el radio del disco de freno se obtiene la fuerza de fricción entre el disco de freno y la pastilla. La fuerza de fricción calculada se debe dividir entre dos para obtener así la fuerza generada en cada pista del disco, es decir, la fuerza originada por el contacto de cada pastilla con su correspondiente pista del disco de freno.

$$\frac{M_{xf}}{2 * R_{efect\ disco}} = F_{fricc\ disco} \quad (4.29)$$

$$\frac{F_{xf} * R_{rueda}}{2 * R_{efect\ disco}} = F_{fricc\ disco} \quad (4.30)$$

Valores obtenidos de las fuerzas

Se muestran las tablas con los valores obtenidos del par generado por la fuerza de frenado en cada rueda y su correspondiente fuerza de fricción entre disco de freno y pastillas. Estas dos magnitudes calculadas (par de frenado y fuerza de fricción entre la pastilla y el disco de freno) son las que posteriormente se aplicarán en el análisis estático realizado a la pinza de forma simulada.

- Situación 1

Tabla 16: par de frenado y fuerza de fricción entre el disco y la pastilla, situación 1

Carretera seca (caso en el que se produce una mayor fuerza)		Z (m/s ²)	Fxf max (N)	Fxr max (N)	Fzf max (N)	Fzr max (N)	Mxf max (N*m)	Mxr max (N*m)	Fxf fricc disco (N)	Fxr fricc disco (N)	
μ a 50 km/h	Desgastados	1	9,81	6074,97	1221,57	6074,97	1221,57	2063,36	414,91	8253,46	1659,62
μ a 90 km/h	Desgastados	0,95	9,32	5690,61	1241,10	5990,12	1306,42	1932,82	421,54	7731,27	1686,16
μ a 120 km/h	Desgastados	0,9	8,83	5314,74	1252,14	5905,27	1391,27	1805,15	425,29	7220,60	1701,16
μ a 50 km/h	Nuevos	0,85	8,34	4947,35	1254,71	5820,41	1476,12	1680,37	426,16	6721,47	1704,64
μ a 90 km/h	Nuevos	0,8	7,85	4588,45	1248,78	5735,56	1560,98	1558,47	424,15	6233,87	1696,59
μ a 120 km/h	Nuevos	0,75	7,36	4238,03	1234,37	5650,71	1645,83	1439,45	419,25	5757,79	1677,02

- Situación 2

Tabla 17: par de frenado y fuerza de fricción entre el disco y la pastilla, situación 2

Carretera seca (caso en el que se produce una mayor fuerza)		q	Fxf (N) Cuando bloquea	Fxr (N) minima	Fzf (N) Cuando bloquea	Fzr (N) minima	Mxf (N*m) Cuando bloquea	Mxr (N*m) minima	Fxf fricc disco (N)	Fxr fricc disco (N)	
μ a 50 km/h	Desgastados	1	0,78	5701,62	2840,49	7309,77	3641,65	1936,56	964,77	7746,22	3859,09
μ a 90 km/h	Desgastados	0,95	0,74	5348,02	2707,19	7251,55	3670,76	1816,46	919,50	7265,82	3677,98
μ a 120 km/h	Desgastados	0,9	0,70	5001,63	2570,28	7196,60	3698,24	1698,80	872,99	6795,22	3491,98
μ a 50 km/h	Nuevos	0,85	0,65	4662,46	2429,76	7145,53	3723,77	1583,60	825,27	6334,42	3301,07
μ a 90 km/h	Nuevos	0,8	0,61	4330,50	2285,64	7099,18	3746,95	1470,85	776,32	5883,41	3105,27
μ a 120 km/h	Nuevos	0,75	0,57	4005,75	2137,91	7058,59	3767,24	1360,55	726,14	5442,21	2904,57

Como se puede apreciar en las columnas de par debido a la fuerza de frenado en la rueda delantera (par máximo en la situación 1 y par cuando bloquea en la situación 2) se obtienen unos valores relativamente altos. Esto se debe a que el estudio se realiza para una situación extrema en la que se requiere aplicar la mayor fuerza posible. En dicha situación extrema se toma la peor circunstancia posible que se pueda dar, que la fuerza de fricción dada en la pastilla debido al contacto con el disco se trasfiera íntegramente a la pinza de freno, como se ha explicado anteriormente.

Una vez que se tengan los valores de las fuerzas que se aplicarán en el estudio se procede a realizar el análisis estático de la pinza de freno mediante el programa de elementos finitos. Se realizarán varios análisis examinando las diferentes situaciones a las distintas velocidades para los materiales seleccionados para sustituir a la fundición gris, aleación de magnesio AZ91D y aleación de aluminio A356.0 T6.

4.2 Análisis estático teórico de la pieza

Previamente al análisis estático de la pinza de freno mediante cálculos de elementos finitos en los que se simula el comportamiento de la pieza, se calcula de forma teórica si la pieza falla o no ante la aplicación de las fuerzas de frenado calculadas en el apartado anterior. Como se ha establecido en el apartado de cálculo de fuerzas, la fuerza de fricción obtenida debido al contacto entre el disco de freno y la pastilla durante el frenado se transfiere íntegramente a la pinza. Esta medida se toma como factor de seguridad para estudiar si cumple los criterios de fallo y no se produce la ruptura, es decir, es un sobredimensionamiento en el diseño en cuanto al estudio del análisis estático

Esta es la razón por la que durante el estudio del cumplimiento de los criterios de fallo de los diferentes materiales en el análisis teórico se toma como factor de seguridad $n=1$, es decir, que el factor de seguridad obtenido durante el cálculo sea como mínimo 1, rompiendo la pieza si se obtiene un valor mínimo. Este valor se toma debido al sobredimensionamiento se ha tomado anteriormente en la aplicación de la fuerza.

A la hora de aplicar la fuerza de fricción sobre la pinza se establece que está sometida ante una fuerza tangencial o de cortadura. Para determinar si la pieza falla para los diferentes materiales se escoge el caso particular de cortadura pura y se calculan las magnitudes correspondientes para determinar si surge el fallo y ver si el material es apto o no para iniciar la fabricación de la pinza de freno.

4.2.1 Materiales dúctiles

- Aleación de aluminio A356.0 T6

Esta aleación de aluminio presenta una elevada ductilidad por lo que será estudiada a partir de uno de los criterios del fallo dúctil, en concreto, mediante la teoría de Von Mises. Como se ha dicho anteriormente, la pinza trabaja en un caso particular, a cortadura pura. Entonces la pieza falla si se dan las siguientes condiciones.

$$\text{Resistencia de fluencia a tracción: } S_{yt} = 220 \text{ MPa} \quad (4.31)$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{3\tau_{xy}^2} \leq S_{yt} \quad (4.32)$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{3} S_{sy} = S_{yt} \quad (4.33)$$

$$S_{sy} = \frac{1}{\sqrt{3}} * S_{yt} = 127 \text{ MPa} \quad (4.34)$$

$$\text{Si } \sigma_{eq} < 127 \text{ MPa: La pieza no falla} \quad (4.35)$$

- Aleación de magnesio AZ91D

Esta aleación de magnesio presenta una reducida ductilidad, pero aun así será estudiada a partir de uno de los criterios del fallo dúctil, en concreto, mediante la teoría de Von Mises. Al tener una reducida ductilidad ante la aplicación de una elevada carga es muy probable que presente fallo estático. Como se ha dicho anteriormente, la pinza trabaja en un caso particular, a cortadura pura. Entonces el material falla si se dan las siguientes condiciones.

$$\text{Resistencia de fluencia a tracción: } S_{yt} = 150 \text{ MPa} \quad (4.36)$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{3\tau_{xy}^2} \leq S_{yt} \quad (4.37)$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{3} S_{sy} = S_{yt} \quad (4.38)$$

$$S_{sy} = \frac{1}{\sqrt{3}} * S_{yt} = 86,6 \text{ MPa} \quad (4.39)$$

$$\text{Si } \sigma_{eq} < 86,6 \text{ MPa: La pieza no falla} \quad (4.40)$$

4.2.2 Materiales frágiles

Tanto la pieza analizada de fundición gris como la de magnesio están sometidas a las mismas condiciones que la pinza de aluminio. Así que el análisis teórico de estos dos materiales frágiles también se produce en la condición de cortadura pura.

- Fundición gris

La fundición gris tiene una reducida ductilidad por lo que será analizada mediante los criterios de fallo frágil, especialmente por medio de la teoría de fallo de Coulomb Mohr. El material fallará si se cumplen estas condiciones.

$$\text{Cortadura pura: } \sigma_x = \sigma_y = 0 \quad (4.41)$$

$$\sigma_1, \sigma_2 = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (4.42)$$

$$\sigma_1, \sigma_2 = \pm \tau_{xy} \Leftrightarrow \sigma_1 = -\sigma_2 = S_{su} \quad (4.43)$$

$$\sigma_1 < 0 < \sigma_2 \quad ; \quad \frac{\sigma_1}{S_{ut}} - \frac{\sigma_2}{S_{uc}} = 1 \quad (4.44)$$

$$S_{uc} = 1034 \text{ MPa} \quad (4.45)$$

$$S_{ut} = 310 \text{ MPa} \quad (4.46)$$

$$\text{Resistencia ultima a la cortadura} = S_{su} \quad (4.47)$$

$$S_{su} = \frac{S_{uc} * S_{ut}}{S_{uc} + S_{ut}} = 238,5 \text{ MPa} \quad (4.48)$$

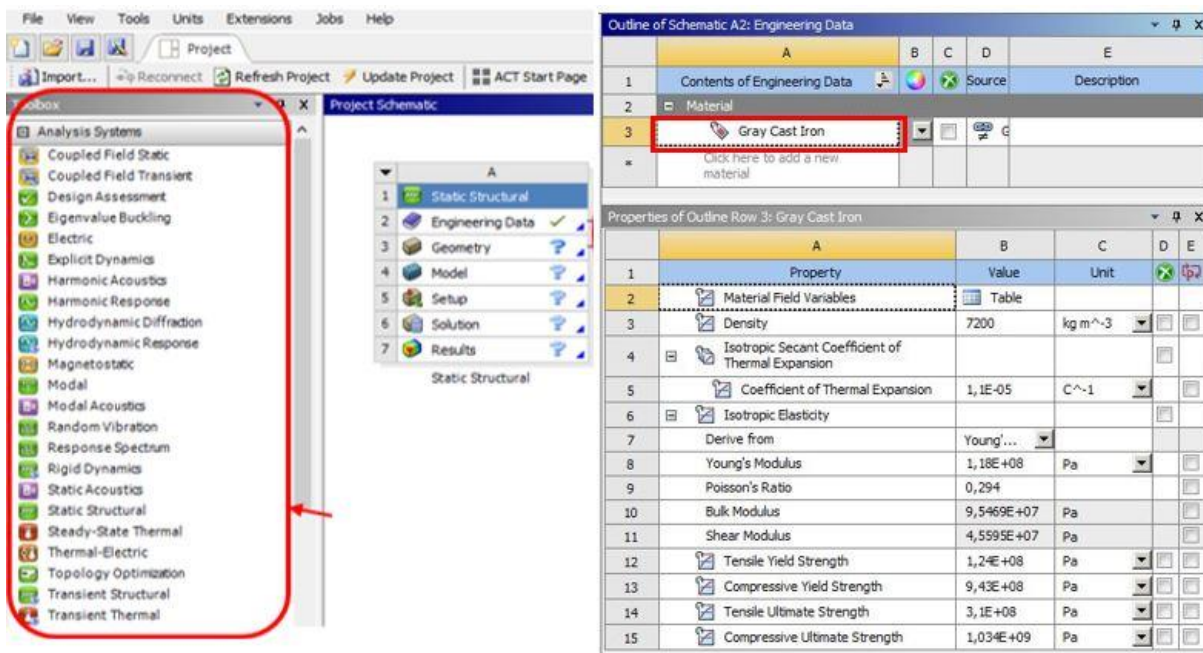
$$\frac{238,5}{S_{ut}} - \frac{(-238,5)}{S_{uc}} = 1 \quad (4.49)$$

Esto quiere decir que el valor máximo que pueden tomar las tensiones principales sin que la pieza rompa es de 238,5 MPa.

