



FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍAS

Trabajo de fin de Carrera titulado:

“Optimización de un sistema de embrague seco para aprovechar al máximo la transmisión de potencia del motor Renault k4j para un vehículo rally.”

Realizado por:

WALTER FERNANDO ORTIZ CÓNDOR

Director del proyecto:

MSC. JAIME MOLINA

Como requisito para la obtención del título de:

INGENIERO AUTOMOTRIZ

QUITO, abril del 2024

DECLARACIÓN JURAMENTADA

Yo, Walter Fernando Ortiz Cóndor, ecuatoriano, con Cédula de ciudadanía N° 1713704888, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional, y se basa en las referencias bibliográficas descritas en este documento.

A través de esta declaración, cedo los derechos de propiedad intelectual a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, reglamento y normativa institucional vigente.

DECLARACIÓN DEL DIRECTOR DE TESIS

Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con el estudiante, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación.

Director de proyecto

Msc. Jaime Vinicio Molina Osejos

LOS PROFESORES INFORMANTES:

Msc. Diana Belén Peralta Zurita.

Msc. Edilberto Antonio Llanes Cedeño

Después de revisar el trabajo presentado lo han calificado como apto para su
defensa

oral ante el tribunal examinador.

Msc. Diana Belén Peralta Zurita

Msc. Edilberto Antonio Llanes Cedeño

Quito, 20 de abril de 2024

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.

Dedicatoria

Con profunda gratitud y emoción, dedico este logro a quienes han sido el pilar fundamental en mi vida.

A mis padres, Segundo Ortiz y Gladys de Ortiz, por ser mi primer ejemplo de esfuerzo, valores y constancia. Su amor incondicional y enseñanzas han sido la base sobre la que he construido mis sueños.

A mi esposa, Viviana del Rocío Loza compañera incansable en cada paso de este camino, por su paciencia infinita, su apoyo inquebrantable y por sostenerme en los momentos más difíciles. Sin su amor y aliento, este desafío habría sido aún mayor.

A mis hijas, Isabella, Alejandra, Whitney, Alisson, mi mayor inspiración, por ser el faro que me guía en las noches de desvelo y la fuerza que me impulsó a seguir adelante cuando el cansancio intentaba vencerme. Su amor y admiración me dieron el coraje para demostrarles que todo esfuerzo tiene su recompensa.

A mi tutor de tesis, Ing. Jaime Molina Msc. por su orientación y paciencia, por compartir su conocimiento y por ser un guía en este proceso de aprendizaje. Su apoyo fue clave para hacer posible este logro.

La ingeniería es más que una profesión; es un compromiso con la innovación, la creatividad y la solución de problemas que transforman el mundo. Es convertir ideas en realidades, desafiar los límites del conocimiento y construir un futuro mejor. Cada diseño y cálculo reflejan no solo teorías, sino esfuerzo y pasión por hacer las cosas de manera más eficientes y sostenibles. Este título representa años de sacrificio y perseverancia, y demuestra que la educación y la determinación pueden cambiar vidas.

Y como decía Séneca: "La suerte no es más que el punto de encuentro entre la preparación y la oportunidad."

Gracias a todos los que formaron parte de este camino.

Índice de Contenido

FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍAS	1
Trabajo de fin de Carrera titulado:.....	1
“Optimización de un sistema de embrague seco para aprovechar al máximo la transmisión de potencia del motor Renault k4j para un vehículo rally.”	1
Resumen	24
Abstract	25
Introducción.....	26
Planteamiento del Problema.....	28
Justificación	29
Objetivo General	30
Objetivos Específicos.....	31
Hipótesis.....	31
Estudio del Arte.....	32
Sistema de embrague	32
Embragues de fricción.....	32
Partes del embrague	32
Cálculos	33
Materiales para el sistema de embrague	36
Materiales orgánicos	37
Materiales cerámicos.....	38
Materiales metálicos.....	38
Materiales sinterizados.....	39
Materiales de carbono	39
Metodología	44
Diseño del equipo original (plato, disco, volante de inercia) de acuerdo con las medidas originales y el despiece correspondiente de cada componente.	46
Investigación y recopilación de datos	47

Configuración del entorno de trabajo en Inventor:	47
Dibujo del Volante de Inercia	48
Dibujo del Plato y Disco	49
Construcción del disco optimizado.	50
Datos Proporcionados	51
Conversión de Unidades	52
Torque Transmitido (T).....	53
Potencia Transmitida (P).....	53
Estimación de la Fuerza de Fricción	53
Simulación.....	56
Resultados	66
Prototipo Virtual del sistema de Embrague	66
Vista explotada.....	67
Valores del material utilizado.	71
Simulación del nuevo disco de embrague.....	73
Resultados Coeficiente de Fricción	76
Discusión de Resultados	79
Característica.....	80
Embrague Estándar (1 superficie).....	80
Embrague de Competencia (8 superficies).....	80
Conclusiones.....	83
Recomendaciones	87
Listado de Referencias	88

Índice de Figuras

Figura 1 <i>Partes del embrague</i>	33
Figura 2 <i>Esquema de un embrague de fricción de tipo disco.</i>	35
Figura 3 <i>Distribución de presiones en un embrague de fricción de tipo disco</i>	36
Figura 4 <i>Disco de embrague de material orgánico original con una estructura de compuesto mixto.</i>	38
Figura 5 <i>Disco de embrague de materiales metálicos</i>	39
Figura 6 <i>Disco de embrague de competencia</i>	40
Figura 7 <i>Proceso de flujo de la metodología.</i>	45
Figura 8 <i>Sistema de embrague del Renault Clío</i>	46
Figura 9 <i>Medidas del fabricante del equipo original</i>	47
Figura 10 <i>Diseño del volante de inercia</i>	48
Figura 11 <i>Proceso de generación Prototipo Virtual Embrague Modificado.</i>	50
Figura 12 <i>Medida de plato de la superficie de contacto.</i>	51
Figura 13 <i>Medidas de la fibra de embrague acorde al diseño realizado.</i>	55
Figura 14 <i>Liberación del disco de embrague con presión.</i>	55
Figura 15 <i>Evaluación del sistema antes del montaje</i>	56
Figura 16 <i>Modelo 3D</i>	57
Figura 17 <i>Definición del material</i>	58
Figura 18 <i>Creación del material</i>	59
Figura 19 <i>Configuración de las condiciones de borde</i>	60
Figura 20 <i>Aplicación de cargas</i>	61
Figura 21 <i>Aplicación de cargas en el disco y volante de inercia.</i>	62
Figura 22 <i>Configuración del análisis</i>	63
Figura 23 <i>Simulación disco modificado</i>	65
Figura 24 <i>Diseño del plato original sin modificación del elemento.</i>	66
Figura 25 <i>Diseño explotado del sistema de embrague optimizado</i>	66
Figura 26 <i>Disco original vs disco modificado</i>	67

Figura 27 <i>Diseño explotado del sistema de embrague original y modificado</i>	68
Figura 28 <i>Simulación plato original</i>	69
Figura 29 <i>Simulación de disco nuevo</i>	73
Figura 30 <i>Simulación desplazamiento</i>	74
Figura 31 <i>Simulación plato original – esfuerzo máximo</i>	75
Figura 32 <i>Simulación plato - esfuerzo máximo</i>	75

Índice de Tablas

Tabla 1 <i>Valores referenciales del sistema original.</i>	29
Tabla 2 <i>Tabla de materiales usados en la simulación.</i>	42
Tabla 3 <i>Aplicación de cargas</i>	61
Tabla 4 <i>Análisis de aplicación de fuerzas</i>	63
Tabla 5 <i>Tabla comparativa de materiales de fricción</i>	70
Tabla 6 <i>Tabla de materiales para disco de embrague semimetálico</i>	71
Tabla 7 <i>Resultados del coeficiente de fricción</i>	76
Tabla 8 <i>Comparativa del sistema de embrague optimizado vs no optimizado</i>	77
Tabla 9 <i>Comparación de parámetros de diseño</i>	80

Resumen

El presente estudio se orientó a mejorar el sistema de embrague seco del motor Renault K4J, que equipa al Renault Clio 1.4, aplicando técnicas innovadoras de ingeniería y materiales de alto rendimiento para optimizar la transferencia de potencia y el desempeño en rally. La investigación se desarrolló mediante un enfoque descriptivo-práctico y analítico, permitiendo identificar y medir aspectos críticos como la fricción, el desgaste y la transmisión de torque.

En su configuración inicial, el sistema mostraba un coeficiente de fricción de 0.35 y una fuerza de fricción cercana a 1500 N, lo que se traducía en una eficiencia del 80% en la transferencia de potencia bajo condiciones exigentes (3000 rpm). Luego de las modificaciones realizadas, se logró disminuir el coeficiente de fricción a 0.292 y aumentar la fuerza de fricción hasta 1752 N, lo que equivale a una mejora aproximada del 17% en la capacidad de transmitir torque sin deslizamientos. Estos resultados confirman que la optimización aplicada incrementa significativamente la eficiencia en la transferencia de potencia, mejorando el rendimiento competitivo, aunque conlleva un mayor desgaste en las superficies de contacto.

La contribución original de este trabajo radica en la combinación de simulaciones avanzadas (utilizando herramientas como SimSolid) y ensayos experimentales, proporcionando un enfoque cuantitativo que resulta aplicable al diseño de sistemas de embrague para vehículos de alto rendimiento en competencias de rally.

Palabra clave: sistema de embrague seco, Renault, K4J, coeficiente de fricción, rally

Abstract

The present study aimed to improve the dry clutch system of the Renault K4J engine, which powers the Renault Clio 1.4, by applying innovative engineering techniques and high-performance materials to optimize power transfer and rally performance. The research was conducted using a descriptive-practical and analytical approach, allowing for the identification and measurement of critical aspects such as friction, wear, and torque transmission.

In its initial configuration, the system exhibited a friction coefficient of 0.35 and a friction force close to 1500 N, resulting in an 80% efficiency in power transfer under demanding conditions (3000 rpm). After the modifications, the friction coefficient was reduced to 0.292, and the friction force increased to 1752 N, representing an approximate 17% improvement in the ability to transmit torque without slippage. These results confirm that the applied optimization significantly enhances power transfer efficiency, improving competitive performance, although it leads to increased wear on contact surfaces.

The original contribution of this work lies in the combination of advanced simulations (using tools such as SimSolid) and experimental testing, providing a quantitative approach applicable to the design of clutch systems for high-performance rally vehicles.

Keywords: dry clutch system, Renault, K4J, friction coefficient, rally.

Introducción

El sistema de embrague es un importante elemento para la transmisión de potencia de un vehículo sobre todo aplicado en un automóvil ya que permite su desplazamiento, así como el cambio de velocidades (Camarena, 2014). Por ello, dentro de una competencia como el rally se necesita adaptar ciertos elementos para que pueda alcanzar su máximo rendimiento sin dañar las partes involucradas (Merino, 2014). Cabe mencionar que este tema se vuelve cada vez más relevante debido a los avances constantes en la industria automotriz. La meta es lograr un balance ideal entre mayor potencia y menor consumo de combustible y para lograr esto, se apuesta por materiales más ligeros y duraderos, además de minimizar los ajustes y las holguras. Así, los vehículos pueden ofrecer su mejor desempeño y eficiencia en el día a día (Aldana & Albán, 2023).

En base a lo expuesto, el presente proyecto se centra en la optimización de un sistema de embrague seco para aprovechar al máximo la transmisión de potencia del motor Renault k4j para un vehículo de rally. Este tipo de competencia exige un rendimiento superior y una durabilidad extrema del embrague, dado que las condiciones de operación son mucho más severas en comparación con la conducción cotidiana. Por lo tanto, la adaptación específica del sistema de embrague se vuelve necesaria al considerar factores como la rápida aceleración, el frenado intenso y las constantes variaciones del terreno. La investigación se enfocará en la identificación de materiales que sean ligeros pero altamente resistentes, así como en el desarrollo de configuraciones de embrague que minimicen los ajustes y las holguras, con el objetivo de optimizar el rendimiento y la eficiencia del sistema.

La importancia de llevar a cabo este estudio radica en la necesidad de garantizar que el sistema de embrague del vehículo de rally pueda soportar las exigentes condiciones a las que será sometido sin comprometer su funcionalidad ni su vida útil. Un embrague inadecuadamente diseñado o con materiales poco resistentes puede generar fallos prematuros, afectando no solo el rendimiento del automóvil, sino también la seguridad del

piloto y la competitividad en la carrera. Además, el desarrollo y la optimización de estos sistemas no solo benefician al ámbito del automovilismo deportivo, sino que también pueden generar innovaciones aplicables a los vehículos de uso convencional. La investigación permitirá establecer parámetros que mejoren la transmisión de potencia, reduzcan el desgaste y contribuyan al desarrollo de tecnologías más eficientes, reforzando así el avance en la industria automotriz y ofreciendo soluciones que optimicen el desempeño mecánico de los vehículos en distintos contextos.

Antecedentes

Diversos estudios han abordado la problemática del diseño de sistemas de embrague, permitiendo identificar áreas de mejora en función de la durabilidad y el rendimiento. Por ejemplo, la investigación realizada por Aldana y Albán (2023) en los vehículos Chevrolet NPR Reward de la flota BAVARIA, de Renting Colombia S.A., se centró en desarrollar un embrague con mayor vida útil y funcionamiento eficiente, utilizando un enfoque mixto que combinó análisis cualitativos y cuantitativos. De igual forma, Trifonov (2019) analizó el diseño y cálculo de un nuevo disco de embrague para un Volkswagen Touran, considerando parámetros críticos como la presión, la energía de disparo y la variación de temperatura, aunque concluyó que la solución propuesta no era económicamente viable. Además, Becerra et al. (2015) presentaron un modelo interactivo para comprender el sistema de embrague, fundamentado en una revisión bibliográfica que aportó una base sólida sobre la disposición de sus componentes.

En el presente estudio, el foco se dirige al sistema de embrague del motor Renault K4J, empleado en el Renault Clio 1.4. Este motor es reconocido por su fiabilidad y eficiencia en contextos urbanos; sin embargo, cuando se enfrenta a las demandas extremas de competencias de rally, se hace evidente que el sistema original presenta deficiencias. Con un coeficiente de fricción de aproximadamente 0.35 y una eficiencia en la transferencia de potencia cercana al 80%, el embrague original muestra limitaciones en cuanto a la pérdida

de potencia, la estabilidad en la transmisión del torque y un desgaste acelerado en las superficies de contacto. Estas condiciones demuestran que, para alcanzar un rendimiento competitivo, era imprescindible implementar mejoras en el diseño del embrague.

Planteamiento del Problema

En el ámbito del automovilismo, especialmente en competencias de rally, es común modificar vehículos estándar para aumentar su rendimiento y adaptarlos a exigencias extremas. El Renault Clio 1.4, impulsado por el motor Renault K4J, se utiliza frecuentemente para estas mejoras, en particular para incrementar el torque y la potencia. No obstante, estas modificaciones implican que el sistema de embrague original se vea sometido a mayores esfuerzos, revelando deficiencias en la transmisión de potencia.

Datos preliminares muestran que, en condiciones normales, el embrague original presenta un coeficiente de fricción de aproximadamente 0.35 y logra una eficiencia en la transferencia de potencia cercana al 80% cuando se prueba a 3000 rpm. Estas cifras indican que existe una pérdida de potencia significativa, lo que se traduce en deslizamientos durante los cambios de marcha y un desgaste acelerado de las superficies de contacto. Dicho desempeño insuficiente provoca saltos de marcha y una respuesta inestable, aspectos críticos en una competencia de rally, donde se requiere una transmisión de torque constante y segura (Zorrero, 2023).

La problemática se agrava al intentar aumentar la potencia del motor, ya que el sistema actual no está diseñado para soportar las cargas adicionales sin comprometer su funcionalidad. Por ello, se hace indispensable optimizar el diseño del embrague, incorporando materiales más resistentes y tecnologías avanzadas que aseguren una mayor eficiencia en la transferencia de potencia, reduzcan el desgaste y garanticen un funcionamiento estable en condiciones de alta exigencia.

