



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Politécnica Superior de Alcoy

Diseño de un disco de freno para un automóvil comercial  
deportivo

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Mecánica

AUTOR/A: Miret Donet, Alexandre Rafael

Tutor/a: Micó Reche, Carlos

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

## **RESUMEN**

El presente trabajo tiene como objetivo principal el diseño y análisis de un disco de freno. Este es un componente crítico, y crucial, en el sistema de frenado de todo vehículo y su diseño óptimo es importante para garantizar un buen rendimiento y una conducción segura.

Para ello se ha hecho uso de un software CAD llamado *SolidWorks* con el cual se ha simulado un modelo tridimensional de la pieza permitiendo realizarse un estudio mediante elementos finitos. Gracias a ello se han considerado diferentes geometrías, con diferentes grosores o diámetros, y diferentes materiales disponibles, usualmente utilizados en la industria automotriz, comparando entre si sus características mecánicas.

Se ha realizado un estudio del comportamiento estructural de la pieza bajo diferentes cargas, lo cual ayuda a comprender su desempeño cuando el diseño se exponga a condiciones reales. Además, se ha llevado a cabo una investigación sobre el aspecto de refrigeración de la pieza, que es un punto crítico, especialmente en automóviles de alto rendimiento, debido a las altas temperaturas generadas durante el proceso de frenado.

Por último, a la vista de los resultados, se ha propuesto una alternativa a la planteada desde un principio con el objetivo de mejorar sus características y optimizar la pieza final.

### **Palabras clave:**

Discos de freno, Elementos finitos, SolidWorks, Materiales, Automoción, Análisis estructural, Seguridad, Diseño

## **SUMMARY**

The main objective of this work is the design and analysis of a brake disc. This is a critical and crucial component in the braking system of any vehicle and its optimal design is important to ensure good performance and safe driving.

For this purpose, a CAD software called SolidWorks has been used to simulate a three-dimensional model of the part, allowing a finite element study to be carried out. Thanks to this, different geometries have been considered, with different thicknesses or diameters, and different materials available, usually used in the automotive industry, comparing their mechanical characteristics.

A study of the structural behavior of the part under different loads has been carried out, which helps to understand its behavior when the design is exposed to real conditions. In addition, the cooling aspect of the part has been investigated, which is a critical point, especially in high performance cars, due to the high temperatures generated during the braking process.

Finally, in view of the results, an alternative to the one proposed from the beginning has been proposed with the aim of improving its characteristics and optimizing the final part.

### **Keywords:**

Brake discs, Finite element, SolidWorks, Materials, Automotive, Structural analysis, Safety, Design.

## RESUM

El present treball té com a objectiu principal el disseny i anàlisi d'un disc de fre. Aquest és un component crític, i crucial, en el sistema de frenat de tot vehicle i el seu disseny òptim és important per a garantir un bon rendiment i una conducció segura.

Per a això s'ha fet ús d'un programari CAD anomenat *SolidWork*, amb el qual s'ha simulat un model tridimensional de la peça permetent realitzar un estudi mitjançant elements finits. Gràcies a això, s'han considerat diferents geometries, amb diferents gruixos o diàmetres, i diferents materials disponibles, usualment utilitzats en la indústria automotriu, comparant entre si les seves característiques mecàniques.

S'ha realitzat un estudi del comportament estructural de la peça sota diferents càrregues, la qual cosa ajuda a comprendre el seu acompliment quan el disseny s'exposa a condicions reals. A més, s'ha dut a terme una recerca sobre l'aspecte de refrigeració de la peça, que és un punt crític, especialment en automòbils d'alt rendiment, a causa de les altes temperatures generades durant el procés de frenat.

Finalment, a la vista dels resultats, s'ha proposat una alternativa a la plantejada des d'un principi amb l'objectiu de millorar les seves característiques i optimitzar la peça final.

### **Paraules clau:**

Discos de fre, Elements finits, SolidWorks, Materials, Automoció, Anàlisi estructural, Seguretat, Disseny

## Agradecimientos

A mis padres, que sin ellos no sería quien soy y han confiado en mí, incluso  
cuando yo no lo hice

A mis abuelos que, donde estén ahora mismo sé que están viéndome orgullosos de lo que soy,  
siendo mis ángeles de la guarda y mi guía

A mis compañeros, tanto del año en el que empecé la carrera como los que he conocido más  
tarde gracias a un “tropiezo” en mi vida universitaria

A mi primo Santiago, porque ha sido la persona que más ha explotado mi faceta de ingeniero,  
mi pasión por la automoción y mis ganas de que nunca sea suficiente

A mis profesores de la universidad, en especial Carlos Micó por ser mi tutor y mi soporte en  
este proyecto

## Agraïments

Als meus pares, que sense ells no seria qui soc i han confiat en mí, fins i tot quan  
jo no ho vaig fer

Als meus avis que, on estiguen ara mateix sé que estan veient-me orgullosos del que soc, sent  
els meus àngels de la guarda i la meu guia

Als meus companys, tant de l'any en què vaig començar la carrera com els que he conegut més  
tard gràcies a una “entropessada” en la meua vida universitària

Al meu cosí Santiago, perquè ha sigut la persona que més ha explotat la meua faceta  
d'enginyer, la meua passió per l'automoció i les meues ganes de que mai siga suficient

Als meus professors de la universitat, especialment al meu tutor Carlos Micó per ser el meu  
suport en aquest projecte

## Índice de contenido

1. Introducción .....	1
2. Objeto.....	1
3. Alcance .....	1
4. Descripción y funcionalidad .....	2
5. Consideraciones iniciales .....	3
6. Cálculos .....	4
6.1. Desaceleración .....	4
6.1.1 Desaceleración de serie .....	4
6.1.2. Desaceleración del nuevo diseño.....	5
6.2. Tiempo de frenado.....	5
6.2.1 Tiempo de frenado de serie .....	5
6.2.1 Tiempo de frenado del nuevo diseño .....	5
6.3. Distribución de la masa del automóvil.....	6
6.4. Fuerza de frenado .....	6
6.5. Presión de frenado.....	8
6.5.1 Coeficiente de fricción.....	8
6.5.2. Radio medio de aplicación de la fuerza.....	10
6.5.3. Diámetro total de los pistones .....	12
7. Diseño de la pieza.....	13
7.1. Materiales .....	18
7.2. Análisis estático.....	19
7.2.1. Parámetros iniciales .....	19
7.2.2. Resultados del estudio .....	25
7.3. Conclusión del estudio y selección de material .....	28
7.4. Optimización del diseño.....	29
7.5. Alternativa de diseño .....	30
7.5.1. Disco exterior .....	31
7.5.2. Brida .....	32
7.5.3. Remaches .....	32
7.6. Cálculo esfuerzos cortantes .....	34
7.6.1. Pernos.....	34
7.6.2. Remaches .....	37
8. Planos .....	38

9. Selección de los procesos de fabricación.....	42
9.1. Disco exterior .....	42
9.2. Brida .....	43
9.3. Fundición en molde de arena:.....	44
9.3. Post procesado .....	48
9.4. Remachado.....	51
10. Pliego de condiciones.....	53
10.1. Disco de freno .....	53
10.2. Proceso de fabricación en molde de arena.....	53
10.2. Proceso de mecanizado: Fresado y taladrado .....	54
10.3. Proceso de remachado.....	54
11. Presupuesto .....	54
11.1. Coste del material .....	54
11.1.1. Disco exterior: .....	54
11.1.2. Brida: .....	55
11.1.3. Remaches: .....	55
11.2. Fabricación .....	55
11.2.1. Fundición y mecanizado en la misma empresa: .....	55
11.2.2. Fundición y mecanizado por diferentes empresas: .....	56
11.3. Remachado.....	56
11.4. Resumen de precios.....	56
12. Bibliografía: .....	58

## Índice de figuras

Figura 1: Pieza a diseñar .....	2
Figura 2: Pinza y pastillas de freno .....	2
Figura 3: Nissan GT-R .....	3
Figura 4: Top 25 mejores coches con mejor frenada del mundo.....	4
Figura 5. Parte del plano de las pinzas modelo XA8.31.31/32 [7] .....	12
Figura 7: Primer diseño disco de freno .....	15
Figura 8: Orificios de la brida .....	15
Figura 9: Funcionamiento de los alabes en la refrigeración [9].....	16
Figura 10: Vista de sección de la pieza y de los alabes .....	16
Figura 11. Modelo simplificado del disco de freno [10].....	17
Figura 12: Diseño final del disco de freno .....	18
Figura 13: Parámetros del análisis .....	19
Figura 14: Materiales añadidos.....	20
Figura 15: Sujeciones de la pieza .....	20
Figura 16: Cargas externas: presión pinzas .....	21
Figura 17: Cargas externas: par de frenado .....	22
Figura 18: Mallado de la pieza .....	23
Figura 19: Tensiones resultantes – Al10SiC.....	25
Figura 20: Tensiones resultantes – ASTM A536.....	26
Figura 21: Tensiones resultantes – T6Al4V .....	26
Figura 22: Tensiones resultantes – Al10SiC.....	27
Figura 23: Tensiones resultantes – ASTM A536.....	27
Figura 24: Tensiones resultantes – T6Al4V .....	27
Figura 25: Tensiones resultantes presión de la pinza – diseño optimizado.....	30
Figura 26: Ejemplos de discos de freno a dos piezas .....	31
Figura 27. índice galvánico de los metales [17] .....	34
Figura 28: Rediseño: disco exterior .....	31
Figura 29: Rediseño: brida.....	32
Figura 30: Remache.....	32
Figura 31: Dimensiones remache [18] .....	33
Figura 32: Simplificación esfuerzos cortantes en los pernos .....	35
Figura 33: Áreas bajo cortante perno .....	36
Figura 34. Simplificación esfuerzos cortantes en los remaches.....	37
Figura 33: Áreas bajo cortante perno .....	38
Figura 35: Esquema del funcionamiento de la metalurgia .....	44
Figura 36: Creación del molde de arena .....	45
Figura 37: Esquema del método de llenado superior [22].....	46
Figura 38: Esquema del método de llenado por la línea de partición [22].....	46
Figura 39: Esquema del método de llenado inferior [22] .....	47
Figura 40: Esquema fundición en molde de arena [23] .....	47
Figura 41: Esquema de ambos fresados dependiendo de la posición del eje [24].....	48
Figura 42: Esquema del fresado en oposición y en concordancia [24].....	48
Figura 43: Partes de la fresa de plaquitas intercambiables [25].....	49
Figura 44: Ejemplo de diferentes fresas de carburo sólido.....	49

## Índice de tablas

Tabla 1. Materiales de fricción pastillas de freno [6] .....	9
Tabla 2. Coeficientes de fricción según desgaste [6] .....	10
Tabla 3. Especificaciones técnicas pinzas de freno: área del pistón [7].....	12
Tabla 4: Especificaciones técnicas sistema de frenado Nissan GT-R [7] .....	11
Tabla 5. Especificaciones técnicas pinzas de freno: Diámetro del disco [7] .....	11
Tabla 6. Características de las pinzas modelo XA8.31.31/32 [7].....	12
Tabla 7: Especificaciones técnicas pinzas de freno: grosor del disco [7] .....	14
Tabla 8: Dimensiones disco de ejemplo [7] .....	14
Tabla 9: Dimensiones iniciales de la brida [7] .....	14
Tabla 10: Dimensiones agujeros de ventilación [7] .....	17
Tabla 11: Características de los materiales candidatos [11] .....	18
Tabla 12: Información de la malla para el estudio de presión .....	24
Tabla 13: Información de la malla para el estudio del par de frenado .....	25
Tabla 14: Tensiones estudio de presión.....	26
Tabla 15: Tensiones estudio del par de frenado .....	28
Tabla 16: Masas de las partes del sólido.....	29
Tabla 17: Tensiones resultantes presión de la pinza - diseño optimizado.....	30
Tabla 18: Masas de las piezas de la alternativa de diseño .....	33

## **SIMBOLOGIA:**

- $v$ : velocidad final del automóvil (m/s)
- $v_o$ : velocidad inicial del automóvil (m/s)
- $a_s$ : aceleración de serie (m/s<sup>2</sup>)
- $\Delta x_s$ : distancia recorrida de serie (m)
- $a_n$ : aceleración del nuevo diseño (m/s<sup>2</sup>)
- $\Delta x_n$ : distancia recorrida del nuevo diseño (m)
- $\Delta t_s$ : tiempo de frenado de serie (s)
- $\Delta t_n$ : tiempo de frenado del nuevo diseño (s)
- $m$ : masa del automóvil (kg)
- $M_d$ : masa del automóvil en el eje delantero (kg)
- $M_t$ : masa del automóvil en el eje trasero (kg)
- $F_{fr}$ : fuerza de frenado total (N)
- $F_{frd}$ : fuerza de frenado para las ruedas del eje delantero (N)
- $F_{ftr}$ : fuerza de frenado para las ruedas del eje trasero (N)
- $F_{neumático}$ : fuerza de frenado de cada rueda del eje delantero (N)
- $R_n$ : radio del neumático (m)
- $P_{fr}$ : par necesario para el frenado (Nm)
- $\mu$ : coeficiente de fricción entre las pastillas y el disco de freno
- $p$ : presión aplicada al disco de freno (N/m<sup>2</sup>)
- $D_p$ : diámetro total de los pistones de la pinza (m)
- $R_m$ : radio medio de aplicación de la fuerza de las pastillas (m)
- $N$ : número de pastillas de freno
- $A_{pistón}$ : área del pistón (cm<sup>2</sup>)
- $D_{p-i}$ : diámetro de un cilindro (cm)
- $N_{pis}$ : número de pistones
- $p_a$ : presión a utilizar en el análisis (N/m<sup>2</sup>)
- $P_{fra}$ : par a utilizar en el análisis (Nm)
- $p_o$ : nueva presión de pinzas necesaria (N/m<sup>2</sup>)
- $F_{tr-p}$ : fuerza transversal al perno (N)
- $d_1$ : distancia entre el punto de aplicación y el perno (m)
- $\tau_p$ : esfuerzo cortante en el perno (Pa)
- $A_{tr-p}$ : área transversal del perno (m<sup>2</sup>)
- $n_p$ : número de pernos
- $D_p$ : diámetro del perno (m)
- $F_{tr-r}$ : fuerza transversal al remache (N)
- $d_2$ : distancia entre el punto de aplicación y el perno (m)
- $\tau_r$ : esfuerzo cortante en el remache (Pa)
- $A_{tr-r}$ : área transversal del remache (m<sup>2</sup>)
- $n_r$ : número de remaches
- $D_r$ : diámetro del remache (m)

## 1. Introducción

Hoy en día el diseño de componentes mecánicos para cualquier industria es un reto de muy alto rendimiento. Los avances tecnológicos dentro de la ingeniería han ido evolucionando de manera exponencial cada año, donde día a día vemos en redes sociales, en las noticias o por nosotros mismos, la aparición de nuevas tecnologías formando parte de la vida cotidiana.

No obstante, hay muchos avances los cuales no llegamos a observar con regularidad o, aun formando parte del día a día, no se es consciente de su presencia. Uno de los mayores ejemplos de este fenómeno es la propia industria automotriz, donde la gran mayoría de la sociedad no es consciente de la evolución del automóvil que conduce más allá del aspecto visual. Dentro de esta industria, gracias a las competiciones, como pueden ser la WRC o la F1, el interés de las compañías en invertir en investigación ha ido creciendo con el objetivo de ganar dichas competiciones, y de forma paralela, utilizar los resultados obtenidos reduciéndolos a nivel comercial para sus propios automóviles de calle. Todo ello ha llevado a la investigación de mejores medidas de seguridad como uno de los principales objetivos dentro de toda marca. Cara a los posibles compradores, y la protección de estos, esa representación de seguridad lleva a muchas más ventas a largo plazo.

La primera medida de seguridad desde el principio de la historia del automóvil, siendo de las más importantes hoy en día, es el sistema de frenado. Este ha ido evolucionando durante años optimizando cada parte que lo compone. Dentro de este sistema uno de los componentes más estudiados y optimizados, respecto a diseño y elección materiales, es el disco de freno, el cual está unido a los ejes y es el encargado de convertir la energía cinética en calorífica mediante el roce con las pastillas de freno con las que trabaja a conjunto.

## 2. Objeto

En el presente proyecto, se diseña un disco de freno de alto rendimiento. Para ello es necesario cumplir una serie de objetivos parciales que incluyen, en primer lugar, la identificación del vehículo para el cual se realizará el diseño y las cargas que tendrá que soportar el freno. Seguidamente, será necesario obtener un diseño compatible con el sistema de montaje del vehículo. Por último, se deberá seleccionar el material más adecuado para su fabricación, teniendo en cuenta sus propiedades mecánicas y el proceso de fabricación más adecuado para su producción. Una vez definido el material y el diseño, se llevará a cabo la realización de los planos necesarios y un presupuesto detallado para su fabricación.

## 3. Alcance

El alcance del proyecto se centra en el diseño de un disco de alto rendimiento y en el estudio de la selección de material óptimo en el ámbito comercial, no a nivel de competición automovilística. Se excluyen del alcance aquellos estudios que no estén directamente relacionados con el objetivo principal del proyecto, así como cualquier otra tarea que no sea esencial para la consecución de este.

## 4. Descripción y funcionalidad

La pieza a diseñar es una de las partes fundamentales en el sistema de frenado de cualquier vehículo. El correcto funcionamiento de esta es vital para garantizar tanto la seguridad como el rendimiento óptimo del automóvil. Esta pieza se encuentra montada sobre los bujes de ambos ejes, los cuales también sujetan las llantas del vehículo. Gracias al buje se transmite el par de salida creado por el motor, y transmitido seguidamente el eje, a cada una de las ruedas de manera simultánea.

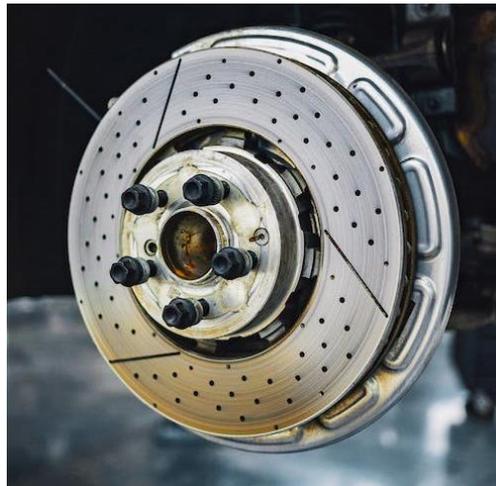


Figura 1: Pieza a diseñar  
[Fuente: Google Imágenes]

Junto al disco de freno, se requiere la instalación de pinzas de freno. Estas pinzas, a su vez, están equipadas con varios pistones hidráulicos a ambos lados, dispuestos en una configuración cara a cara hacia el interior de la pinza. Estos pistones son esenciales para el funcionamiento del sistema de frenado dado que son los responsables de ejercer una fuerza de compresión en el disco al desplazar las pastillas de freno contra este. Cuando el conductor presiona el pedal de freno, la presión ejercida sobre el líquido del circuito, gracias al vástago del pedal, es transmitida a los pistones, los cuales se desplazan junto a las pastillas de freno. Es gracias al rozamiento que se produce entre ambas piezas que se logra convertir la energía cinética en calorífica.



Figura 2: Pinza y pastillas de freno  
[Fuente: Google Imágenes]

## 5. Consideraciones iniciales

Con el objetivo de conseguir el diseño de un disco de freno, lo más fiel a la realidad posible, se ha seleccionado un modelo de automóvil a tener como referencia. Dentro de la gran variedad de coches deportivos de calle se ha seleccionado el modelo “*Nissan GT-R*”, uno de los mayores iconos en la industria automotriz tanto por su historia como por sus especificaciones técnicas. Este modelo consta de serie con un sistema de frenado de la mano de una de las compañías de sistemas de frenado más importantes a nivel mundial llamada “*Brembo*”.



Figura 3: Nissan GT-R  
[Fuente: Google Imágenes]

Para poder realizar el diseño adecuado del disco de freno, es necesario determinar las diferentes fuerzas a las que estará sometida la pieza durante su vida útil. Para ello, se llevan a cabo una serie de cálculos con el fin de obtener los datos específicos para una situación en concreto.

Hoy en día, en todo gran periódico dedicado al mundo de la automoción se realizan una gran variedad de pruebas con el fin de realizar diferentes listados de clasificación dependiendo de los resultados de cada una de ellas. La frenada del automóvil es una de las características más importantes del mismo y una característica de obligatoria puesta a prueba entre todo automóvil de prestigio. Por ello una de las pruebas más recurrentes es la clasificación dependiendo de la distancia recorrida en una frenada por completo normalmente desde una velocidad de 100 km/h a 0 km/h.

El presente proyecto se enfoca en analizar el caso específico de la frenada completa de un *Nissan GT-R* que se desplaza a una velocidad de 27.77 m/s (aproximadamente 100 km/h). Durante las pruebas que se le realizaron, se determinó que este modelo tiene una distancia de frenado para esta velocidad de 33.8 metros[1].