4.3 Procedimiento de ensayo

La realización del análisis estático a la pinza de freno con los diferentes materiales seleccionados a estudiar se lleva a cabo siguiendo una serie de pasos. En estos pasos se detallan las propiedades del material, la definición de la malla, las condiciones de contorno, las fuerzas aplicadas y la representación gráfica de los resultados mediante mapas de colores que permiten analizarlos de una forma sencilla.

- El primer paso de todos es elegir el módulo específico para poder realizar el análisis estático. Una vez seleccionado, se definen las propiedades del material de la pinza de freno que se va a analizar. Dentro de las propiedades del material se definen los valores de las resistencias últimas y resistencia a fluencia de tracción y compresión, densidad y coeficiente de Poisson. Estos parámetros son necesarios para determinar si el material falla ante la aplicación de una carga estática.



Property	Value	Unit
Material Field Variables	Table	
Density	7200	kg m ⁻³
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
Coefficient of Thermal Expansion	1,1E-05	C ⁻¹
Isotropic Elasticity		
Derive from	Young's...	
Young's Modulus	1,18E+08	Pa
Poisson's Ratio	0,294	
Bulk Modulus	9,5469E+07	Pa
Shear Modulus	4,5595E+07	Pa
Tensile Yield Strength	1,24E+08	Pa
Compressive Yield Strength	9,43E+08	Pa
Tensile Ultimate Strength	3,1E+08	Pa
Compressive Ultimate Strength	1,034E+09	Pa

Figura 20: definición de las propiedades del material

- El siguiente paso a seguir es la creación de la malla. En este caso se opta por realizar una malla de forma automática definiendo un tamaño de elemento de 5 mm. Se escoge este tamaño debido a la limitación de potencia que tiene el ordenador de trabajo, ya que si no se ralentizaría mucho los cálculos incluso podría llegar a no poder a realizarlo. Se observa que en algunas zonas determinadas de la pinza se crean unos elementos demasiados grandes, por lo que es necesario redefinir el tamaño del elemento en esas superficies.

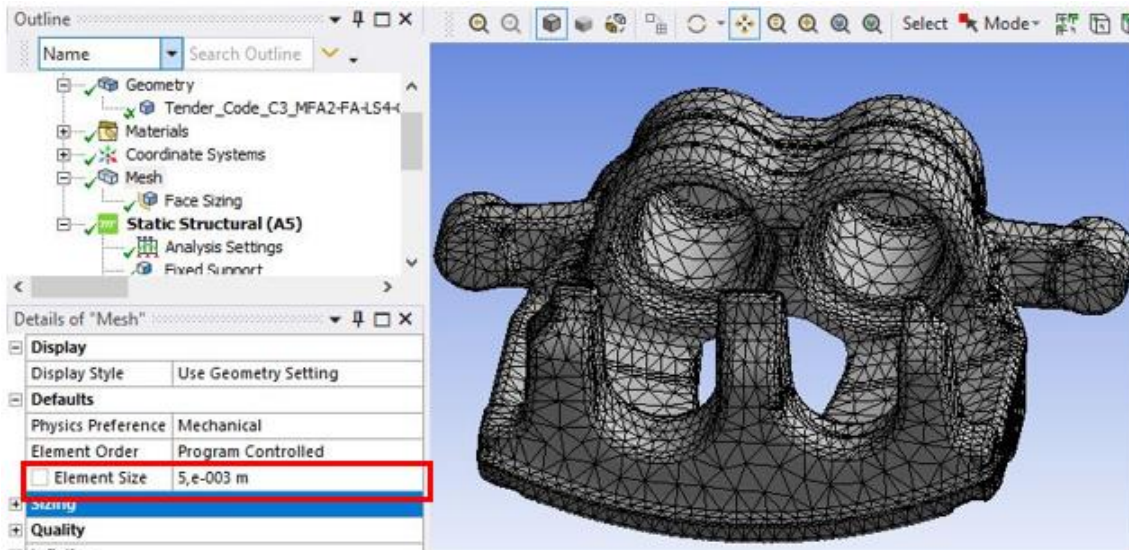


Figura 21: mallado y definición del tamaño de elemento de la malla

Una vez que se haya obtenido la malla es hora de determinar las condiciones de contorno y las cargas estáticas que se aplicarán a la pinza para llevar a cabo el análisis. La pinza se fija por esas superficies ya que por esa parte está unida al soporte que se coloca sobre el disco de freno el cual está anclado al porta ruedas.

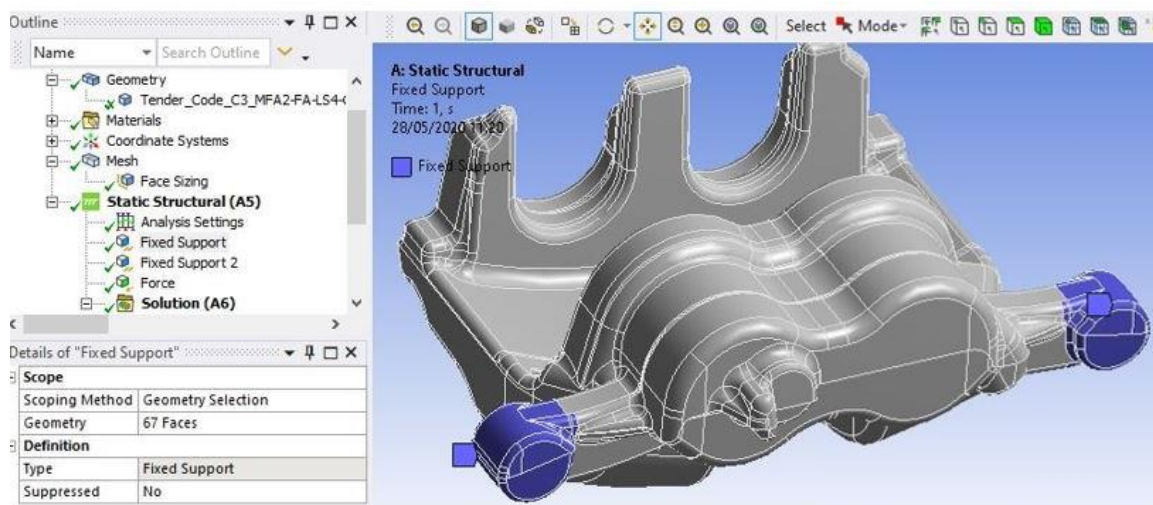


Figura 22: fijaciones de la pinza de freno

- Tras definir las superficies fijas de la pieza, se procede a especificar la fuerza que será aplicada a la pinza. Hay que definir tanto el módulo de la fuerza como la dirección, también se define la superficie en la que aplica. La superficie sometida a la fuerza definida se indica en la siguiente imagen.

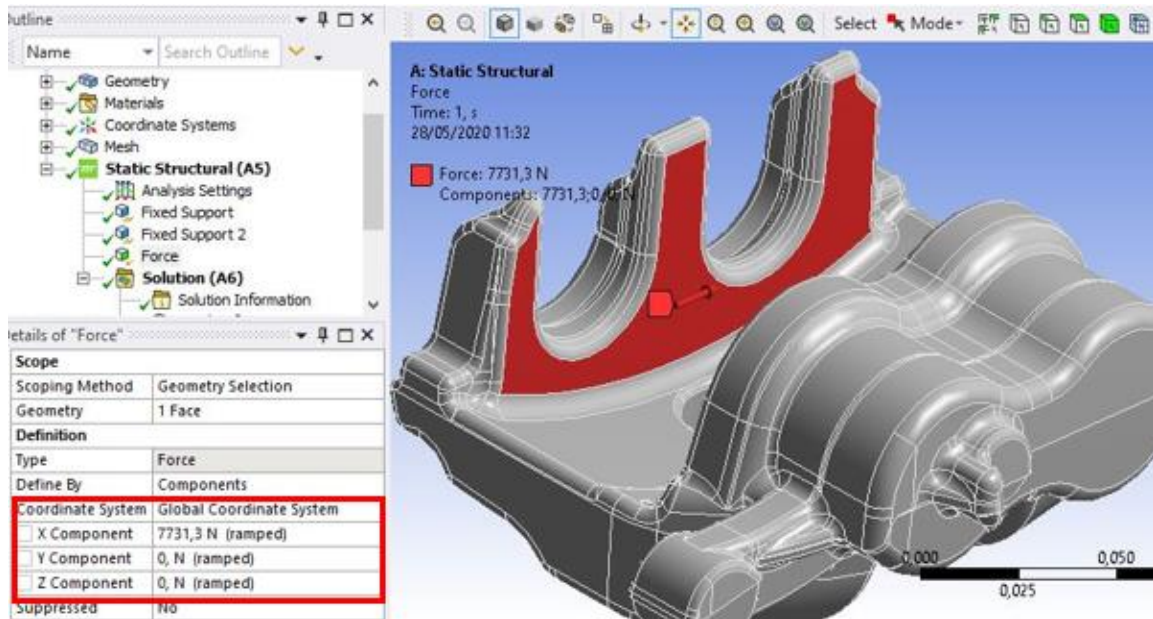


Figura 23: aplicación de la fuerza

- El último paso a seguir antes de lanzar el cálculo del análisis estático es la elección de las magnitudes que se quieren estudiar para determinar si la pieza falla ante las condiciones aplicadas. Se selecciona que se muestren los valores de deformación producidos, los valores de las tensiones equivalentes para los materiales dúctiles y los valores de las tensiones principales y resistencia última a la cortadura para los materiales frágiles.

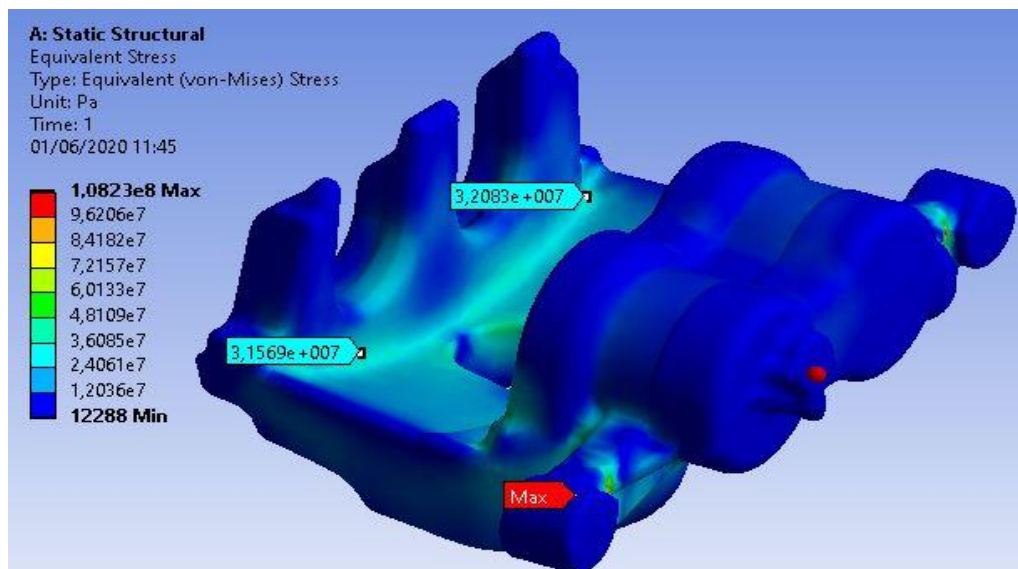


Figura 24: representación gráfica de los resultados, tensión equivalente de Von Mises

- Una vez que se hayan obtenido los resultados de los análisis realizados a los distintos materiales seleccionados, se procede a comentar los resultados decidiendo que material es el más conveniente para la fabricación de la pinza y para cumplir la función de la pinza de la forma más satisfactoria.