A continuación, se muestra una tabla con los valores referenciales del sistema original:

Tabla 1

Valores referenciales del sistema original.

Parámetro	Valor Inicial	Observaciones
Coeficiente de Fricción (μ)	0.35	Valor medido en condiciones operativas estándar
Eficiencia en Transferencia de Potencia	80%	Estimación basada en pruebas a 3000 rpm en condiciones de rally
Fuerza de Fricción	1500 N	Valor referencial obtenido en ensayos de laboratorio

Estos datos evidencian la necesidad de una optimización que permita mejorar la transmisión de potencia y la estabilidad del sistema en contextos competitivos, asegurando que el vehículo cumpla con los estándares requeridos en el rally.

Justificación

El desarrollo de este estudio se fundamenta en la necesidad de mejorar tanto el rendimiento como la durabilidad del sistema de embrague en vehículos de rally, dado que estos se enfrentan a condiciones operativas extremas, tales como aceleraciones intensas, frenadas contundentes y variaciones constantes en el terreno. Dichas condiciones provocan elevados esfuerzos mecánicos y térmicos que afectan de manera crítica a componentes esenciales, entre ellos el embrague (Zorrero, 2023).

Diversas investigaciones han evidenciado que optimizar el diseño del embrague mediante la incorporación de materiales de alta resistencia y la aplicación de técnicas de

ingeniería avanzadas resulta determinante para incrementar la eficiencia en la transmisión de potencia y mantener una estabilidad adecuada en la transferencia de torque. Por ejemplo, Aldana y Albán (2023) demostraron que la integración de materiales innovadores y procesos de fabricación precisos puede extender la vida útil del embrague al reducir significativamente el desgaste por fricción. Asimismo, Trifonov (2019) resalta la importancia de elegir correctamente los materiales y ajustar meticulosamente el diseño para enfrentar problemas como deslizamientos y saltos de marcha, especialmente bajo condiciones de alta exigencia.

Adicionalmente, el uso de componentes más livianos y la minimización de tolerancias en las holguras mecánicas se han identificado como estrategias eficaces para optimizar la eficiencia del sistema en contextos de alto rendimiento, asegurando una transferencia de potencia más fluida (Becerra et al., 2015). En este sentido, la optimización del embrague en el motor Renault K4J permite garantizar que el incremento en la potencia del motor se traduzca en un desempeño efectivo, permitiendo alcanzar mayores velocidades y una fiabilidad superior en competencias de rally.

Los resultados derivados de esta investigación no solo contribuirán a elevar el rendimiento competitivo del vehículo, sino que también proporcionarán una base técnica que podrá ser utilizada por futuros profesionales en el área de la mecánica automotriz para implementar mejoras similares en otros vehículos de alto desempeño.

Objetivo General

Optimizar el sistema de embrague seco del motor Renault K4J, mediante la implementación de técnicas avanzadas de ingeniería y materiales de alto rendimiento, para el mejoramiento en la transmisión de potencia como el desempeño en competencias de rally.

Objetivos Específicos

- Investigar tecnologías y materiales avanzados para el diseño de sistema de embrague de alto rendimiento mediante la revisión bibliográfica especializada en el ámbito del automovilismo deportivo.
- Diseñar el prototipado virtual de Simulación en SimSolid para el análisis de esfuerzos de fricción y presión del sistema de embrague.
- Evaluar el impacto de los resultados obtenidos en los embragues tanto en el equipo original como en el embrague optimizado, con su coeficiente de rozamiento y durabilidad.
- Proporcionar recomendaciones y directrices para la implementación de las mejoras desarrolladas en el embrague del Renault Clio, exponiendo una tabla de resultados de equipamiento original versus sistema modificado con base en los resultados obtenidos, para su uso en competiciones de rally.

Hipótesis

Dado que el sistema de embrague original del Renault Clío opera a 3000 rpm con un coeficiente de fricción de 0.35 y una eficiencia en la transferencia de potencia cercana al 80% (Zorrero, 2023), se plantea que la implementación de un rediseño integral—mediante la utilización de materiales de alto rendimiento y técnicas avanzadas de ingeniería (variable independiente)—redundará en una disminución medible del coeficiente de fricción y en un incremento significativo en la eficiencia de transmisión (variables dependientes). En consecuencia, se espera que estas mejoras se traduzcan en una mayor durabilidad del sistema y en la reducción de pérdidas de potencia durante los cambios de marcha en condiciones de rally. Estudios recientes han evidenciado que la aplicación de estos avances tecnológicos optimiza el rendimiento de sistemas críticos en entornos exigentes (Aldana & Albán, 2023; Gómez et al., 2022).

Estudio del Arte

Sistema de embrague

Los embragues son dispositivos que permiten el acoplamiento y desacoplamiento de dos ejes según las necesidades del momento, funcionando como conexiones temporales entre ellos. En un automóvil, por ejemplo, se ubica un embrague entre el eje de salida del motor y el eje de entrada de la caja de cambios, haciendo que al pisar el pedal, el conductor desacopla el motor de la caja de cambios, facilitando el cambio de marchas sin brusquedad. Al soltar gradualmente el pedal, los otros elementos se vuelven a conectar de manera suave y progresiva (Flores. 2021).

Embragues de fricción

El embrague de fricción tiene sus ventajas que se deben aprovechar en este tipo de proyectos, ya que al reducir la superficie de contacto con las diferencias de giro se transmite de manera suave y progresiva la potencia (Abasolo et al., 2017). También se considera que minimiza todo tipo de vibraciones, así como sacudidas que pueden generarse por las características propias del motor que permite el funcionamiento del automóvil (Guerrero, 2021).

Partes del embrague

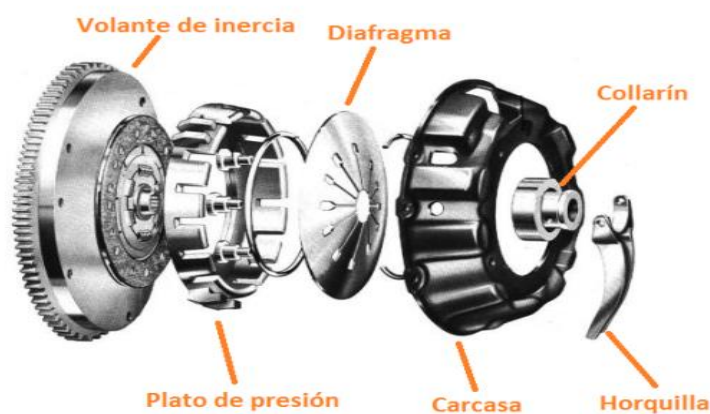
El embrague se encuentra conformado por las siguientes partes:

- Conjunto de presión: componente diseñado para soportar y facilitar la transmisión del movimiento generado por el cojinete hacia el sistema de embrague.
- Disco de acero: ubicado entre el volante de inercia y el conjunto de presión, actúa como elemento clave para la transferencia de torque.

- Cojinete de embrague: su función principal es recibir la fuerza aplicada al pedal y transferirla al conjunto de presión, garantizando un accionamiento preciso del sistema (Flores, 2021).
- Volante de inercia: denominado así por el principio físico que rige su funcionamiento, almacena energía cinética y regula la entrega de potencia del motor al sistema de transmisión (Escuela Industrial San Antonio, 2020).

Figura 1

Partes del embrague



Nota. Tomado de El embrague: ¿Qué es?, por Mega Taller, 2016, Megataller

(<https://blog.megataller.com/el-embrague-que-es/>)

El sistema de embrague tiene varias partes en las que se modificará buscando la eficiencia de potencia en la modificación de las partes.

Cálculos

En el rally, mejorar la velocidad y la precisión es clave, ya que cada componente del vehículo desempeña un papel importante en el rendimiento general; cuando todos trabajan de manera óptima, el vehículo puede responder de forma más eficiente y confiable a los desafíos que presentan las competencias (Molero 2011). Al conectar el motor con la transmisión, permite al conductor gestionar la transferencia de potencia y asegurando un

control preciso sobre el rendimiento del vehículo en diferentes condiciones de manejo (Bastidas, 2023).

De manera que, en un embrague de competencia se cuenta con que las superficies de los discos son perfectamente planas y la presión es uniforme en todos los puntos de la superficie de contacto, esto indica que se cumple la hipótesis indicada sobre la presión uniforme, permitiendo calcular el par de rozamiento generado en la superficie de contacto de la siguiente manera:

Ecuación 1

$$T_{roz} = \int r \cdot \mu \cdot p \cdot dA = \mu \cdot p \cdot \int r \cdot dA = \mu \cdot p \cdot \int r \cdot 2\pi r \cdot dr = 2\pi \cdot \mu \cdot p \cdot \frac{r_{ext}^3 - r_{int}^3}{3} = \frac{\pi}{12} \cdot \mu \cdot p \cdot (D^3 - d^3)$$

Tal como se observa en las ecuaciones, para realizar el cálculo se deben tener los siguientes datos: μ es el coeficiente de fricción, p es la presión (uniforme), D es el diámetro exterior y d es el diámetro interior, también con estos datos se puede calcular la fuerza F que se genera como presión en la superficie de contacto, para ello, se tiene la siguiente ecuación:

Ecuación 2

$$F = \int p \cdot dA = p \cdot A = \frac{\pi}{4} \cdot p \cdot (D^2 - d^2)$$

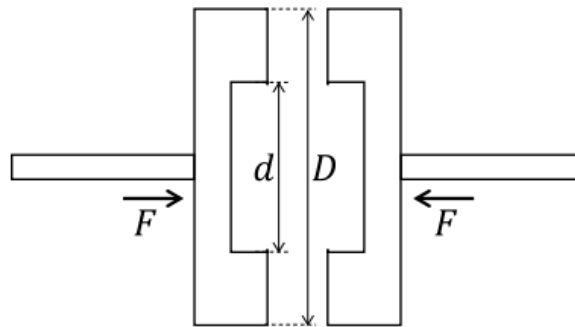
Formula que se usa posterior a la sustitución de la ecuación 2 en la ecuación 1:

Ecuación 3:

$$T_{roz} = \mu \cdot \frac{F}{3} \cdot \frac{D^3 - d^3}{D^2 - d^2}$$

Figura 2

Esquema de un embrague de fricción de tipo disco.



Nota. Tomado de Diseño de máquinas, por OpenCourseWare, Universidad del País Vasco (https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/50396/mod_resource/content/1/Tema%2012.%20Embragues.pdf)

Según lo indicado anteriormente, en el caso de un embrague nuevo mantiene la misma presión en cualquier punto de contacto, pero esto genera un mayor desgaste en los puntos que tiene una mayor distancia de separación con relación al eje, para realizar el cálculo del desgaste se puede aplicar la siguiente fórmula:

$$\delta = k \cdot p \cdot V_{dest}$$

El desgaste se considera como un punto proporcional a la presión p y a la velocidad de deslizamiento v_{desl} . Para ello, se tiene una constante de proporcionalidad k , en el caso del embrague, los dos cuerpos en cuestión son discos que giran, cada uno con su propio eje. Por lo que, las velocidades de giro de los ejes 1 y 2 son w_1 y w_2 , respectivamente, generando la velocidad angular relativa (de deslizamiento) entre los dos discos como:

$$W_{dest} = W_1 - W_2$$

Por lo tanto, la velocidad de deslizamiento v_{deslv} en un punto de contacto ubicado a una distancia radial r_r se puede calcular utilizando la siguiente fórmula de velocidad como primer paso:

$$V_{dest} = W_{dest} \cdot r = (W_1 - W_2) \cdot r$$

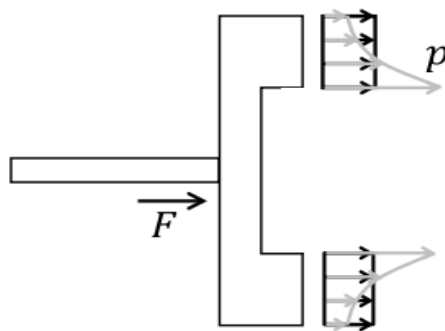
Luego, para realizar el cálculo de contacto con velocidad de deslizamiento, se utilizan los resultados anteriores y se procede a multiplicar por los valores de k y p como se indica a continuación:

$$\delta = k \cdot p \cdot W_{dest} \cdot r = k \cdot p \cdot (W_1 - W_2) \cdot r$$

Como se muestra en la fórmula los puntos más distantes tienen mayores probabilidades de desgaste, como efecto de esto se tiene que la presión de contactos va a disminuir para estos puntos mientras que para los puntos más cercanos la fuerza aumentará, lo que permitirá tener al sistema en equilibrio, permitiendo que F no cambie en el tiempo. De manera que así se obtendrá una distribución de presión como se observa en la figura 3:

Figura 3

Distribución de presiones en un embrague de fricción de tipo disco



Nota. Tomado de Diseño de máquinas, por OpenCourseWare, Universidad del País Vasco (https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/50396/mod_resource/content/1/Tema%2012.%20Embragues.pdf)

Materiales para el sistema de embrague

Los avances tecnológicos en el diseño y fabricación de embragues en los últimos años han cambiado la industria del rally, mejorando la eficiencia y el rendimiento (Merino,

2014). Estas mejoras también reflejan una evolución en el uso de materiales, ya que, inicialmente, los componentes se fabricaban principalmente en acero y otros compuestos convencionales. Con el tiempo, la industria ha avanzado hacia el empleo de materiales más ligeros y resistentes, como aleaciones de alta performance, compuestos de carbono y materiales cerámicos, que no solo optimizan el peso y la durabilidad, sino que también mejoran la eficiencia del rendimiento y la capacidad de adaptación a condiciones extremas (Aldana & Albán, 2023).

De manera que, es importante identificar los componentes que actúan en su funcionamiento (Velaochaga, J. C. 2022). En este sentido, se busca realizar la optimización mecánica del embrague de un automóvil y para lograrlo, se deben conocer las características generales, así como la información generada por su fabricante, también se deben establecer los requisitos para el embrague ya que de todos estos datos depende la vida útil o la fuerza en el pedal necesaria para desembragar (Zorrero, D. 2023). En la actualidad se utilizan diferentes materiales para la fabricación de los discos de fricción, o discos de embrague, pues dependen de la aplicación y las demandas de rendimiento. A continuación, se muestran los principales tipos:

Materiales orgánicos

Los discos de fricción orgánica se elaboran utilizando materiales como papel, celulosa y kevlar, los cuales ofrecen un equilibrio óptimo entre rendimiento, durabilidad y costo. Estos materiales son ampliamente utilizados en aplicaciones automotrices, especialmente en sistemas de embrague y frenos, debido a su capacidad para proporcionar una fricción estable y predecible, lo que contribuye a una operación suave y silenciosa. Además, su composición permite una menor generación de calor y desgaste en comparación con otros tipos de materiales de fricción, lo que mejora la vida útil de los componentes y reduce la necesidad de mantenimiento

Figura 4

Disco de embrague de material orgánico original con una estructura de compuesto mixto.



Este tipo de construcción es la más común y comercial en los discos de embrague de líneas de fabricación de coches en serie.

Materiales cerámicos

Estos discos están elaborados a partir de componentes como el carburo de silicio y el óxido de aluminio, esto se debe a que su aplicación permite un alto rendimiento y trabajo pesado, indicando que el auto puede ser utilizado en carreras, equipos industriales y maquinaria agrícola, es decir, en lugares donde se necesitan de altos niveles de torsión y una gran resistencia al calor.

Materiales metálicos

En este tipo de discos se utilizan materiales como acero y bronce, sobre todo en aplicaciones que requiere un alto torque y transmisión de potencia, como ejemplo se tiene a la maquinaria pesada y a los equipos industriales.