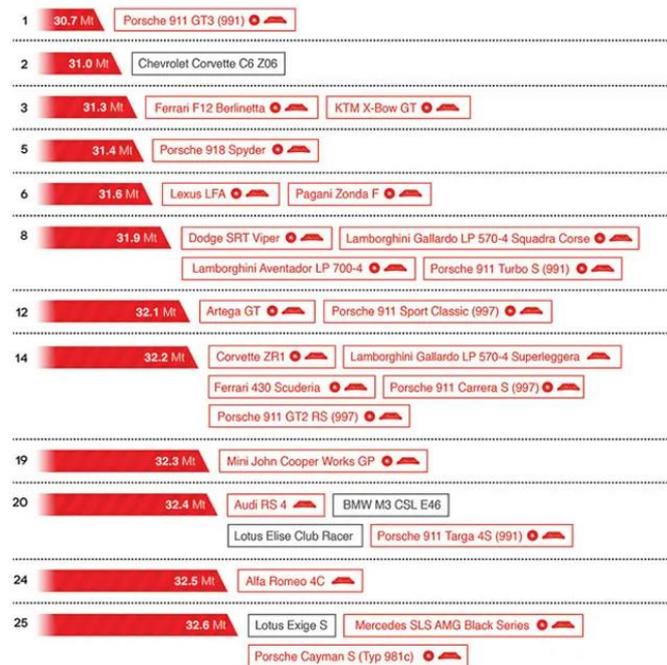


Figura 4: Top 25 mejores coches con mejor frenada del mundo [2]

El ranking que se utiliza de referencia viene dado por la web *motor.es* donde se abarcan distancias desde los 30.7 metros, pasando por los 32.6 metros del top 25, hasta los 33.5 metros del último clasificado en el top 50 [2]. Por consiguiente, uno de los objetivos de este proyecto es mejorar la distancia de frenado con el propósito de situarse dentro del top 25 ya que en esta parte de la clasificación se observan diferentes automóviles que compiten directamente con el *Nissan GTR* por el interés de los compradores. Para ello el nuevo diseño deberá poder alcanzar la marca de los 32.6 metros.

## 6. Cálculos

### 6.1. Desaceleración

Como primer paso, se realiza el cálculo de la aceleración negativa que el automóvil debe soportar para así disminuir totalmente su velocidad hasta detenerse por completo. Este cálculo se realiza a modo de comparación tanto para el modelo de serie como para la nueva propuesta de diseño. Para ello se hace uso de la ecuación de un cuerpo con un Movimiento Rectilíneo Uniformemente Acelerado o MRUA [3] junto a los siguientes datos:

#### 6.1.1 Desaceleración de serie

Donde:

$v$  es la velocidad final del automóvil = 0 m/s

$v_0$  es la velocidad inicial del automóvil = 27.77 m/s

$a_s$  es la aceleración de serie ( $m/s^2$ )

$\Delta x_s$  es la distancia recorrida de serie = 33.8 m

(1)

$$\begin{aligned}v^2 &= v_0^2 + a_s * \Delta x_s \\a_s &= \frac{v^2 - v_0^2}{\Delta x_s} \\a_s &= \frac{0^2 - 27.77^2}{33.8} \\a_s &= -22.816 \frac{m}{s^2}\end{aligned}$$

### 6.1.2. Desaceleración del nuevo diseño

Donde:

$a_n$  es la aceleración del nuevo diseño ( $m/s^2$ )

$\Delta x_n$  es la distancia recorrida del nuevo diseño = 32.6 m

(2)

$$\begin{aligned}v^2 &= v_0^2 + a_n * \Delta x_n \\a_n &= \frac{v^2 - v_0^2}{\Delta x_n} \\a_n &= \frac{0^2 - 27.77^2}{32.6} \\a_n &= -23.656 \frac{m}{s^2}\end{aligned}$$

## 6.2. Tiempo de frenado

Habiendo obtenido la desaceleración necesaria se puede obtener el tiempo que tardará el automóvil en detenerse por completo. Igual que con la aceleración negativa, se realiza el cálculo a modo de comparan los tiempos tanto para el modelo de serie como el nuevo diseño propuesto. Para ello se utiliza otra variación de la ecuación de un cuerpo con un Movimiento Rectilíneo Uniformemente Acelerado [3]:

### 6.2.1 Tiempo de frenado de serie

Donde:

$\Delta t_s$  es el tiempo de frenado de serie (s)

(3)

$$\begin{aligned}V &= v_0 + |a_s| * \Delta t_s \\ \Delta t_s &= \frac{v - v_0}{|a_s|} \\ \Delta t_s &= \frac{27.77 - 0}{22.816} \\ \Delta t_s &= 1.22 \text{ s}\end{aligned}$$

### 6.2.1 Tiempo de frenado del nuevo diseño

Donde:

$\Delta t_n$  es el tiempo de frenado del nuevo diseño (s)

(4)

$$V = v_0 + |a_n| * \Delta t_n$$

$$\Delta t_n = \frac{v - v_0}{|a_n|}$$

$$\Delta t_n = \frac{27.77 - 0}{23.656}$$

$$\Delta t_n = 1.17 \text{ s}$$

### 6.3. Distribución de la masa del automóvil

La distribución de la masa del automóvil puede variar en diferentes situaciones en relación con la distribución en los ejes. Dependiendo si el automóvil está acelerando o frenando esta distribución se ve afectada siendo más demandante la parte trasera o la delantera respectivamente.

En este caso de estudio se da en una situación de frenado, es por eso que la masa se distribuye recayendo el 70 % en el eje delantero y el 30 % en el trasero[4]. Seguidamente se procede a calcular la masa que tiene que soportar cada uno de los ejes:

Donde:

$m$  es la masa del automóvil = 1850 kg [1]

$M_d$  es la masa del automóvil en el eje delantero (kg)

$M_t$  es la masa del automóvil en el eje trasero (kg)

· Eje delantero:

$$M_d = 0.7 * m$$

$$M_d = 0.7 * 1850$$

$$M_d = 1295 \text{ kg}$$

(5)

· Eje trasero:

$$M_t = 0.3 * m$$

$$M_t = 0.3 * 1850$$

$$M_t = 555 \text{ kg}$$

(6)

### 6.4. Fuerza de frenado

Dada la distribución, y habiendo obtenido previamente el dato de la desaceleración necesaria para poder detener el automóvil por completo, se calcula la fuerza que se debe aplicar para conseguir este resultado, tanto en total como dependiendo del eje.

Donde:

$F_{fr}$  es la fuerza de frenado total (N)

$F_{frd}$  es la fuerza de frenado para las ruedas del eje delantero (N)

$F_{frt}$  es la fuerza de frenado para las ruedas del eje trasero (N)

· Fuerza total:

$$\begin{aligned} F_{fr} &= m * | a | \\ F_{fr} &= 1850 * | -23.656 | \\ F_{fr} &= 43763.600 \text{ N} \end{aligned} \tag{7}$$

· Fuerza en el eje delantero:

$$\begin{aligned} F_{frd} &= Md * | a | \\ F_{frd} &= 1295 * | -23.656 | \\ F_{frd} &= 30634.520 \text{ N} \end{aligned} \tag{8}$$

· Fuerza en el eje trasero

$$\begin{aligned} F_{frrt} &= Mt * | a | \\ F_{frrt} &= 555 * | -23.656 | \\ F_{frrt} &= 13129.080 \text{ N} \end{aligned} \tag{9}$$

Observando los cálculos se puede apreciar que los neumáticos del eje delantero son los que mayores cargas deben soportar. Por ello la pieza a diseñar en este proyecto se realiza bajo estas condiciones siendo así las más desfavorables para la misma.

Primero se debe dividir la fuerza de frenado de los neumáticos delanteros para obtener la necesaria en cada uno.

Donde:

$F_{neumático}$  es la fuerza de frenado de cada rueda del eje delantero (N)

$$\begin{aligned} F_{neumático} &= \frac{F_{frd}}{2} \\ F_{neumático} &= \frac{30634.520}{2} \\ F_{neumático} &= 15317.260 \text{ N} \end{aligned} \tag{10}$$

Dado que el neumático y el disco de freno giran al unísono, el par de frenado de los neumáticos se genera a través de la presión de frenado ejercida en el propio disco. Por ello sabiendo la fuerza de frenado que tiene que proporcionar el neumático, y utilizando el radio de este, se obtiene el par de frenado, que debe generar el disco de freno.

Los neumáticos de serie en el Nissan GT-R de referencia se fabrican con las medidas 255/40/R20 [1] por lo que el par de frenado se calcula mediante la siguiente fórmula:

Donde:

$R_n$  es el radio del neumático = 20 pulgadas = 0.508 m  
-  $P_{fr}$  es el par necesario para el frenado (Nm)

(11)

$$\begin{aligned}P_{fr} &= F_{neumático} * R_n \\P_{fr} &= 15317.260 * 0.508 \\P_{fr} &= 7781.168 \text{ Nm}\end{aligned}$$

Este par de frenado se plantea teniendo en cuenta que el automóvil se encuentra en unas condiciones perfectas donde los neumáticos son capaces de transmitir el 100% de la fuerza de frenado al asfalto.

### 6.5. Presión de frenado

Habiendo obtenido previamente el par de frenada necesario de uno de los neumáticos delanteros para detener por completo el automóvil, se puede obtener la presión necesaria que deben ejercer las pastillas de freno sobre el disco utilizando la siguiente fórmula [5]:

Donde:

$\mu$  es el coeficiente de fricción entre las pastillas y el disco de freno

$p$  es la presión aplicada al disco de freno ( $N/m^2$ )

$D_p$  es el diámetro total de los pistones de la pinza (m)

$R_m$  es el radio medio de aplicación de la fuerza de las pastillas (m)

$N$  es el número de pastillas de freno = 2 u

(12.1)

$$\begin{aligned}P_{fr} &= \frac{\mu * p * \pi * (D_p)^2 * R_m * N}{4} \\p &= \frac{P_{fr} * 4}{\mu * \pi * (D_p)^2 * R_m * N}\end{aligned}$$

En cuanto a las variables a utilizar en la fórmula, es necesario obtener tres de ellas, el coeficiente de fricción entre las pastillas y el disco de freno, el diámetro total de los cilindros de la pinza y, por último, el radio medio de aplicación de la fuerza de las pastillas.

#### 6.5.1 Coeficiente de fricción

En el estudio realizado por Andrzej Borawski [6] se llevó a cabo un estudio tribológico, evaluaciones y mediciones relacionadas con la fricción, el desgaste y la lubricación de superficies en contacto, de diferentes pastillas junto a un disco de freno. Se realizaron diferentes pruebas para observar cómo varían las propiedades y el desgaste de las pastillas con el tiempo de uso. Para ello, se midió el coeficiente de fricción promedio y la tasa de desgaste pesando cada vez las muestras, antes y después de las pruebas, para determinar los cambios de peso.

Se utilizaron muestras de pastillas de freno clasificadas en cuatro grupos según el tipo de automóvil para el que se utilizan. Dependiendo de a qué tipo de automóviles van dirigidas las pastillas de freno, se observa una composición de diferentes materiales. En este caso, el grupo nº2 es el indicado para el automóvil de referencia utilizado ya que está dirigido a coches *premium* o de alto rendimiento.

Brake Pads Group No.	Layer	Composition (% of Total Mass)
I	Friction material	Phenolic resin—29.69%; steel fibers—3.81%; glass fiber—7.99%; cast iron fibers—3.48%; silicon carbide—0.92%; zeolites—5.19%; zinc oxide—1.68%; graphite—2.18%; copper—6.46%; barite—15.63%; silicates—9.46%; magnesium oxides—15.52%
	Binder layer (interlayer)	Phenolic resin—41.99%; steel fibers—2.34%; cast iron fibers—1.58%; glass fiber—3.28%; silicon carbide—0.37%; zeolites—4.34%; zinc oxide—1.51%; graphite—2.18%; barite—14.39%; silicates—5.40%; magnesium oxides—16.15%
	Support plate (backplate)	C—0.17%; Mn—1.41%; Si—0.21%; P—0.04%; S—0.02%; Fe—98.14%
II	Friction material	Phenolic resin—18.14%; steel fibers—3.95%; glass fiber—7.43%; cast iron fibers—2.40%; silicon carbide—0.98%; zeolites—5.68%; zinc oxide—1.85%; graphite—2.86%; copper—6.22%; barite—18.58%; silicates—8.36%; magnesium oxides—17.06%; rubber particles—6.22%
	Binder layer (interlayer)	Phenolic resin—38.33%; steel fibers—2.38%; cast iron fibers—1.45%; glass fiber—3.47%; silicon carbide—0.38%; zeolites—4.40%; zinc oxide—1.27%; copper—6.70%; graphite—2.02%; barite—13.40%; silicates—6.74%; magnesium oxides—17.11%; rubber particles—2.36%
	Support plate (backplate)	C—0.16%; Mn—1.34%; Si—0.18%; P—0.02%; S—0.03%; Fe—98.13%
III	Friction material	Phenolic resin—16.85%; steel fibers—4.17%; glass fiber—7.40%; cast iron fibers—2.64%; silicon carbide—0.82%; zeolites—3.80%; zinc oxide—2.33%; graphite—2.85%; copper—8.23%; barite—18.47%; silicates—8.81%; magnesium oxides—16.94%; rubber particles—6.68%
	Binder layer (interlayer)	Phenolic resin—37.11%; steel fibers—2.53%; cast iron fibers—1.39%; glass fiber—3.84%; silicon carbide—0.48%; zeolites—4.27%; zinc oxide—1.06%; copper—6.48%; graphite—2.18%; barite—14.65%; silicates—6.66%; magnesium oxides—17.28%; rubber particles—2.05%
	Support plate (backplate)	C—0.18%; Mn—1.41%; Si—0.26%; P—0.02%; S—0.02%; Fe—98.11%
IV	Friction material	Phenolic resin—30.74%; steel fibers—3.3%; glass fiber—6.09%; cast iron fibers—3.64%; silicon carbide—1.5%; zinc oxide—1.41%; graphite—2.84%; copper—6.03%; barite—17.94%; silicates—9.46%; magnesium oxides—17.04%
	Binder layer (interlayer)	Phenolic resin—46.39%; steel fibers—2.25%; cast iron fibers—1.42%; glass fiber—2.28%; silicon carbide—0.41%; zinc oxide—1.42%; copper—6.01%; graphite—2.08%; barite—14.25%; silicates—6.50%; magnesium oxides—16.42%
	Support plate (backplate)	C—0.18%; Mn—1.39%; Si—0.22%; P—0.03%; S—0.02%; Fe—98.15%

Tabla 1. Materiales de fricción pastillas de freno [6]

Se mantuvieron condiciones constantes como la velocidad, la carga, el recorrido y el diámetro de contacto. Seguidamente, mediante el cálculo del coeficiente de fricción a partir de la fuerza de fricción registrada en cada prueba, se obtuvieron resultados diferentes a medida que el desgaste de las pastillas aumentaba desde el 10% hasta el 100%

Brake Pad Wear (%)	Test No.	Coefficient of Friction of Brake Pad Samples			
		I	II	III	IV
10	1	0.391	0.469	0.441	0.342
	2	0.385	0.459	0.544	0.361
	3	0.396	0.455	0.458	0.381
20	1	0.389	-	-	-
	2	0.446	-	-	-
	3	0.402	-	-	-
30	1	-	0.416	-	0.388
	2	-	0.497	-	0.405
	3	-	0.440	-	0.339
40	1	0.359	0.367	0.438	-
	2	0.386	0.456	0.514	-
	3	0.374	0.462	0.511	-
50	1	-	0.414	0.481	0.359
	2	-	0.406	0.426	0.341
	3	-	0.380	0.506	0.429
60	1	0.355	0.382	0.412	0.376
	2	0.357	0.434	0.428	0.341
	3	0.339	0.417	0.477	0.402
70	1	0.331	0.352	0.414	0.348
	2	0.294	0.377	0.389	0.340
	3	0.299	0.348	0.462	0.416
80	1	0.281	0.343	0.297	0.332
	2	0.277	0.308	0.329	0.368
	3	0.254	0.315	0.292	0.386
90	1	0.134	0.168	0.264	0.315
	2	0.171	0.207	0.286	0.352
	3	0.143	0.246	0.210	0.365
100	1	0.192	0.221	0.218	0.199
	2	0.169	0.323	0.262	0.150
	3	0.129	0.215	0.274	0.194

Tabla 2. Coeficientes de fricción según desgaste [6]

Partiendo de la premisa de que los datos de referencia, como la distancia de frenado para detenerse por completo, se han medido en condiciones óptimas, tanto para el automóvil como para el sistema de frenado, se hace uso de un promedio de los coeficientes de fricción con el menor desgaste posible, el 10%

(13)

$$\mu = \frac{0.469+0.459+0.455}{3}$$

$$\mu = 0.461$$

### 6.5.2. Radio medio de aplicación de la fuerza

El radio medio de aplicación se puede encontrar en los planos de las pinzas y depende del diámetro del disco de freno seleccionado. Es por ello que primero se debe seleccionar el diámetro que tendrá el nuevo diseño. Respecto a este dato, el modelo *Nissan GT-R* hace uso de unas pinzas de freno de 6 pistones [7].

NISSAN GT3				
		Description	Q.ty	Part number
Disc	Left	Ø 380x34	1	09.8528.12
	Right	Ø 380x34	1	09.8528.22
Caliper	Left	M6. 28/30/38	1	XA8.31.31
	Right	M6. 28/30/38	1	XA8.31.32

Tabla 3: Especificaciones técnicas sistema de frenado Nissan GT-R [7]

Como se observa en las siguientes características, el diámetro del disco que acepta este modelo de pinza va desde los 355 a los 390 mm.

### P/N XA8.31.31/32 6 PISTON CALIPER

Typical application: GT

#### Mounting information

Trailing Leading

LH XA8.31.31

RH XA8.31.32

#### Technical Specifications

Piston Size (mm)	28	Piston Area (cm <sup>2</sup> )	49,13	Mounting Offset (mm)	42
	30	Pad Area (cm <sup>2</sup> )	78,5	Mounting Hole Dia. (mm)	12,23
	38	Pad Thickness (mm)	29	Caliper Body	Monobloc
		Pad Family	B24	Caliper Material	Aluminium
		Disc Thickness (mm)	32 - 35	Piston Insert	Titanium
		Disc Diameter (mm)	355 - 390	Weight (kg)	2,5
		Mounting Hole Center (mm)	210	Fluid Capacity	116



Tabla 4. Especificaciones técnicas pinzas de freno: Diámetro del disco [7]

Por ello, para el proyecto se selecciona un diámetro de disco de 390 mm para poder maximizar diferentes aspectos:

- Mayor capacidad para la disipación del calor. Un disco de freno de mayor tamaño proporciona una mayor superficie que permita disipar el calor generado en la frenada. Gracias a ello se evita el sobrecalentamiento en el sistema de frenos y evitar la disminución de la capacidad de frenado especialmente en frenadas intensas o prolongadas.
- Mayor rendimiento de frenado. Dado que cuanto mayor sea el diámetro permitirá un mayor par de frenada con la misma presión ejercida por las pinzas.
- Mayor resistencia estructural. A mayor tamaño del disco tiende a aumentar la resistencia a mayores cargas y fuerzas durante la frenada, esto es beneficioso en automóviles de alto rendimiento como el de este proyecto.

Obtenido el diámetro del disco de freno, se comprueba el plano del modelo de pinza utilizado en el *Nissan GT-R* en busca del radio medio de presión. En este caso  $R_m = 169.5$  mm [7] el cual se convierte a SI siendo finalmente  $R_m = 0.1695$  m.