5 RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el apartado anterior se han calculado las fuerzas de frenado obtenidas tanto en la rueda debido al contacto con la carretera como la fuerza de fricción generada entre el disco de freno y la pastilla. Estas fuerzas se han calculado para diferentes velocidades y condiciones de adherencia sobre una carretera seca considerando dos situaciones, situación en la que se bloquea las cuatro ruedas simultáneamente al sobrepasar la fuerza máxima de adherencia y la situación en la que solo se bloquean las ruedas delanteras cuando se supera el límite de adherencia. En esta última se calculan las fuerzas máximas en las ruedas del eje delantero antes de que estas bloqueen y la fuerza mínima necesaria en las ruedas traseras para garantizar la estabilidad del vehículo.

Para realizar el análisis estático a los tres materiales seleccionados en el diseño de la pinza de freno para su fabricación, se han elegido dos casos de la primera situación, uno más desfavorable que el otro. Para la segunda situación se ha realizado el análisis con los datos obtenidos para las mismas condiciones de velocidad escogidas en la situación uno. A continuación, se muestran las imágenes obtenidas en el análisis estático realizado a través del programa de elementos finitos, en los que se estudiará si se produce el fallo debido a la aplicación de las cargas y comentando los resultados. Se mostrarán los resultados de forma gráfica mediante una escala de colores indicando el máximo y el mínimo obtenido para cada magnitud medida. Estas magnitudes representadas son, la deformación experimentada en la pieza, tensión equivalente para los materiales dúctiles, máxima tensión a cortadura y las tensiones máximas y mínimas principales para los materiales frágiles.

En la imagen siguiente se indica la superficie en la que se aplica la fuerza de fricción, en dicha superficie se analizarán los resultados obtenidos aparte de estudiar la pieza entera para saber si puede fallar en alguna zona débil.

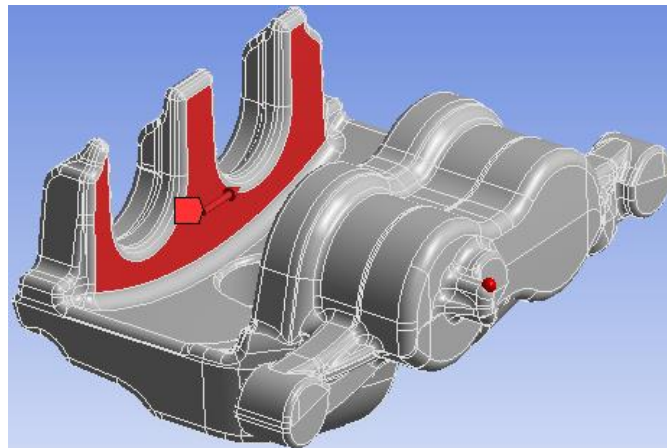


Figura 25: superficie en la que se aplica la fuerza

5.1 Aluminio

Al realizar el cálculo del análisis estático de la pinza el programa también obtiene la masa de la pieza si se fabricase con la aleación de aluminio A356.0 T6. La masa de la pieza estudiada es de 2,08 Kg. En el siguiente apartado se compararán las masas obtenidas en los análisis realizados a los diferentes materiales. La comparación de las masas junto con los análisis estáticos facilitará la decisión de elegir el mejor material para la optimización del diseño de la pinza y su fabricación.

5.1.1 Situación 1

En la situación uno se ensaya la pieza para dos coeficientes de adherencia diferentes, es decir, para diferentes condiciones de adherencia entre neumático y carretera. En concreto se trata del estado del neumático, realizando un cálculo con el neumático nuevo y otro con el neumático desgastado. La velocidad es la misma para los dos cálculos, 90 km/h.

Se observa que el estado de los neumáticos tiene un gran efecto sobre la adherencia del vehículo. El coeficiente correspondiente a los datos del segundo caso (neumáticos nuevos), es de 0,8. La diferencia entre el coeficiente de adherencia para neumáticos desgastados (0,95) y nuevos, es de 0,15. A la hora de calcular las fuerzas de fricción, los valores de estas se ven afectadas por la diferencia de los coeficientes de adherencia. La variación que existe entre las fuerzas correspondientes entre los dos coeficientes es de 1497,4 N. Dicha diferencia influye al comportamiento de la pinza.

Para realizar la comparación de los resultados obtenidos de todos los casos realizados para los tres materiales seleccionados, se escoge el caso en el que se necesita una mayor fuerza para reducir la velocidad del vehículo, es decir, el más desfavorable. Al ser más desfavorable, si no se obtiene el fallo de la pieza quiere decir que con los casos en los que la fuerza es menor tampoco se produce la ruptura.

Tabla 18: fuerzas correspondientes a los cálculos realizados en la primera situación

Carretera seca (caso en el que se produce una mayor fuerza)				Z (m/s ²)	Fxf max (N)	Fxf fricc disco (N)
1º Cálculo	μ a 90 km/h	Desgastados	0,95	9,32	5690,61	7731,27
2º Cálculo	μ a 90 km/h	Nuevos	0,8	7,85	4588,45	6233,87

1º cálculo (el más desfavorable): neumáticos desgastados, coeficiente de adherencia 0,95, velocidad de 90 km/h y una fuerza de 7731,27N

Los neumáticos desgastados tienen una mejor adherencia a la carretera, debido a una mayor superficie de contacto, por lo que será necesario una mayor fuerza para poder frenar el vehículo o incluso reducir su velocidad hasta pararlo completamente. Cuanto mayor sea la adherencia entre neumático y carretera mayor será el coeficiente y por lo tanto mayor la fuerza para frenarlo.

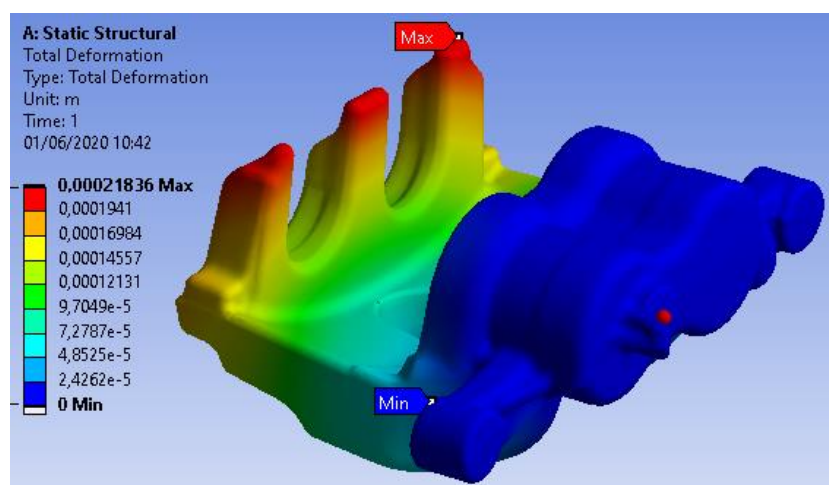


Figura 26: deformación de la pieza aluminio situación 1

La aplicación de la fuerza de fricción produce la mayor deformación de la pinza en la superficie de aplicación de la fuerza. Concretamente en el extremo de uno de los picos de esa cara. La máxima deformación experimentada de la pinza toma un valor de 0,22 mm.

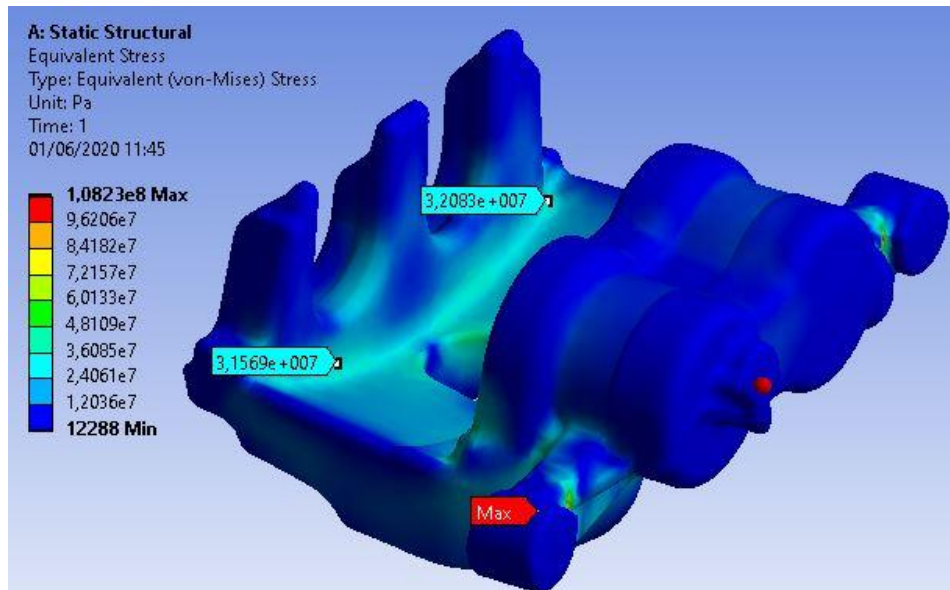


Figura 27: tensión equivalente de Von Mises

En la Figura 27: *tensión equivalente de Von Mises* se representa la tensión equivalente de Von Mises de toda la pieza mediante una escala de colores en la que el color rojo indica el máximo valor obtenido y el azul el valor mínimo. Como se puede observar, en la superficie de aplicación de la fuerza se obtiene un valor de 32 MPa, inferior al máximo obtenido, por lo que la pinza en esa zona no fallará.