Figura 5

Disco de embrague de materiales metálicos



Cabe mencionar que este tipo de discos tiene cualidades de mayor resistencia.

Materiales sinterizados

Los discos de fricción sinterizados están compuestos de polvos metálicos que se comprimen y se someten a calor para formar un material sólido. Son reconocidos por su durabilidad, resistencia al desgaste y su capacidad para soportar altos niveles de calor y torque.

Materiales de carbono

Para la fabricación de discos con este tipo de material se verifican varios factores que permiten determinar cuál será el compuesto a utilizar, donde se incluye a fibras de carbono y resina, que tienen resistencia al calor, durabilidad y mayor rendimiento, por lo que, sus aplicaciones se orientan a autos de carreras y sistemas aeroespaciales (Lascano et al, 2020).

Figura 6

Disco de embrague de competencia



La modificación del área de contacto y los materiales darán como resultado un disco con gran aporte en la competencia. Sin embargo, materiales como el carbono y el cerámico, que son más ligeros y resistentes, han sido introducidos gracias a los avances tecnológicos (Bartolomé et al., 2007), siendo ideales para las exigencias del rally porque pueden soportar altas temperaturas y transferir mejor la energía (Condesa, 2013).

En los casos donde el objetivo es encontrar un material diferente a los que se encuentran frecuentemente en la industria, se realiza un prototipado virtual y Simulación del sistema de embrague (Wittmer, 2023), utilizando el software de diseño para determinar las tensiones a las que se exponen el material del disco y revestimiento cuando no hay laminado y la equivalencia es alta (Trifonov, 2019). También es importante realizar un análisis comparativo del tiempo de vida útil del embrague, contrastando el sistema original con el modificado. De esta manera, se puede evaluar si la modificación en la geometría de la pieza tiene un impacto positivo en la durabilidad del embrague, ayudando a determinar si estas modificaciones contribuyen a prolongar su vida útil en condiciones de uso extremo, como las que se encuentran en las competencias de rally (Velaochaga, 2022).

El rendimiento de los vehículos de rally, como el Renault K4J, ha cambiado debido a los avances tecnológicos en el diseño y fabricación de embragues, los mismos que no solo

han beneficiado a los equipos de rally, sino que también han impulsado el crecimiento y la innovación general de la industria automotriz (Merino, 2014).

Para Kalpakjian (2002), la simulación y el modelado por computadora están adquiriendo importancia en el segmento de manufactura y servicios de la industria a nivel general, esto como resultado de la dinámica de mercado y la feroz competencia global. En efecto, las empresas manufactureras y de servicios se ven forzadas a proporcionar un producto o servicio de mejor calidad sobre una base de costo más eficaz, al tiempo que intentan reducir el tiempo de inicio de la producción o servicio. La búsqueda de ventaja competitiva requiere mejora continua, cambios en el proceso y la implementación de nuevas tecnologías. Aunque la simulación y el modelado por computadora no son herramientas nuevas para resolver problemas matemáticos complicados o para proyectar distribuciones estadísticas sofisticadas, el poder de la nueva generación de software ha incrementado la aplicación del modelado por computadora como herramienta para solucionar problemas en el campo del diseño de instalaciones. Los paquetes de simulaciones disponibles en la actualidad ya no requieren una formación sólida en matemáticas o lenguajes de programación para realizar simuladores del mundo real.

Cabe mencionar que para la optimización del sistema de embrague seco del motor Renault K4J en vehículos de rally, el uso de herramientas de simulación como Altair SimSolid puede ser altamente beneficioso. En efecto, SimSolid permite realizar análisis estructurales en ensamblajes CAD completos en cuestión de minutos, sin necesidad del uso de simplificación geométrica ni de mallado, las cuales son 2 de las tareas más intensivas y propensas a errores en las simulaciones tradicionales. Este software es especialmente útil para evaluar múltiples escenarios de diseño rápidamente, lo que permite ajustes precisos y eficientes en el diseño del embrague para manejar el incremento de potencia y torque del motor. Además, SimSolid soporta diversas conexiones y condiciones de carga, lo que facilita la simulación de condiciones reales y la toma de decisiones informadas para mejorar

la durabilidad y rendimiento del sistema de embrague en condiciones de rally Symington (2020).

Precisamente, con el uso de un software de diseño, se puede aprovechar la modelización y su tratamiento en sistemas CAD para desarrollar, en una primera etapa, el proceso de diseño y la conceptualización de un producto en particular, permitiendo determinar su alcance, mejorar su diseño y proyectar su reconstrucción. La proyección del modelado, considerando los efectos de las variables de campo en el sólido a través de la simulación, permite utilizar software CAD, que hace posible establecer una valoración final antes de la construcción de la propuesta y seleccionar los materiales adecuados (Villarreal Prado, 2023).

Tabla 2

Tabla de materiales usados en la simulación.

Propiedad	Unidad	Valor Recomendado	Descripción
Densidad	kg/m ³	3000 - 4000	Determina la masa por unidad de volumen.
Módulo de elasticidad	GPa	150 - 300	Rigidez del material frente a la deformación.
Relación de Poisson	-	0.2 - 0.25	Relación entre las deformaciones longitudinal y lateral.
Resistencia a la tracción	MPa	50 - 100	Límite de resistencia antes de la fractura.
Resistencia a la compresión	MPa	100 - 300	Capacidad para soportar cargas de compresión.
Conductividad térmica	W/(m·K)	may-20	Facilidad de conducción de calor.
Capacidad calorífica	J/(kg·K)	800 - 1200	Energía requerida para aumentar la temperatura.
Coeficiente de expansión térmica	1/°C	5e-6 - 8e-6	Expansión del material por cambio de temperatura.
Dureza	Vickers (HV)	1200 - 1600	Resistencia del material al rayado o penetración.

Fricción estática	-	0.3 - 0.5	Coeficiente de fricción en estado estático.
-------------------	---	-----------	---

Metodología

Dado los objetivos del estudio, se ha adoptado un enfoque descriptivo, centrado en la identificación de características clave de conjuntos homogéneos de fenómenos. Este enfoque implica el uso de criterios sistemáticos que faciliten la determinación de la estructura o el comportamiento de los fenómenos en cuestión, con el fin de ofrecer una visión clara y detallada. La información recopilada proviene de diversas fuentes confiables, asegurando una base sólida para el análisis y la interpretación de los datos (Guevara et al., 2020).

Por lo que, en relación con el tema de estudio se enfoca en detallar las características y el funcionamiento del sistema de embrague seco de la transmisión de potencia del motor Renault K4J. Además, la optimización de este sistema implica un análisis minucioso de su diseño, componentes, y rendimiento, lo que requiere una descripción que permita indicar si los resultados muestran los niveles de eficiencia y el rendimiento del vehículo requeridos para el rally.

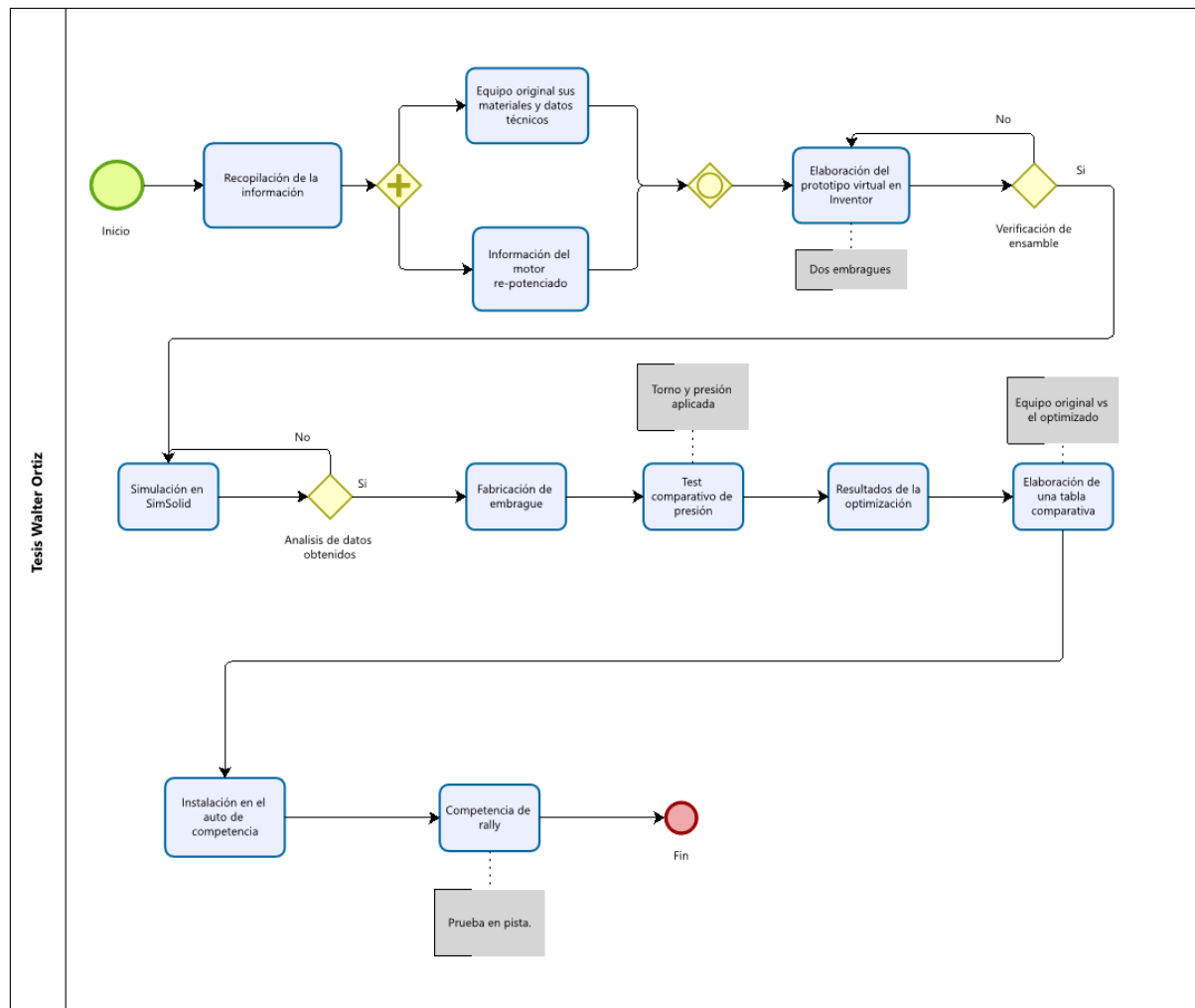
También tiene un enfoque experimental indicado como un proceso que permite exponer a un objeto a ciertas constituciones con el fin de observar los efectos resultantes (Guevara et al., 2020). Aplicado al caso en cuestión, este enfoque requiere realizar ajustes y modificaciones al sistema de embrague seco para evaluar cómo estas alteraciones impactan el comportamiento del vehículo en condiciones reales de rally. El objetivo es observar los efectos directos de los cambios en el rendimiento del vehículo, asegurando que las modificaciones mejoren la eficiencia y la durabilidad del sistema en un entorno de alto rendimiento.

Como herramienta de trabajo se utiliza una revisión documental para exponer los principios básicos del diseño y funcionamiento del sistema de embrague y así generar mejoras a los resultados existentes. También se recopila la información relevante sobre el

funcionamiento del embrague en vehículos Renault Clío, así como sobre los requisitos y desafíos particulares que se debe superar en competencias de rally.

Figura 7

Proceso de flujo de la metodología.



Basándose en la Figura 7, se presenta el diagrama de flujo que ilustra el proceso de recopilación de información. En primer lugar, se analiza el equipo original (plato, disco, volante de inercia), junto con los datos de diseño y desempeño relacionados con la información del motor repotenciado, lo que permite desarrollar el diseño de los dos sistemas de embrague en Inventor. Posteriormente, se realiza una simulación en Sim Solid para

agilizar el proceso de diseño y análisis, reduciendo el tiempo de desarrollo. Sin embargo, la validación del embrague se lleva a cabo mediante cálculos que permiten comprobar el comportamiento del sistema. Luego, se procede con la fabricación del embrague y una prueba comparativa de presión entre el equipo original y el modificado. A continuación, se analizan los resultados de la optimización y se generan los datos necesarios para la tabla comparativa. Finalmente, el embrague modificado se instala en el vehículo de competencia para rally, obteniendo los datos finales que permiten evaluar su rendimiento en condiciones reales de competencia.

Diseño del equipo original (plato, disco, volante de inercia) de acuerdo con las medidas originales y el despiece correspondiente de cada componente.

Equipo original del sistema de embrague del Renault Clío, que se muestra en la figura 8:

Figura 8

Sistema de embrague del Renault Clío



(a)

(b)

(c)

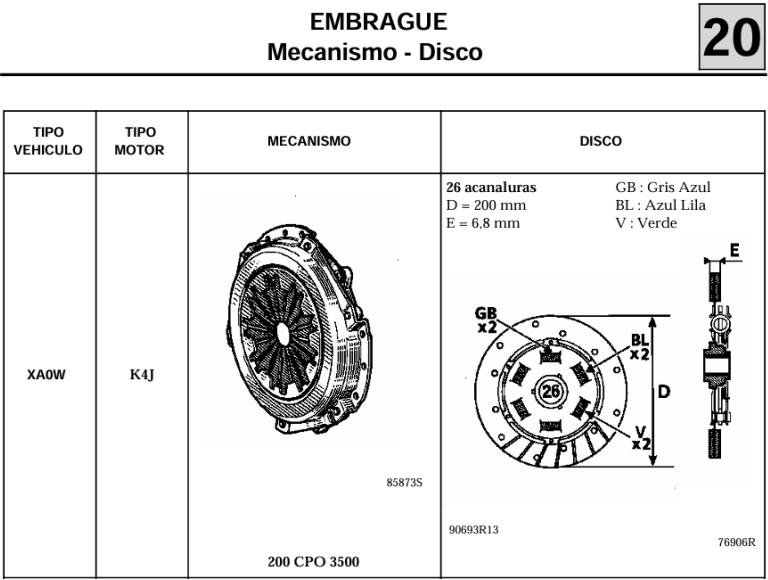
Nota: En la imagen de la izquierda (a) se muestra Disco original del Renault Clío, en la imagen central (b) está el Volante de inercia y en la derecha (c) el Plato original del Renault Clío, este conjunto de elementos, tienen un cálculo definido y basado en el confort y conducción que busca la suavidad en cambios a baja revoluciones del motor hacia la transmisión y las ruedas.

Investigación y recopilación de datos

La recopilación de datos y mediciones se realizó conforme a las especificaciones técnicas, dimensiones y detalles del plato disco y el volante de inercia, lo que asegura precisión y confiabilidad en la información obtenida. Asimismo, se consultaron los manuales técnicos y planos originales del fabricante para verificar cada parámetro y elaborar un diagrama detallado que mostrara las partes individuales del sistema. De manera conjunta, al final del proceso, se representó el sistema completo, permitiendo una mejor comprensión de su funcionamiento y su integración dentro del conjunto mecánico.

Figura 9

Medidas del fabricante del equipo original.