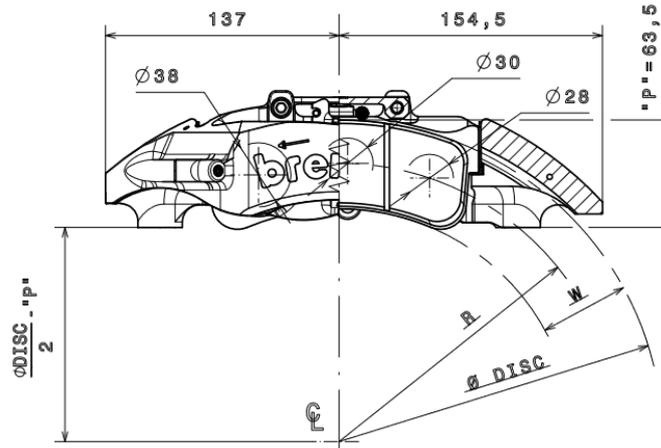


Figura 5. Parte del plano de las pinzas modelo XA8.31.31/32 [7]

Ø DISC	R	TH DISC	W (disc)	H (pad)	TH PAD
390	169,5	32 - 35	52,5	52	29
355	152,5	32 - 35	52,5	52	29

Tabla 5. Características de las pinzas modelo XA8.31.31/32 [7]

### 6.5.3. Diámetro total de los pistones

En cuanto diámetro del pistón a utilizar en la fórmula, este es un dato que no viene dado en las especificaciones de la propia pinza, pero se puede obtener mediante la formula del área de un círculo:

#### P/N XA8.31.31/32 6 PISTON CALIPER

Typical application: GT

#### Mounting information

Trailing Leading

LH XA8.31.31

RH XA8.31.32

#### Technical Specifications

Piston Size (mm)	28	Piston Area (cm <sup>2</sup> )	49,13	Mounting Offset (mm)	42
	30	Pad Area (cm <sup>2</sup> )	78,5	Mounting Hole Dia. (mm)	12,23
	38	Pad Thickness (mm)	29	Caliper Body	Monobloc
		Pad Family	B24	Caliper Material	Aluminium
		Disc Thickness (mm)	32 - 35	Piston Insert	Titanium
		Disc Diameter (mm)	355 - 390	Weight (kg)	2,5
		Mounting Hole Center (mm)	210	Fluid Capacity	116



Tabla 6. Especificaciones técnicas pinzas de freno: área del pistón [7]

Donde:

$A_{pistón}$  es el área del pistón = 49.13 cm<sup>2</sup>

$D_{p-i}$  es el diámetro de un cilindro (cm)

$$\begin{aligned} A_{pistón} &= \pi * r^2 \\ A_{pistón} &= \frac{\pi * (D_{p-i})^2}{4} \\ D_{p-i} &= \sqrt{\frac{A_{pistón} * 4}{\pi}} \\ D_{p-i} &= \sqrt{\frac{49.13 * 4}{\pi}} \\ D_{p-i} &= 7.909 \text{ cm} \end{aligned} \tag{14}$$

Debido a que en la fórmula viene dada para un simple pistón se ha multiplicado el diámetro obtenido por el número de pistones de la pinza y convertido a SI:

Donde:

$N_{pis}$  es el número de pistones = 6 u

$$\begin{aligned} D_p &= D_{p-i} * N_{pis} \\ D_p &= 7.909 * 6 \\ D_p &= 47.454 \text{ cm} = 0.475 \text{ m} \end{aligned} \tag{15}$$

Con todas las variables faltantes ya conocidas, se vuelve de nuevo a la fórmula para calcular la presión ejercida por las pastillas de freno en el disco:

$$\begin{aligned} p &= \frac{P_{fr} * 4}{\mu * \pi * (D_p)^2 * R_m * N} \\ p &= \frac{7293.365 * 4}{0.461 * \pi * (0.475)^2 * 0.169 * 2} \\ p &= 264139.423 \frac{N}{m^2} \end{aligned} \tag{12.2}$$

## 7. Diseño de la pieza

Al realizar todos los cálculos necesarios para el análisis de resistencia de la pieza, se procede a crear su diseño.

En cuanto las dimensiones de la pieza, como se ha mencionado anteriormente, se ha seleccionado un diámetro exterior de 390 mm. Por otro lado, el grosor de esta viene dado por las pinzas de freno que se utilizan en el modelo *Nissan GT-R* ofreciendo un intervalo permisible.

## P/N XA8.31.31/32 6 PISTON CALIPER

Typical application: GT

### Mounting information

Trailing	Leading
LH XA8.31.31	
RH XA8.31.32	



### Technical Specifications

Piston Size (mm)	28	Piston Area (cm <sup>2</sup> )	49,13	Mounting Offset (mm)	42
	30	Pad Area (cm <sup>2</sup> )	78,5	Mounting Hole Dia. (mm)	12,23
	38	Pad Thickness (mm)	29	Caliper Body	Monobloc
		Pad Family	B24	Caliper Material	Aluminium
		Disc Thickness (mm)	32 - 35	Piston Insert	Titanium
		Disc Diameter (mm)	355 - 390	Weight (kg)	2,5
		Mounting Hole Center (mm)	210	Fluid Capacity	116

Tabla 7: Especificaciones técnicas pinzas de freno: grosor del disco [7]

En el rango de grosor disponible para la pieza, que va desde 32 mm hasta 35 mm, se ha optado por seleccionar el grosor máximo permitido, que es de 35 mm. Esta elección se realiza con el objetivo de lograr una mayor resistencia mecánica frente a la presión ejercida por las pastillas de freno.

Después de obtener el diámetro exterior y el grosor del disco de freno, se ha utilizado el catálogo de discos de freno de *Brembo* para seleccionar un diámetro interno de 260 mm [7]. Esta elección se basó en un ejemplo de disco de freno, que aparece en dicho catálogo, con características similares.

Diameter (mm) x Th (mm)	Inside diameter (mm)
390x35	260

Tabla 8: Dimensiones disco de ejemplo [7]

También se ha utilizado el catálogo como referencia inicial para determinar las dimensiones clave de la brida, que es la parte del disco de freno responsable de sujetarlo al buje del automóvil. Estas dimensiones se refieren al diámetro interior y al grosor de la brida.

Overall thickness (mm)	Flange inside diameter (mm)	Flange Th (mm)
35	227	8

Tabla 9: Dimensiones iniciales de la brida [7]

El diseño de la pieza se ha llevado a cabo mediante el software CAD llamado *SolidWorks 2022*. Esta herramienta, además de la realización del diseño 3D, permitirá un análisis de resistencia con el cual se discutirán los resultados con el objetivo de obtener la elección del material óptimo. En la etapa inicial de la pieza, se observa un disco de freno no muy afín a la realidad, ya que solo representa la base de la pieza final.

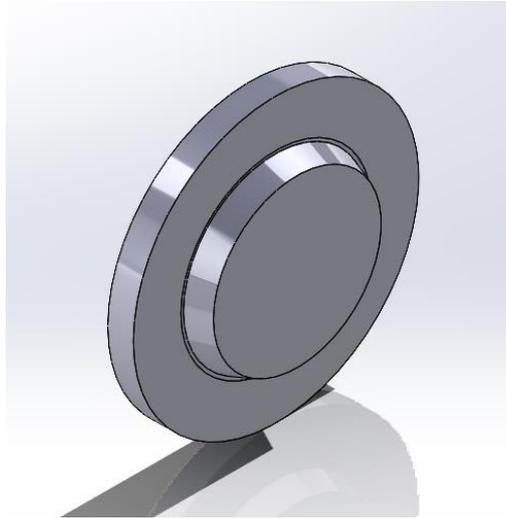


Figura 6: Primer diseño disco de freno  
[Fuente: Elaboración propia]

Dado que el disco de freno tiene que colocarse en el buje, el cual conecta con el eje, es necesario un orificio para el propio eje, así como varios orificios adicionales para permitir el paso de los pernos que sujetan, y fijan, el disco y la llanta del automóvil.

El orificio central para el eje tiene un diámetro de 67 mm ya que el eje son 66.21 mm [8]. A continuación, los pernos están dispuestos en una configuración 5x114.3 [8], lo que implica que hay cinco orificios espaciados a una distancia de 114.3 mm entre ellos. Considerando que el tamaño de rosca de los pernos es de M12 x 1.25 [8], se ha seleccionado un diámetro, para cada uno de los cinco orificios, de 12 mm.

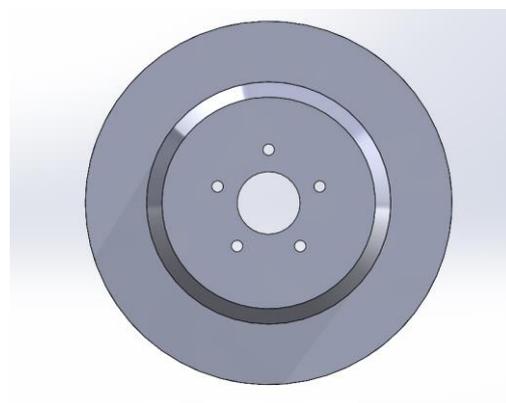


Figura 7: Orificios de la brida  
[Fuente: Elaboración propia]

Ya que en este proyecto no se ha realizado ningún estudio térmico de la pieza, dada la falta de accesibilidad a diferentes datos necesarios para ello y la falta de conocimientos sobre este tipo de estudios, se ha utilizado un artículo de referencia como guía para modificar el diseño anterior, hacerlo más realista y con mejores prestaciones.

En el estudio realizado por Rivera-López, J E *et al.* [9] se analizaron características clave como la temperatura, velocidad y el flujo de calor con el objetivo de comprender el comportamiento del disco de freno en cuanto a la exposición a diferentes temperaturas. Para ello se empleó el software *SolidWorks* con el objetivo de reproducir el flujo de aire en los conductos de ventilación y así poder evaluar tanto su velocidad como su capacidad de disipación de calor mediante el uso de diferentes geometrías. Finalmente, al realizar las pruebas se compararon los resultados con los cálculos matemáticos para obtener mayor precisión.

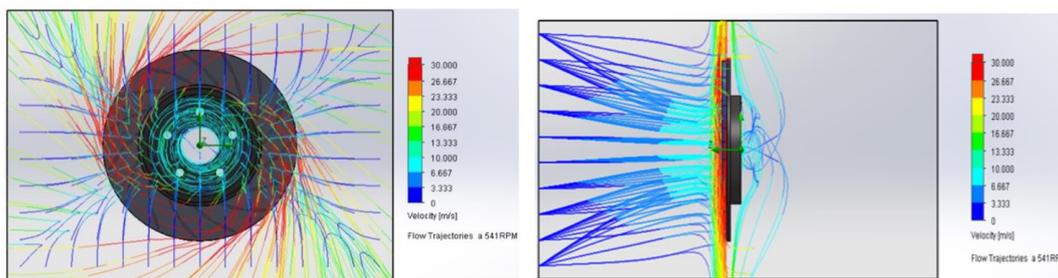


Figura 8: Funcionamiento de los alabes en la refrigeración [9]

Es por ello que se han agregado canales de ventilación a la pieza que permiten un mayor flujo de aire a través de la superficie de la pieza para mejorar su capacidad de refrigeración. Estos canales contribuyen a mantener la integridad estructural, previniendo posibles deformaciones o fallos estructurales, al reducir la temperatura de trabajo y mantener las especificaciones técnicas que podrían verse afectadas por una exposición prolongada a altas temperaturas en situaciones como frenadas bruscas o muy prolongadas.

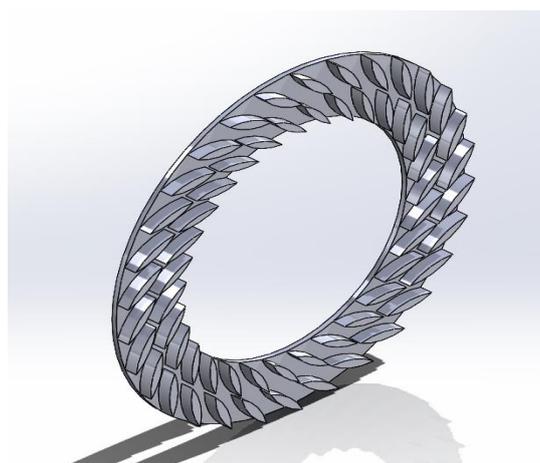


Figura 9: Vista de sección de la pieza y de los alabes  
[Fuente: Elaboración propia]

En cuanto a la selección del grosor de ambos lados del disco de freno, al revisar el catálogo de *Brembo* se observa que la amplitud de los agujeros de ventilación para grosores de

disco de 35 mm es de 12 mm [7]. Por lo tanto, se deduce que los restantes 23 mm del grosor total del disco se distribuirán en 11.5 mm a cada lado.

Th (mm)	Ventilation holes (mm)
35	12

Tabla 10: Dimensiones agujeros de ventilación [7]

Por último, se ha agregado un nuevo elemento al diseño, que son las ranuras ciegas en las superficies de contacto con las pastillas de freno. En el estudio realizado por Sha, Zhihua *et al.* [10] se focaliza en el efecto de las texturas en la superficie del disco de freno en relación con la vibración durante el proceso de frenado. Para esto, se establece un modelo simplificado de elemento finito de un disco de freno. El objetivo principal es obtener referencias para el diseño y la optimización del disco de freno.

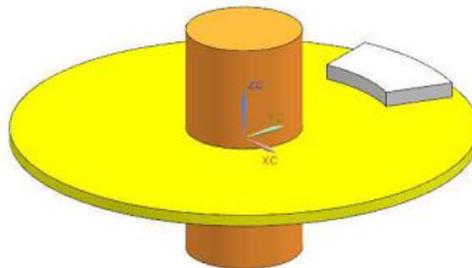


Figura 10. Modelo simplificado del disco de freno [10]

El estudio analiza cómo la disposición de las ranuras en la superficie del disco afecta la estabilidad del sistema de frenos y contribuye a una frenada óptima. Además, se destaca que esta disposición de las ranuras puede reducir la superficie de contacto con la pastilla de freno, lo que a su vez disminuye el desgaste de esta. Los resultados del estudio concluyen que las ranuras ciegas con un ángulo mayor permiten una mayor fluctuación de vibración, lo que mejora el rendimiento de frenado.

Una vez obtenidos todos los detalles de la pieza el resultado final, a falta de la selección del material, sería el siguiente:

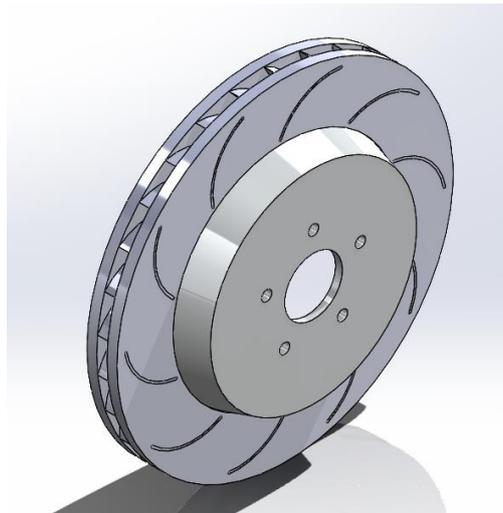


Figura 11: Diseño final del disco de freno  
[Fuente: Elaboración propia]

## 7.1. Materiales

Una vez completado el diseño de la pieza, una de las partes más importantes es la selección del material adecuado a utilizar en su fabricación. Para ello es necesario saber cuáles son las opciones disponibles y comprender las características de cada una de ellas.

En el artículo realizado por Martínez Gómez, Javier *et al.* [11] se estudió la selección de materiales para discos de freno de un automóvil SUV utilizando un método multicriterio. Se evaluaron diferentes candidatos, utilizados normalmente en la fabricación de discos de freno, en función de sus características clave. Los materiales candidatos y sus respectivas características son las siguientes:

Material	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Precio (USD/kg)	Módulo Young (GPa)	Límite elástico (MPa)	Radio de Poisson	Resistencia a la tracción (MPa)	Resistencia a la compresión (MPa)	Dureza Brinell (HV)	Conductividad térmica (W/m <sup>2</sup> C)	Coefficiente de expansión térmica (μstrain/°C)
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Ti <sub>6</sub> Al <sub>4</sub> V	4430	27.5	115	898	0.349	620	848	347	8.91	9.1
Al <sub>10</sub> SiC	2770	8.29	88	358	0.32	372	358	118	148	18
AISI 304L	7980	4.53	205	310	0.275	620	310	210	16	18
ASTM A536	7150	0.67	173	339	0.28	500	351	217	41	12.5
ASTM A48	7200	0.67	120	149	0.265	250	170	252	46	13

Tabla 11: Características de los materiales candidatos [11]

Para el estudio que se está realizando se seleccionan tres de los materiales propuestos. El primero de ellos es la aleación de titanio “Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V”, elegida para examinar su comportamiento al ser el material con las características mecánicas más elevadas, sin tener en cuenta las restricciones presupuestarias, un escenario donde no haya límites establecidos. Aunque a la hora de los resultados del análisis entre las selecciones, esto será un punto clave.

En segundo lugar, se va a descartar una de las dos fundiciones que se encuentran en la parte inferior de la tabla. Dado que el precio del material es el mismo, se va a seleccionar aquel que presente mejores prestaciones. Para ello, el material que se descartará es la fundición gris “ASTM A48”, ya que, aunque sus características son similares a las de la fundición nodular “ASTM A536”, tiene un menor módulo de Young, lo que indica una mayor facilidad para deformarse y una menor capacidad para recuperar su forma original. Además, tanto el límite elástico como la resistencia a la tracción y a la compresión son considerablemente inferiores.

Por último, en la parte media de la tabla, se descartará el acero inoxidable "AISI 304L". Aunque tiene un módulo de Young, una dureza y una resistencia a la tracción mayores, se debe tener en cuenta que la pieza estará principalmente sometida a compresión, donde ambas opciones tienen una resistencia similar. Sin embargo, considerando que uno de los objetivos principales es mejorar la facilidad de refrigeración de la pieza, la aleación de aluminio "Al10SiC" presenta una conductividad térmica significativamente más alta. Aparte de eso, la densidad de la aleación de aluminio es casi tres veces menor, lo cual es un punto clave en aplicaciones automotrices de alto rendimiento donde se busca maximizar la optimización del peso de cada componente.

## 7.2. Análisis estático

El análisis de la pieza se realiza utilizando el software *SolidWorks 2022*, el cual también se utilizó para el propio diseño de la pieza. Se llevan a cabo dos estudios distintos para tener en cuenta dos cargas externas diferentes. Uno de los estudios evaluará los resultados de la compresión generada por la pinza de freno en las caras del disco, mientras que el otro considerará la fuerza de frenado que los anclajes del disco, los cuales lo conectan al buje y al eje, deben soportar.

### 7.2.1. Parámetros iniciales

Dentro del software, en la sección de análisis estático, existen varios parámetros que se pueden configurar para poder simular la situación de estudio con máximo detalle, como se puede observar en la siguiente imagen:

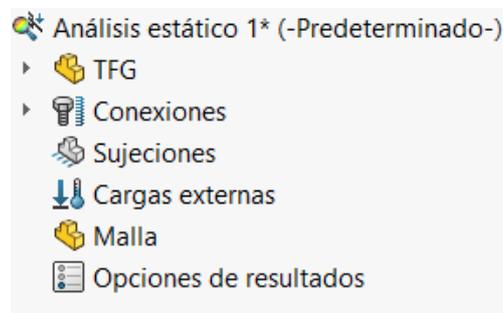


Figura 12: Parámetros del análisis  
[Fuente: Elaboración propia]

#### 7.2.1.1. Materiales del sólido

En el análisis inicial, es crucial seleccionar el material que se utilizará en el sólido. Para llevar a cabo esta tarea, *SolidWorks 2022* ofrece una base de datos que incluye una amplia variedad de materiales y sus respectivas características. Además, el software permite la creación de materiales personalizados. Por lo tanto, el primer paso a llevar a cabo es la creación de los tres materiales bajo estudio y agregarlos a la base de datos.

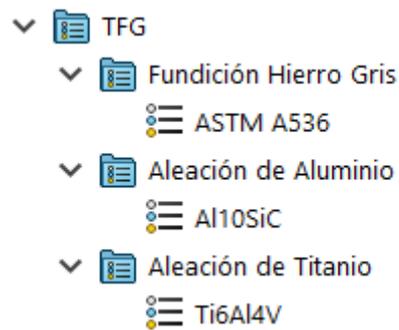


Figura 13: Materiales añadidos  
[Fuente: Elaboración propia]

### 7.2.1.2. Sujeciones

Para el análisis, es necesario seleccionar cómo se sujetará la pieza. Para ello, se ha considerado que la sujeción principal del disco de freno y su capacidad para girar al unísono con la llanta se logra mediante los pernos de los bujes. Por lo tanto, se han identificado y seleccionado las caras y aristas que estarán en contacto con estos pernos.

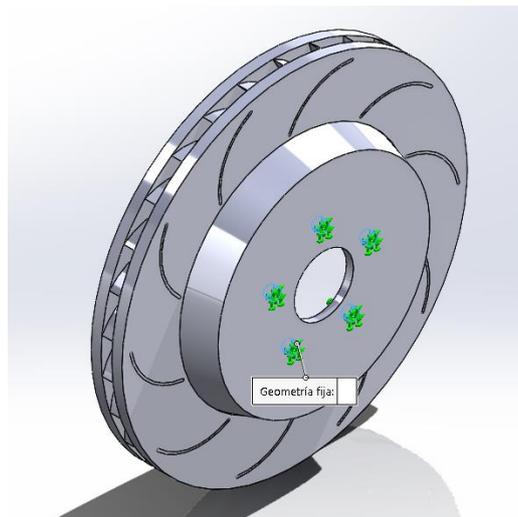


Figura 14: Sujeciones de la pieza  
[Fuente: Elaboración propia]

### 7.2.1.3. Cargas externas

Es necesario seleccionar las cargas externas a las que se va a someter la pieza. Las fuerzas externas se han multiplicado por un factor de seguridad de 1.5. Este factor de seguridad se ha seleccionado basándose en un artículo realizado por Akshay Naikwadi *et al.* [12] donde se realizaron análisis estáticos a un disco de freno expuesto a diferentes fuerzas. Según las conclusiones de ese artículo, se determinó que el factor mínimo de seguridad debería ser de 1.5.

### Presión de las pinzas de freno

Por un lado, está la presión que ejercen las pastillas sobre el disco de freno, calculada anteriormente en la Ec.11.2. y ahora multiplicada por el factor de seguridad.

Donde:

$p_a$  es la presión a utilizar en el análisis

(16)

$$p_a = p * 1.5$$
$$p_a = 264139.423 * 1.5$$
$$p_a = 396209.135 \frac{N}{m^2}$$

Esta compresión se ejerce en ambas caras del disco donde se asentaría la pastilla de freno.