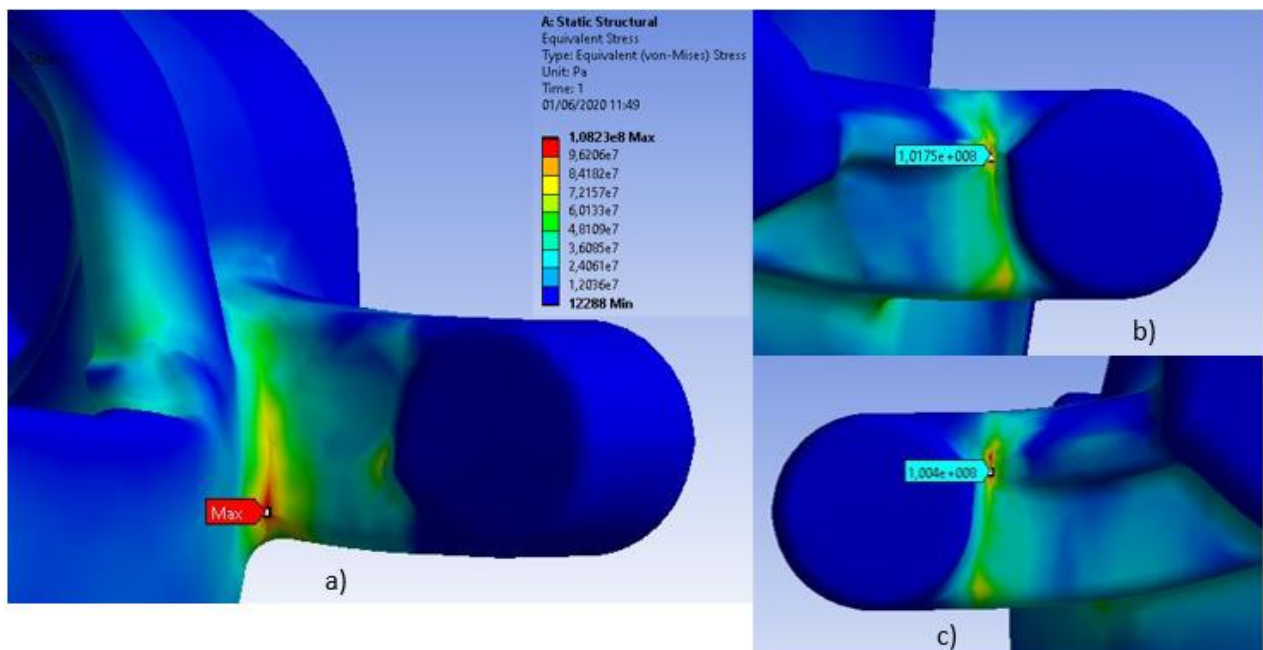


Figura 28: concentración de tensiones y representación de la tensión equivalente de Von Mises

En estas imágenes se muestran que en las superficies de redondeo cercanas a la parte fija de la pinza de freno, se producen concentraciones de tensiones, es decir, zonas por las que la pinza de freno pueda fallar. El valor máximo de la tensión equivalente de Von Mises se obtiene en los redondeos cercanos al apoyo fijo, en la superficie interior (imagen a). Por la parte exterior de los apoyos fijos también se obtienen concentraciones de tensiones, pero con valores un poco más bajos que en la anterior zona (imágenes b y c). En el cálculo se obtiene un factor de seguridad mayor al establecido para determinar si falla o no, siendo el valor obtenido 1,7 y el valor límite establecido 1.

Se compara el valor obtenido durante el análisis estático simulado con el valor máximo calculado teóricamente para ver si la pinza falla o no y así poder descartar el material como sustituto de la fundición gris para su fabricación.

$$\text{Valor máximo teórico: } \sigma_{eq} < 127,01 \text{ MPa} \quad (5.1)$$

$$\text{Valor simulación: } \sigma_{eq-simulación} < 108,23 \text{ MPa} \quad (5.2)$$

$$\sigma_{eq-simulación} < \sigma_{eq}; \text{ La pinza no falla} \quad (5.3)$$

5.1.2 Situación 2

En esta situación las únicas ruedas que se bloquean son las delanteras. Se calculan las fuerzas máximas admitidas antes de que se bloqueen y las fuerzas mínimas que se deben producir en las ruedas delanteras para garantizar la estabilidad. Esta situación es más realista que la anterior, ya que la mayoría de los vehículos funcionan de esta forma durante la frenada.

Esta situación al semejarse más a la realidad, el cálculo se lleva a cabo con el coeficiente de adherencia de frenado (q), el cual caracteriza de forma más precisa el frenado del vehículo. Se calcula a partir del coeficiente de adherencia entre el vehículo y la carretera (utilizado en la situación 1) mediante la expresión del apartado Cálculo de las fuerzas de frenado en las ruedas.

El análisis estático realizado para esta situación tiene las mismas condiciones que el caso correspondiente a la situación uno. La fuerza que se aplica se obtiene a partir de una velocidad de 90 km/h, neumáticos desgastados y un coeficiente de adherencia de frenado de 0,74, obtenido a partir del coeficiente de adherencia de 0,95. El valor de la fuerza que se aplica en la pinza es de 7265,82 N.

Tabla 19: fuerzas correspondientes a los cálculos realizados en la segunda situación

Carretera seca (caso en el que se produce una mayor fuerza)			q	Fxf (N) Cuando bloquea	Fxf fricc disco (N)
μ a 90 km/h	Desgastados	0,95	0,74	5348,02	7265,82

El caso que se estudia en esta situación refleja mejor la acción de frenado y las fuerzas que realmente se producen durante la frenada. Sin embargo, se comparan los resultados obtenidos en las dos situaciones para ver cómo se comportaría la pinza de freno en ambas condiciones.

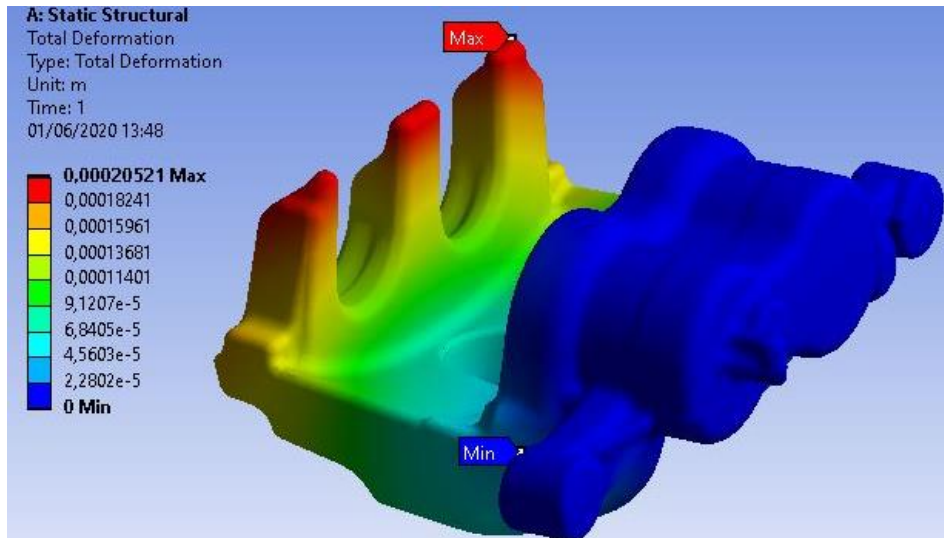


Figura 29: deformación de la pieza aluminio situación 2

Como en el caso de la situación 1, la máxima deformación que experimenta la pinza es en la superficie donde iría alojada la pastilla exterior (lado contrario a los cilindros). Se obtiene una deformación máxima de 0,21 mm, menor a la correspondiente de la situación 1.

En las siguientes imágenes se estudia si la pinza cumple las condiciones del criterio de fallo y no se produce la ruptura ante la aplicación de la carga.

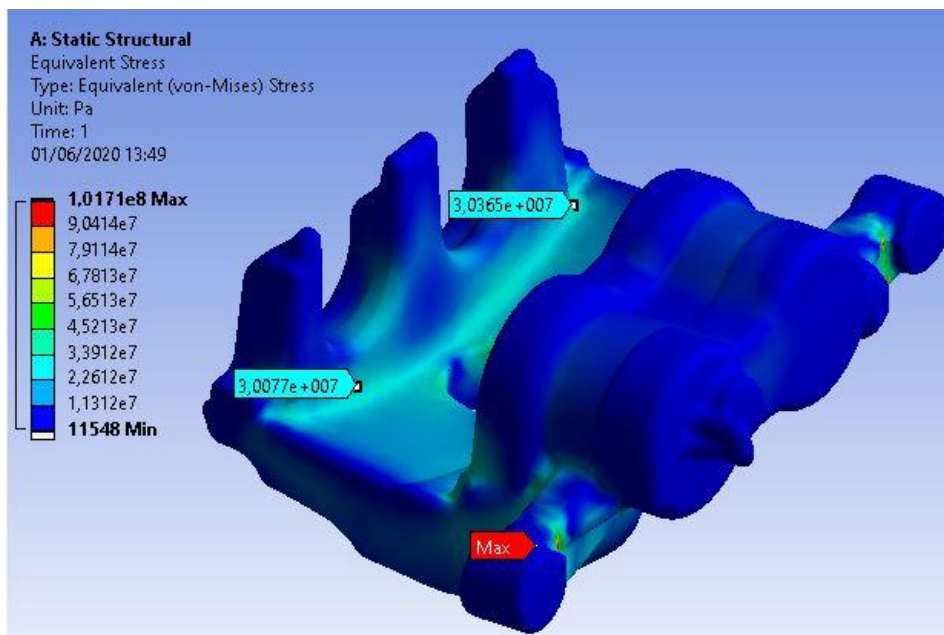


Figura 30: tensión equivalente de Von Mises situación 2

Se representa la tensión equivalente de Von Mises de toda la pieza. Como se puede observar, en la superficie de aplicación de la fuerza no se obtienen valores muy altos de tensión equivalente, por lo que la pinza en esa zona no fallará.

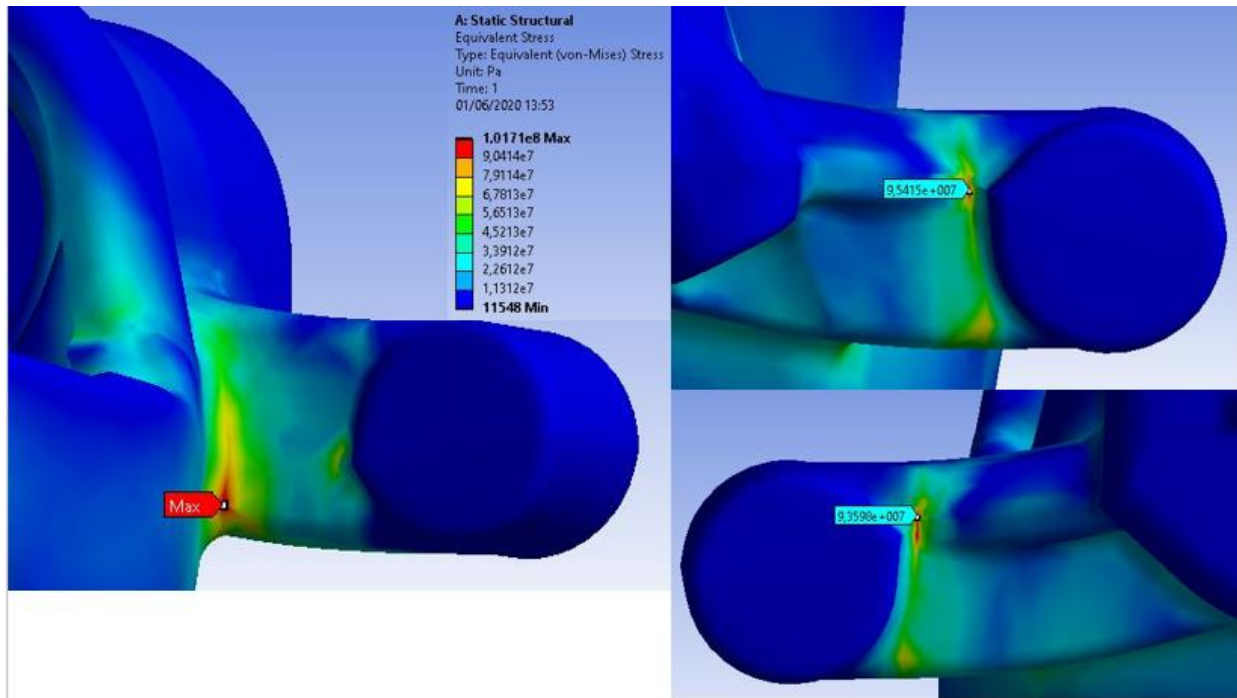


Figura 31: concentración de tensiones y representación de la tensión equivalente de Von Mises

Las concentraciones de tensiones se producen en las mismas zonas que en la situación 1, pero con valores más bajos, esto se debe a que el valor de la fuerza es menor.