Configuración del entorno de trabajo en Inventor:

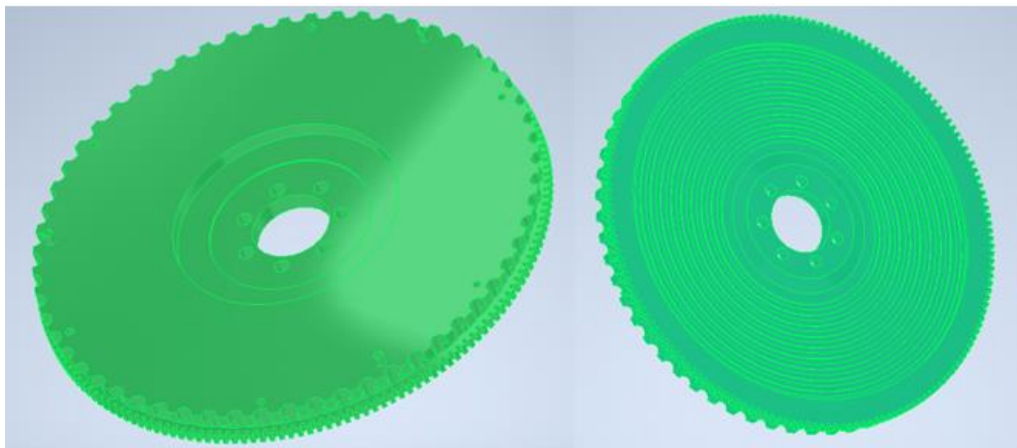
Para llevar a cabo el entorno de trabajo se procede a abrir Inventor y ajustar las unidades de medida a milímetros y el sistema de coordenadas según las necesidades del proyecto. Luego, se configura las distintas capas para diferentes elementos del dibujo, como líneas de referencia, cotas y detalles específicos del componente.

Dibujo del Volante de Inercia

- Construcción del contorno exterior: se ajusta el diámetro y se prepara la estructura cilíndrica de acuerdo con las especificaciones técnicas al dibujar el contorno exterior del volante de inercia usando la herramienta de círculo.
- Componentes de montaje: se dibujan los componentes de montaje utilizando herramientas de círculo y línea, asegurándose de que estén posicionados y alineados correctamente. Es importante mantener la precisión y simetría necesarias, ya que el montaje en el proceso de simulación posterior depende de estas características.
- Otros detalles internos: se utilizan las herramientas adecuadas para obtener la forma y el diseño preciso, determinando las verdaderas características del diseño tal como se muestra en la figura 10.

Figura 10

Diseño del volante de inercia



El diseño del volante fue hecho acorde las medidas tomadas del equipo original y validadas con las especificaciones del fabricante.

Dibujo del Plato y Disco

- Plato y disco contorno: utilizando una herramienta de círculo o polilínea, se traza el contorno del disco del plato respetando las dimensiones establecidas.
- Superficie de contacto: se detalla la superficie de contacto donde se aplicará el embrague mediante líneas y arcos.
- Ranuras y orificios: se añaden ranuras y orificios en el plato disco utilizando herramientas de círculo y línea, asegurándose de que todos los elementos estén adecuadamente posicionados y alineados.

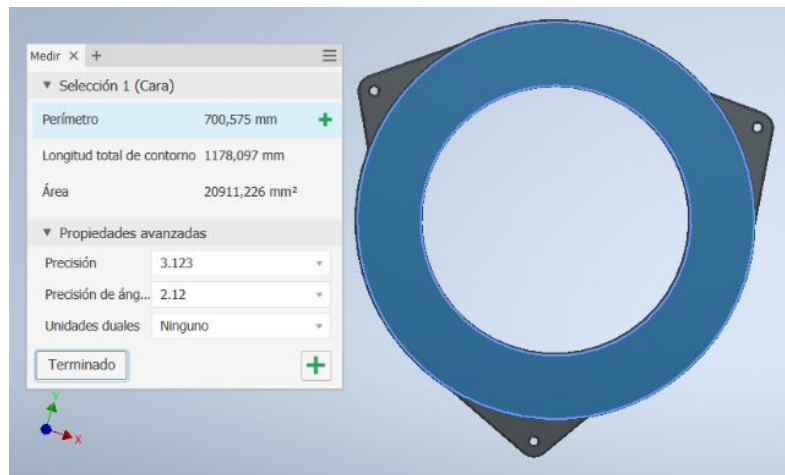
El diseño de un disco de embrague de competencia en Inventor sigue un proceso estructurado que abarca desde la preparación inicial hasta la presentación final del dibujo. Este proceso incluye la recopilación de las especificaciones técnicas, dimensiones y detalles del disco de embrague, basándose en los manuales técnicos y otros recursos confiables para obtener la información necesaria. Además, se ajustan las unidades de medida (milímetros) según los requerimientos del proyecto, garantizando precisión y coherencia en el diseño final.

De igual forma se procedió a configurar capas distintas para diferentes elementos del dibujo, como líneas de referencia, cotas y detalles específicos, usando herramientas de círculo para dibujar el contorno exterior del disco de embrague, estableciendo el diámetro adecuado según las especificaciones técnicas. También se dibujó los orificios de montaje en el disco de embrague utilizando herramientas de círculo y línea, asegurando de que estén correctamente alineados y posicionados de acuerdo con las especificaciones.

Se definió la superficie de contacto donde se acoplará el embrague utilizando líneas y arcos, en la que se añadió segmentos y ranuras en el disco de embrague utilizando herramientas de línea, arco y spline para obtener la forma precisa y mejorar el rendimiento del embrague. Para ello se usó herramientas de acotación para agregar dimensiones a todas las partes específicas del dibujo, incluyendo diámetros, radios y distancias entre

Figura 12

Medida de plato de la superficie de contacto.



Este no tiene una modificación puesto que acorde la ecuación de rozamiento y fricción esta área es parte de la transmisión de potencia al aplicar una liberación sobre el plato. En el equipo original se valida la superficie de rozamiento para generar los datos de análisis y posterior optimización. Para calcular el coeficiente de fricción (μ) en la superficie del kit de embrague del Renault Clio 1.4 durante los cambios de marcha a 3000 rpm, con un área del plato de 20911,226 mm² y una fuerza normal de 6000 N, se utiliza la relación entre la fuerza de fricción y la fuerza normal. Sin embargo, para esto es necesario conocer o estimar la fuerza de fricción (F_f). A continuación, se detallan los pasos y la metodología que podrían utilizarse:

Datos Proporcionados

- Área del plato de presión (A_p): 20911,226 mm²
- Área de cada superficie del disco (A_d): 1651,30 mm² (con cuatro superficies por lado, totalizando ocho superficies)
- Fuerza Normal (N): 6000 N
- Velocidad del motor (ω): 3000 rpm

En base a los datos proporcionados, se procede a calcular el área total de contacto del Disco. Cabe mencionar que el disco de embrague tiene ocho superficies de contacto (cuatro en cada lado), por lo que se procede a establecer las siguientes ecuaciones:

$$A_{totaldisco} = 8 \times A_d \quad (8)$$

$$A_{totaldisco} = 8 \times 1651,30 \text{ mm}^2 \quad (9)$$

$$A_{total_disco} = 13210,4 \text{ mm}^2 \quad (10)$$

Conversión de Unidades

Convertir el área del plato de presión a metros cuadrados (m²):

$$A = 20911,22 \text{ mm}^2 \times \frac{1\text{m}^2}{1,000,000 \text{ mm}^2} = 0,020911226 \text{ m}^2 \quad (11)$$

Convertir la velocidad del motor de revoluciones por minuto (rpm) a radianes por segundo:

$$\omega = 3000 \text{ rpm} \times \frac{2\pi \text{ rad}}{60\text{s}} = 3000 \times \frac{\pi}{30} = 100\pi \approx 314,16 \text{ rad/s} \quad (12)$$

Fuerza de Fricción:

La fuerza de fricción (F_f) es la fuerza que se genera debido al contacto entre las superficies del embrague y se calcula con la siguiente fórmula:

$$F_f = \mu \cdot N \quad (13)$$

Para encontrar el coeficiente de fricción (μ), se necesita estimar la fuerza de fricción. En un escenario ideal, esta fuerza se puede medir experimentalmente. Sin embargo, si no se tiene acceso a datos experimentales, se utilizarían los valores típicos del coeficiente de fricción para materiales similares.

$$\mu = \frac{F_f}{N} = \frac{1750\text{N}}{6000\text{N}} = 0,292 \quad (14)$$

Torque Transmitido (T)

El torque transmitido por el embrague puede ser relacionado con la fuerza de fricción y el radio promedio del disco de embrague. Para un disco de embrague típico, el radio promedio puede estimarse como la media del radio interior (r_i) y el radio exterior (r_o), suponiendo los siguientes valores típicos:

$$\text{Radio interior: } 75 \text{ mm} (0,0075 \text{ m}) \quad (15)$$

$$\text{Radio exterior: } 107,5 \text{ mm} (0,1075 \text{ m}) \quad (16)$$

$$r = \frac{r_i + r_o}{2} = \frac{0,0075 + 0,1075}{2} = 0,09125 \text{ m} \quad (17)$$

El torque (T) es:

$$T = F_f \cdot r \quad (18)$$

Potencia Transmitida (P)

La potencia (P) transmitida por el motor se relaciona con el torque y la velocidad angular:

$$P = T \cdot \omega \quad (19)$$

Estimación de la Fuerza de Fricción

Se supone que la potencia del motor del Renault Clio 1.4 es de 75 kW (100 hp) a 6000 rpm, un valor típico para este tipo de vehículos. Por lo que, a 3000 rpm, la potencia sería aproximadamente la mitad de la potencia máxima, es decir, 37,5 kW (37500 W).

Utilizando la relación de potencia:

$$P = T \cdot \omega \quad (20)$$

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{37500}{314,16 \frac{\text{rad}}{\text{s}}} \approx 119,4 \text{ Nm} \quad \text{A} \quad (21)$$

Ahora sabiendo que:

$$T = F_f \cdot r \quad (22)$$

Se puede resolver para F_f :

$$F_f = \frac{T}{r} = 119,4 \frac{Nm}{0,09125m} \approx 1308,2 N \quad (23)$$

Calcular el coeficiente de fricción:

Finalmente, utilizando la relación:

$$\mu = \frac{F_f}{N} = \frac{1308,2N}{6000N} \approx 0,218 \quad (24)$$

El coeficiente de fricción (μ) en la superficie del kit de embrague del Renault Clio 1.4 durante los cambios de marcha a 3000 rpm es aproximadamente 0,218. Los valores utilizados para el torque y la potencia son estimaciones y deberían verificarse con datos específicos del motor y condiciones de operación reales. Por lo tanto, el cálculo se basa en condiciones ideales y puede verse afectado por factores como el desgaste del embrague, la temperatura y otros elementos operativos. Para obtener una precisión óptima, es necesario realizar mediciones experimentales específicas que consideren estas variables, permitiendo ajustar los resultados a las condiciones reales de funcionamiento del vehículo y mejorar la fiabilidad de los datos obtenidos.

Figura 13

Medidas de la fibra de embrague acorde al diseño realizado.



Esto permite garantizar la liberación en la prueba de funcionamiento en la prensa con la presión seleccionada, asegurando que el sistema opere de manera eficiente y segura. Cabe recalcar que se realizó el Test de presión en prensa para verificar el comportamiento del conjunto bajo condiciones controladas, evaluando su respuesta y rendimiento ante la carga aplicada. Además, este procedimiento permitió detectar posibles irregularidades en el mecanismo y realizar los ajustes necesarios para optimizar su desempeño antes de su implementación final.

Figura 14

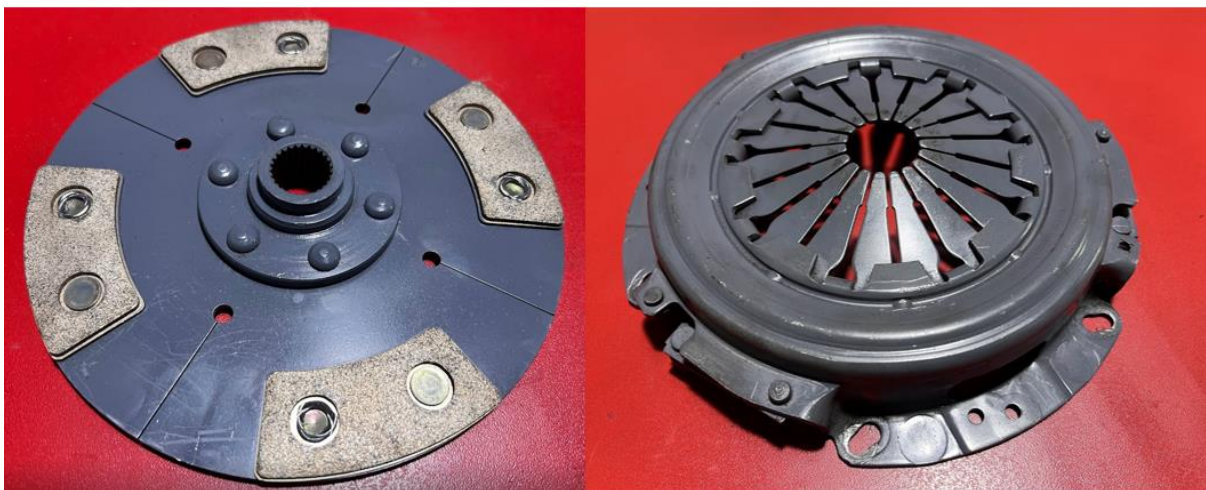
Liberación del disco de embrague con presión.



Esto permite validar el funcionamiento de la optimización de las medidas fabricadas. Finalmente, se realiza una evaluación del sistema antes del montaje para asegurar el funcionamiento adecuado antes de su instalación, aquí se incluye la prueba de presión de los resortes del plato para verificar que el disco se libere correctamente en el recorrido requerido, permitiendo así el ingreso de las marchas tal como se aprecia en la figura 15:

Figura 15

Evaluación del sistema antes del montaje



Una vez finalizada la elaboración del plato y disco optimizado acorde la imagen de la figura 14 está lista para la instalación.

Simulación.

Se elabora una simulación en SimSolid del plato disco y volante de embrague para obtener los resultados de funcionamiento. A continuación, se detalla el proceso:

Crear o importar el modelo 3D:

Se usó un software de CAD como Inventor, para crear el modelo 3D del plato disco y volante de embrague, asegurándose de que el modelo esté completamente detallado e

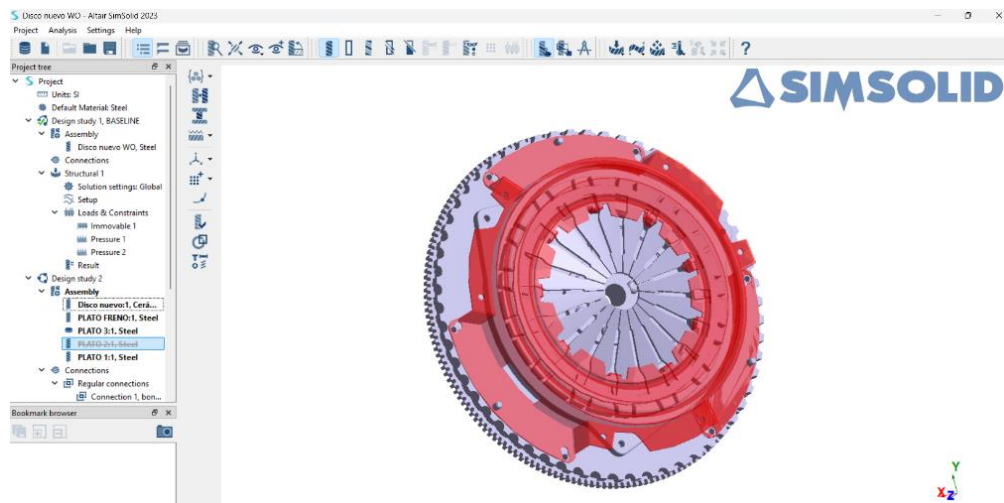
incluya todas las características relevantes, como orificios, ranuras y superficies de contacto.

Importar el modelo 3D:

Se abre SimSolid y se selecciona la opción para importar el modelo CAD. Posteriormente, se importa el archivo del plato disco y volante de embrague en formatos como STEP, IGES, STL, entre otros.