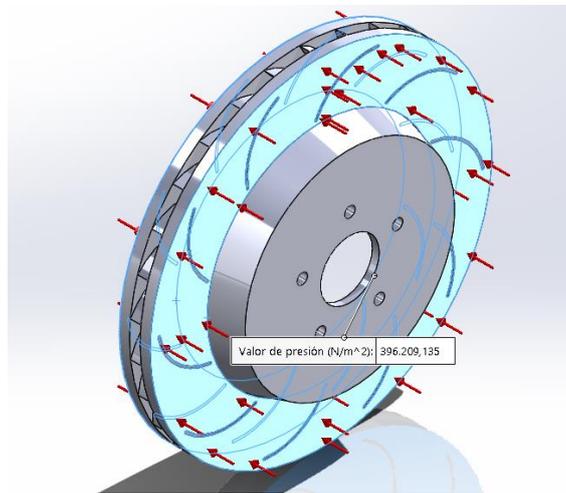


Figura 15: Cargas externas: presión pinzas  
[Fuente: Elaboración propia]

### Par de frenado

Por otro lado, el disco de freno estará sometido a la fuerza generada por el par de frenado. Esta fuerza resulta en una concentración de tensiones elevadas en los puntos de soporte, es decir, en los pernos. Este par de frenado necesario se obtuvo en la Ec.11 y ahora se multiplica por el factor de seguridad.

Donde:

$P_{fra}$  es el par a utilizar en el análisis

(17)

$$P_{fra} = P_{fr} * 1.5$$
$$P_{fra} = 7781.168 * 1.5$$
$$P_{fra} = 11671.752 Nm$$

El par se origina debido a la aplicación de la fuerza de compresión de las pastillas de freno sobre las caras del disco. Esto requiere un punto de aplicación con respecto al eje central de la pieza, por ello se va a hacer uso del radio medio de aplicación de la fuerza de las pinzas de freno utilizado anteriormente, el cual se observa en la tabla 6, y tiene un valor de 169.5 mm.

Dado que el software *Solidworks 2022* no permite aplicar un par de torsión sobre una línea, se debe aplicar la torsión a partir de una cara. Como en este apartado del estudio solo se analiza la parte central de la pieza, se ha reducido el radio exterior del disco a 169.5 mm, lo que permite utilizar las caras superiores de ambos lados del disco como puntos de aplicación de este par, teniendo como referencia el eje central de la pieza.

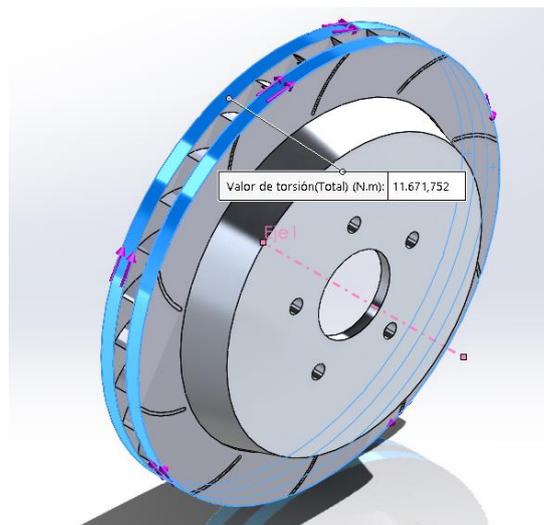


Figura 16: Cargas externas: par de frenado  
[Fuente: Elaboración propia]

#### 7.2.1.4. Mallado

Una vez seleccionadas las sujeciones se crea una malla la cual, dependiendo de en cuantas celdas divide la pieza, permite al usuario obtener información más exacta de los resultados. En el análisis de piezas complejas, se recomienda llevar a cabo un estudio de sensibilidad de la malla. Este proceso implica realizar diferentes análisis utilizando distintos tamaños de malla con el fin de obtener un tamaño de malla óptimo. Esto puede implicar obtener resultados ligeramente menos precisos, pero permite ahorrar un tiempo de espera considerable, ya que el software no tiene que realizar cálculos tan exhaustivos en cada análisis. De esta manera, se logra un equilibrio entre la precisión y la eficiencia de tiempo en los estudios de la pieza.

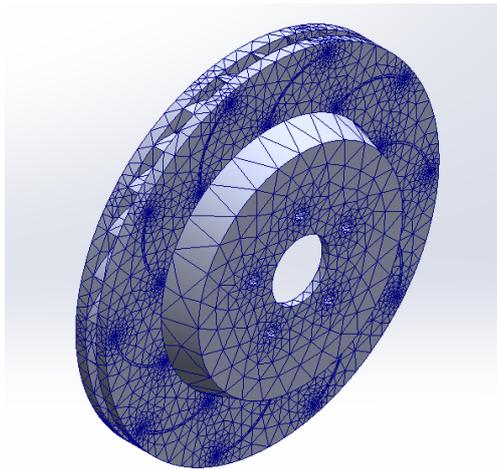


Figura 17: Mallado de la pieza  
[Fuente: Elaboración propia]

### Mallado para el estudio de presión

Para el primero mallado, se ha realizado un estudio de sensibilidad de la malla abarcando el rango desde el mínimo valor de celdas posible hasta el máximo. Esto se ha realizado utilizando la aleación de titanio, que es uno de los tres materiales propuestos, y se han recopilado las tensiones máximas obtenidas en los diferentes mallados. A continuación, se muestra un gráfico donde se puede observar la evolución de los datos obtenidos.

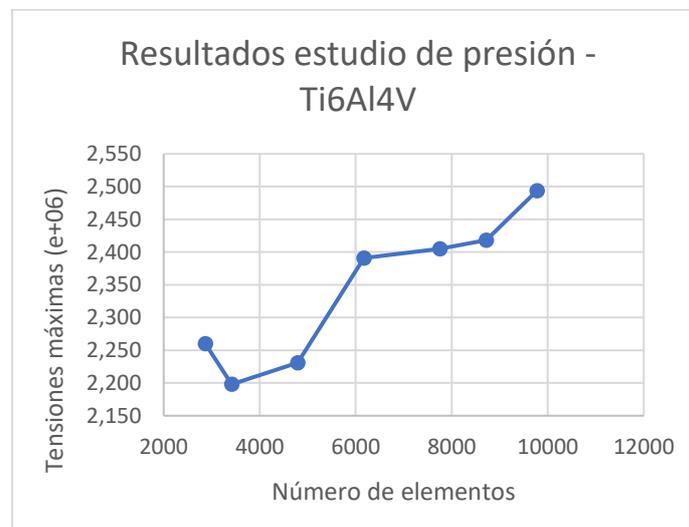


Figura 18. Gráfico 1: Sensibilidad de mallado para el estudio de presión  
[Fuente: Elaboración propia]

A pesar de que la evolución de las tensiones obtenidas, la diferencia en el último tramo se sitúa alrededor del 5%. Además de obtener unos datos mucho más precisos, el mallado más fino tiene un tiempo de espera no mayor a diez segundos. En algunos casos, la elección del mallado puede depender del tiempo de espera asociado a cada opción. Sin embargo, en el presente caso, se ha determinado que el mallado más fino es el más preciso combinado con un corto tiempo de espera. Por lo tanto, esta selección es la más adecuada en términos de precisión y eficiencia.

### Información de malla

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla basada en curvatura de combinado
Puntos jacobianos para malla de alta calidad	16 Puntos
Tamaño máximo de elemento	14,0299 mm
Tamaño mínimo del elemento	2,2961 mm
Número total de nodos	19523
Número total de elementos	9684
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:09

Tabla 12: Información de la malla para el estudio de presión

[Fuente: Elaboración propia]

### Mallado para el estudio del par de frenado

Para realizar el estudio del par de frenado, se ha reducido el diámetro de la pieza, lo que ha requerido realizar un nuevo estudio de sensibilidad de malla. En este caso, se ha utilizado de nuevo la aleación de titanio y se han recopilado datos sobre las tensiones máximas. Además, el diseño con menor diámetro permite al mallado un mayor número de divisiones. A continuación, se muestra la evolución de los datos en el siguiente gráfico.

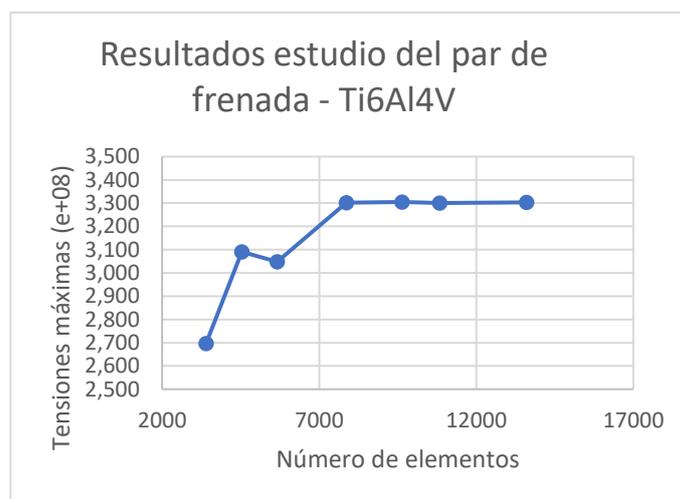


Figura 19. Gráfico 2: Sensibilidad de mallado para el estudio del par de frenada

[Fuente: Elaboración propia]

En el gráfico se puede observar que, al principio, la evolución de los datos muestra un aumento significativo en los valores de tensión a medida que se aumenta la cantidad de elementos en el mallado. Sin embargo, alrededor de un mallado con 8000 elementos, se observa una estabilización en los resultados. A partir de este punto, incrementar la finura del mallado aumentando el número de divisiones no produce cambios significativos en los datos obtenidos.

Dado que el tiempo de espera requerido para mallados más finos es considerablemente superior al anterior, se ha seleccionado un mallado alrededor de este número de divisiones. De esta manera, se logra obtener la mayor precisión posible en los datos con un tiempo de espera reducido.

### Información de malla

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla basada en curvatura de combinado
Puntos jacobianos para malla de alta calidad	16 Puntos
Tamaño máximo de elemento	13,363 mm
Tamaño mínimo del elemento	4,45429 mm
Número total de nodos	16172
Número total de elementos	7854
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:11

Tabla 13: Información de la malla para el estudio del par de frenado  
[Fuente: Elaboración propia]

## 7.2.2. Resultados del estudio

Los resultados se presentarán clasificados según el tipo de carga externa aplicada y el material utilizado en cada caso. El enfoque del estudio se centra en las tensiones de von Mises, las cuales son indicadores de la resistencia del material frente a las cargas mecánicas. Las tensiones de von Mises ayudan a predecir la deformación o fallo del material cuando se aplica fuerza desde diferentes direcciones. Cuando el valor de esta tensión supera el límite elástico del material, se produce una deformación permanente. Tras la presentación de los resultados, se llevará a cabo una discusión y se extraerán conclusiones sobre el material óptimo.

### 7.2.2.1. Carga externa: Presión de las pinzas de freno

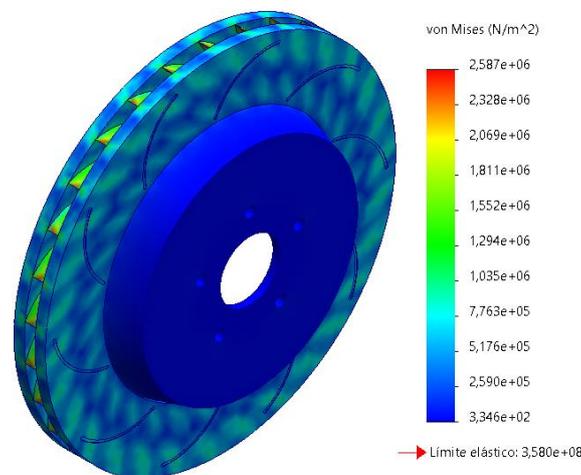


Figura 20: Tensiones resultantes – Al10SiC  
[Fuente: Elaboración propia]

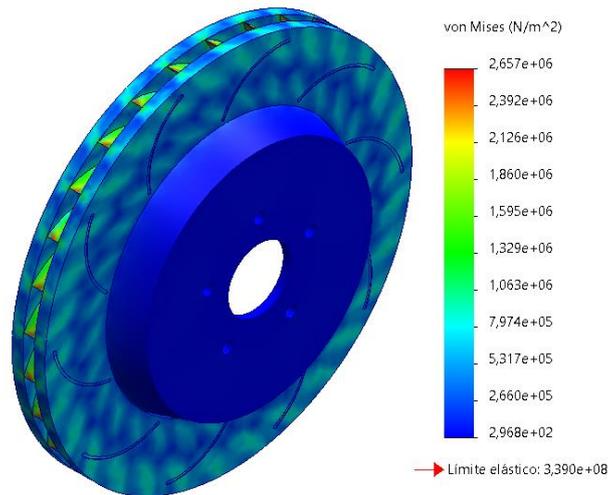


Figura 21: Tensiones resultantes – ASTM A536  
[Fuente: Elaboración propia]

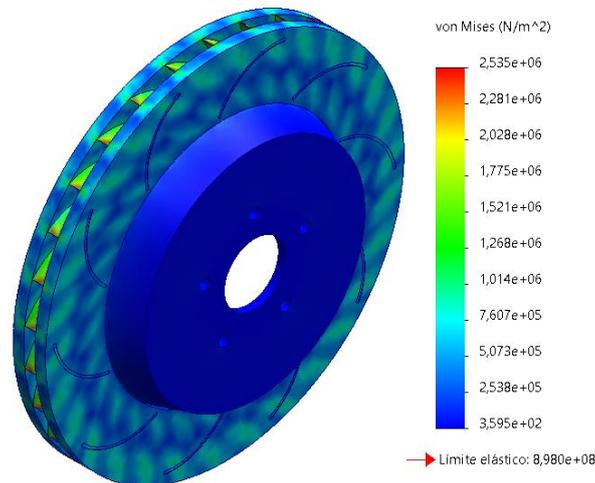


Figura 22: Tensiones resultantes – T6Al4V  
[Fuente: Elaboración propia]

Material	Límite Elástico (N/m <sup>2</sup> )	Tensión mínima (N/m <sup>2</sup> )	Tensión máxima (N/m <sup>2</sup> )
<i>Al<sub>10</sub>SiC</i>	$3.580 \times 10^8$	$3.346 \times 10^2$	$2.587 \times 10^6$
<b>ASTM A536</b>	$3.390 \times 10^8$	$2.968 \times 10^2$	$2.657 \times 10^6$
<i>T<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V</i>	$1.490 \times 10^8$	$3.995 \times 10^2$	$2.535 \times 10^6$

Tabla 14: Tensiones estudio de presión  
[Fuente: Elaboración propia]

7.2.2.2. Carga externa: Par de frenado

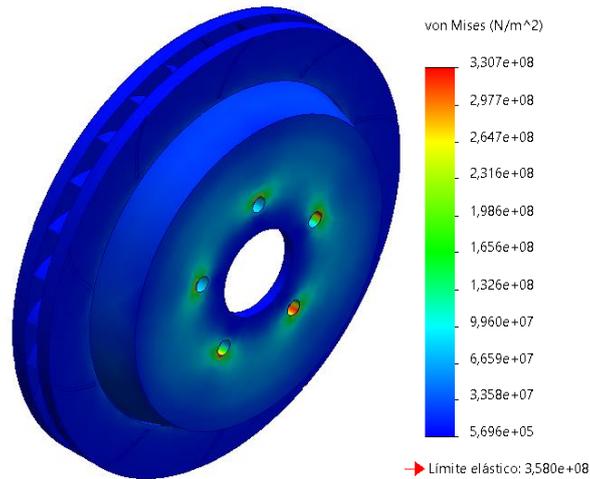


Figura 23: Tensiones resultantes – Al10SiC  
[Fuente: Elaboración propia]

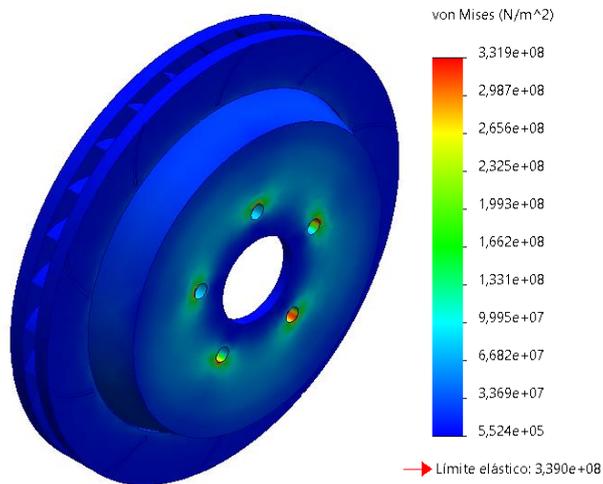


Figura 24: Tensiones resultantes – ASTM A536  
[Fuente: Elaboración propia]

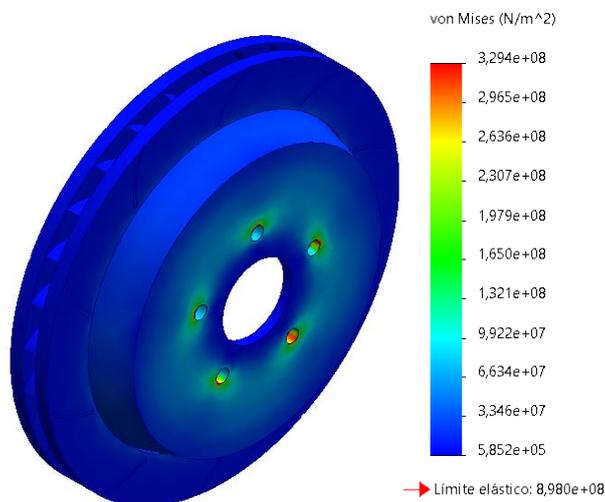


Figura 25: Tensiones resultantes – T6Al4V  
[Fuente: Elaboración propia]

Material	Límite Elástico (N/m <sup>2</sup> )	Tensión mínima (N/m <sup>2</sup> )	Tensión máxima (N/m <sup>2</sup> )
<b>Al<sub>10</sub>SiC</b>	$3.580 \times 10^8$	$5.696 \times 10^5$	$3.307 \times 10^8$
<b>ASTM A536</b>	$3.390 \times 10^8$	$5.524 \times 10^5$	$3.319 \times 10^8$
<b>T<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V</b>	$1.490 \times 10^8$	$5.852 \times 10^5$	$3.294 \times 10^8$

Tabla 15: Tensiones estudio del par de frenado  
[Fuente: Elaboración propia]

### 7.3. Conclusión del estudio y selección de material

Una vez obtenido todos los resultados de ambos estudios, primeramente, se puede observar como cualquiera de los tres materiales sería apto en esa situación ya que no se crean grandes tensiones con la presión de la pinza. Por otro lado, el estudio del par de frenado es el que arroja datos más interesantes para la selección del material.

En primer lugar, el estudio concluye que la aleación de titanio *T6Al4V* es la primera opción de descarta debido a su sobredimensionamiento, como se puede observar en los resultados, dado su alto precio en comparación con las otras opciones que se puede observar en la tabla 11.

Seguidamente, se ha realizado una lista con los puntos importantes de ambas opciones disponibles ya que su límite elástico es muy parecido y cercano a las tensiones máximas que aparecen: la aleación de aluminio y la fundición de hierro.

Para la aleación de aluminio:

- Tiene una densidad más baja, lo cual resulta en una menor masa final de la pieza, un aspecto clave para la optimización del peso en automóviles de altas prestaciones.
- Posee una conductividad térmica tres veces mayor, lo que es beneficioso para la refrigeración en piezas sometidas a altas temperaturas, como los discos de freno.

En cuanto a la fundición de hierro:

- Tiene un costo diez veces menor en comparación con la aleación de aluminio.
- Ofrece una resistencia a la compresión similar a la aleación de aluminio.
- Tiene un número de Poisson menor, lo que ayuda en la absorción de vibraciones.
- Tiene una dureza Brinell dos veces superior, lo que dificulta el desgaste de la pieza.

Además, siendo la conductividad térmica un punto clave en esta pieza no se ha planteado un punto de salida a partir del cual se considere un valor suficiente para la refrigeración de un disco de freno. Es por ello que se ha tenido en cuenta un artículo realizado por García-León, Ricardo Andrés *et al.* [13] donde se ha realizado, mediante el software *SolidWorks*, un análisis de diferentes geometrías de un disco de freno con un material el cual tiene conductividad térmica similar a la fundición de hierro planteada como opción en este proyecto. En este artículo se observa un buen rendimiento respecto a la refrigeración de la pieza, concluyendo que podría haber una mejora, en esta misma característica, si se llegase a realizar un estudio aún más exhaustivo de la geometría interna.

En resumen, al considerar los aspectos más destacables de cada opción, la fundición de hierro muestra ventajas significativas, ya que tiene un precio mucho más bajo, mayor rigidez, mayor absorción de las vibraciones y una mayor resistencia al desgaste. Estos factores, junto al justificar que su conductividad térmica es un buen valor para la refrigeración de la pieza, convierten la fundición de hierro dúctil o nodular en el material óptimo bajo la situación de estudio.