Se compara el valor obtenido durante el análisis estático simulado con el valor máximo calculado teóricamente para ver si la pinza falla o no y así poder descartar el material como sustituto de la fundición gris para su fabricación.

$$\text{Valor máximo teórico: } \sigma_{eq} < 127,01 * MPa \quad (5.4)$$

$$\text{Valor simulación: } \sigma_{eq-simulación} < 101,71 MPa \quad (5.5)$$

$$\sigma_{eq-simulación} < \sigma_{eq}; \text{ La pinza no falla} \quad (5.6)$$

5.2 Magnesio

Para el analizar la aleación de magnesio se realizan los mismos cálculos que se han llevado a cabo con la aleación de aluminio para poder compararlo y decidir qué material es mejor para la sustitución de la fundición gris en la fabricación de la pinza. Se aplican las mismas condiciones y por lo tanto la misma fuerza para ver como el material se comporta y estudiar si falla o no. Al realizar el cálculo también se obtiene la masa de la pieza si se fabricase con la aleación de magnesio AZ91D. La masa de la pieza estudiada es de 1,40 kg.

5.2.1 Situación 1

A continuación, se muestran las imágenes de los resultados del comportamiento de la pinza de freno fabricada con la aleación de magnesio AZ91D ante la aplicación de la fuerza de fricción de 7731, 27N (Tabla 18: fuerzas correspondientes a los cálculos realizados en la primera situación).

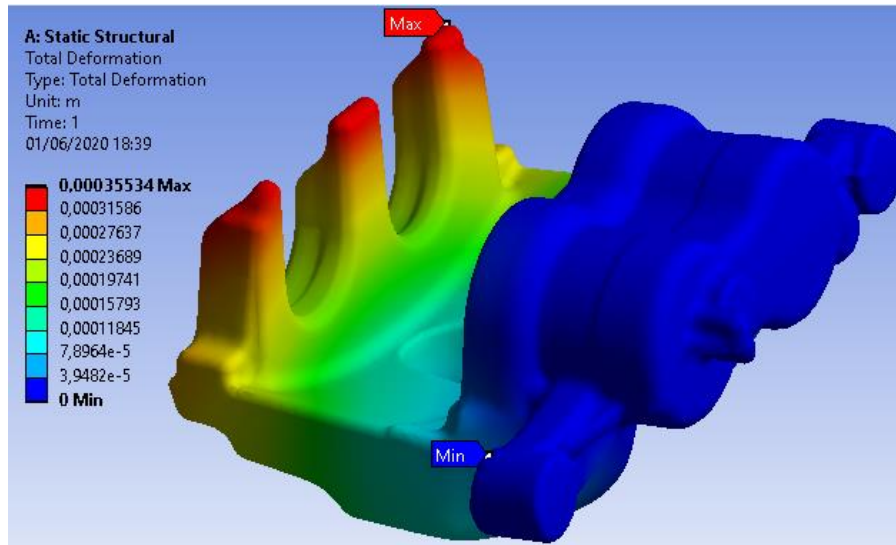


Figura 32: deformación de la pinza de magnesio, situación 1

Las deformaciones más significativas se dan en los extremos de los picos en la superficie de aplicación de la fuerza. Se produce una deformación máxima de 0,35 mm.

En las siguientes imágenes se estudia si la pinza cumple las condiciones del criterio de fallo y no se produce la ruptura ante la aplicación de la carga. Se muestra la tensión equivalente de Von Mises, la cual será clave para determinar si el material cumple el criterio.

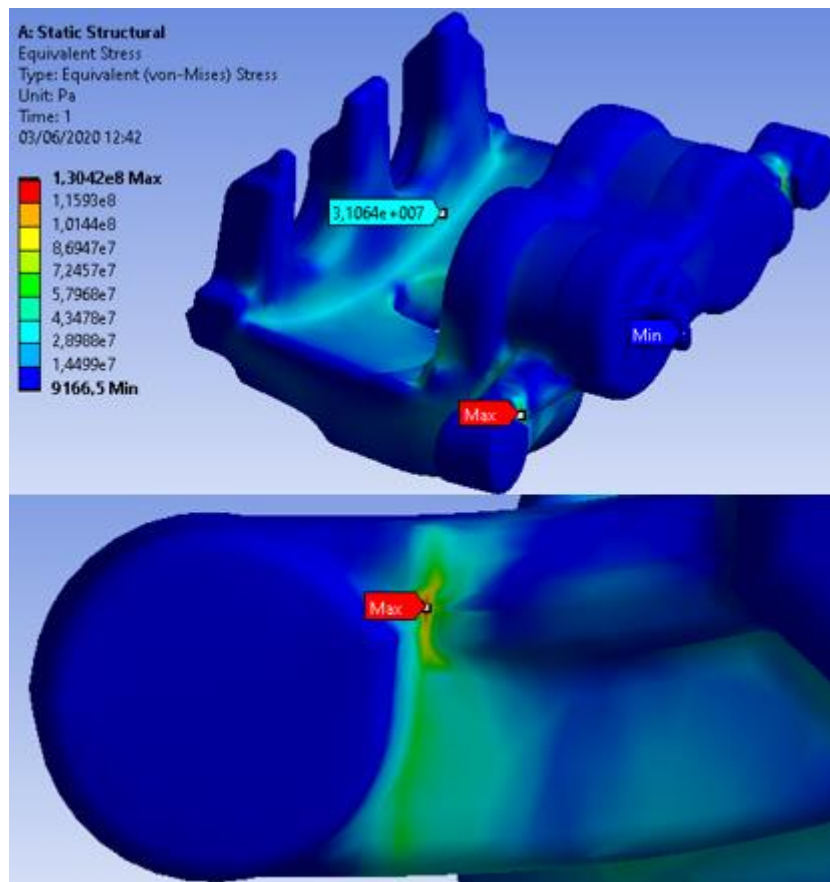


Figura 33: tensión equivalente de Von Mises, magnesio (situación 1)

Como se puede observar la máxima tensión equivalente se produce en los redondeos cercanos a los apoyos fijos, concretamente en la parte exterior. En la superficie donde se aplica la fuerza esta tensión toma valores bajos en comparación con los obtenidos en los redondeos de los apoyos fijos. En el cálculo se obtiene un factor de seguridad menor al establecido para determinar si falla o no, por lo que en este caso el material sí que fallaría ante la aplicación de los resultados. El factor de seguridad obtenido durante el cálculo es de 0,87 siendo menor al límite establecido.

Se compara el valor obtenido durante el análisis estático simulado con el valor máximo calculado teóricamente para ver si la pinza falla o no y así poder descartar el material como sustituto de la fundición gris para su fabricación.

$$\text{Valor máximo teórico: } \sigma_{eq} < 86,6 \text{ MPa} \quad (5.7)$$

$$\text{Valor simulación: } \sigma_{eq-simulación} < 130,42 \text{ MPa} \quad (5.8)$$

$$\sigma_{eq-simulación} < \sigma_{eq}; \text{ La pinza sí que falla} \quad (5.9)$$

5.2.2 Situación 2

El análisis estático realizado para esta situación tiene las mismas condiciones que el caso correspondiente a la situación uno. La fuerza que se aplica se obtiene a partir de una velocidad de 90 km/h, neumáticos desgastados y un coeficiente de adherencia de frenado de 0,74. El valor de la fuerza que se aplica en la pinza es de 7265,82 N (Tabla 19: *fuerzas correspondientes a los cálculos realizados en la segunda situación*).

Los resultados de deformación representados sobre la pinza de freno no varían casi nada con respecto a los resultados de Figura 32: *deformación de la pinza de magnesio, situación 1*. Los valores de mayor deformación se producen en las mismas zonas que en el cálculo anterior (extremos de los picos de la superficie de aplicación), siendo 0,33 mm el valor máximo obtenido. A continuación, se muestra una imagen de los resultados obtenidos sobre la tensión equivalente de Von Mises.

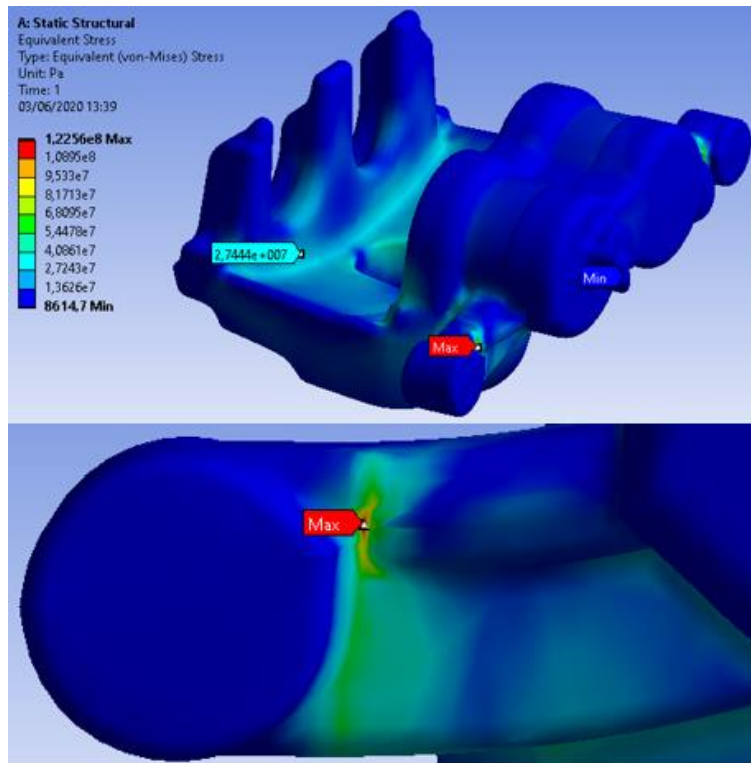


Figura 34: tensión equivalente de Von Mises, magnesio (situación 2)

Los valores de tensión equivalente obtenidos en la superficie en la que se aplica la fuerza no suponen un peligro en cuanto al fallo dúctil de la pieza. Las zonas que, si hay que tener en cuenta, son los redondeos cercanos al apoyo fijos, donde se obtiene el máximo valor de esta tensión.

Al igual que en la situación 1, se compara el valor obtenido durante el análisis estático simulado con el valor máximo calculado teóricamente para ver si la pinza falla o no y así poder descartar el material como sustituto de la fundición gris para su fabricación.

$$\text{Valor máximo teórico: } \sigma_{eq} < 86,6 \text{ MPa} \quad (5.10)$$

$$\text{Valor simulación: } \sigma_{eq\text{-simulación}} < 122,56 \text{ MPa} \quad (5.11)$$

$$\sigma_{eq\text{-simulación}} < \sigma_{eq}; \text{ La pinza sí que falla} \quad (5.12)$$

5.3 Fundición gris

Para el analizar la fundición gris se realizan los mismos cálculos que se han llevado a cabo con la aleación de aluminio y de magnesio para poder compararlo y decidir cuál de las dos aleaciones anteriormente estudiadas es mejor para su sustitución. Para llevar a cabo la comparación entre materiales, se aplican las mismas condiciones y por lo tanto la misma fuerza para ver como el material se comporta y estudiar si falla o no. Al realizar el cálculo también se obtiene la masa de la pieza si se fabricase con el material fundición gris. La masa de la pieza estudiada es de 5,6 kg.