Figura 16

Modelo 3D



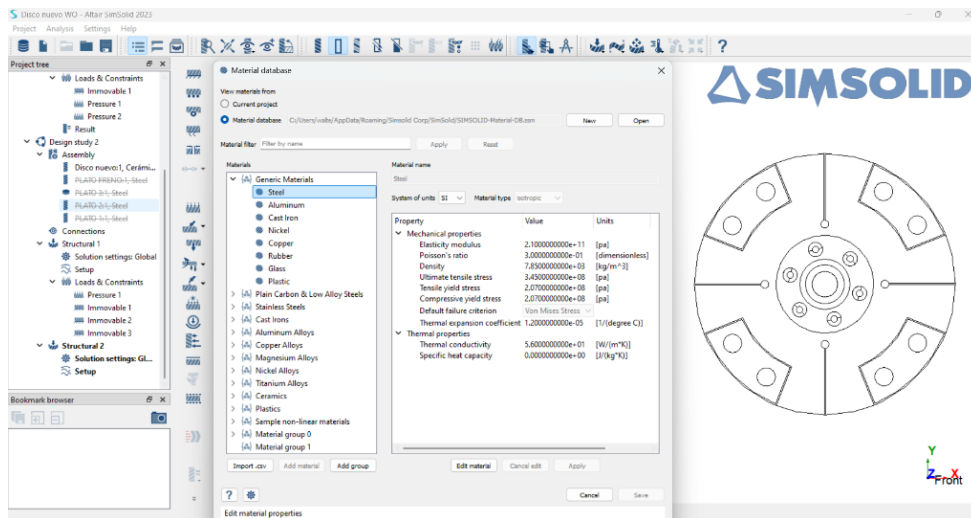
Definición del Material

Se deben definir los materiales para cada componente del ensamblaje en SimSolid, asegurando que cada pieza cuente con las propiedades adecuadas para el análisis estructural. Para ello, se selecciona el material más apropiado desde la biblioteca de materiales de SimSolid, considerando factores como la aplicación específica y las condiciones de operación. Además, se especifican detalladamente las propiedades mecánicas, incluyendo el módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson, densidad, límite de resistencia y conductividad térmica, entre otros parámetros relevantes. Esta asignación de

materiales permitió obtener resultados precisos en la simulación y garantizar un desempeño óptimo del sistema bajo diversas condiciones de carga.

Figura 17

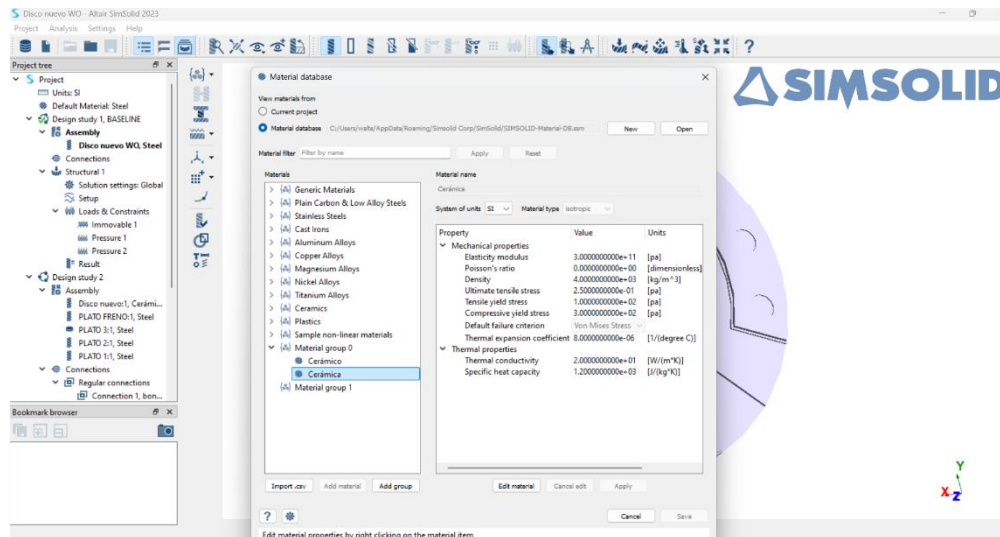
Definición del material



Para iniciar el proceso de simulación y obtener los resultados presentados posteriormente, se realizaron los cálculos necesarios para la optimización del disco de embrague dentro del mecanismo de embrague, considerando la distribución de esfuerzos, la disipación de calor y la resistencia al desgaste. Además, se ajustaron los parámetros de diseño para mejorar la eficiencia y durabilidad del componente, asegurando un desempeño óptimo en condiciones de operación exigentes.

Figura 18

Creación del material



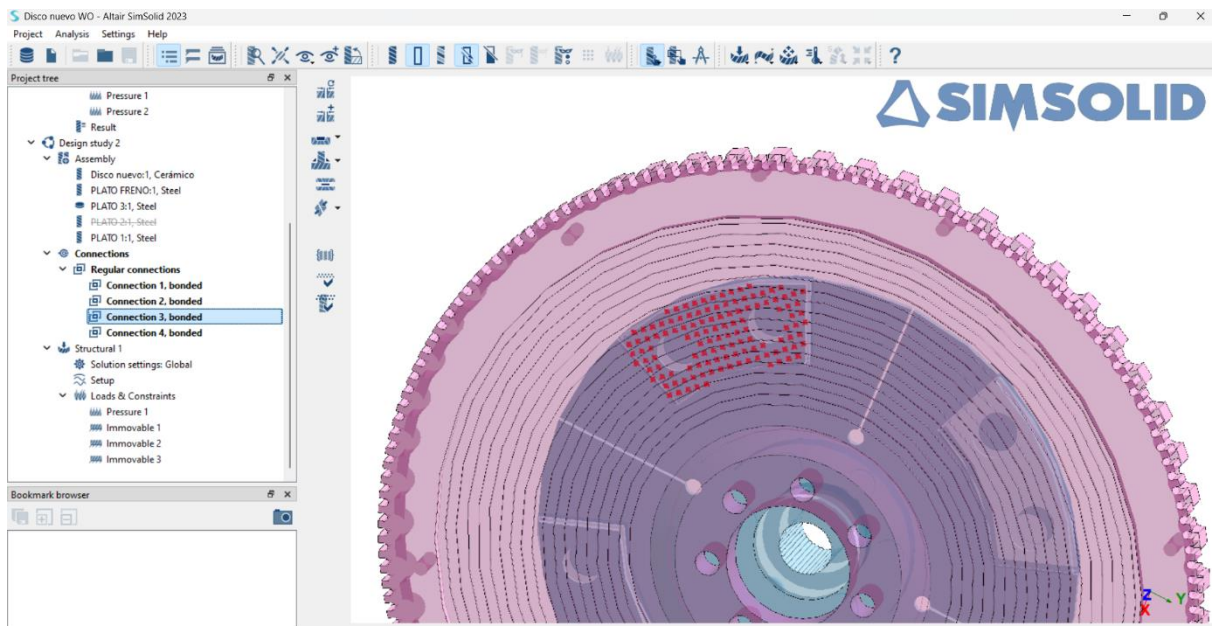
Se crea el material en función de las características del material seleccionado para la construcción del disco de embrague, asegurando que sus propiedades térmicas y de resistencia sean adecuadas para las exigencias del sistema. Para ello, se consideran factores como la conductividad térmica, la capacidad de disipación de calor y la resistencia a la fricción y al desgaste, propios de la cerámica utilizada. Esto permite garantizar un rendimiento óptimo del disco de embrague, maximizando su durabilidad y eficiencia en condiciones de alta exigencia operativa.

Configuración de las Condiciones de Borde

Se definen las condiciones de fijación del modelo, como los puntos donde el volante se conecta al motor y el plato disco al sistema de embrague, asegurándose de que se apliquen las condiciones de borde adecuadas para simular correctamente el entorno operativo del ensamblaje. Además, se establecen restricciones que representen con precisión los grados de libertad del sistema, evitando desplazamientos no deseados y asegurando una distribución realista de las cargas.

Figura 19

Configuración de las condiciones de borde



El modelo, previamente ensamblado en Autodesk Inventor, fue importado a SimSolid con condiciones de fijación definidas para cada componente de manera individual. En SimSolid se implementaron contactos de tipo *surface-to-surface* con condiciones de fricción predefinidas, lo que permitió replicar con exactitud las holguras y tolerancias existentes en las interfaces de montaje. Este enfoque asegura que la interacción entre las piezas se simule fielmente, garantizando una transferencia de cargas y movimientos acorde a las condiciones reales de operación del sistema.

Aplicación de Cargas

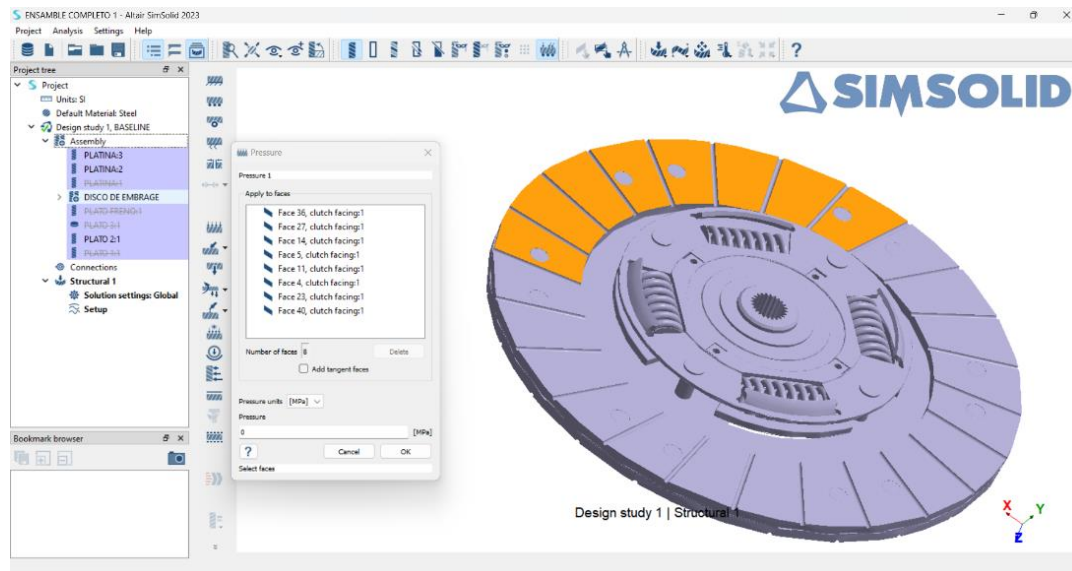
Se aplican las cargas operativas que el ensamblaje experimentará durante su funcionamiento, lo cual puede incluir fuerzas axiales, momentos de torsión y presiones. Es importante asegurarse de que estas cargas sean representativas de las condiciones reales de operación del embrague. A continuación se presenta una tabla con las cargas operativas aplicadas en la simulación, utilizando los datos proporcionados en el análisis previo:

Tabla 3*Aplicación de cargas*

Carga Aplicada	Símbolo	Valor Recomendado	Unidad	Descripción
Momento de Torsión	T	150 – 250	Nm	Torque transmitido durante la operación del embrague.
Presión de Contacto	p	0.5	MPa	Presión aplicada en la interfaz entre el disco y el plato de presión.
Fuerza Axial (Normal)	F_n	5.14 – 8.56	kN	Fuerza normal calculada mediante la relación $T = \mu \cdot F_n \cdot r$, considerando $r = 0.1$ m y un coeficiente $\mu = 0.292$.

Esta tabla garantiza que las cargas aplicadas en la simulación sean representativas de las condiciones reales de operación del sistema de embrague, asegurando la validez del análisis estructural.

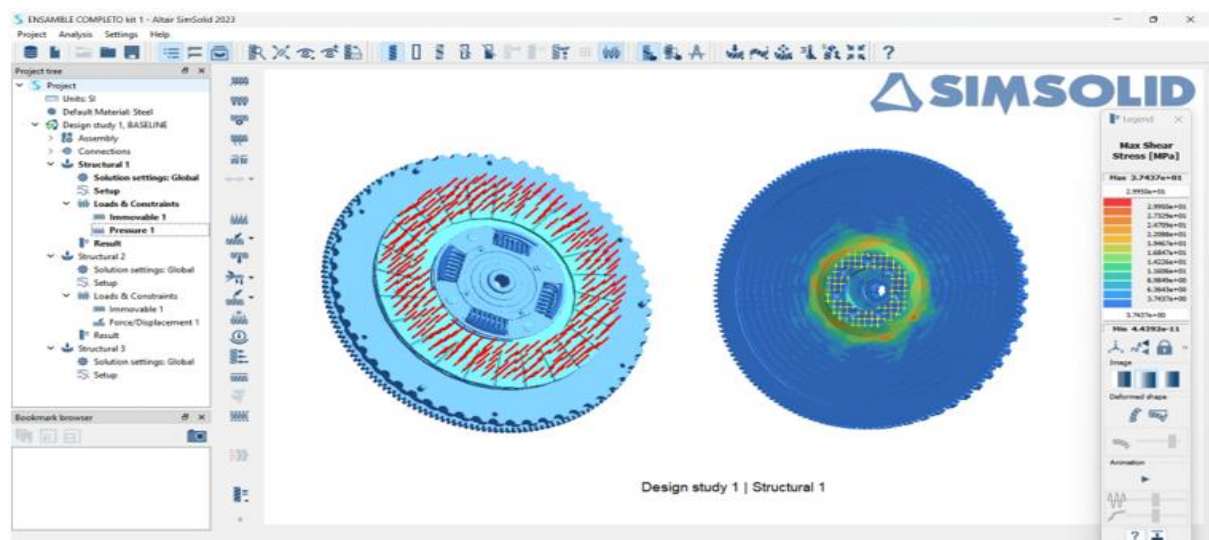
Figura 20*Aplicación de cargas*



Se procedió a seleccionar la superficie una a una para tomar con precisión las caras del disco en las que se aplica la presión en el disco original. Este proceso permitió garantizar una correcta identificación de las áreas de contacto y carga, asegurando que la distribución de la presión en la simulación reflejara con exactitud las condiciones reales de funcionamiento. Además, se verificó que la selección de superficies fuera coherente con los puntos de interacción del sistema, optimizando así la precisión del análisis.

Figura 21

Aplicación de cargas en el disco y volante de inercia.

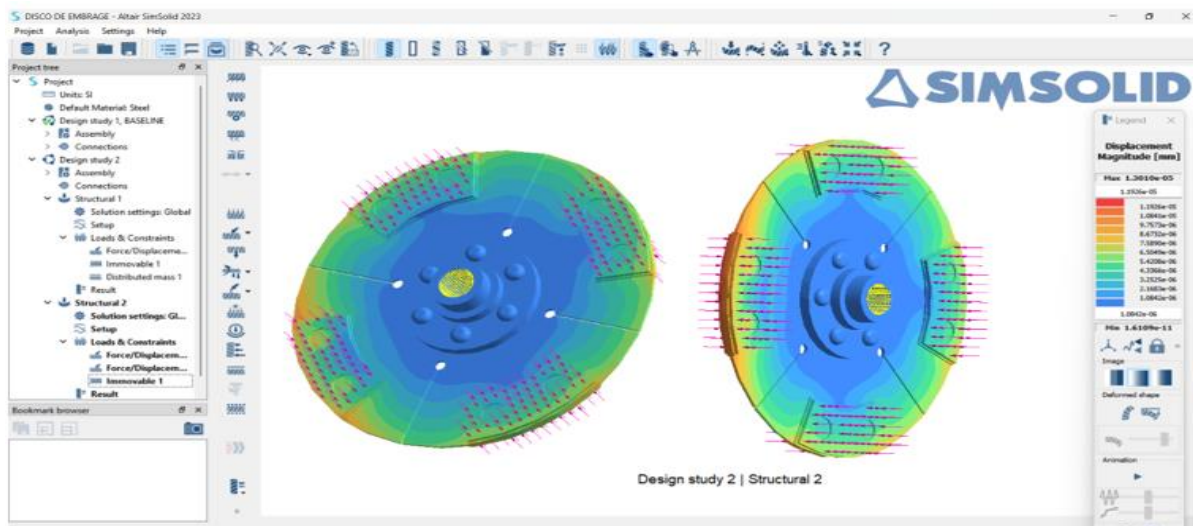


Configuración del Análisis

Se seleccionó el tipo de análisis a realizar en SimSolid, asegurando que se adapte a las condiciones de carga y funcionamiento del sistema. Durante el estudio, se determina que el esfuerzo máximo en operación del equipo original es de 2.7 MPa, lo que indica un margen de seguridad respecto a la tolerancia máxima de 3.7 MPa. Este análisis permite evaluar la eficiencia estructural del componente, identificando posibles mejoras en el diseño y garantizando que el disco de embrague opere dentro de los límites de seguridad establecidos, evitando fallos prematuros y optimizando su rendimiento.