#### 7.4. Optimización del diseño

Una opción para optimizar el diseño con el fin de reducir la masa del disco de freno, y con ello el presupuesto de la pieza, sería disminuir su diámetro. Según los datos de la tabla 5, el rango de opciones para el diámetro de la pinza de freno va desde 355 mm hasta 390 mm. Por ello, después de obtener los resultados del estudio y realizar una selección del material adecuado, se decide reducir el diámetro exterior del disco de freno a 355 mm. Esta reducción permitiría disminuir la masa actual de 16.636 kg en 4.223 kg, llegando así a una masa final de 12.413 kg.

Tratado como	Masa
Disco exterior 390 mm	12,357 kg
Disco exterior 355 mm	8,407kg
Brida	4,006 kg

Tabla 16: Masas de las partes del sólido  
[Fuente: Elaboración propia]

La reducción de diámetro del disco de freno resulta en un cambio en el radio medio de presión de la pinza de freno, como se indica en la tabla 6, donde se reduce a 152.5 mm. Este cambio en el radio medio de presión implica un aumento en la presión requerida por las pinzas de freno, calculadas según la ecuación 11.2.

Para garantizar la integridad de la pieza y asegurar que no esté en peligro, se realiza nuevamente el cálculo de la presión de la pinza, junto al factor de seguridad, y el análisis de tensiones. Esto permite obtener información precisa sobre las tensiones generadas y asegurarse de que la pieza pueda soportar las nuevas condiciones de funcionamiento.

Donde:

$p_o$  es la nueva presión de pinzas necesaria ( $N/m^2$ )

(18)

$$p_o = \left( \frac{P_{fr} * 4}{\mu * \pi * (D_p)^2 * R_m * N} \right) * 1.5$$

$$p_o = \left( \frac{7293.365 * 4}{0.461 * \pi * (0.475)^2 * 0.153 * 2} \right) * 1.5$$

$$p_o = 437642.768 \frac{N}{m^2}$$

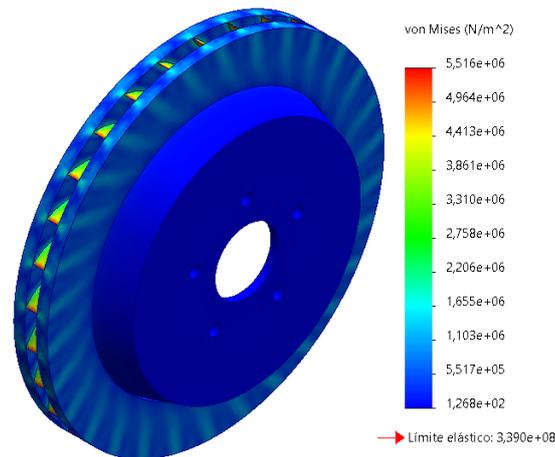


Figura 26: Tensiones resultantes presión de la pinza – diseño optimizado  
[Fuente: Elaboración propia]

Material	Límite Elástico (N/m <sup>2</sup> )	Tensión mínima (N/m <sup>2</sup> )	Tensión máxima (N/m <sup>2</sup> )
<b>ASTM A536</b>	$3.390 \times 10^8$	$1.268 \times 10^2$	$5.516 \times 10^6$

Tabla 17: Tensiones resultantes presión de la pinza - diseño optimizado  
[Fuente: Elaboración propia]

Al calcular la presión de nuevo y analizar las tensiones resultantes después de la reducción del diámetro del disco de freno, se ha comprobado que el aumento de tensiones no es significativo. Esto significa que la integridad de la pieza no se ve afectada por el cambio realizado. Se ha conseguido una reducción de la masa del disco de freno sin causar inconvenientes en su funcionamiento.

### 7.5. Alternativa de diseño

Si se buscara reducir aún más la masa total de los discos de freno sacrificando una parte del coste final, existe una alternativa a considerar en la selección de materiales. Esta opción implica crear un disco de freno de dos piezas en lugar de uno.

De esta manera, se pueden aprovechar las ventajas que ofrece la fundición de hierro dúctil o nodular, que se han mencionado anteriormente, para la parte exterior del disco de freno, junto con las ventajas de la aleación de aluminio para la parte de la brida, como su baja densidad, alta conductividad térmica y un mayor límite elástico el cual arroja mejores resultados en el estudio del par de frenado.

Una compañía pionera en este tipo de discos de freno es *Brembo*, que ofrece tres tipos diferentes de unión [14]. Estos son:

1. Discos flotantes: En este tipo, las dos piezas del disco se unen mediante casquillos de fijación que permiten cierto grado de movimiento entre ellas.
2. Discos remachados: En esta opción, las dos piezas se unen mediante remaches de acero que proporcionan una unión sólida y resistente.
3. Discos cofundidos: En este caso, las dos piezas se unen mediante el proceso de fundición, creando una unión integrada y robusta.



Figura 27: Ejemplos de discos de freno a dos piezas [14]

Los discos flotantes y los discos remachados son los que se utilizan comúnmente en vehículos de gama alta y deportivos, debido a su mayor potencia y exigencias de rendimiento.

En este caso, se ha decidido realizar un rediseño para un disco de freno remachado. Para ello se han rediseñado detalles de cada una de las partes y se ha seleccionados los remaches a utilizar.

#### 7.5.1. Disco exterior

El disco exterior ha sido modificado para agregar una zona adicional en el diámetro interior donde se asentará la brida como uno de los puntos de fijación, junto con los remaches. Esta nueva sección añadida tiene la mitad del grosor de cada lado, lo que equivale a 5.75 mm en este caso.

Además, se han agregado doce agujeros en el disco, los cuales coincidirán con los de la brida para fijar los remaches y así crear la unión entre ambas piezas. La elección de este número de agujeros se debe a que en los discos de freno de dos piezas, generalmente se utilizan diez o doce agujeros, siendo doce la opción más común [7]



Figura 28: Rediseño: disco exterior  
[Fuente: Elaboración propia]

### 7.5.2. Brida

En cuanto a la brida, se ha rediseñado creando los lados de la misma rectos para poder complementar mejor con el nuevo diseño del disco de freno y las sujeciones. Además, se han añadido doce agujeros, como se han añadido en el disco de freno, por donde se fijaran los remaches.

Además, se han redondeado las aristas superiores tanto en la parte exterior como en la interior del disco de freno. Esta modificación, que se ha realizado debido a que los lados son completamente verticales, tiene como objetivo reducir las concentraciones de tensiones y mejorar la resistencia general del componente.

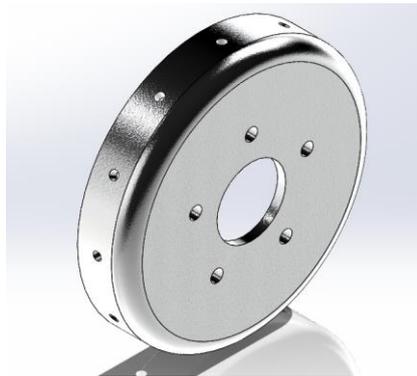


Figura 29: Rediseño: brida  
[Fuente: Elaboración propia]

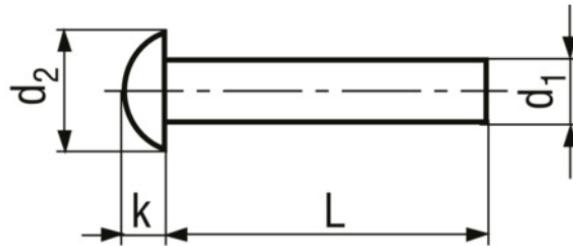
### 7.5.3. Remaches

Uno de los puntos más importantes en la nueva alternativa de diseño es la sujeción de ambas piezas y, con ello, los remaches a utilizar. Los remaches seleccionados son remaches de acero que cumplen con la norma DIN 660.



Figura 30: Remache  
[Fuente: Elaboración propia]

Estos tienen un diámetro de 8 mm y una longitud de 14 mm [15], lo cual es adecuado para el espesor total a remachar de la brida junto al espesor de la fijación del disco exterior siendo de 13.75 mm.



d1	Length (L)	d2	k
8	14	14	4,8

Figura 31: Dimensiones remache [15]

Tras implementar los nuevos rediseños e incorporar los remaches, se ha logrado una nueva reducción en la masa total. Los anteriores 12.413 kg se han reducido en 0.575 kg, alcanzando una masa actualizada de 11.838 kg. Aunque esta disminución pueda parecer insignificante a simple vista, en el contexto de los automóviles de alto rendimiento, cada componente se optimiza meticulosamente para minimizar su masa final. Este enfoque se debe a la importancia de la reducción de peso en la búsqueda de un desempeño óptimo junto a la máxima explotación de todas sus características.

Tratado como	Material	Masa
Disco exterior	ASTM A536	10.135 kg
Brida	Al <sub>10</sub> SiC	1.571 kg
Remaches	Acero inoxidable	0.132 kg (0.011 kg x12)

Tabla 18: Masas de las piezas de la alternativa de diseño  
[Fuente: Elaboración propia]

Un último punto a tener en cuenta cuando se unen dos o más metales diferentes es un proceso llamado corrosión galvánica. Este proceso aparece debido a la diferencia de potencial electroquímico de los metales involucrados. Al entrar en contacto, en presencia de alguna solución conductora, los electrones se desprenden del material menos noble, que realiza la función de ánodo (-), mientras que el material más noble los recibe, realizando la función de cátodo (+). Todo esto provoca la corrosión del material menos noble [16].



Figura 32. índice galvánico de los metales [16]

No obstante, la diferencia de potencial electroquímico es mayor cuanto más alejados estén entre ellos los metales y, como se puede observar en el índice, el hierro fundido y el aluminio no permanecen muy alejados el uno del otro.

Otro indicio de que no ocurre este suceso es que se observa que ya se comercializan discos de freno de estas características, utilizando hierro fundido para el disco exterior y aluminio para la brida [14], dando a entender que no existe ningún inconveniente para ello.

## 7.6. Cálculo esfuerzos cortantes

Teniendo en cuenta la alternativa de diseño después de haber sido optimizado, se va a realizar un estudio de los esfuerzos cortantes a los que estarán expuestos tanto los pernos que sujetan el disco de freno al buje, mediante tuercas, como los remaches que unen el disco exterior con la brida.

Los esfuerzos cortantes son fuerzas aplicadas de forma transversal que pueden generar cortes o deformaciones en los pernos o remaches, en este caso. Estas fuerzas se originan a causa del par de frenado generado por el disco de freno. Los pernos y los remaches, al actuar como elementos de sujeción y unión de ambas piezas, deben resistir y soportar estos esfuerzos. Es fundamental asegurarse de que los pernos sean lo suficientemente resistentes para soportar estos esfuerzos y garantizar la seguridad del sistema de frenado.

### 7.6.1. Pernos

En la siguiente imagen se representa la situación de estudio simplificada donde los bloques negros son fijos y representan el buje y la llanta, el gris representa el disco de freno y el cilindro representa el perno sujeto al buje:

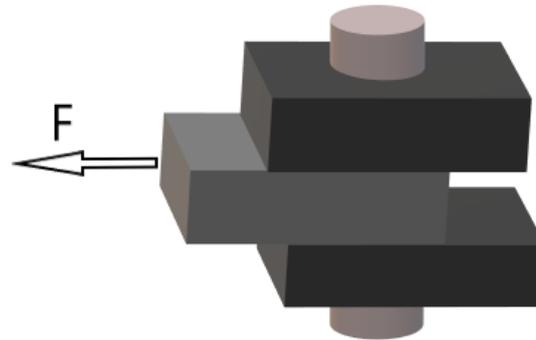


Figura 33: Simplificación esfuerzos cortantes en los pernos  
[Fuente: Elaboración propia]

Para determinar la fuerza que se aplicará sobre el perno, es necesario dividir el par de frenada entre los 5 pernos del buje y multiplicarlo por la distancia desde el punto de aplicación al centro del perno. Como se muestra en la tabla 6, el radio de aplicación del par de frenada es de 152.5 mm y la distancia entre pernos, anteriormente mencionada en el diseño de la pieza, es de 114.3 mm, lo que significa que la distancia desde el centro de la pieza al perno es de 57.15 mm.

La distancia desde el punto de aplicación al centro del perno se calcula restando la distancia desde el centro de la pieza al perno (57.15 mm) a la distancia de aplicación (152.5 mm). En este caso, la distancia resultante es de 147.35 mm. Seguidamente, se calcula la fuerza que se va a aplicar sobre el perno:

Donde:

$F_{tr-p}$  es la fuerza transversal al perno (N)

$d_1$  es la distancia entre el punto de aplicación y el perno = 0.147 m

(19)

$$F_{tr-p} = P_{fra} * d$$

$$F_{tr-p} = 11,671.752 * 0.147$$

$$F_{tr-p} = 1,715.748 \text{ N}$$

Una vez obtenida la fuerza transversal aplicada se realiza el cálculo del esfuerzo cortante sobre el perno mediante la siguiente fórmula [17]:

Donde:

$\tau_p$  es el esfuerzo cortante en el perno (Pa)

$A_{tr-p}$  es el área transversal del perno ( $m^2$ )

$n_p$  es el número de pernos = 5 u

(20.1)

$$\tau_p = \frac{F_{tr-p}}{A_{tr-p} * n_p}$$

El área para utilizar es la suma de ambas áreas que están bajo la exposición al cortante como se observa en la imagen:

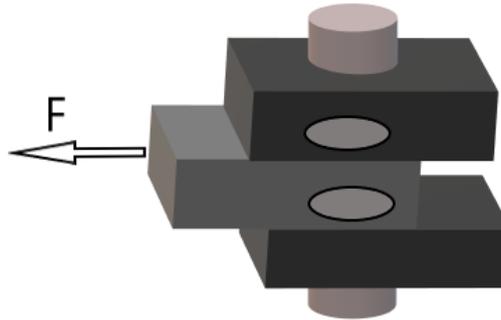


Figura 34: Áreas bajo cortante perno  
[Fuente: Elaboración propia]

Sabiendo que las dimensiones del perno son M12X1.25 se calcula el área mediante la ecuación del área de un círculo:

Donde:

$D_p$  es el diámetro del perno (m)

$$A_{tr-p} = \left( \frac{\pi * (D_p^2)}{4} \right) * 2 \quad (21)$$
$$A_{tr-p} = \left( \frac{\pi * (0.012^2)}{4} \right) * 2$$
$$A_{tr-p} = 2.262 * 10^{-4} m^2$$

De vuelta a la ec. 17, finalmente se calcula el esfuerzo cortante que soporta cada perno. Es importante tener en cuenta que el par de frenada se divide entre los 5 pernos.

$$\tau_p = \frac{F_{tr-p}}{A_{tr-p}} * \frac{1}{n_p} \quad (20.2)$$
$$\tau_p = \frac{1,715.748}{2.262 * 10^{-4}} * \frac{1}{5}$$
$$\tau_p = 1,517,018.568 Pa$$
$$\tau_p = 1.517 MPa$$

El esfuerzo cortante mencionado anteriormente es el que debe soportar cada uno de los cinco pernos que conectan el buje con el disco de freno. Generalmente, estos pernos se fabrican utilizando materiales como acero, bronce de silicio, latón o aluminio [18]. Materiales los cuales tienen límites elásticos significativamente más altos de lo requerido para esta aplicación.

### 7.6.2. Remaches

En la siguiente imagen se representa la segunda situación de estudio donde el cilindro de color gris representa el remache, el bloque negro el disco exterior de hierro fundido y, el blanco, la brida de aleación de aluminio. En el caso de la frenada el bloque que representa el disco exterior está fijo mientras que la brida sigue el movimiento del eje.

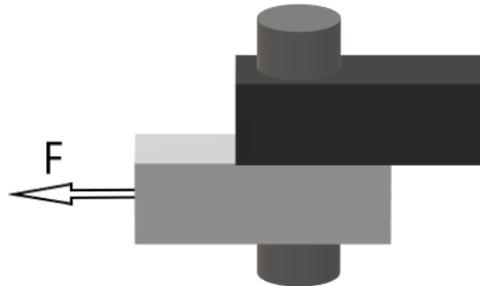


Figura 35. Simplificación esfuerzos cortantes en los remaches  
[Fuente: Elaboración propia]

Para determinar la fuerza que se aplicará sobre el remache se va a tomar como punto de aplicación de la fuerza el centro de este. Como se observa en el plano N°2, el diámetro exterior de la brida es de 243 mm, siendo el radio 121.5mm. Esta tiene un grosor de 8 mm por lo que el centro del remache se sitúa en un radio de 117.5 mm.

De nuevo, la distancia desde el punto de aplicación al centro del remache se calcula restando la distancia desde el centro de la pieza a este (117.5 mm) a la distancia de aplicación (152.5 mm). En este caso, la distancia resultante es de 35 mm. De nuevo, se calcula la fuerza que se va a aplicar, pero esta vez sobre el remache:

Donde:

$F_{tr-r}$  es la fuerza transversal al remache (N)

$d_2$  es la distancia entre el punto de aplicación y el perno = 0.035 m

(22)

$$F_{tr-r} = P_{fra} * d_2$$

$$F_{tr-r} = 11,671.752 * 0.035$$

$$F_{tr-r} = 408.511 \text{ N}$$

Una vez obtenida la fuerza transversal aplicada se realiza el cálculo del esfuerzo cortante sobre el remache mediante siguiente fórmula [17]:

Donde:

$\tau_r$  es el esfuerzo cortante en el remache (Pa)

$A_{tr-r}$  es el área transversal del remache ( $m^2$ )

$n_r$  es el número de remaches = 12 u

(23.1)

$$\tau_r = \frac{F_{tr-r}}{A_{tr-r} * n_r}$$

El área para utilizar es el área que está bajo la exposición al cortante como se observa en la imagen:

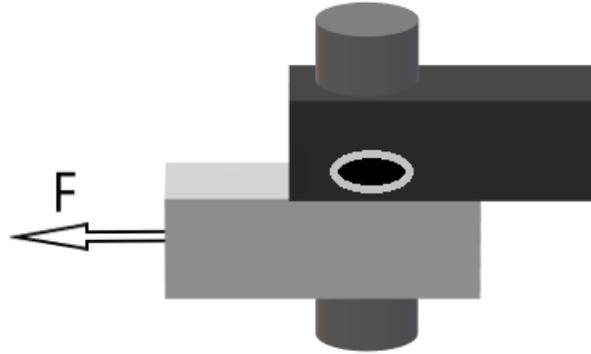


Figura 36: Área bajo cortante remache  
[Fuente: Elaboración propia]

Sabiendo que el diámetro del perno es de 8 mm, como se indica en la Figura 32, se calcula el área mediante la ecuación del área de un círculo:

Donde:

$D_r$  es el diámetro del remache (m)

(24)

$$A_{tr} = \left( \frac{\pi * (D_r^2)}{4} \right)$$

$$A_{tr} = \left( \frac{\pi * (0.008^2)}{4} \right)$$

$$A_{tr} = 5.027 * 10^{-5} m^2$$

De vuelta a la ec. 23, finalmente se calcula el esfuerzo cortante, esta vez, que debe soportar cada uno de los remaches.