5.3.1 Situación 1

A continuación, se muestran las imágenes de los resultados del comportamiento de la pinza de freno fabricada con el material elegido inicialmente en el diseño, la fundición gris, ante la aplicación de la fuerza de fricción de 7731, 27N (Tabla 18)

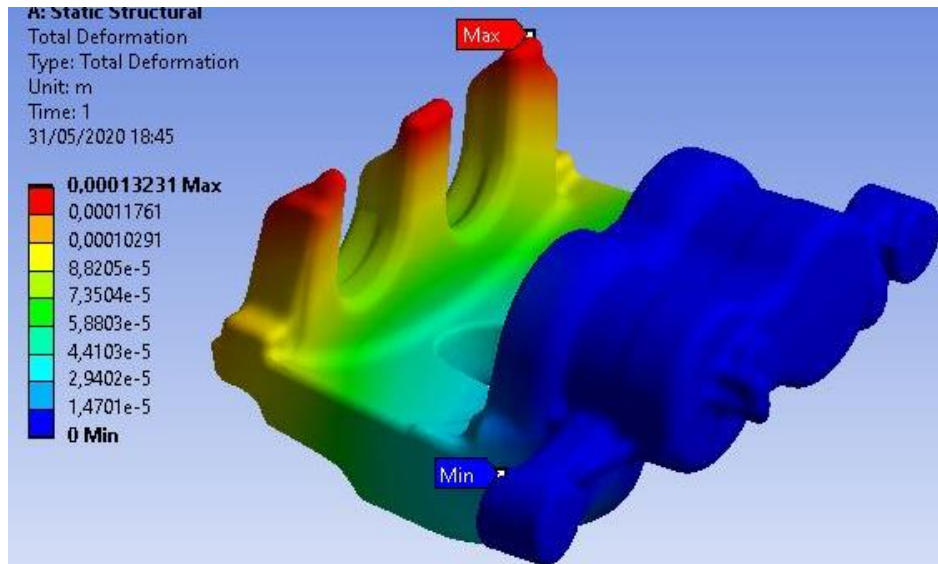


Figura 35: deformación de la pinza, fundición gris (situación 1)

Las deformaciones más significativas se dan en los extremos de los picos en la superficie de aplicación de la fuerza. Se produce una deformación máxima de 0,13 mm.

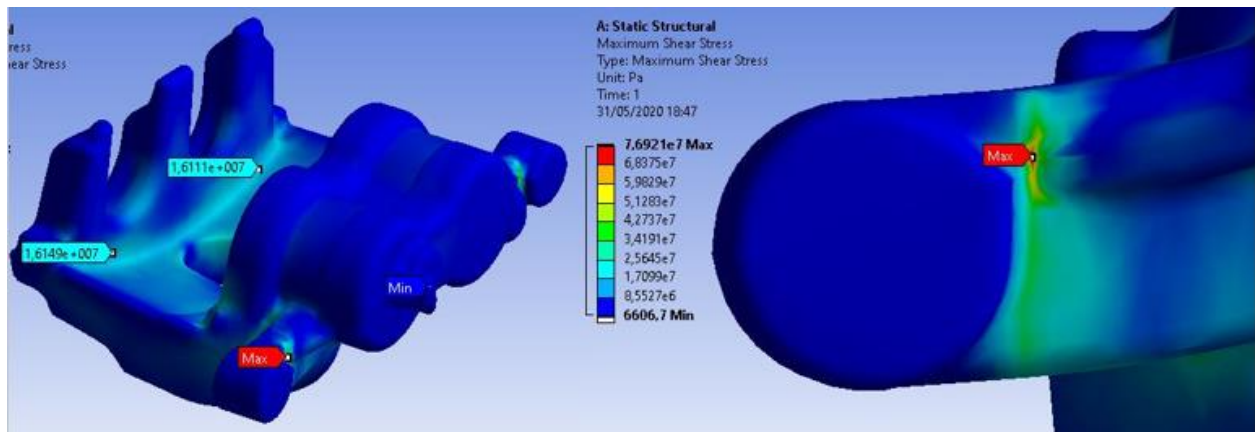


Figura 36: máxima tensión de cortadura, fundición gris (situación 1)

En esta imagen se representa la máxima tensión a cortadura producida en la pieza. La superficie en la que se aplica la fuerza aparece coloreada de un azul claro en algunas zonas, este color representa tensiones aproximadamente entre 16 MPa y 25 MPa, valores muy lejanos del valor máximo por lo que la pieza en esa superficie no fallará. El máximo valor se localiza en una zona de redondeos donde se ha producido una concentración de tensiones. En el caso de que este valor, 76,92 MPa supere la tensión última a cortadura del material, la pinza de freno romperá frágilmente por esta zona. Durante el análisis de los resultados se aprecia que en los redondeos cercanos a los apoyos fijos se producen concentraciones de tensiones. Estas zonas se tendrán que vigilar para evitar la ruptura de la pinza.

Si la máxima tensión a cortadura supera el valor de la tensión última a cortadura, se produciría la ruptura frágil de la pieza.

$$S_{Su} = 238 \text{ MPa} \quad (5.13)$$

$$S_{Su-simulacion} = 76,92 \text{ MPa} \quad (5.14)$$

$$S_{Su-simulacion} < S_{Su}; \text{ La pieza no falla por cortadura} \quad (5.15)$$

A continuación, se muestran los resultados de las tensiones máxima y mínima principales a partir de las cuales se calculará si la pieza falla o no.

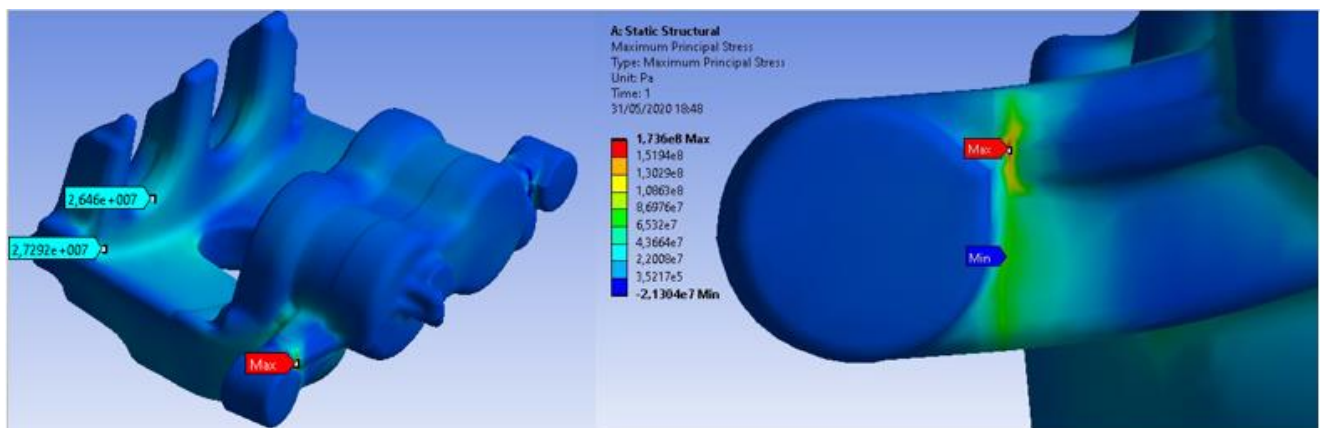


Figura 37: Máxima tensión principal, fundición gris (situación 1)

En estas imágenes se representa la máxima tensión principal, la cual junto con la mínima tensión principal nos permitirá saber si la pieza fallará y se romperá frágilmente. Se aprecia que la máxima tensión se encuentra en una zona de redondeos entre el apoyo fijo y el nervio que une la superficie exterior de los cilindros con el apoyo fijo. Hay que vigilar estas zonas porque son propensas a producir concentraciones de tensiones y seguramente es por donde se rompa la pieza en caso de que no se cumpla el criterio.

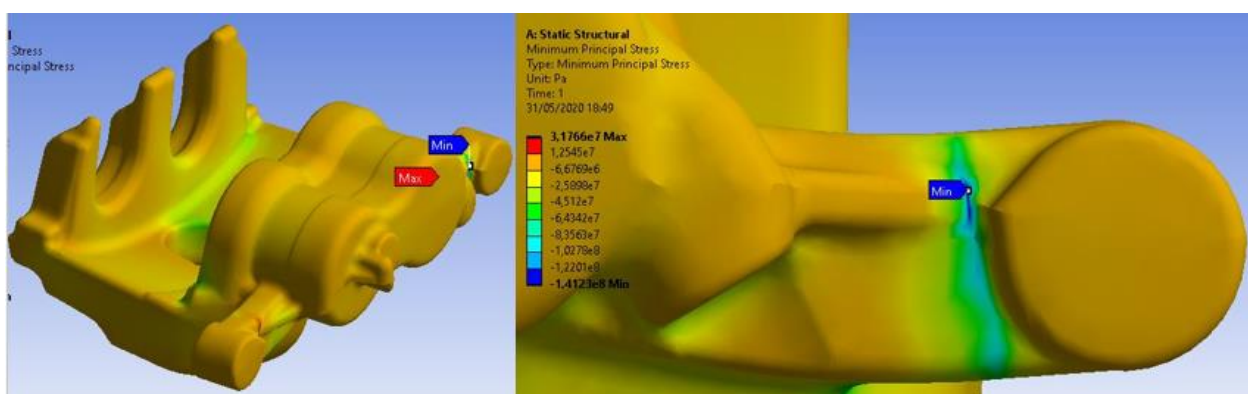


Figura 38: mínima tensión principal, fundición gris (situación 1)

La mínima tensión principal se encuentra en las proximidades de un apoyo fijo, contrario al correspondiente de la máxima tensión principal. Esta zona alcanza el mayor valor de compresión de la pinza, concentrada en la zona de redondeos como se puede apreciar en la imagen. A continuación, se realiza el cálculo a partir de las tensiones principales máxima y mínima para ver si la pieza falla o no.

$$\text{Tensión máximo teórico: } \sigma_1 < 238 \text{ MPa} \quad (5.16)$$

$$\text{Tensión mínimo teórico: } \sigma_2 < -2,38 \text{ MPa} \quad (5.17)$$

$$\text{Tensión máximo simulación: } \sigma_1 < 173,6 \text{ MPa} \quad (5.18)$$

$$\text{Tensión mínimo simulación: } \sigma_2 < -141 \text{ MPa} \quad (5.19)$$

$$\frac{\sigma_1}{S_{ut}} - \frac{\sigma_2}{S_{uc}} = 0,69 < 1 ; \text{ la pieza no falla} \quad (5.20)$$

En el cálculo se obtiene un factor de seguridad mayor al establecido para determinar si falla o no, siendo el valor obtenido 1,4 y el valor límite establecido 1.

5.3.2 Situación 2

El análisis estático realizado para esta situación tiene las mismas condiciones que el caso correspondiente a la situación uno. La fuerza que se aplica se obtiene a partir de una velocidad de 90 km/h, neumáticos desgastados y un coeficiente de adherencia de frenado de 0,74. El valor de la fuerza que se aplica en la pinza es de 7265,82 N (Tabla 19).