Figura 22

Configuración del análisis



Se realizó un análisis aplicando fuerzas en ambas caras de las pastillas del disco de embrague, considerando la fijación del elemento. Este procedimiento permitió determinar los puntos en los que el material tabla de los resultados del análisis de cargas.

Tabla 4

Análisis de aplicación de fuerzas

Parámetro	Valor	Unidad	Descripción
Fuerza Axial Aplicada	5.14 – 8.56	kN	Cargas normales aplicadas en cada cara de la pastilla, representando las condiciones operativas del embrague.
Esfuerzo Máximo en la Pastilla	65	MPa	Valor máximo de tensión alcanzado en la zona crítica del material durante la simulación, asegurando que se mantenga dentro de los límites de seguridad.
Presión de Contacto	0.5	MPa	Presión uniforme aplicada sobre la superficie de la pastilla, la cual garantiza una adecuada distribución de la carga y una correcta transmisión del par.

Ejecución de la Simulación

Durante la ejecución de la simulación en SimSolid se establecen las condiciones operativas reales del ensamblaje del disco de embrague ya que se imponen cargas representativas, tales como fuerzas axiales, momentos de torsión y presiones de contacto. Además de definir las condiciones de soporte y fijación que emulan la sujeción del componente en servicio, también el software realiza cálculos avanzados empleando métodos basados en elementos finitos y técnicas sin malla para determinar la distribución de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos en el material.

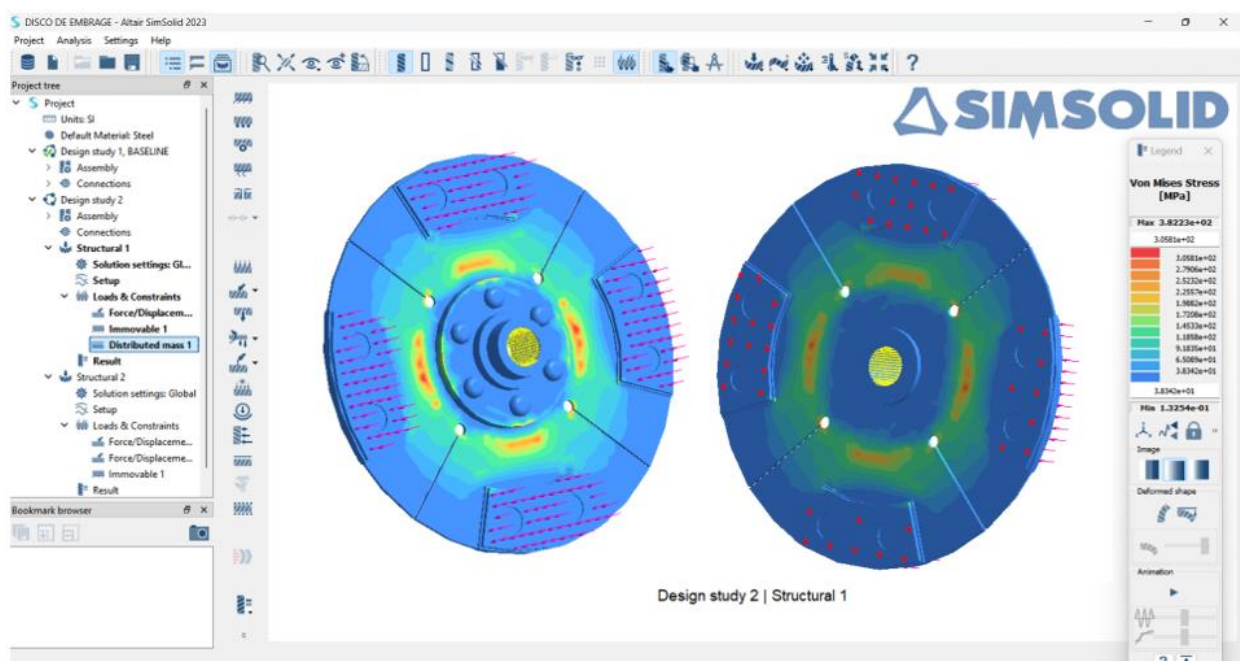
Cabe mencionar que los análisis incluyen la resolución del equilibrio de fuerzas, la verificación de los desplazamientos máximos permitidos, y el cálculo de parámetros tales como el coeficiente de fricción y la presión de contacto.

Esta metodología hace que la respuesta del ensamblaje, bajo las cargas aplicadas, se ajuste a los márgenes de seguridad establecidos, validándose el proceso mediante la

convergencia de la solución y la confirmación de que el modelo opera sin errores y bajo condiciones representativas de su funcionamiento real. Además, se realizan verificaciones adicionales para identificar posibles puntos de falla o zonas críticas, asegurando que el diseño del disco de embrague sea robusto y fiable en condiciones de operación extremas, lo que contribuye a la optimización del rendimiento y la seguridad del sistema.

Figura 23

Simulación disco modificado



Se evaluó la tensión en el material, determinando su magnitud para analizar la respuesta del componente a partir del criterio del esfuerzo de Von Mises, el cual se fundamenta en la teoría de la energía de distorsión. Este criterio permite cuantificar la acumulación de energía de deformación en el material y establecer un umbral de fluencia. De esta manera, se comprobó que las tensiones inducidas por las cargas aplicadas permanecen dentro de los límites elásticos, garantizando la integridad estructural y el funcionamiento seguro del componente.

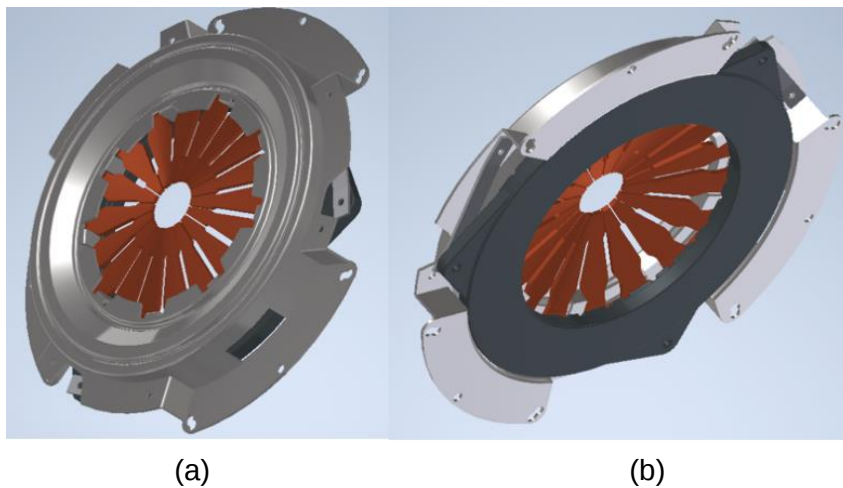
Resultados

Prototipo Virtual del sistema de Embrague

En la figura 24 se muestra el resultado final del ensamble del palto embrague original y modificado del Renault Clío que fue utilizado para la simulación.

Figura 24

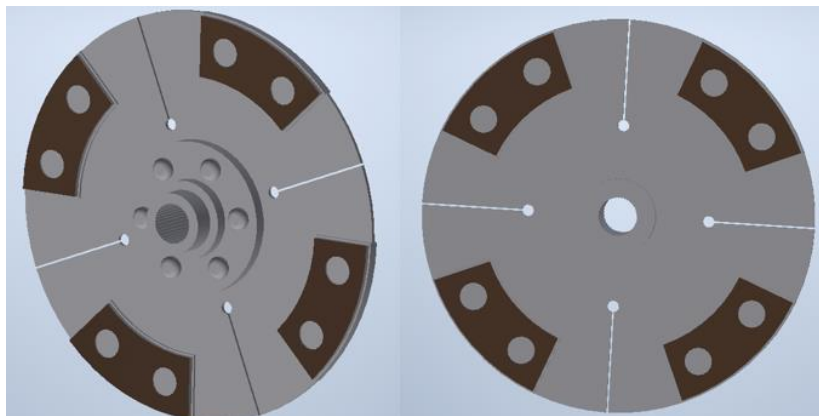
Diseño del plato original sin modificación del elemento.



En la figura 24 se muestra el prototipo virtual del disco de embrague optimizado apreciando su diseño de los dos lados del elemento y los cambios en las pastillas de contacto.

Figura 25

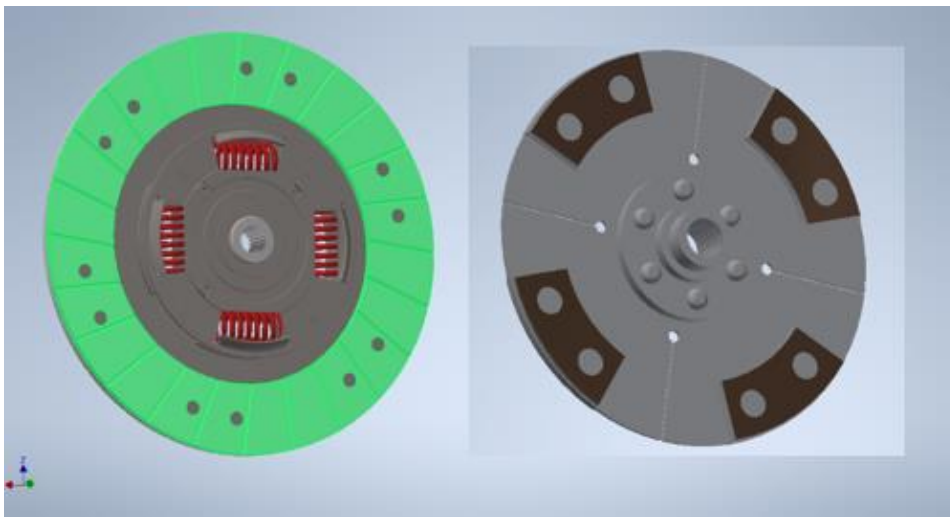
Diseño explotado del sistema de embrague optimizado



En la figura 26 se aprecia la diferencia entre el equipo original y el optimizado, destacándose la clara reducción de la superficie de contacto como el principal cambio. Esta modificación se realizó considerando la máxima reducción posible, con el objetivo de obtener las eficiencias buscadas en el proceso de eliminar la pérdida de transmisión de potencia durante los cambios de marcha en la competencia de rally.

Figura 26

Disco original vs disco modificado

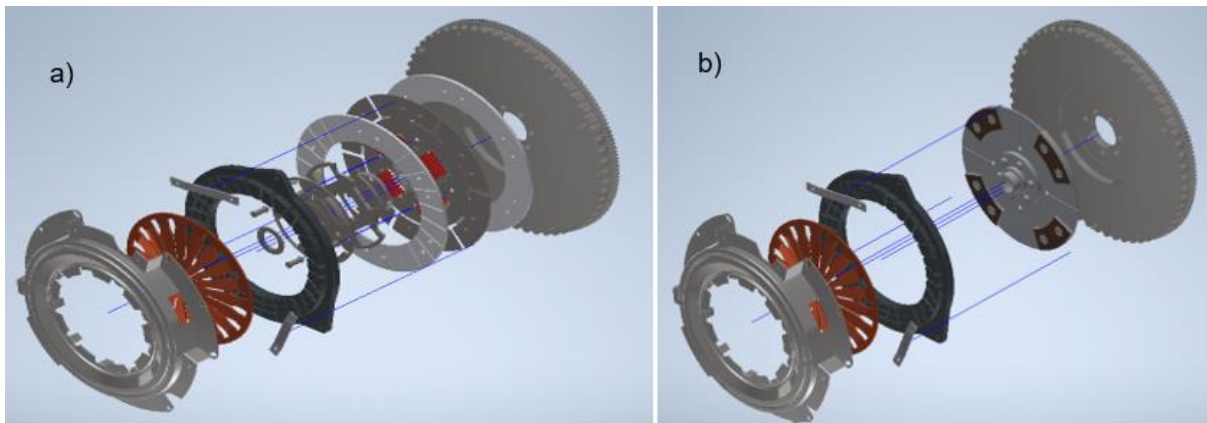


Vista explotada

Se considera conveniente, para una mejor comprensión y con el fin de que se pueda apreciar en detalle todos los componentes del sistema de embrague, colocar en la figura 27 las dos vistas correspondientes. En el lado izquierdo se presenta la vista explotada original (a), que muestra de manera detallada la disposición de los elementos del sistema tal como se encuentra en su configuración original. A la derecha, se ubica la vista modificada (b), en la que se destacan los cambios y optimizaciones realizados en el diseño, permitiendo una comparación clara entre ambos sistemas. Esta disposición facilita la comprensión de las modificaciones realizadas y resalta las diferencias clave en la estructura y el rendimiento del embrague optimizado.

Figura 27

Diseño explotado del sistema de embrague original y modificado



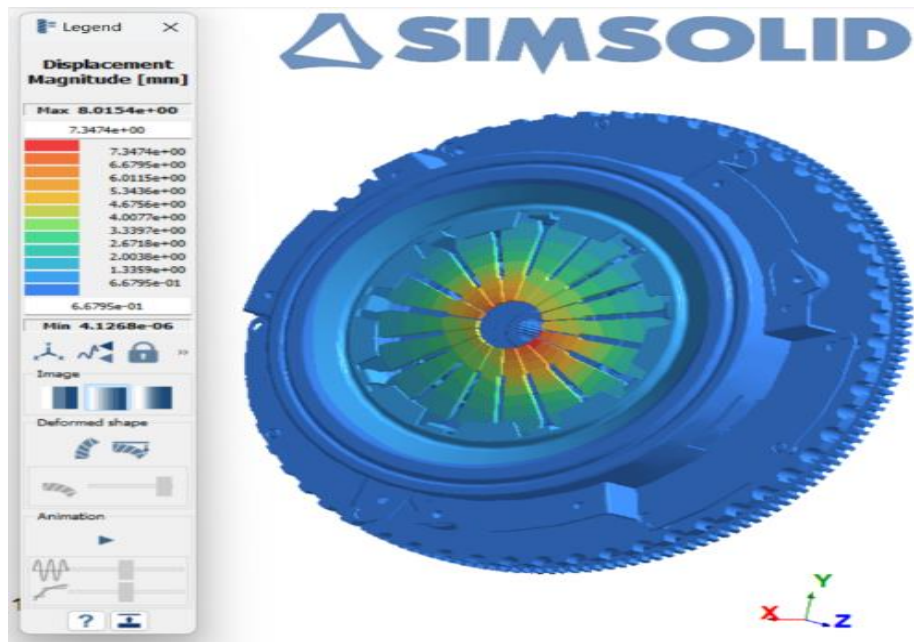
Interpretación de Simulación

Una vez completada la simulación, se revisan detenidamente los resultados generados, que pueden incluir desplazamientos, tensiones, deformaciones y factores de seguridad, con el objetivo de evaluar el desempeño del diseño bajo las condiciones de carga aplicadas. Se utilizan las herramientas avanzadas de visualización de SimSolid para examinar cada detalle de los resultados, permitiendo una evaluación precisa y comprensible. A través de la generación de gráficos, animaciones y reportes detallados, se documentan los hallazgos y se facilita la interpretación de los datos obtenidos. Estos informes no solo proporcionan información sobre el comportamiento del sistema, sino que también sirven como base para tomar decisiones en el que haya que realizar posibles ajustes o mejoras en el diseño del ensamblaje.