(23.2)

$$\tau_r = \frac{F_{tr-r}}{A_{tr-r} * n_r}$$

$$\tau_r = \frac{408.511}{5.027 * 10^{-5}} * \frac{1}{12}$$

$$\tau_r = 677,194.8147 Pa$$

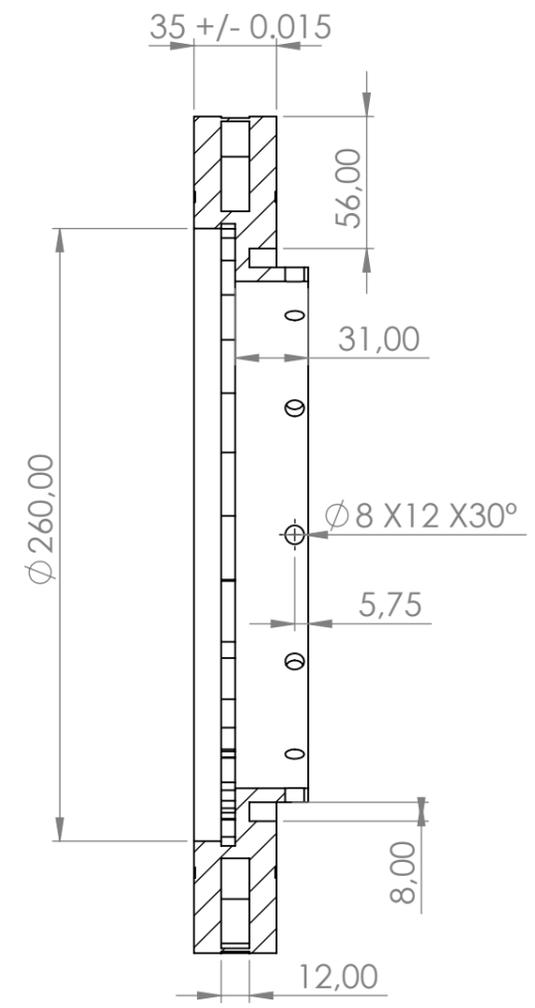
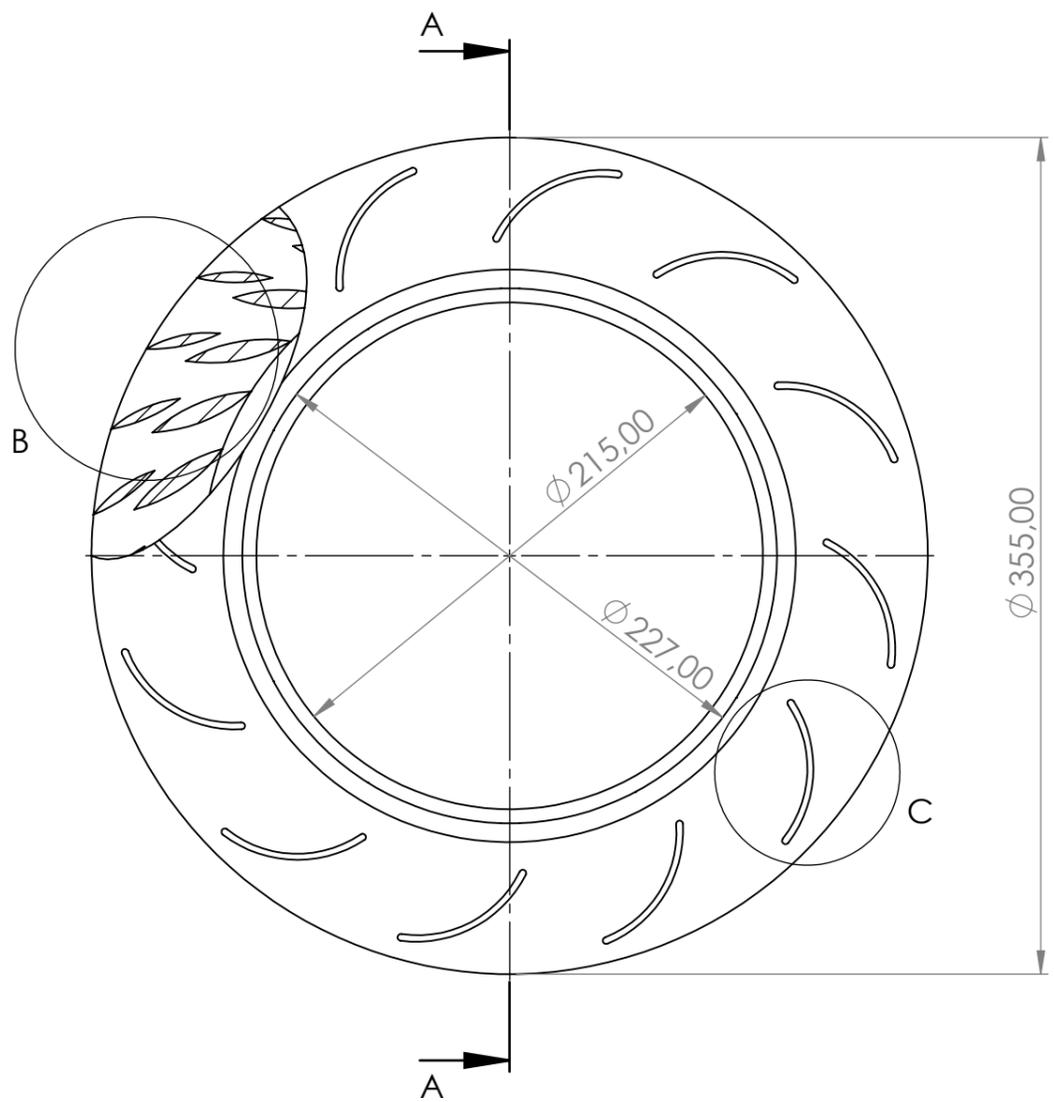
$$\tau_r = 0.677 MPa$$

Como se puede observar el esfuerzo cortante es mínimo para cada uno de los remaches y siendo mucho menor que el límite elástico de cualquier acero que se use como unión de ambas piezas.

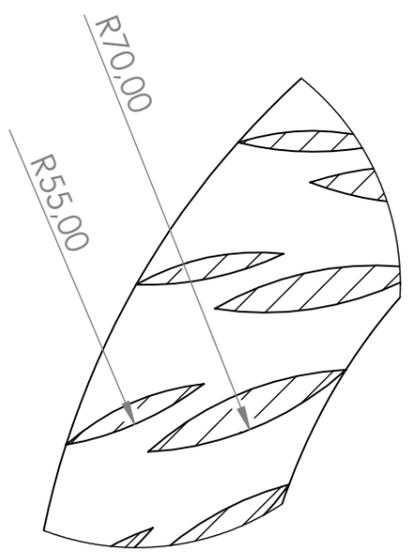
## 8. Planos

8 7 6 5 4 3 2 1

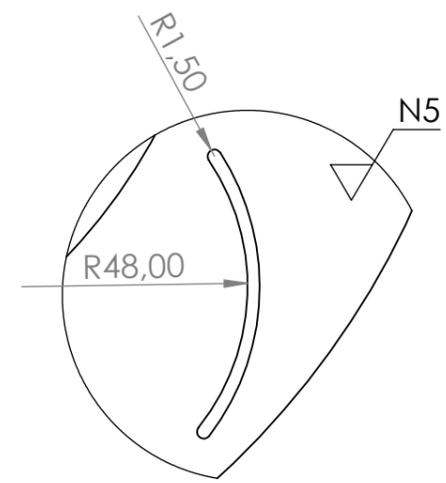
F  
E  
D  
C  
B  
A



SECCIÓN A-A  
ESCALA 1 : 3



DETALLE B  
ESCALA 2 : 3

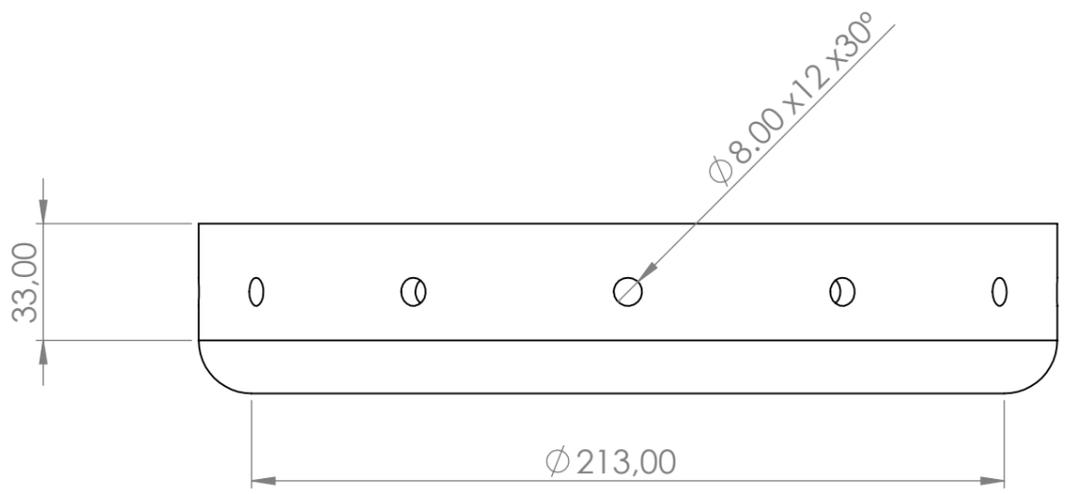
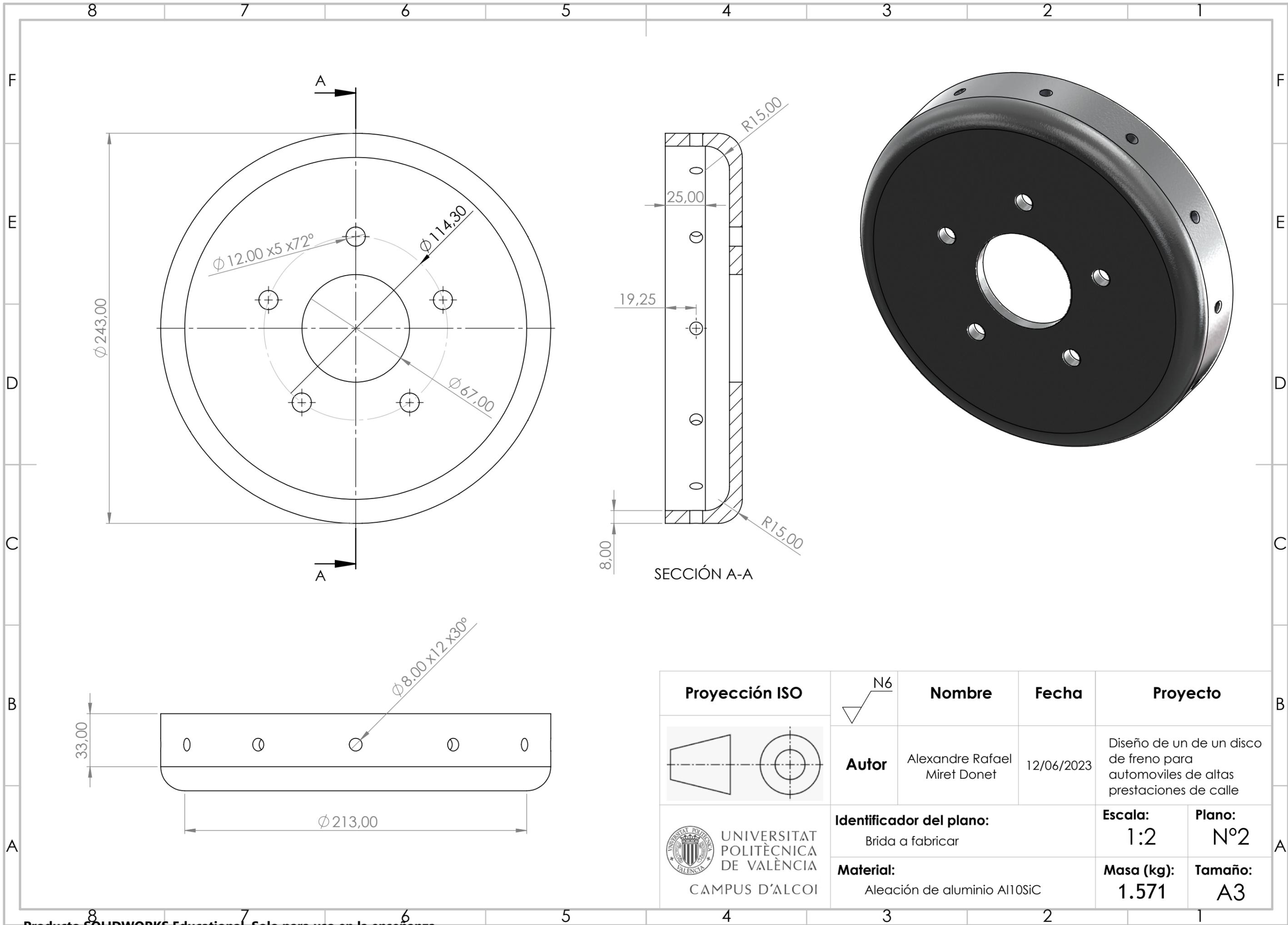


DETALLE C  
ESCALA 2 : 3

Proyección ISO	Nombre	Fecha	Proyecto	
	<b>Autor</b> Alexandre Rafael Miret Donet	12/06/2023	Diseño de un de un disco de freno para automoviles de altas prestaciones de calle	
			<b>Identificador del plano:</b> Disco exterior a fabricar	
<b>Material:</b> Fundición nodular ASTM A536			<b>Peso (kg):</b> 10.135	<b>Tamaño:</b> A3



8 7 6 5 4 3 2 1



Proyección ISO	N6	Nombre	Fecha	Proyecto
		<b>Autor</b> Alexandre Rafael Miret Donet	12/06/2023	Diseño de un de un disco de freno para automoviles de altas prestaciones de calle
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA CAMPUS D'ALCOI	<b>Identificador del plano:</b> Brida a fabricar		<b>Escala:</b> 1:2	<b>Plano:</b> Nº2
	<b>Material:</b> Aleación de aluminio Al10SiC		<b>Masa (kg):</b> 1.571	<b>Tamaño:</b> A3

4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

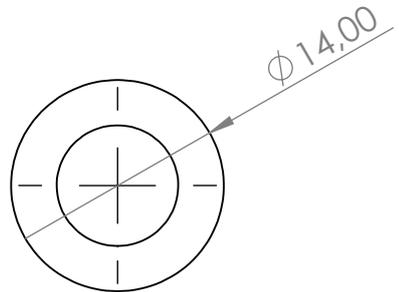
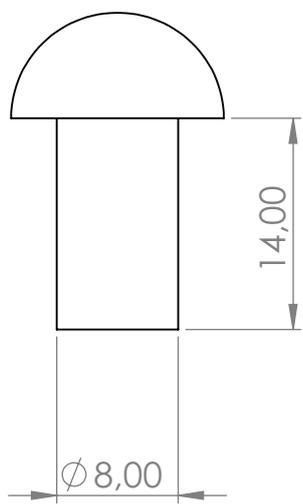
C

B

B

A

A

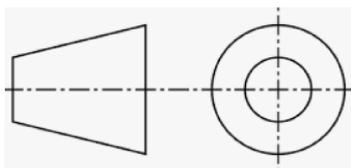


**Proyección ISO**

**Nombre**

**Fecha**

**Proyecto**



**Autor**

Alexandre Rafael Miret Donet

12/06/2023

Diseño de un de un disco de freno para automoviles de altas prestaciones de calle



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA  
CAMPUS D'ALCOI

**Identificador del plano:**

Remache de unión a utilizar

**Escala:**

2:1

**Plano:**

Nº3

**Material:**

Acero inoxidable

**Peso (kg):**

0.011

**Tamaño:**

A4

4 3 2 1

## 9. Selección de los procesos de fabricación

Uno de los aspectos clave en la fabricación de piezas es la selección óptima del proceso de fabricación a utilizar. Para facilitar esta selección y determinar las prioridades de producción, es importante considerar la cantidad de piezas que se fabricarán en un periodo de tiempo específico, como por ejemplo, un año.

Tomando como referencia a la compañía Brembo, se puede realizar una estimación de su producción anual. Según su página web oficial [19], Brembo fabrica alrededor de cincuenta millones de discos de freno al año. Dado que tienen treinta plantas de producción, podemos dividir esta producción entre ellas para utilizar la producción de una planta como referencia. Esto nos lleva a un objetivo anual aproximado de un millón setecientas mil piezas.

Una vez obtenido este dato se observa la necesidad de procesos de fabricación que permitan un volumen alto de producción junto a una posible gran cadencia.

### 9.1. Disco exterior

El disco exterior es fabricado mediante fundición en hierro dúctil o fundición nodular. Para la producción de estos discos, se consideran dos alternativas de procesos de fundición: el moldeo en arena y el moldeo permanente. A continuación, se detallan las características principales de cada proceso:

#### Proceso de fundición en molde de arena [20]

- Flexibilidad de diseño: Al hacer uso de moldes temporales, el molde de arena ofrece una mayor flexibilidad en el diseño ya que permite fáciles modificaciones en cualquier momento adaptándose a cualquier requisito específico.
- Costes de fabricación bajos: Generalmente los costes de fabricación en arena son bajos en comparación a otros métodos. Al utilizarse materiales como arena y aglutinantes son materiales usualmente más baratos. Por otro lado son moldes fáciles de reparar e incluso reemplazar.
- Altas cadencia de producción: Al tener como opción la posibilidad de reparar y utilizar varios moldes de arena simultáneamente se puede lograr una mayor cadencia de producción en comparación con el molde permanente. Sin embargo, hay que tener en cuenta el tiempo de enfriamiento de las piezas en estos moldes como un aspecto negativo.
- Calidad de las piezas aceptable: Se obtiene una buena calidad, no obstante, pueden aparecer ciertas variaciones por el propio molde. Aun así, la reproducción de los detalles es buena con un acabado superficial aceptable para este tipo de piezas.

#### Proceso de fundición en moldes permanentes [21]

- Precisión dimensional: Estos moldes permiten una mayor precisión dimensional en comparación con los moldes de arena.
- Moldes resistentes y duraderos: La vida de los moldes es relativamente larga al fabricarse con materiales altamente resistentes al calor y al desgaste permitiendo utilizarse en una amplia cantidad de ciclos de fundición.
- Mejor calidad de la pieza: En comparación con los moldes de arena se obtiene una calidad final mayor en las piezas fundidas

- Flexibilidad de diseño limitada: En comparación con los moldes de arena, los moldes permanentes tienen una menor flexibilidad en cuanto a modificaciones del diseño dado el costo y el tiempo de producción del nuevo molde que eso implicaría.

En comparación entre ambos procesos de fabricación, el proceso ideal sería la fundición mediante molde de arena. Este proceso ofrece ventajas significativas en términos de costos de fabricación. Esto se debe a que, el uso de moldes permanentes resultaría costoso por los materiales necesarios para su creación, ya que deben resistir altas temperaturas durante períodos prolongados debido al punto de fusión elevado del hierro fundido. La fundición en moldes de arena permite una alta cadencia y volumen de producción al poder utilizar otros moldes mientras las piezas fabricadas se enfrían. Además, ofrece flexibilidad para solucionar problemas o hacer modificaciones en el molde o el diseño durante el proceso.

Por último, aunque la calidad superficial puede ser inferior en comparación con el molde permanente, no es el factor más relevante, ya que se puede realizar un mecanizado postprocesado para controlar las tolerancias permitidas. Por lo tanto, el acabado final de la pieza no se ve comprometido.

## 9.2. Brida

Para la fabricación de la brida del disco de freno en una aleación de aluminio, existen diferentes posible procesos como la fundición o procesos de conformado de metales como la forja. Sin embargo, se valora mantener el proceso de fundición de arena para este caso también por varias razones.

En primer lugar y más importante, es posible aprovechar la misma infraestructura ya planteada para la anterior pieza, lo que implica un coste significativamente más bajo en la inversión inicial. No se requerrían de una nueva línea de producción ni de la adquisición de equipos específicos para el conformado de metales.

Por otro lado, la fundición en molde de arena permite una gran flexibilidad en el diseño y la posibilidad de realizar modificaciones rápidas y económicas del molde como se ha comentado anteriormente. Además, otro punto anteriormente destacado es la facilidad y menor coste de la reparación o, incluso sustitución, de los propios moldes en caso de cualquier imprevisto en la producción

Por último, el proceso de fundición de arena suele ser más rápido y permite un mayor volumen de producción en comparación con el conformado de metales. Esto se debe a la posibilidad de utilizar múltiples moldes simultáneamente.

Por lo tanto, mantener el proceso de fundición en molde de arena para la fabricación de la brida del disco de freno de aluminio permite aprovechar la infraestructura anteriormente planteada, una mayor flexibilidad de diseño, permite modificaciones rápidas y económicas, y ofrece una mayor velocidad y capacidad de producción en comparación con la forja

### 9.3. Fundición en molde de arena [20]

La fundición, también conocida como metalurgia, es un proceso que consiste en calentar un mineral con el objetivo de obtener el material puro utilizando un agente reductor el cual, usualmente, es una fuente de carbono. Este agente reductor, al calentarse y combinarse junto al mineral reacciona con los componentes no deseados presentes en él. Durante la reacción, el carbono se oxida generando dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) en forma de gas, mientras reduce los componentes no deseados, como el oxígeno, dejando así el material deseado. Al finalizar este proceso se puede utilizar el material obtenido para la creación de aleaciones o fabricación de piezas.

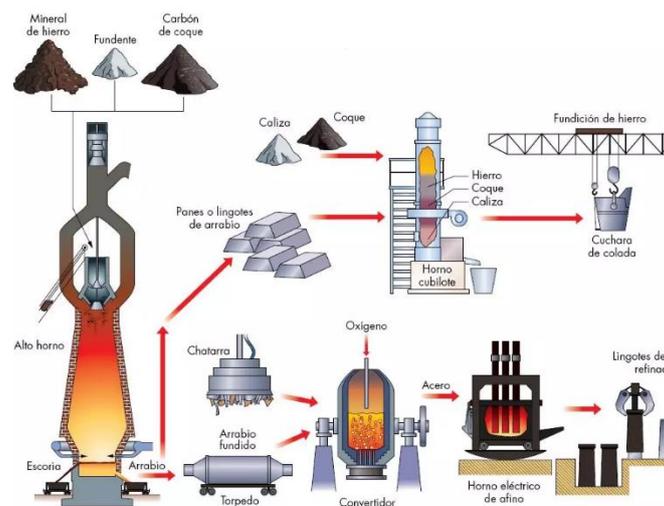


Figura 37: Esquema del funcionamiento de la metalurgia  
[Fuente: Google Imágenes]

En este caso el material o la aleación utilizada para la fabricación de ambas piezas se adquieren para directamente fundirse y verterlo al molde. Estos materiales se pueden obtener en diferentes formas, desde lingotes o barras hasta incluso virutas o polvo, dependiendo del tipo de material.