Los resultados de deformación representados sobre la pinza de freno no varían casi nada con respecto a los resultados de la Figura 35: *deformación de la pinza, fundición gris (situación 1)*. Los valores de mayor deformación se producen en las mismas zonas que en el cálculo anterior (extremos de los picos de la superficie de aplicación), siendo 0,12 mm el valor máximo obtenido. A continuación, se muestra una imagen de los resultados obtenidos sobre la tensión máxima a cortadura

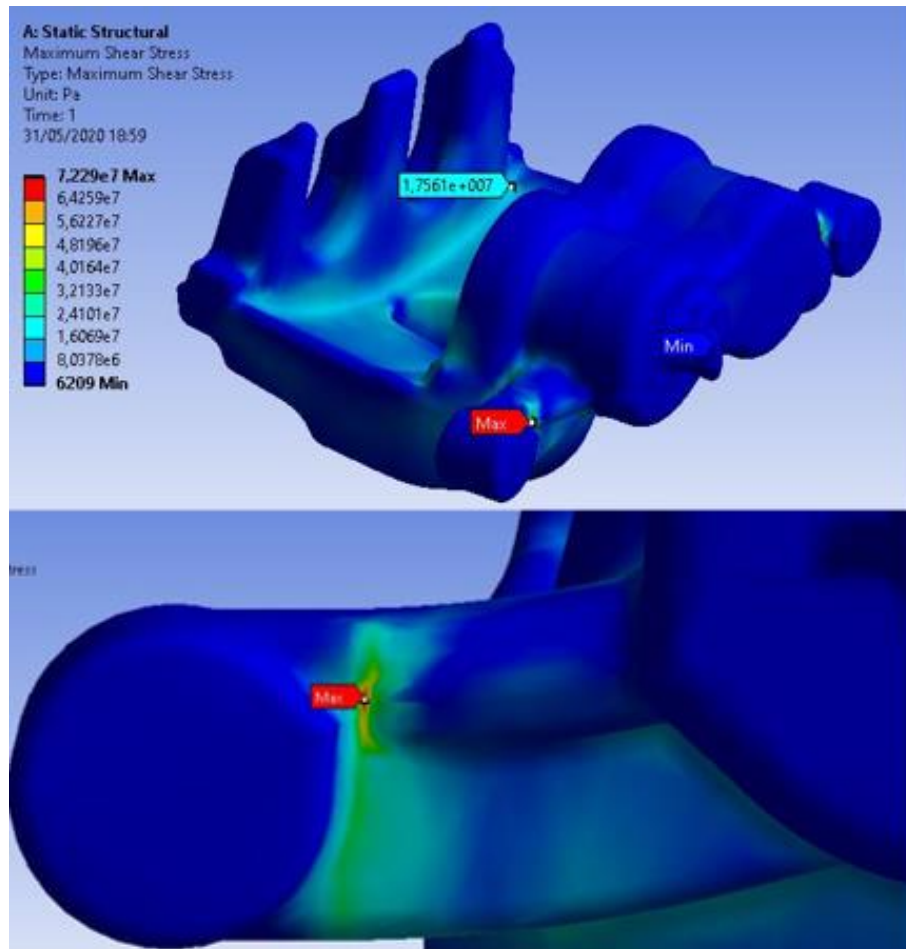


Figura 39: máxima tensión de cortadura, fundición gris (situación 2)

Como en el caso anterior (situación 1) la máxima tensión a cortadura se da en los redondeos próximos a los apoyos. En la superficie de aplicación de la fuerza no se obtienen valores muy elevados por lo que esa zona sigue sin generar peligro de ruptura. Si la máxima tensión a cortadura supera el valor de la tensión última a cortadura, se produciría la ruptura frágil de la pieza.

$$S_{su} = 238 \text{ MPa} \quad (5.21)$$

$$S_{su-simulacion} = 72,29 \text{ MPa} \quad (5.22)$$

$$S_{su-simulacion} < S_{su} ; \text{ La pieza no falla por cortadura} \quad (5.23)$$

A continuación, se muestran los resultados de las tensiones máxima y mínima principales a partir de las cuales se calculará si la pieza falla o no.

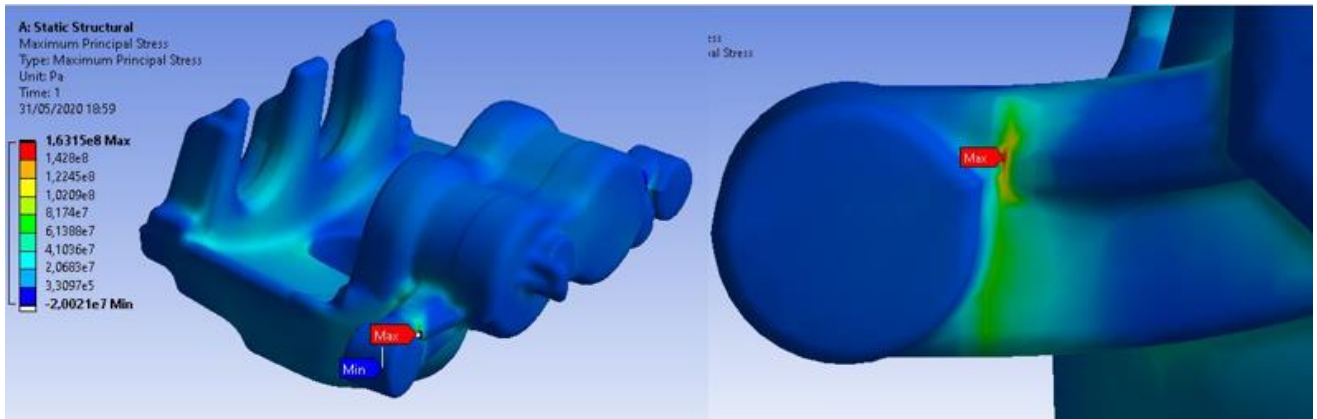


Figura 40: Máxima tensión principal, fundición gris (situación 2)

La imagen de la izquierda muestra que en gran parte de la pieza se obtienen valores medios, representados por medio del color azul claro. Los máximos valores se encuentran en la zona de redondeo como en el caso anterior. Para realizar el criterio de fallo se muestra también los resultados obtenidos de la tensión mínima principal.

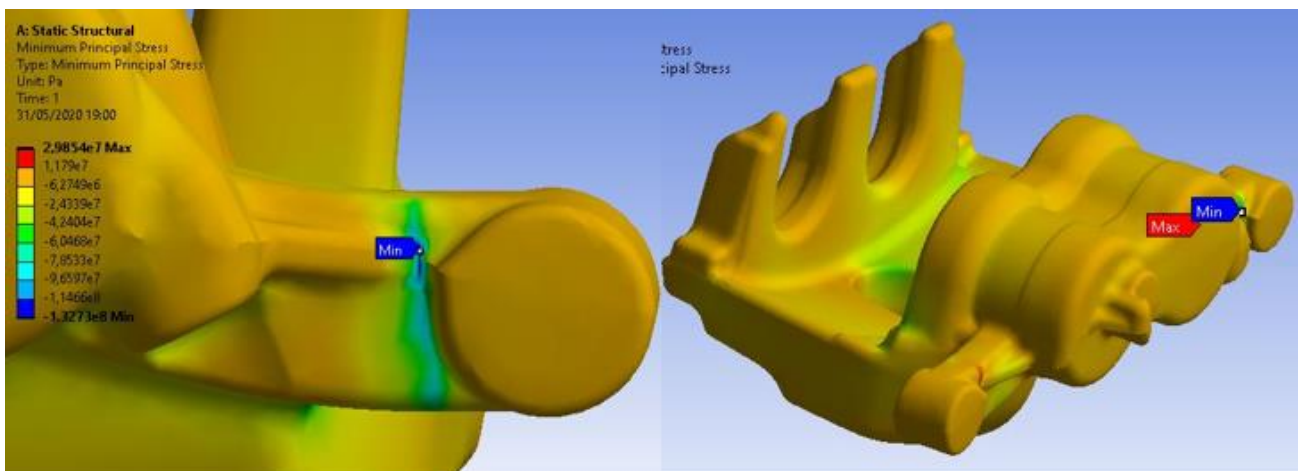


Figura 41: mínima tensión principal, fundición gris (situación 2)

La tensión mínima principal se encuentra en la misma superficie de redondeo que en el caso anterior.

$$\text{Tensión máximo teórico: } \sigma_1 < 238 \text{ MPa} \quad (5.24)$$

$$\text{Tensión mínimo teórico: } \sigma_2 < -238 \text{ MPa} \quad (5.25)$$

$$\text{Tensión máximo simulación: } \sigma_1 < 163,1 \text{ MPa} \quad (5.26)$$

$$\text{Tensión mínimo simulación: } \sigma_2 < -132,7 \text{ MPa} \quad (5.27)$$

$$\frac{\sigma_1}{S_{ut}} - \frac{\sigma_2}{S_{uc}} = 0,69 < 1 ; \text{ la pieza no falla} \quad (5.28)$$

5.4 Análisis

Se muestra una tabla donde se recogen los valores de las tensiones medidas para cada material, las deformaciones y las masas. Se realizará la comparación y la selección del material que más se adecue para el cumplimiento de la función de la pinza de freno consiguiendo así la optimización de su diseño.

Tabla 20: resumen de los datos obtenidos en el análisis estático

MATERIAL DÚCTIL							
	Densidad (kg/m ³)	Masa (kg)	Tension a fluencia de cortadura (MPa)	Deformación (mm)	Tensión equivalente (MPa)	Fallo	
Aleación Aluminio: A356,0 T6	2680	2,08	127,01	0,22	108,23	NO	
Aleación Magnesio: AZ91D	1810	1,41	86,6	0,36	130,42	SI	
MATERIAL FRÁGIL							
	Densidad (kg/m ³)	Masa (kg)	Máxima tensión principal (MPa)	Mínima tensión principal (MPa)	Deformación (mm)	Tensión última cortadura (MPa)	Fallo
Fundición Gris	7200	5,59	173,6	-141,4	0,13	76,92	NO

Como se ha comentado brevemente en el apartado anterior, la aleación de magnesio AZ91D no cumple el criterio de Coulomb Mohr para materiales dúctiles en el análisis estático. Debido a esto, dicho material es descartado desde el principio ya que no cumpliría con las condiciones más desfavorables a las que está sometida la pieza. Una de las grandes ventajas que presenta la aleación de magnesio es su baja densidad, que se traduce en una reducción de peso considerable comparándola con la masa de la pieza con el material original, la fundición gris. A parte de que no cumple las condiciones del criterio para materiales dúctiles, es el material que experimenta una mayor deformación. Esta deformación puede provocar un mal asentamiento de la pastilla en la superficie de la pinza provocando un contacto no uniforme entre pastilla y disco. Este hecho tendría como consecuencia un desgaste irregular del disco de freno, por lo que afectaría a la efectividad de la frenada. Los valores de deformación de los demás materiales son aceptables obteniéndose el mínimo valor en el material originalmente seleccionado en el diseño para la fabricación de la pinza.

En cuanto a los materiales que sí que cumple los criterios de análisis estático, hay una gran diferencia entre las densidades. Como se puede observar, la densidad de la aleación de aluminio es aproximadamente un tercio la densidad de la fundición gris. Esta diferencia supone valores dispares en la masa de la pinza, obteniendo un mejor resultado en cuanto a optimización del diseño por parte de la aleación de aluminio.

El hecho de que los materiales estudiados tengan diferente naturaleza, es decir, que uno sea dúctil y el otro frágil, afecta a la hora de comparar los materiales. La fundición gris al ser frágil soporta mejor los esfuerzos a compresión que la aleación de aluminio. Pero a su vez el aluminio presenta la ventaja de que no se rompe en cuanto se supere el límite de fluencia, todavía tendría un margen para romper. Como se pueden ver en las imágenes correspondientes a los resultados obtenidos, tanto la aleación de aluminio como la fundición gris soportan la carga aplicada sin problemas tanto en superficie de aplicación como en el resto de la pieza. También comparten las zonas donde se producen las concentraciones de tensiones, puntos clave en los que la pieza partiría si no se cumpliesen los requisitos. Las superficies de redondeo próximas a los apoyos fijos son zonas de unión entre dos geometrías diferentes, propensas a la aparición de concentraciones de tensiones. Dichas superficies deberían ser modificados en la fase de diseño con la intención de suavizar la geometría. Mediante esta operación se reduce la aparición de concentraciones de tensiones evitando el fallo de la pieza.