En la figura 28 se presenta la simulación del desplazamiento de las horquillas del plato del embrague, como resultado de la fuerza aplicada. Esta fuerza permite el trabajo de liberación del disco de embrague del volante de inercia, facilitando la separación del movimiento y, en consecuencia, el cambio de marchas en la caja de cambios.

Figura 28

Simulación plato original.



En la figura 28 se comparan el disco original y el disco modificado. Posteriormente, se realizan simulaciones en SimSolid, lo que permite analizar y comparar los resultados obtenidos. Estos datos servirán para demostrar que el sistema ha sido optimizado de manera efectiva y los cambios son claves para el desempeño acorde a los requerimientos del auto de competencia, la modificación está completa. El disco modificado tiene 8 pastillas con distinta estructura de material, área diferente al conjunto original está separado una de la otra para dar menor área de contacto sobre los elementos de fricción como son el volante de inercia y el plato de embrague.

Para un coeficiente de fricción de 0.292, los materiales semimetálicos o compuestos orgánicos son los más adecuados, ya que ofrecen un buen balance entre fricción controlada, durabilidad y resistencia al desgaste sin generar excesivo calor, lo cual es ideal para vehículos de uso diario o aplicaciones moderadas, pero no necesariamente para competiciones de alto rendimiento. Esta es una tabla comparativa de materiales de fricción

utilizados en discos de embrague, con énfasis en el coeficiente de fricción de 0.292 y sus características clave:

Tabla 5

Tabla comparativa de materiales de fricción

Material	Composición	Coeficiente de Fricción	Aplicación	Ventajas	Desventajas
Material Orgánico (OEM)	Mezcla de resinas, fibras sintéticas, cauchos, y metales blandos	0.28 - 0.35	Vehículos de uso diario (normales)	- Menor desgaste - Operación silenciosa - Buena respuesta al tacto	- Menor capacidad de disipación de calor - No apto para altas temperaturas
Material Semi-Metálico	Combinación de metales como hierro, cobre, y materiales orgánicos	0.28 - 0.35	Vehículos comerciales y de gama media	- Buena durabilidad - Resistencia al desgaste - Mejor manejo de temperaturas	- Mayor ruido y vibración - Pueden ser menos suaves que los orgánicos
Material Compuesto de Kevlar	Kevlar combinado con resinas y otros compuestos orgánicos	0.28 - 0.30	Vehículos deportivos de gama media	- Excelente resistencia al desgaste - Resistencia a temperaturas moderadas - Menor transferencia de calor	- No apto para temperaturas extremadamente altas - Menor rendimiento en condiciones extremas
Material Carbono-Carbono	Combinación de fibras de carbono y resinas de carbono	0.30 - 0.35	Vehículos de alto rendimiento (competencia)	- Excelente manejo de calor - Larga durabilidad - Alto rendimiento	- Costoso - Mayor tendencia al desgaste por uso excesivo en condiciones normales
Material Metálico	Aleaciones metálicas	0.35 - 0.45	Vehículos de alto	- Alta durabilidad - Resistencia	- Puede generar más ruido

(Bronce, Hierro)	como bronce y hierro	rendimiento y competición	a altas temperaturas	- Mayor desgaste de los discos
-------------------------	----------------------	---------------------------	----------------------	--------------------------------

Valores del material utilizado.

Cabe mencionar que se hizo uso de la referencia del cálculo inicial para la selección del material para elaborar el disco de embrague optimizado.

El material semimetálico ha sido seleccionado para el diseño del disco de embrague debido a su óptimo balance entre resistencia mecánica, disipación térmica y durabilidad operativa. Este material integra metales como cobre y hierro con fibras cerámicas y resinas, lo que permite minimizar el desgaste en componentes críticos como el volante de inercia y el plato de presión, asegurando una transmisión del par eficiente y confiable. Dichas propiedades son esenciales para aplicaciones en transmisiones manuales sometidas a cambios de marcha frecuentes y variaciones térmicas significativas. En este estudio se aplica este enfoque en el diseño del disco de embrague para el Renault Clio 1.4, un modelo ampliamente comercializado en Sudamérica, que opera bajo condiciones exigentes tanto en entornos urbanos como interurbanos. Este vehículo se beneficia de la capacidad del material para soportar cargas térmicas y mecánicas elevadas, lo que se traduce en una mayor fiabilidad y rendimiento del sistema de embrague.

Tabla 6

Tabla de materiales para disco de embrague semimetálico

Propiedad	Unidad	Valor Recomendado	Descripción
Material Base	-	Compuesto Semimetálico	Mezcla de metales (cobre, hierro) y materiales orgánicos o cerámicos.

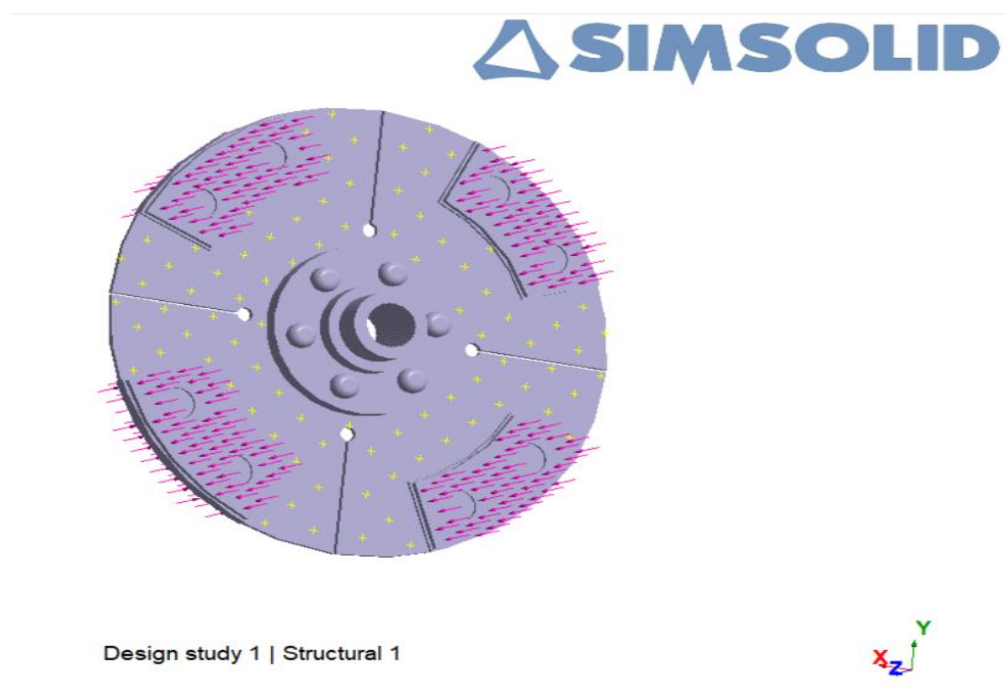
Propiedad	Unidad	Valor Recomendado	Descripción
Densidad	kg/m ³	3500 - 4000	Determina la masa por unidad de volumen.
Módulo de Elasticidad	GPa	200 - 280	Indica la rigidez del material frente a la deformación.
Relación de Poisson	-	0.22 - 0.25	Relación entre la deformación longitudinal y lateral.
Resistencia a la tracción	MPa	80 - 120	Límite de resistencia antes de la fractura.
Resistencia a la compresión	MPa	200 - 300	Capacidad del material para soportar cargas de compresión.
Conductividad térmica	W/(m·K)	10 - 25	Facilidad del material para conducir el calor.
Capacidad calorífica	J/(kg·K)	900 - 1100	Energía requerida para aumentar la temperatura del material.
Coeficiente de expansión térmica	1/°C	6e-6 - 7.5e-6	Expansión del material debido a cambios de temperatura.

Propiedad	Unidad	Valor Recomendado	Descripción
Dureza	Vickers (HV)	1300 - 1600	Resistencia a la penetración o rayado.
Fricción dinámica	-	0.25 - 0.3	Coeficiente de fricción en movimiento (estimado a partir del estático).
Temperatura máxima de operación	°C	350 - 450	Límite térmico antes de la degradación del material.

Simulación del nuevo disco de embrague.

Figura 29

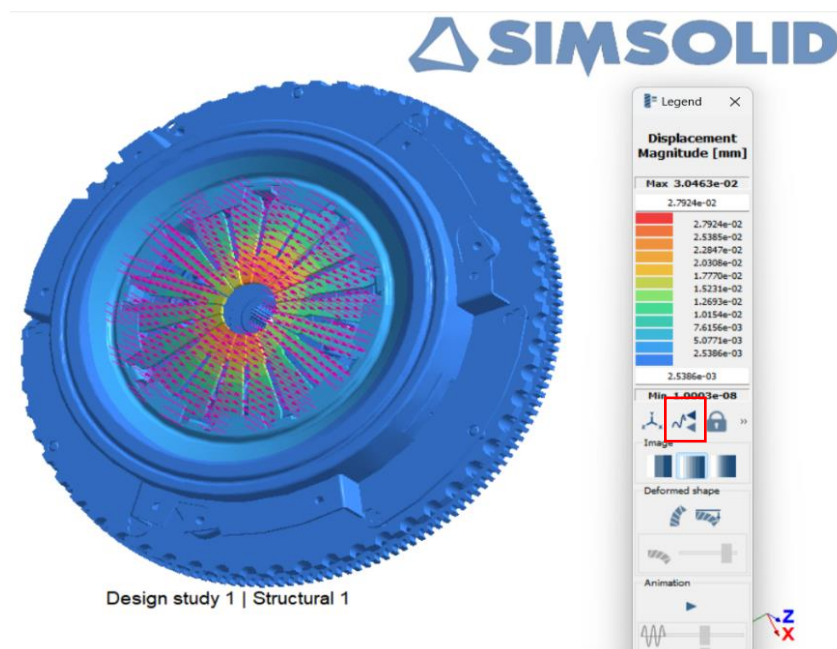
Simulación de disco nuevo.



En la figura 29 se muestra la simulación de disco modificado en el cual se aplica las fuerzas de salida y entrada de 6000 N para determinar si las superficies prestan la resistencia requerida para tener un óptimo trabajo con coeficiente de fricción calculado con una RPM promedio de 3.000 Rpm.

Figura 30

Simulación desplazamiento



En la figura 30 se simula la magnitud de desplazamiento con una medida de 2.79×10^{-10} mm que cuando el valor máximo permitido es de 3.04×10^{-10} mm lo cual es básico para la operación y garantiza el funcionamiento del mecanismo tanto con el disco original como con el modificado esta simulación se valida con el ejercicio práctico.

El análisis numérico mediante métodos de elementos finitos evidenció que la deformación máxima del sistema es de 2.79×10^{-10} mm, lo cual se encuentra por debajo del umbral crítico de 3.04×10^{-10} mm establecido para el correcto funcionamiento del mecanismo. Este resultado, corroborado mediante pruebas prácticas, garantiza que tanto el disco de embrague original como la versión modificada operan dentro de condiciones seguras y eficientes, respaldando la integridad estructural del sistema de embrague en aplicaciones reales (ANSYS, 2020).

Figura 31

Simulación plato original – esfuerzo máximo

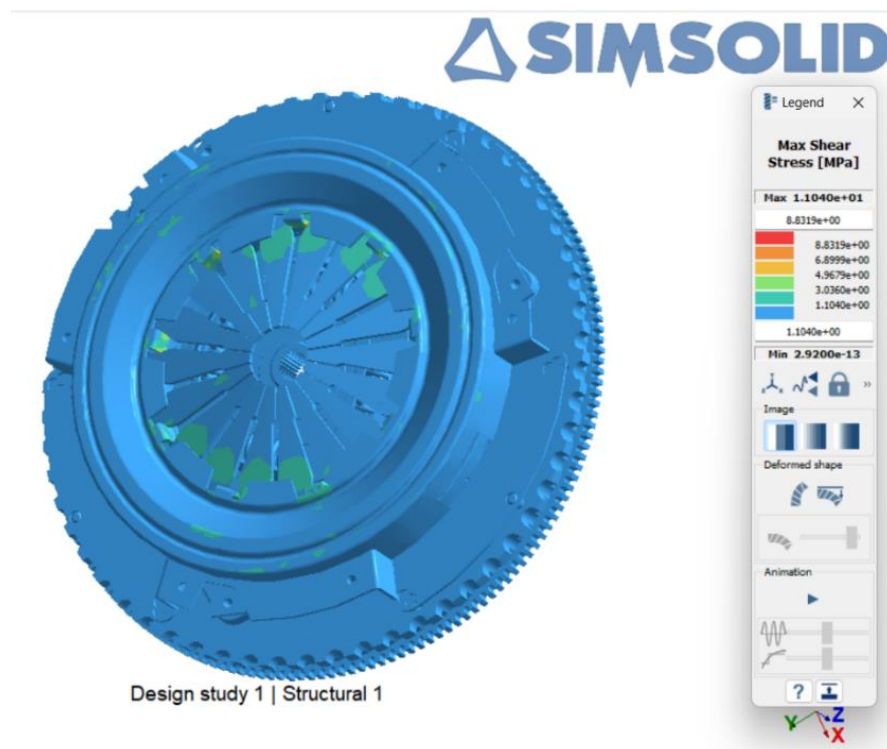
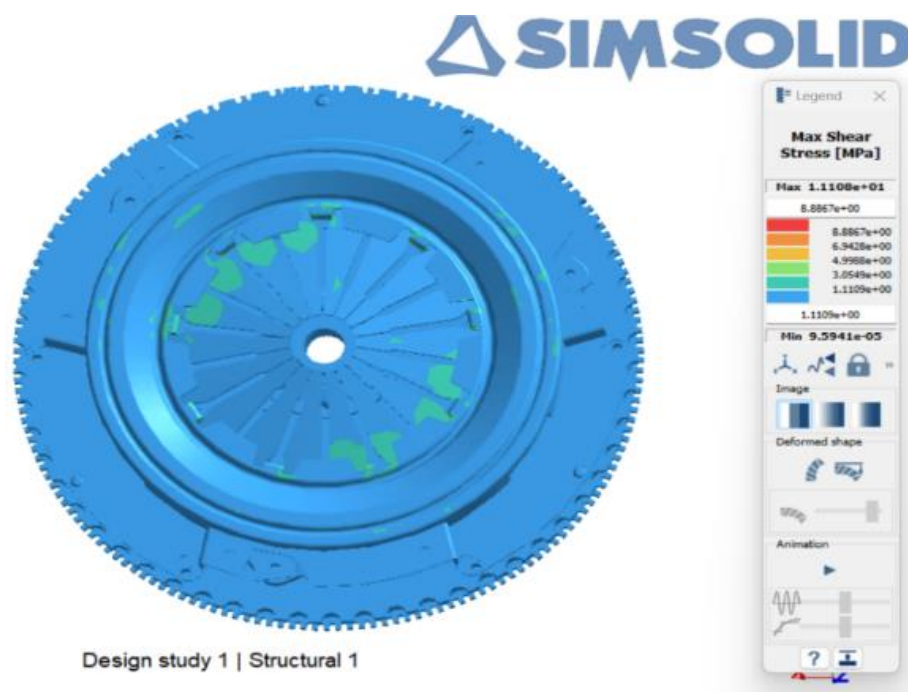


Figura 32

Simulación plato - esfuerzo máximo.



Resultados Coeficiente de Fricción

Con respecto al coeficiente de fricción (μ) en la superficie del kit de embrague del Renault Clio 1.4 es aproximadamente 0,292. Tanto en el cálculo como en las simulaciones se encontraron tendencias, prácticas y áreas de oportunidad en el rediseño del embrague para vehículos de rally para su posterior aplicación y validación de resultados versus el sistema original. El coeficiente de fricción obtenido al ser de 0.292, proporciona una mayor fuerza de fricción (1752 N), de manera que, se tiene una mayor capacidad para transmitir el torque sin que suceda ningún tipo de movimiento que genere problemas, lo que significa que se tiene una mayor eficiencia en la transferencia de potencia, principalmente cuando hay cargas más altas. También es importante tomar en cuenta que en este escenario se genera un mayor desgaste de las superficies de contacto del embrague. Mientras que en comparación con un menor coeficiente de fricción (0.218), este genera una menor fuerza de fricción (1308 N), lo que a su vez implica una menor capacidad para transmitir torque, siendo así menos eficiente en la transferencia de potencia y más susceptible al deslizamiento bajo cargas más altas.