Una vez obtenido el material, este se calienta, se vierte en los moldes de arena donde se solidifica y al enfriarse se destruye el molde para extraer la pieza. En fundiciones como el hierro, además del molde de arena, la caja es cubierta con una chapa gruesa para prevenir la "flotación del molde" donde la presión del metal empuja por encima de la cavidad dañando así el molde y el resultado final.

En cuanto a el tipo de molde de arena que se va a utilizar para el proceso, se ha seleccionado el molde de arena de resina ya que consigue menos piezas defectuosas al conseguir un acabado más preciso, sólido y suave. Es un tipo de molde especialmente adecuado para piezas que requieran alta calidad y resistencia. Aunque el costo es mayor y la velocidad de producción es más lenta, ofrece una mayor confiabilidad y rendimiento a las piezas finales.

En la construcción del molde de arena se utiliza un modelo replicado de la pieza a construir fabricados en madera o metal dependiendo de los requisitos o características de la fundición. Este modelo se utiliza como patrón para crear la cavidad en el molde donde se vierte el metal fundido.

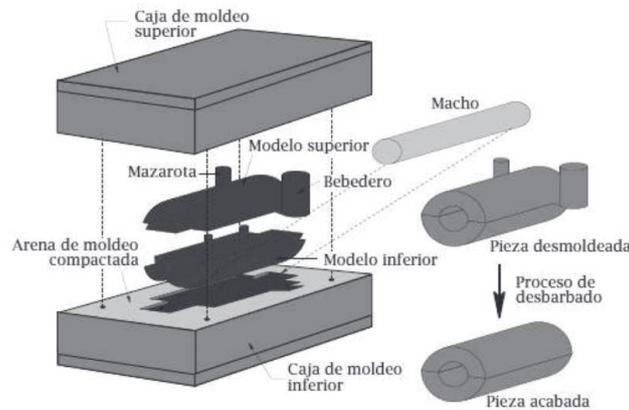


Figura 38: Creación del molde de arena [22]

Para realizar cavidades internas se utilizan machos en los moldes (Figura 41). Estos deben soportar condiciones más extremas que el resto del molde al estar rodeados del metal fundido. Una vez solidificada la pieza el macho se retira cuidadosamente de la cavidad o en algunos casos su rotura si es necesario.

Una vez obtenido el molde se debe verter el metal en el molde. Se puede realizar o de manera directa o utilizando un sistema de distribución llamado bebedero.

- Llenado directo: Es la forma más simple vertiendo el metal fundido sin ningún sistema de distribución. Se suele usar en moldes pequeños, aunque también en moldes con alta resistencia al impacto dado que el metal impacta de manera constante en la parte inferior del molde. Este método no permite buenas tolerancias ni una gran calidad en la pieza y se evitan metales susceptibles a la oxidación dado que se observan fenómenos como el atrapamiento del aire que facilita este proceso.

- Llenado mediante bebedero: Este sistema utiliza una estructura llamada bebedero la cual se encarga de facilitar la distribución del metal fundido dentro del molde. Sus dimensiones se calculan dependiendo de los materiales a utilizar. Estas son las partes que lo forman:

- Taza de colada: Cavidad situada en la parte superior que facilita la acción de verter el líquido minimizando las turbulencias en la entrada del bebedero.
- Bebedero: Canal vertical con forma cónica que conecta el tazo con el pozo de colada
- Pozo de colada: Forma cilíndrica encargada de reducir la velocidad del material antes de su entrada al canal de colada. Además, asegura una transición suave al canal de colada permitiendo que este siempre esté lleno sin turbulencias durante el proceso.
- Canal de colada: Canal horizontal que transporta el metal líquido hasta la entrada al molde.

El bebedero puede tener más de una puerta de entrada a la pieza dependiendo de las dimensiones de la misma, en moldes de gran volumen se recomienda el uso de varias puertas para que el llenado se realice de forma homogénea.

Dentro de la posibilidad del llenado mediante el uso del bebedero se pueden realizar de tres maneras:

- Llenado superior: En este método el canal, y con ello la puerta de entrada, se disponen en la parte superior del molde. Esto sería un método muy parecido al llenado directo donde se utiliza la gravedad para facilitar la fluidez del metal pero con el control de llenado que aporta el bebedero.

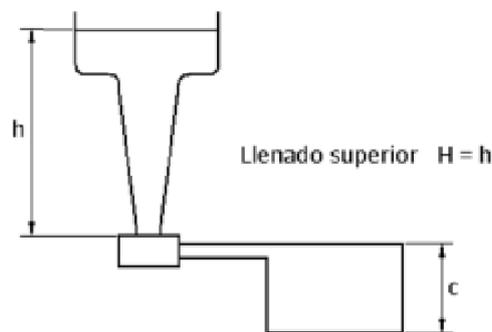


Figura 39: Esquema del método de llenado superior [23]

- Llenado por la línea de partición del molde: Este método es un método muy parecido al llenado superior pero que se suele utilizar cuando la geometría o disposición de la pieza no permite el uso del anterior método.

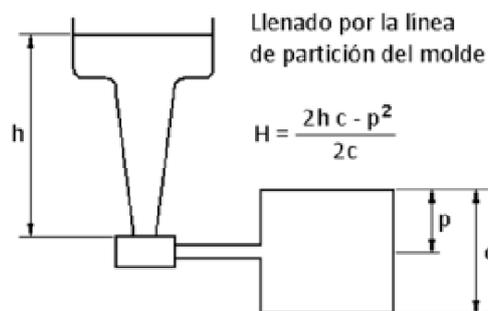


Figura 40: Esquema del método de llenado por la línea de partición [23]

- Llenado inferior: Para evitar el impacto del metal contra la pared del molde y evitar el fenómeno de atrapamiento de aire se realiza el llenado desde la parte inferior. En este caso, se utilizan mazarotas situadas en los laterales en vez de la parte superior del molde para asegurar que sean capaces de evitar la aparición de rechupes.

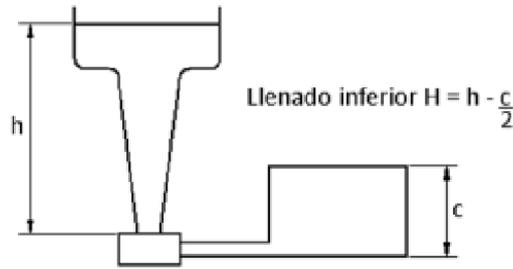


Figura 41: Esquema del método de llenado inferior [23]

Donde la  $H$  se refiere al salto efectivo, el cual es la diferente de altura entre el nivel del metal líquido en el canal de colada y la entrada del metal al molde. El salto efectivo es un factor importante a considerar ya que afecta al flujo y la distribución del metal líquido en el molde. Este asegura un llenado uniforme y completo evitando inconvenientes como la porosidad o contracciones desfavorables

Además del sistema de distribución existen dos componentes principales más para el molde de fundición:

- Respiradero: Es un orificio delgado hecho con una aguja con el objetivo de facilitar la salida al aire de dentro del molde y a los gases que se forman al entrar el metal.
- Mazarota: Es una extensión de la pieza en forma de cono o cilindro que se conecta al sistema de alimentación. Esto permite una alimentación suplementaria para evitar defectos por falta de material al solidificarse y contraerse. Además, mejora el flujo del metal y un mayor control de la solidificación.

La ubicación de estos tres componentes debe seleccionarse con rigurosidad ya que una mala ubicación de los mismos podría repercutir de manera negativa en el resultado final de la pieza.

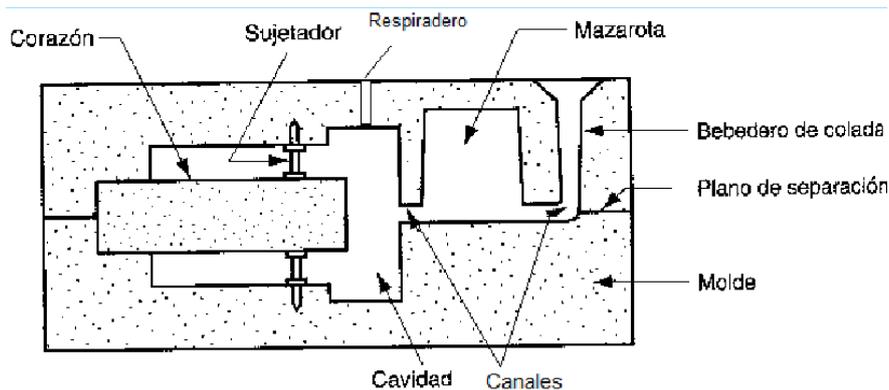


Figura 42: Esquema fundición en molde de arena [22]

### 9.3. Post procesado

#### 9.3.1. Fresado [24]

El fresado es un proceso de mecanizado en el que se arrancan virutas de un material utilizando una herramienta en forma circular con múltiples filos la cual se denomina fresa. Este es un proceso de mecanizado para piezas sin simetría de revolución. El movimiento principal de corte se realiza al girar sobre su propio eje. Usualmente los movimientos y profundidad necesarios para el corte los realiza la pieza que se mecaniza utilizando tres grados de libertad.

Dentro del fresado se pueden clasificar dos tipos dependiendo del eje de la fresa respecto a la pieza:

- Fresado cilíndrico: donde el eje de la fresa es paralelo a la superficie de trabajo de la pieza.
- Fresado frontal: donde el eje de la fresa es perpendicular a la superficie de frenado.

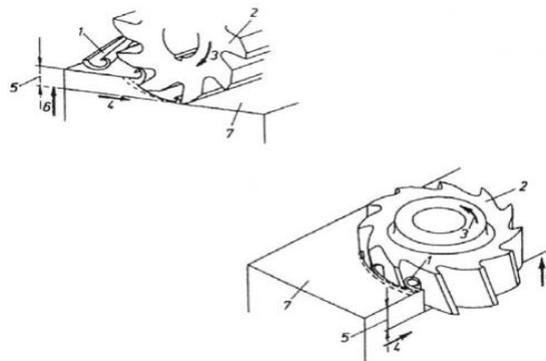


Figura 43: Esquema de ambos fresados dependiendo de la posición del eje [25]

Además, se puede diferenciar en dos tipos de fresado dependiendo del giro de la fresa.

- Fresado en oposición: el giro de la fresa es contrario al sentido de avance.
- Fresado en concordancia: el giro de la fresa es en el mismo sentido que el avance.

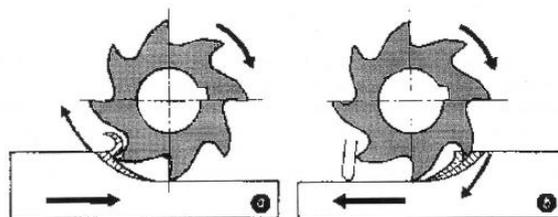


Figura 44: Esquema del fresado en oposición y en concordancia [25]

Las herramientas llamadas fresas de plaquitas intercambiables se dividen en dos partes: el cuerpo de la fresa, que es la parte principal de la herramienta y proporciona la estructura y resistencia necesarias y las plaquitas que son las encargadas del arranque del material. Generalmente, el cuerpo de la fresa es cilíndrico y permite el montaje en el husillo de la fresadora. Si se utiliza con un portaherramientas, puede tener un vástago para su sujeción.

Por otro lado, están las plaquitas de corte, piezas intercambiables ubicadas en el cuerpo de la fresa, fabricadas con material de corte duro como el carburo de tungsteno o cerámica. Estas tienen filos de corte afilados y se encargan del arranque de las virutas del material. La geometría de estas plaquitas varía según la aplicación y el tipo de fresado, y sus filos pueden ser helicoidales, rectos e incluso dentados. Cada plaquita tiene uno o varios filos de corte, lo que permite utilizar la misma plaquita cambiando simplemente su posición. Además, cuando estos filos se desgastan, se pueden reemplazar las plaquitas individualmente sin necesidad de cambiar toda la herramienta.

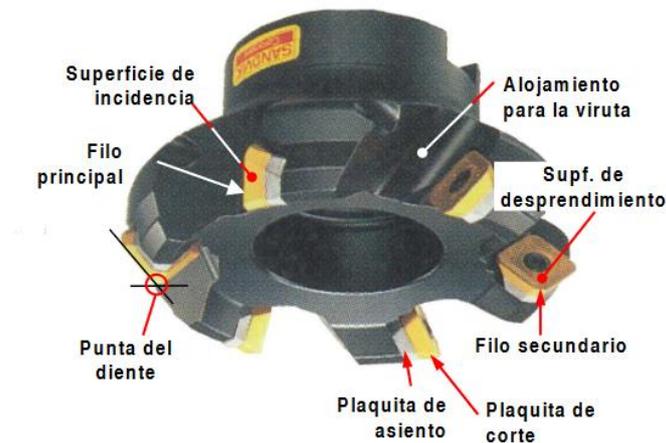


Figura 45: Partes de la fresa de plaquitas intercambiables [24]

Por contraparte, existen también herramientas con filo propio, que no utilizan plaquitas intercambiables, llamadas fresas de carburo sólido. Estas herramientas están fabricadas de una sola pieza con el mismo material mencionado anteriormente para las plaquitas, es decir, el carburo de tungsteno. En este caso, el filo de corte está integrado en el cuerpo de la herramienta, por lo tanto, cuando el filo se desgasta, se debe reemplazar toda la herramienta.

Al igual que las plaquitas, la geometría de las fresas de carburo sólido puede variar dependiendo de la situación que se requiera. Estas herramientas, a diferencia de las fresas con plaquitas intercambiables, se suelen utilizar en situaciones de mayor exigencia, como el fresado de materiales duros o abrasivos, el fresado donde se generen altas temperaturas o el fresado de alta velocidad.



Figura 46: Ejemplo de diferentes fresas de carburo sólido  
[Fuente: Google Imágenes]

Además, el fresado permite la finalización del post procesado con un acabado superficial de diferentes rugosidades, normalmente desde los 0.0032 mm hasta, incluso, los 0.0004 mm. Los acabados con menor rugosidad solo se realizan cuando son necesarios ya que esto afecta al rendimiento y durabilidad de las piezas.[26]

### 9.3.2. Taladrado [27]

El taladrado es un proceso de mecanizado ampliamente utilizado en la industria para crear agujeros circulares utilizando una herramienta llamada broca. Durante este proceso, la broca gira sobre su eje para eliminar material y formar el agujero. El taladrado es versátil y puede utilizarse en una amplia gama de metales.

Este proceso implica dos movimientos principales: el movimiento de corte y el movimiento de avance. El movimiento de corte es el giro de la broca, que se encarga de eliminar el material para formar el agujero. El movimiento de avance, paralelo al eje de la broca, determina la velocidad a la cual la broca penetra en el material. Es crucial seleccionar la velocidad adecuada de avance según el tipo de material para lograr un taladrado óptimo.

La broca es la herramienta principal utilizada en el proceso de taladrado. Está compuesta por dos partes: un mango que se fija a la máquina o al portaherramientas, y una parte cortante que consiste en un cuerpo cilíndrico con bordes cortantes, ya sean helicoidales o rectos. Estos bordes cortantes no solo arrancan el material, sino que también sirven como conducto de evacuación de virutas y pueden usarse para aplicar fluidos de corte, como lubricantes, que reducen la temperatura de trabajo y facilitan el proceso de corte.

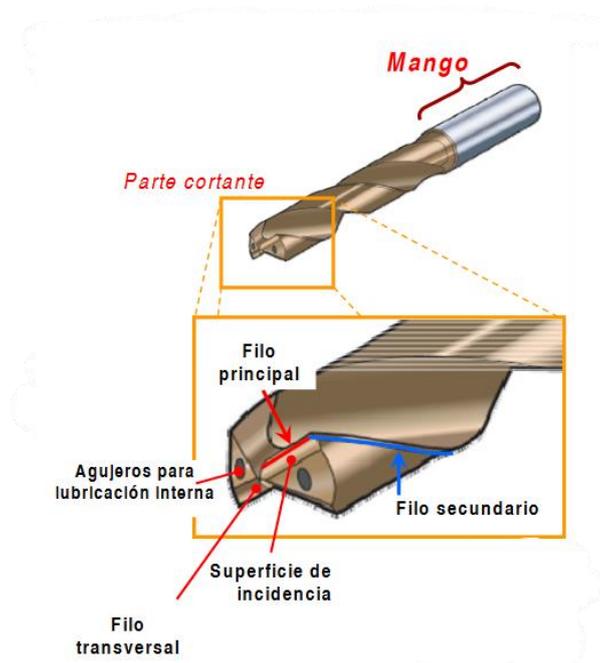


Figura 47. Partes de una broca [27]

En la broca, se pueden identificar cinco elementos importantes:

- Filo principal: Es la parte afilada y cortante del diente de la broca que tiene un contacto directo con el material y realiza el corte principal.
- Filo secundario: Algunos dientes tienen un filo secundario que reduce la fricción y mejora la calidad del corte al aliviar la presión ejercida en el filo principal.

- Superficie de incidencia: Es la parte del diente que recibe la fuerza de corte y la transfiere al filo principal.
- Superficie de desprendimiento: Es la parte del diente ubicada detrás del filo principal y se encarga de evacuar las virutas generadas durante el corte. Esta superficie evita obstrucciones y mantiene la eficiencia del corte, protegiendo el material de ralladuras.
- Filo transversal: Algunos dientes pueden tener un filo transversal adicional que se extiende lateralmente desde el filo principal, mejorando la capacidad de corte en diferentes direcciones.

Además, en esta herramienta se definen tres ángulos que dependen del material y del tipo de taladrado:

- Ángulo de posición de filo principal: Es la inclinación del filo principal de la herramienta con respecto a la dirección de corte. Este ángulo determina la capacidad de penetración en el material. Un ángulo más agudo reduce la fricción y facilita el corte, pero un ángulo excesivamente agudo puede debilitar el filo y causar desgaste o astillado.
- Ángulo de desprendimiento: Es la inclinación de la superficie de desprendimiento respecto a la dirección de corte. Un ángulo de desprendimiento adecuado evita la acumulación de material y obstrucciones en la herramienta. Un ángulo pequeño puede dificultar la evacuación de las virutas, mientras que un ángulo excesivamente grande puede debilitar el filo y reducir su eficiencia.
- Ángulo de incidencia: Es la inclinación de la superficie de incidencia del diente respecto a la dirección de corte. Un ángulo de incidencia adecuado permite una mejor transmisión de la fuerza al filo principal y evita deformaciones o roturas. Se debe seleccionar cuidadosamente para evitar vibraciones, desgaste prematuro y una mala calidad de corte.

#### Disco exterior:

Para el disco exterior es necesario dos acciones de post procesado una vez retirada la pieza del molde de arena: La realización de los agujeros de 8 mm de diametro que se utilizarán en la union de ambas piezas mediante el remachado. Además del acabado de las caras en contacto con las pastillas de freno con una tolerancia de grosor total entre los 0.012 a los 0.015 mm [28].

#### Brida:

Respecto a la brida deben realizarse los mismos agujeros de 8mm de diametro que se utilizaran en la unión mediante remaches junto con los agujeros de 12 mm de diametro para la colocación de los pernos y un agujero en el centro de 67 mm de diametro para el buje. Además se realiza el mecanizado del interior y del exterior para mejorar la estetica de la pieza a la vez que obtener el radio interior y exterior de 15 mm en las esquinas.

#### 9.4. Remachado [29]

El remachado es un proceso utilizado para unir de manera rígida o móvil piezas de diferentes materiales mediante deformación. Para ello se emplean remaches como elementos de fijación permanente. Estos, son de un metal dúctil el cual se insertan en los agujeros previamente taladrados uniendo así dos piezas de manera muy simple segura y de bajo costo.

El proceso de remachado se lleva a cabo después de realizar un proceso de taladrado, donde el remache se inserta en el agujero ajustando las piezas entre sí y se deforma la cabeza.

Por ello, existen diferentes tipos de remaches los cuales dependen de en qué industria se utilizan:

- Remache estándar: son los más comunes utilizados en aluminio, acero y cobre.
- Remache flor: estos son perfectos para materiales blandos como plástico o madera. Su función es distribuir la carga y fuerza de apriete reduciendo la probabilidad de rotura.
- Remache paraguas: son remaches capaces de adaptarse a las variaciones de espesor de los materiales.
- Remaches de golpe: son solo de una pieza y se colocan mediante los golpes de un martillo.
- Remaches ciegos: estos se deben colocar mediante maquinarias ya que solo se tiene acceso por un lado de la pieza por falta de posibilidad de acceder al otro.
- Remaches semi-tubulares: se suelen utilizar en aplicaciones de alta resistencia

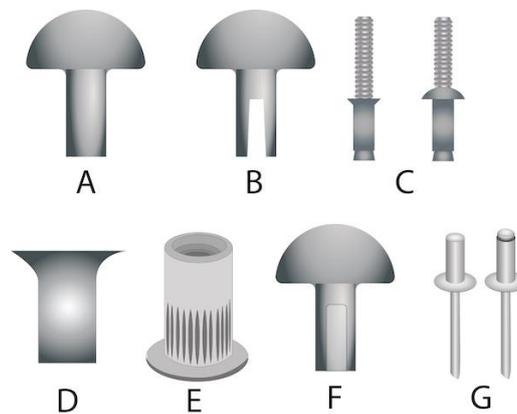


Figura 48. Variedad de tipos de remaches  
[Fuente: Google Imágenes]

El remachado puede realizarse en frío o en caliente. Primero se realiza un mecanizado de taladrado a las piezas a unir, seguidamente se debe limpiar la superficie de impureza para poder insertar el remache y conformar el remache utilizando una herramienta especializada o en una máquina automática como se puede observar más hoy en día en la industria.