Los dos materiales cumplen las condiciones de funcionamiento y las diferentes situaciones a las que se somete a la pinza de freno. Ambos materiales durante el cálculo del análisis estático obtienen valores que cumplen con los factores de seguridad impuestos, siendo la aleación de aluminio el material que

tiene un margen de error más amplio que la fundición gris. Ambos materiales cumplen con los dos primeros criterios impuestos, que no falle y que superen los factores de seguridad durante el cálculo. La elección del material viene afectada por la diferencia de densidades que tiene entre ambos materiales. El hecho de la densidad del aluminio sea un tercio de la de la fundición gris posiciona en primer lugar a la aleación de aluminio como material para la fabricación de pieza. Además, se produce una reducción de peso del componente cumpliendo así uno de los principales objetivos de los fabricantes de automóviles, reducción de peso para disminuir el consumo y como consecuencia las emisiones de gases.

Tras la comparación de las características de los materiales y sobre todo su comportamiento y respuestas ante la aplicación de las diferentes cargas producidas durante la frenada, la operación de optimización del diseño de una pinza de freno en base a la elección de nuevos materiales a través del análisis estático concluye, con la selección del material para la fabricación de la pinza de freno. Se considera que el material para la fabricación de la pinza de freno, sustituyendo así al material original (fundición gris), es la **aleación de aluminio A356.0 T6**.

6 CONCLUSIONES

La realización del proyecto se ha conseguido al cumplir los objetivos y fases establecidas. Una de las primeras era la elección de los materiales a analizar para sustituir la fundición gris y utilizarlos en la fabricación de la pinza de freno. Los materiales propuestos, aleación de aluminio A356.0 T6 y aleación de magnesio AZ91D, se han seleccionado debido a sus buenas características mecánicas, concretamente debido a sus resistencias a fluencia de tracción y compresión. El hecho de que presenten densidades bajas, comparadas con la de la fundición gris, también ha sido un factor clave en la elección de los materiales.

Se analiza y estudia el proceso de frenada de un vehículo consiguiendo desarrollar un modelo que caracteriza la frenada del vehículo. Para desarrollar dicho modelo ha sido necesario estudiar previamente la arquitectura del vehículo y calcular los datos geométricos de los que depende el cálculo de las fuerzas de frenado. Para ello se ha investigado el tipo de vehículo que incorporará la pinza de freno estudiada, un automóvil de tipo berlina. En cuanto a los datos geométricos calculados de los que dependen las fuerzas de frenado son, la ubicación del centro de gravedad del vehículo y el reparto de pesos en los diferentes ejes.

El modelo simplificado en el cual no se han tenido en cuenta las fuerzas laterales y las fuerzas que se oponen al movimiento, permite hacer una estimación tanto de las fuerzas de frenado obtenidas en las ruedas como las fuerzas de fricción debidas al contacto entre el disco de freno y la pastilla. Las fuerzas obtenidas en la rueda y en la pinza de freno debido al contacto pastilla-disco durante la frenada para una velocidad de 90 km/h y un coeficiente de adherencia de 0,95 son las siguientes, 5690,61 N y 7731,27N, respectivamente.

Los valores obtenidos gracias al modelo de la frenada se utilizan en la realización del análisis estático simulado para estudiar si el material aguanta los esfuerzos a los que está sometida la pinza de freno. Para simular de forma realista la situación de frenada en la pinza de freno, antes de iniciar el cálculo del análisis estático se determinan las condiciones de contorno a las que está sometida la pinza. La fuerza de fricción entre la pastilla de freno y el disco se aplica en la superficie en la que va colocada la pastilla exterior. Las superficies de las "orejetas" de la pinza, situadas a ambos lados de las cavidades para los pistones de la pinza, se establecen como apoyos fijos, ya que es por donde se fija la pinza de freno en la realidad al resto del vehículo.

La simulación de los análisis estáticos por medio de un programa de elementos finitos (ANSYS) ha facilitado la interpretación y evaluación del comportamiento de los diferentes materiales propuestos, aleación de aluminio A356.0 T6 y la aleación de magnesio AZ91D, en diferentes condiciones de funcionamiento de la pinza de freno.

Durante el análisis de los resultados se ha visto que una de las aleaciones propuestas, concretamente la de magnesio (AZ91D), no cumplió con los criterios de fallo al obtenerse una tensión equivalente mayor al límite del material, $130,42 \text{ MPa} > 86,6 \text{ MPa}$, tampoco se cumplía con el criterio del factor de seguridad, debido a que el valor de este obtenido en el cálculo era menor que el establecido ($n=1$). Esto significa que, si la pinza de freno se fabricase con la aleación de magnesio AZ91D, rompería durante la frenada del vehículo. Por este motivo no se puede proponer para la sustitución del material original, la fundición gris. Tanto la aleación restante, aleación de aluminio, como la fundición gris cumplen con los dos primeros criterios impuestos, que no falle y que superen los factores de seguridad durante el cálculo, por lo que la elección del material se realizara en base al tercer criterio impuesto, la densidad o reducción del peso de la pinza. El hecho de que la aleación de aluminio tenga una densidad menor que la fundación gris, concretamente es una tercera parte, hizo que la elección del material se decantase por la aleación de aluminio A356.0 T6. Al reducir el peso de la pinza de freno se satisface el deseo de los fabricantes de automóviles de reducir el peso de los componentes y, por lo tanto, del vehículo consiguiendo una disminución del consumo y de la emisión de gases contaminantes.

Además, el aluminio cuenta con la ventaja de que se puede reciclar de forma ilimitada reduciendo al mínimo la energía utilizada para su fundición y fabricación de diferentes piezas sin perder las propiedades.

Se propone como línea futura del proyecto diseñar la adaptación de la cadena de producción para conseguir una fabricación óptima de la pinza de freno a partir de la fundición de la aleación de aluminio A356.0 T6.

El principal objetivo del proyecto consistía en la optimización del diseño de una pinza de freno basándose en la sustitución del material original mediante la realización de un análisis estático de la pieza estudiada. Para ello, se parte de un modelo de frenado del vehículo simple, pero que precisa de la caracterización de las fuerzas de frenado que se producen durante esta acción. Estas fuerzas posteriormente son aplicadas en el análisis estático permitiendo el estudio y comparación de los comportamientos de los diferentes materiales propuestos. En definitiva, el objetivo del proyecto sí que se cumple ya que se consigue sustituir el material original del diseño por un material con propiedades similares, pero mejorando las prestaciones de la pinza de freno.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]: Kinkaid, N.M, O'Reilly, O. M, Papadopoulos. "Automotive disc brake squeal". Journal of Sound and Vibration 267 (2003) 105–166.
- [2]: <https://sites.google.com/site/fluidosfisica/home/principio-de-pascal>. Última consulta 18/06/2020
- [3]: Aparicio Izquierdo, F., Vera Alvarez C., y Diaz López V.. "Teoría de los vehículos automóviles". Escuela Politécnica Superior de Ingenierías Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, año 1995.
- [4]: <https://demobike.es/tipos-de-liquidos-de-freno>. Última consulta 18/06/2020
- [5]: Catálogo de materiales online. Última consulta 18/05/2020
<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=f3cd25980ab24fdaa5893252cd2bc192>
- [6]: Kleiner M., Geiger M, Klaus, A. "Manufacturing of Lightweight Components by Metal Forming". CIRP Annals Volume 52, Issue 2, 2003, Pages 521-542. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60202-9](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60202-9)
- [7]: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=07baafbb9c364fb18fd413bceced867f&cck=1>. Catálogo de materiales online. Última consulta 03/06/2020
- [8]: Lu N.N.; Wang X.J. , et al "Electromagnetic interference shielding effectiveness of magnesium alloy-fly ash composites". Journal of Alloys and Compounds. 650 (2015) 871-877.
- [9]: Friedrich, H.E.; Mordike, B.L. "Magnesium technology: metallurgy, design data-automotive applications". Springer Science & Business Media, Berlin. Edición 1. Año 2006
- [10]: Vadim S. Zolotarevsky, Nikolai A. Belov. "Industrial Casting Aluminum Alloys". Moscow Institute of Steel and Alloys-State Technical University, 2007, Pages 327-396
- [11]: Chomsaeng, N. Haruta, T, et al. i. "HRTEM and ADF STEM of precipitates at peak ageing in cas A356 aluminium alloy". Journal of Alloys and Compounds 496 (2010) 478–487
- [12]: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=EspecificacionesAluminio&LN=ES>. Última consulta 18/06/2020
- [13]: Barrand. "Enciclopedia del Aluminio". Urmo, Bilbao. Volumen 3. Año 1969.
- [14]: Angeloni, M. "Fatigue life evaluation of A356 aluminium alloy used for engine cylinder head". Other. École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, 2011.
- [15]: Riba Romeva, C. "Selección de materiales en el diseño de máquinas". Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL. Pag.133-140, Primera edición, 2008
- [16]: Catálogo de aleaciones de aluminio, última consulta 18/05/2020.
<https://www.makeitfrom.com/material-properties/EN-AC-42000-T6-Cast-Aluminum>
- [17]: Abasolo. M, Navalpotro, S, Iriondo, E y J Corral, J. "Teorías de fallo estático". Capítulo 3. Opencourseware
- [18]: https://www.prontubeam.com/articulos/12_2015_PROP_MAT/12_2015_PROP_MAT.php
- [19]: De Castro P, C. "Apuntes, Teorías de falla bajo cargas estáticas". Disponible en la página web: <https://es.slideshare.net/CarlosArmandoDeCastr/teoras-de-falla-bajo-cargas-estticas>
- [20]: Portal de información sobre CAD CAM CAE en español. Última consulta 20/05/2020.
<http://www.3dcadportal.com/ansys.html>
- [21]: "Introduction to a finite element, analysis program: ANSYS". Departamento de mecanica de solidos, KTH. KTH Royal Institute Technology, 2006, Pags. 1-24.

[22]: <http://motorenmarcha.com/mecanica-automotriz-altura-del-centro-de-gravedad/>. Última consulta 31/03/2020

[23]: <https://es.slideshare.net/JoseCrisolMartinez/ud7-sistemas-de-transmision-y-frenado>. Última consulta 18/06/2020

[24]: www.km77.com. Página web con información sobre las fichas técnicas de vehículos. Última consulta 19/05/2020

[25]: <https://www.repuestoscoches24.es/1657752-brembo>. Catálogo de discos de freno de vehículos. Última consulta 9/05/2020

[26]: <http://autoescuelasjulio.com/los-neumaticos/>. Última consulta 18/06/2020

[27]: <https://iberisasl.com/blog/trabajar-con-tu-elevador-de-coches/>. Última consulta 1/04/2020

[28]: Yu-feng, L. Yan-tao, T. Lei-lei. H. "A new braking force distribution strategy for electric vehicle based on regenerative braking strength continuity". J. Cent. South Univ. (2013) 20: 3481–3489

[29]: Milliken, D and Milliken, W. "Race car vehicle dynamics" (pp. 665-690) Warrendale. (2003)

[30]: <https://grupocarman.com/blog/2017/12/17/analisis-estatico-y-dinamico>. Última consulta 11/05/2020

[31]: <https://8000vueltas.com/2012/03/16/la-guia-definitiva-sobre-frenos-parte-3-eje-trasero-rodajes-y-solucion-de-problemas>. Última consulta 9/04/2020

[32]: <http://kashima.campuseina.com/mod/book/view.php?id=7572>. Última consulta 21/05/2020

[33]: González Carpena, A. "Análisis de la defectología en la inspección técnica de vehículos y establecimiento de un nuevo procedimiento de inspección de frenado". PhD thesis, Universidad de Murcia, 2015.

[34]: S. Abu A. Albatlan. "Effect of hydraulic brake pipe inner diameter on vehicle dynamics" Higher Technological Institute. International Journal of Automotive Technology, Vol. 16, No. 2, pp. 231–237 (2015)

J. Gilbert Kaufman, Elwin L. Rooy. "Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications". American Foundry Society and ASM International. Pag 7-20.