Figura 49. Máquina remachadora automática radial  
[Fuente: Google Imágenes]

## 10. Pliego de condiciones

### 10.1. Disco de freno

- El disco de freno debe cumplir la normativa europea ECE R90, la cual establece los requisitos de diseño, fabricación y rendimiento.
- El material utilizado en el disco de freno debe ser confiable y duradero.
- El disco de freno debe estar adecuadamente balanceado para garantizar un rendimiento óptimo y evitar vibraciones durante el frenado.
- Se debe proporcionar documentación que certifique la calidad del material, el balanceo y otros aspectos relevantes.
- Se deben realizar diversas pruebas de calidad y ensayos establecidos en la normativa ECE R90, como pruebas de resistencia, durabilidad, vibración, sobrecalentamiento y velocidades sensibles.
- Se debe entregar una memoria constructiva que contenga toda la información relevante sobre el proceso de fabricación.
- El fabricante debe ofrecer una garantía que cubra los defectos de fabricación y asegure el buen desempeño del disco durante un período determinado.
- En el proceso de fabricación se deben implementar medidas de protección y sistemas de seguridad.

### 10.2. Proceso de fabricación en molde de arena

- Los materiales utilizados en la fundición deben cumplir con las normas europeas EN12513, EN13835 y EN ISO 4957.
- El molde debe estar fabricado con arena de resina de alta calidad.
- El modelo utilizado para crear la cavidad debe ser preciso y representar fielmente la pieza a fabricar.

- Se deben utilizar cajas de moldeo adecuadas, como cajas de madera o acero.
- El metal debe solidificarse por completo antes de romper el molde, después de ser fundido y vertido en los moldes.
- Las piezas fabricadas mediante este método deben pasar por un proceso de post procesamiento para eliminar la arena adherida y mejorar la superficie.

## 10.2. Proceso de mecanizado: Fresado y taladrado

- La fresadora y el taladro deben ser adecuados para el material y las dimensiones de la pieza a mecanizar.
- Se deben utilizar herramientas de corte con filos adecuados para cada material y las características de la pieza.
- Ambos procesos deben combinar el giro de la herramienta con el desplazamiento para lograr un corte óptimo.
- Si se utiliza control numérico, se debe revisar y programar correctamente para garantizar la precisión y calidad del mecanizado.
- Se debe realizar un mantenimiento continuo de ambas máquinas.

## 10.3. Proceso de remachado

- Se deben utilizar remaches que cumplan con la norma BN988.
- Los remaches utilizados deben ser de alta calidad y adecuados para el material y las dimensiones de las piezas a unir.
- Se debe utilizar una herramienta de remachado adecuada para deformar el extremo del remache y crear una unión permanente.
- El proceso debe garantizar que los remaches se instalen correctamente, creando una unión resistente.
- Se deben realizar pruebas de las propiedades mecánicas una vez que ambas piezas estén unidas.

# 11. Presupuesto

## 11.1. Coste del material

Para la elaboración del presupuesto se considerarán los costos de los materiales, la fundición en molde de arena y el mecanizado. A continuación, se presenta el presupuesto para la producción anual de 1,700,000 unidades de discos de freno. Dado que la mayoría de los datos de costos están en USD, se realizará la conversión a EUR considerando que 1 USD equivale a 0.92 EUR.

### 11.1.1. Disco exterior:

El disco exterior tiene una masa de 10.135 kg de acuerdo con la tabla 18 por lo que, primero se calcula el coste por unidad y seguidamente el coste total de piezas, siendo el precio del ASTM A536 de 0.67 USD/kg [11] o 0.62 EUR/kg:

Coste por unidad:  $10.135 \text{ kg} * 0.62 \text{ EUR/kg} = 6.28 \text{ EUR}$

Coste total: :  $6.28 \text{ EUR} * 1,700,000 = 10,676,000 \text{ EUR}$

#### 11.1.2. Brida:

La brida tiene una masa de 1.571 kg de acuerdo con la tabla 18 por lo que, de nuevo, se calcula el costo por unidad y seguidamente para el total de piezas, siendo el precio del  $\text{Al}_{10}\text{SiC}$  de 8.29 USD/kg [11] o 7.63 EUR/kg:

Coste por unidad:  $1.571 \text{ kg} * 7.63 \text{ EUR/kg} = 11.99 \text{ EUR}$

Coste total:  $11.99 \text{ EUR} * 1,700,000 = 20,383,000 \text{ EUR}$

#### 11.1.3. Remaches:

En la página web de los remaches seleccionados anteriormente para unir ambas piezas el precio de cada 100 remaches a partir de los 10,000 es de 20.76 EUR/100u [15]. Por lo tanto sabiendo que por cada disco de freno hay 12 remaches:

Remaches totales:  $1,700,000 * 12 = 20,400,000 \text{ u}$

Coste total:  $(20,400,000/100) * 20.76 = 4,235,040 \text{ EUR}$

Por lo tanto, el coste total solo del material para el disco de freno completo es de:  $20,383,000 \text{ EUR} + 10,676,000 \text{ EUR} + 4,235,040 \text{ EUR} = \mathbf{35,249,040 \text{ EUR}}$

### 11.2. Fabricación

Una vez obtenido el costo del material, se realiza una búsqueda de los costos de la fundición en molde de arena aunque, finalmente, solo se ha podido obtener el presupuesto para la fundición dúctil. Dado que el proceso de fundición de aluminio suele ser más económico debido a su menor punto de fusión y densidad, se utilizará el mismo presupuesto que para la fundición de hierro. Esto asegura que esta parte del presupuesto se asemeje lo más posible a la realidad y permitirá utilizar el sobrecoste para cualquier tipo de posibles inconvenientes relacionados con defectos en el proceso de fabricación, problemas de diseño, la reparación o sustitución de moldes o maquinaria etc.

El presupuesto de la fundición de hierro incluye desde la fundición sin mecanizar hasta opciones de mecanizado simple e incluso de alta precisión. Además del anterior presupuesto, se ha obtenido el presupuesto solo de mecanizado por parte de otra organización como es la universidad de zaragoza [30]. Es por ello que se procede a realizar una comparación entre el precio de utilizar la misma empresa tanto para la fundición como el mecanizado y, por contraparte, la opción de realizar la fundición con una empresa y el mecanizado con otra.

#### 11.2.1. Fundición y mecanizado en la misma empresa:

##### 11.2.1.1. Disco exterior:

Para el disco exterior, se utiliza la fundición en molde de resina de arena con un acabado de alta precisión, con un precio de 2.35 EUR/kg [31].

Coste de fabricación del disco exterior:  $1,700,000 * 2.35 \text{ EUR} = 3,995,000 \text{ EUR}$

##### 11.2.1.2. Brida:

Para la brida, dado que no requiere tanta precisión en el acabado y el mecanizado en general, se utilizará la fundición en molde de resina de arena seguida de un mecanizado simple, con un precio de 1.76 EUR/kg [31].

Coste de fabricación de la brida:  $1,700,000 * 1.76 \text{ EUR} = 2,992,000 \text{ EUR}$

Por lo tanto el coste de fabricación de ambas piezas para la opción 1 es de:  $3,995,000 \text{ EUR} + 2,992,000 \text{ EUR} = \mathbf{6,987,000 \text{ EUR}}$

11.2.2. Fundición y mecanizado por diferentes empresas:

En este punto, se tomará en cuenta que en España en 2023 habrá 2018 días laborables [32], asumiendo que la fábrica trabaja en tres turnos partidos durante las 24 horas del día y produce las 1700000 unidades en ese período. Se considera el costo del post procesado, en 53.08 EUR/h [30] tanto para la fresadora CNC como para el taladrado, multiplicado por dos debido a las dos cadenas de producción, una para el disco exterior y otra para la brida. Con un coste de solo fundición de 1.43 USD/kg [31] o 1.32 EUR/Kg. Por lo tanto:

Horas laborables totales en 2023:  $218 \text{ días} * 24 \text{ h/día} = 5,232 \text{ h}$

Dado que la fundición del disco de freno y la brida tienen el mismo costo, se calcula el costo de fundición para ambos:  $(1,700,000 * 1.32) * 2 = 4,488,000 \text{ EUR}$

11.2.2.1. Línea 1 de mecanizado: Disco exterior

Mecanizado fresado y taladrado del disco exterior:  $(53.08 \text{ EUR/h} * 5,232) * 2 = 555,429.12 \text{ EUR}$

11.2.2.2. Línea 2 de mecanizado: Brida

Mecanizado fresado y taladrado del disco de freno de la brida:  $(53.08 \text{ EUR/h} * 5,232) * 2 = 555,429.12 \text{ EUR}$

Finalmente el coste de fabricación de ambas piezas para la opción 2 es de:  $555,429.12 \text{ EUR} + 555,429.12 \text{ EUR} = \mathbf{5,598,858.24 \text{ EUR}}$

11.3. Remachado

Por último, en relación al proceso de remachado, debido a la falta de datos sobre el costo por hora del proceso, se ha optado por seleccionar el precio de una máquina remachadora como alternativa. Dentro del rango de precios de las máquinas remachadoras disponibles, que oscila entre 1,000 y 10,000 USD [33], se ha tomado en consideración el caso de mayor costo con el objetivo de asegurar la adquisición de la máquina óptima necesaria para realizar el remachado de manera adecuada. Esto implica un costo de 9,200 EUR al convertir el precio en dólares a euros.

11.4. Resumen del presupuesto

A continuación, se presenta un resumen del presupuesto total considerando tanto la fundición como el mecanizado en la misma empresa, así como otro escenario en el que la fundición y el mecanizado se realizan en empresas diferentes. Además se añade el IVA a cada una de las opciones de presupuestos finales.

Opción de presupuesto 1		
	Coste unitario	Coste total (EUR)
ASTM A536	0.62 EUR/Kg	10,676,000
Al <sub>10</sub> SiC	7.63 EUR/Kg	20,383,000
Remache	20.76 EU/100 Pcs	4,235,040
Fundición y mecanizado disco exterior	2.35 EUR/Kg	3,995,000
Fundición y mecanizado brida	1.76 EUR/Kg	2,992,000
Remachado	9,200 EUR	9,200
<b>Total</b>	-	<b>42,290,240</b>
<b>IVA</b>	<b>21%</b>	<b>8,880,950.40</b>
<b>Total + IVA</b>	-	<b>51,171,190.40</b>

Opción de presupuesto 2		
	Coste unitario	Coste total (EUR)
ASTM A536	0.62 EUR/Kg	10,676,000
Al <sub>10</sub> SiC	7.63 EUR/Kg	20,383,000
Remache	20.76 EU/100 Pcs	4,235,040
Fundición disco exterior	1.32 EUR/Kg	2,244,000
Fundición brida	1.32 EUR/Kg	2,244,000
Fresado disco exterior	53.08 EUR/h	277,714.12
Fresado brida	53.08 EUR/h	277,714.12
Taladrado disco exterior	53.08 EUR/h	277,714.12
Taladrado brida	53.08 EUR/h	277,714.12
Remachado	9,200 EUR	9,200
<b>Total</b>	-	<b>40,902,096.48</b>
<b>IVA</b>	<b>21%</b>	<b>8,589,440.26</b>
<b>Total + IVA</b>	-	<b>49,491,536.74</b>

Se puede observar que el presupuesto es aproximadamente un millón y medio de euros menor, pero se deben tener en cuenta la logística necesaria como el transporte de materiales o la distancia entre las diferentes fábricas. Este enfoque se presenta y se propone como una alternativa con el objetivo de no abordar una sola opción. Aunque generalmente, es más rentable realizar todo el proceso en la misma empresa, ya que teniendo en cuenta la logística en su totalidad este presupuesto final aumente considerablemente.

## 12. Bibliografía:

- [1] «Nissan GT-R 570 CV - Ficha técnica & Prestaciones», *Ze Perfs*. [En línea]. Disponible en: <https://zeperfs.com/es/fiche6203-nissan-gt-r.htm> [Último acceso: junio 2023].
- [2] A. Fernández Guillén, «Los 50 coches que mejor frenan: de 100 a 0 km/h en menos de 31 metros», *Motor.es*, 24 de julio de 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.motor.es/noticias/los-coches-que-mejor-frenan-201738060.html> [Último acceso: junio 2023].
- [3] J. L. Fernández Yagües, «Ecuaciones Movimiento Rectilíneo Uniformemente Acelerado (M.R.U.A.)», *FísicaLab*. [En línea]. Disponible en: <https://www.fisicalab.com/apartado/mrua-ecuaciones> [Último acceso: junio 2023].
- [4] A. J. Day y D. (David D. Bryant, *Braking of road vehicles*, 2nd ed. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2022.
- [5] «Frictional brake with pressure-applying cylinder and pads with faulting - MATLAB - MathWorks España», *MathWorks*. [En línea]. Disponible en: <https://es.mathworks.com/help/sdl/ref/discbrake.html> [Último acceso: junio 2023].
- [6] A. Borawski, «Testing Passenger Car Brake Pad Exploitation Time's Impact on the Values of the Coefficient of Friction and Abrasive Wear Rate Using a Pin-on-Disc Method», *Materials*, vol. 15, n.º 6, p. 1991, 2022, doi: 10.3390/ma15061991.
- [7] «Brembo Racing Brake Systems Catalogue». Brembo – Official WebSite, 2015-2016. [En línea]. Disponible en: [https://www.brembo.com/de/Varie/Brembo\\_RacingAutoCatalogue.pdf](https://www.brembo.com/de/Varie/Brembo_RacingAutoCatalogue.pdf) [Último acceso: junio 2023].
- [8] «2023Nissan GT-R - Tamaños de ruedas y neumáticos, PCD, Desplazamiento y especificaciones de las llantas», *LlantasNeumáticos*. [En línea]. Disponible en: <https://llantasneumaticos.com/size/nissan/gt-r/2023/#trim-facelift-2016-2024-38-4bar35--562> [Último acceso: junio 2023].
- [9] J. E. Rivera-López *et al.*, «Thermal and fluid-dynamic analysis of an automotive disc brake with ventilation pillars aerodynamic type», *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1386, n.º 1, nov. 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1386/1/012112.
- [10] Z. Sha *et al.*, «Research on Braking Vibration Characteristics of Grooved Brake Interface of Disc Brake», *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 692, n.º 1, p. 12021, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/692/1/012021.
- [11] J. Martínez Gómez *et al.*, «Métodos multicriterio aplicados en la selección de un material para discos de freno», *INGENIUS*, n.º 20, pp. 83-95, 2018, doi: 10.17163/ings.n20.2018.08.
- [12] A. Naikwadi *et al.*, «DESIGN OPTIMIZATION OF DISK BRAKE ROTOR», vol. 04, n.º 09.
- [13] R. A. García-León *et al.*, «Análisis termodinámico de un disco de freno automotriz con pilares de ventilación tipo NACA 66-209», *Inge Cuc*, vol. 14, n.º 2, pp. 9-18, 2018, doi: 10.17981/ingecuc.14.2.2018.01.
- [14] «Discos de freno compuestos: una solución para reducir el peso y el consumo del vehículo», *Brembo – Official WebSite*. [En línea]. Disponible en: <https://www.bremboparts.com/europe/es/asistencia/estudios/discos-de-freno-compuestos-una-soluci%C3%B3n-para-reducir-el-peso-y-el-consumo-del-veh%C3%ADculo-207810> [Último acceso: junio 2023].

- [15] «BN 988 - Round head rivets | Bossard Global», *Bossard*. [En línea]. Disponible en: <https://www.bossard.com/eshop/global-en/specific-fastening-technologies/rivet-technology/solid-rivets/solid-rivets/round-head-rivets/p/988/?category=02.200.800.10&index=0&q=%3ARelevance%3AA87579DF-7F9C-4535-9A8D-87830D3D5D84%3AStainless%2Bsteel%3AA87579DF-7F9C-4535-9A8D-87830D3D5D84%3ASteel%3A73553375-8C31-42CF-A1C5-834E74E0D5BE%3A14%3AF527C156-7E58-11D4-97D3-0000E8601B71%3A8> [Último acceso: junio 2023].
- [16] rmmcia, «Compatibilidad de metales: La corrosión galvánica en metales», 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.rmmcia.es/blog/laton-y-cobre/compatibilidad-de-metales-la-corrosion-galvanica> [Último acceso: junio 2023].
- [17] 10 Ejercicios Resueltos de ESFUERZO CORTANTE [Ejemplos de Pernos y Placas] *Mecánica de Materiales*, 24 de febrero de 2022. [En línea Video]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=WZwQN5RugLE> [Último acceso: junio 2023].
- [18] «¿Cuáles son los tipos de materiales de los pernos?», *ITALICA*, 16 de febrero de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://italica.pe/cuales-son-los-tipos-de-materiales-de-los-pernos/> [Último acceso: junio 2023].
- [19] «Ámbito de actividad del Grupo», *Brembo – Official WebSite*. [En línea]. Disponible en: <https://www.brembo.com/es/company/about/actividad> [Último acceso: junio 2023].
- [20] H. Córdoba, «FUNDICIONES. ARENAS Y MOLDES, Y PROCESOS DE CONFORMADO DE LOS MATERIALES», 8 de julio de 2020. [En línea]. Disponible en: [https://issuu.com/henrydanielcordoba80/docs/revista\\_4](https://issuu.com/henrydanielcordoba80/docs/revista_4) [Último acceso: junio 2023].
- [21] Universidad del País Vasco, «Tema 3: Fundición en Molde permanente». [En línea]. Disponible en: [https://www.ehu.es/manufacturing/docencia/709\\_ca.pdf](https://www.ehu.es/manufacturing/docencia/709_ca.pdf) [Último acceso: junio 2023].
- [22] J. H. Fernandez, «FUNDICIÓN PROTOCOLO CURSO DE PROCESOS DE MANUFACTURA EDICION 2008-2 FACULTAD INGENIERIA INDUSTRIAL LABORATORIO DE PRODUCCION», Escuela colombiana de ingeniería
- [23] J. A. García Chacón, «Estudio de la influencia de diferentes diseños de los sistemas de alimentación y compensación en la fundición en arena», *Univ. Sevilla*, 2013.
- [24] «Tema 10: Fresado». Universidad del País Vasco, [En línea]. Disponible en: [https://www.ehu.es/manufacturing/docencia/723\\_ca.pdf](https://www.ehu.es/manufacturing/docencia/723_ca.pdf) [Último acceso: junio 2023].
- [25] Universidad de La Coruña, «Tema VI: Procesos de mecanizado 2». [En línea]. Disponible en: <https://lim.ii.udc.es/docencia/iin-tecmec/docs/TemaVI.pdf> [Último acceso: junio 2023].
- [26] «Selección de la rugosidad superficial adecuada para el mecanizado CNC», *Xometry Europe*, 9 de junio de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://xometry.eu/es/seleccion-de-la-rugosidad-superficial-adecuada-para-el-mecanizado-cnc/> [Último acceso: junio 2023].
- [27] Universidad del País Vasco, «Tema 11: Taladrado». [En línea]. Disponible en: [https://www.ehu.es/manufacturing/docencia/725\\_ca.pdf](https://www.ehu.es/manufacturing/docencia/725_ca.pdf) [Último acceso: junio 2023].
- [28] «BSF - Automoción - Características del disco de freno», *BSF*. [En línea]. Disponible en: <https://www.bsf.es/frenos-de-disco/> [Último acceso: junio 2023].
- [29] brenda, «Los 3 tipos de remaches más básicos», *Potencia Fluida GOPA*, 12 de enero de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://pfgopa.com.mx/los-3-tipos-de-remaches-mas-basicos/> [Último acceso: junio 2023].



- [30] «Servicio general de apoyo a la investigación (SAI) - Tarifas 2023». Universidad Zaragoza, [En línea]. Disponible en: [https://vgeconomica.unizar.es/sites/vgeconomica.unizar.es/files/precios\\_publicos/PRECIO\\_S\\_PUBLICOS/450\\_tarifas\\_2023\\_c.go\\_30-3-23.pdf](https://vgeconomica.unizar.es/sites/vgeconomica.unizar.es/files/precios_publicos/PRECIO_S_PUBLICOS/450_tarifas_2023_c.go_30-3-23.pdf) [Último acceso: junio 2023].
- [31] «The Price of Sand Castings», *Iron foundry*. [En línea]. Disponible en: <https://www.iron-foundry.com/sand-castings-price.html> [Último acceso: junio 2023].
- [32] «¿Cuántos días laborables hay en 2023?», *Jobatus*. [En línea]. Disponible en: <https://www.jobatus.es/noticias/cuantos-dias-laborables-2023> [Último acceso: junio 2023].
- [33] «Orbital Riveting Machine | Riveth», 1 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.riveth.com/rivet-machine/orbital-riveting-machine/> [Último acceso: junio 2023].