Tabla 7

Resultados del coeficiente de fricción

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Fórmula/Explicación
Área del Plato de Presión	A_{pAp}	20,911.26	mm ²	Dato proporcionado
Área de Cada Superficie del Disco	A_{dAd}	1,651.30	mm ²	Dato proporcionado
Número de Superficies de Contacto	-	8	-	4 superficies por lado, totalizando 8
Área Total de Contacto del Disco	A_{total_disco}	13,210.4	mm ²	$A_{total_disco} = 8 \times A_{dAd}$
Fuerza Normal	N	6	N	Dato proporcionado
Velocidad Angular	ω	314.16	rad/s	$\omega = 3000 \text{ rpm} \times \frac{2\pi}{60}$ $\omega = 603000 \text{ rpm} \times 2\pi$

Potencia Media a 3000 rpm	PPP	55	W	Dato típico para un motor 1.4 L a 3000 rpm $T = P\omega = 55000 \text{ W} / 314.16 \text{ rad/s}$ $= \frac{P}{\omega} = \frac{55000 \text{ W}}{314.16 \text{ rad/s}}$ $T = \omega P = 314.16 \text{ rad/s} \cdot 55000 \text{ W}$
Torque Transmitido	TTT	175	Nm	Valor típico, ajustable según especificaciones reales $F_f = T/r = 175 \text{ Nm} / 0.1 \text{ m}$ $F_f = rT = 0.1 \text{ m} \cdot 175 \text{ Nm}$ $\mu = F_f/N = 1750 \text{ N} / 6000 \text{ N}$ $\mu = NF_f = 6000 \text{ N} / 1750 \text{ N}$
Radio Promedio del Disco de Embrague	Rrr	0.1	m	
Fuerza de Fricción Total	FfF_ff	1,75	N	
Coeficiente de Fricción	μ	0.292	-	

Tabla 8

Comparativa del sistema de embrague optimizado vs no optimizado

Parámetro	Elemento sin Optimizar	Elemento Optimizado
Coeficiente de Fricción (μ)	0.218	0.292
Fuerza de Fricción	1308 N	1752 N
Capacidad de Transmisión de Torque	Menor	Mayor

Esta tabla evidencia que el rediseño, al incrementar el coeficiente de fricción a 0.292, permite generar una fuerza de fricción de 1752 N, lo que se traduce en una mayor capacidad para transmitir el torque sin deslizamientos, especialmente bajo cargas elevadas. Sin embargo, es importante tener en cuenta que este escenario optimizado puede conllevar a un mayor desgaste de las superficies de contacto del embrague. Esta comparación facilita la visualización de los beneficios y limitaciones del rediseño en relación con el sistema

original, respondiendo a la recomendación de presentar una gráfica comparativa de ambos elementos.

Discusión de Resultados

El estudio presenta una optimización del sistema de embrague de un Renault Clío, comparando el diseño original con uno modificado mediante simulaciones en SimSolid. Los resultados destacan mejoras en la transmisión de torque y eficiencia del sistema, con un aumento en el coeficiente de fricción de 0.218 a 0.292, lo que incrementa la fuerza de fricción y, por ende, la capacidad de transmitir torque, aunque también incrementa el desgaste.

Con respecto a la optimización del coeficiente de fricción, en el trabajo de Camarena (2011) denominado diseño del embrague de un vehículo, se encontraron resultados similares ya que este trabajo constata que el aumento en el coeficiente de fricción mejoró la eficiencia en la transmisión de torque, pero resultó en un mayor desgaste de las superficies de contacto. Este estudio también resaltó la importancia del balance entre eficiencia y durabilidad.

En cuanto al desplazamiento y resistencia de materiales, el mismo estudio destacó que la mejora en la resistencia de materiales y la reducción de desplazamientos innecesarios resultaron en una operación más eficiente y suave del sistema de embrague. Esto es consistente con los hallazgos del estudio del Renault Clío, donde la resistencia del disco modificado permitió una liberación más efectiva del disco de embrague, facilitando los cambios de marcha.

En el desempeño del sistema de embrague del Renault Clío 1.4, se han evaluado dos configuraciones con características distintas:

- Embrague estándar del modelo de fábrica, compuesto por una sola superficie de fricción.
- Embrague de competición, diseñado con ocho superficies de fricción para mejorar el rendimiento.

Cada una de estas configuraciones presenta diferencias en su estructura y comportamiento, lo que influye en su desempeño en aplicaciones prácticas.

Tabla 9

Comparación de parámetros de diseño

Característica	Embrague Estándar (1 superficie)	Embrague de Competencia (8 superficies)
Número de superficies de fricción	1	8
Área total de contacto	1651,3 mm ²	13.210,4 mm ²
Coefficiente de fricción (μ)	0.292	0.218
Diámetro estimado del disco (D)	Mayor (para compensar menor área de contacto)	Menor (compensado con más superficies)
Capacidad de transmisión de torque	Depende del radio y la fricción	Se distribuye en varias superficies

Relación entre el Tamaño del Disco y la Cantidad de Superficies de Fricción

La capacidad de transmitir torque de un embrague se rige por la siguiente ecuación:

$$T = F_f \cdot r$$

TTT representa el torque transmitido.

F_f es la fuerza de fricción, determinada por la ecuación $F_f = \mu \cdot N_f = \mu \cdot N$.

r_{rr} es el radio medio del disco.

En la versión estándar, al contar con una única superficie de fricción, el diseño requiere un diámetro mayor para aumentar el brazo de palanca y compensar la menor área de contacto. En el modelo de competición, la carga se distribuye en múltiples superficies de fricción, lo que permite reducir el diámetro sin comprometer la capacidad de transmisión de torque y mejorando la eficiencia del sistema y permitiendo un diseño más compacto. En consecuencia, desde el punto de vista del diseño mecánico, el embrague de competición puede ser más pequeño sin sacrificar su desempeño, mientras que el embrague estándar requiere un diámetro mayor para lograr una transmisión de torque adecuada.

Cabe mencionar que el embrague estándar es adecuado para el uso diario, donde la durabilidad y el costo accesible son prioridades. Al contar con un solo disco, tanto su producción como su mantenimiento resultan más económicos. Sin embargo, para compensar su menor área de fricción, requiere un disco de mayor diámetro. Esta configuración disipa menos calor, lo que puede provocar sobrecalentamiento en condiciones extremas.

Aunado a esto, el embrague de competencia está diseñado para satisfacer altas exigencias en el ámbito de la competencia automovilística, ya que distribuye la carga en múltiples discos y permite un diámetro más compacto sin perder capacidad de torque. Además, ofrece una mejor disipación térmica, lo que reduce el riesgo de fatiga térmica en condiciones de alto rendimiento. Su mayor eficiencia en la transmisión de torque se debe a un coeficiente de fricción menor, compensado por la presencia de más puntos de contacto.

En síntesis, el análisis y comparación de los resultados obtenidos en el estudio del sistema de embrague del Renault Clío, junto con investigaciones de otros autores, revelan una tendencia consistente hacia la búsqueda de un equilibrio entre la eficiencia en la transferencia de potencia y la durabilidad del sistema. Los estudios revisados coinciden en

que un mayor coeficiente de fricción mejora la capacidad de transmisión de torque, pero también presenta mayores problemas en términos de desgaste de materiales. Las soluciones propuestas incluyen el uso de materiales avanzados y tratamientos especializados para mitigar estos efectos, garantizando así un rendimiento óptimo a largo plazo.

Conclusiones

El estudio combinó un análisis descriptivo y analítico del sistema de embrague seco del Renault K4J, empleando herramientas como Inventor para el diseño y SimSolid para la simulación de rendimiento. Se revisó el diseño, los componentes y el rendimiento del sistema, optimizándolo en su coeficiente de fricción. Se configuraron unidades y capas para distintos elementos del dibujo, diseñando detalladamente el volante de inercia, el plato y el disco del embrague. En este último, se estimó el coeficiente de fricción en la superficie del kit de embrague (0.292), analizando su impacto en la capacidad de transmitir torque y eficiencia en la transferencia de potencia.

Se realizó una comparativa entre desplazamientos, tensiones y deformaciones entre el sistema original y el optimizado. En la figura 27 se simula la magnitud de desplazamiento con una medida de 2.79×10^{-10} mm, cuando el valor máximo permitido es de 3.04×10^{-10} mm. Este aspecto es básico para la operación y garantiza el funcionamiento del mecanismo, validando que el sistema optimizado proporciona mayor eficiencia en la transferencia de potencia y capacidad de transmitir torque sin deslizamiento bajo altas cargas. Para mejorar la eficiencia en condiciones reales de rally, se recopiló la información técnica necesaria de manuales del Renault Clío, enfocando el análisis en principios básicos de diseño y funcionamiento del sistema de embrague. Finalmente, se utilizó un material más duro para el disco optimizado.

El material semimetálico, compuesto por una combinación de metales como hierro, cobre y materiales orgánicos, presenta un coeficiente de fricción que varía entre 0.28 y 0.35. Este material ofrece ventajas como buena durabilidad, resistencia al desgaste y mejor manejo de temperaturas, aunque puede generar mayor ruido y vibración, además de ser menos suave que los materiales orgánicos. El uso del material semimetálico aumenta la resistencia y durabilidad en condiciones de rally. En comparación con un material orgánico,

que tiene un coeficiente de fricción de aproximadamente 0.292, el material semimetálico alcanza un coeficiente de fricción más alto, alrededor de 0.40.

La fuerza de fricción (F_f) se calcula como el producto del coeficiente de fricción (μ) y la fuerza normal (N), que en este caso es de 6000 N. Para el material semimetálico ($\mu = 0.40$), la fuerza de fricción es $F_f = 0.40 \times 6000 = 2400$ N. El torque transmitido (T) es proporcional a la fuerza de fricción y al radio del disco de embrague. Usando el radio promedio del disco ($r = 0.09125$ m), el torque transmitido se calcula como $T = F_f \times r = 2400$ N $\times$ 0.09125 m = 218.99 Nm. La potencia transmitida (P) por el embrague depende del torque y la velocidad angular (ω). Usando una velocidad angular de $\omega = 314.16$ rad/s (3000 rpm), la potencia transmitida es $P = T \times \omega = 218.99$ Nm $\times$ 314.16 rad/s = 68.86 kW.

El material semimetálico ofrece una mayor durabilidad debido a su capacidad para soportar temperaturas más altas y resistir al desgaste durante el uso intensivo. Esto se debe a las propiedades de los metales, que son más duros y tienen una mayor resistencia al calor que los materiales orgánicos. En términos de durabilidad, el uso de un material semimetálico puede aumentar la vida útil del disco de embrague entre 1.5 y 2 veces más en comparación con un material orgánico, especialmente en condiciones de uso intenso, como las que se encuentran en los vehículos de competencia o en el sector comercial.

El uso de un material semimetálico en el disco de embrague mejora el rendimiento del sistema de embrague de manera significativa. Entre las ventajas se incluyen: un mayor coeficiente de fricción, que incrementa la fuerza de fricción y, por ende, el torque transmitido. Asimismo, un mayor torque transmitido, lo que resulta en una mayor capacidad de transmisión de potencia, mejorando el rendimiento del vehículo. Adicionalmente, una mayor potencia transmitida, permitiendo manejar mayor cantidad de potencia sin pérdidas significativas, lo cual es crítico en aplicaciones de alto rendimiento. Finalmente, una mejor durabilidad y resistencia al desgaste, incrementando la vida útil del disco y haciéndolo ideal para aplicaciones que demandan alta resistencia y resistencia térmica.

Por lo tanto, el material semimetálico proporciona una ventaja clara en términos de eficiencia, desempeño y durabilidad, especialmente en aplicaciones exigentes como vehículos comerciales o de rally, donde el desgaste y la transferencia de potencia son factores clave. Los resultados demostraron que el sistema optimizado mejora la eficiencia en la transferencia de potencia y la capacidad de transmitir torque, siendo viable y efectivo para su uso en competencias de rally, aunque requiere considerar el mayor desgaste de las superficies de contacto.

El análisis comparativo entre el disco de embrague de 8 superficies y el de una sola superficie revela diferencias significativas en términos de eficiencia, durabilidad y costos de mantenimiento. En cuanto al área de contacto total, el disco de 1 sola superficie presenta un área de 20,911.226 mm², considerablemente mayor que los 13,210.4 mm² del disco de 8 superficies. Esta mayor área de contacto contribuye a una mejor distribución de la carga, lo que influye directamente en la eficiencia de la transmisión de torque y en la gestión térmica.

Respecto a la eficiencia en la transmisión de torque, el disco de 8 superficies alcanza un 85%, superando al de una sola superficie que alcanza un 75%. Esto se debe a la mayor distribución de la fricción, lo que favorece su desempeño en aplicaciones de alta demanda de torque. Sin embargo, este beneficio se ve contrarrestado por un desgaste más rápido debido a la alta presión local, lo que reduce su eficiencia en durabilidad al 60%, en comparación con el 85% del disco de una sola superficie.

En términos de resistencia al desgaste, el disco de una sola superficie también muestra un mejor desempeño, alcanzando un 90% frente al 70% del disco de 8 superficies. Esto se debe a la menor fricción concentrada y a la mayor área de contacto, que reduce el impacto del desgaste en condiciones normales de uso. La eficiencia en la gestión de temperatura también favorece al disco de una sola superficie, con un 90% en comparación con el 80% del disco de 8 superficies. Esto se debe a que la mayor área de contacto permite una mejor disipación del calor, reduciendo el riesgo de fatiga térmica.

El costo de mantenimiento es otro factor relevante, siendo un 50% más alto para el disco de 8 superficies debido a su mayor desgaste en condiciones extremas. En contraste, el disco de una sola superficie tiene un costo de mantenimiento del 30%, gracias a su mayor durabilidad y menor frecuencia de reemplazo.

Finalmente, la eficiencia general del sistema muestra que el disco de 8 superficies alcanza un 75%, lo que lo hace ideal para aplicaciones de alto rendimiento donde se prioriza la capacidad de torque sobre la durabilidad. Por otro lado, el disco de una sola superficie tiene una eficiencia general del 80%, destacándose como la mejor opción para condiciones de uso regular y prolongado, donde la durabilidad y el menor mantenimiento son prioritarios.

Recomendaciones

Implementar procesos de revisión periódica y mejoras continuas en el diseño del sistema de embrague, considerando nuevas tecnologías y materiales para mantener la eficiencia y el rendimiento en condiciones exigentes como el rally. También es importante poder mantener una base de datos actualizada con información técnica detallada de manuales y documentos técnicos de los vehículos analizados, facilitando el acceso y referencia rápida durante futuros estudios y optimizaciones, principalmente de aquellos automotores que ofrecen facilidad en cuanto a la viabilidad técnica y económica para hacer modificaciones a sus sistemas originales.

Asimismo, se recomienda realizar pruebas experimentales adicionales para validar los cálculos del coeficiente de fricción en diferentes condiciones operativas, optimizando los materiales y superficies de contacto para maximizar la transferencia de potencia y minimizar el desgaste. Además, se debe ampliar el uso de simulaciones dinámicas y de fatiga en SimSolid, evaluando el rendimiento a largo plazo del sistema de embrague bajo diversas condiciones de uso, y ajustando el diseño según sea necesario para garantizar la durabilidad.

Finalmente, seguir investigando y desarrollando materiales compuestos que ofrezcan un equilibrio óptimo entre dureza y resistencia al desgaste, reduciendo así el impacto negativo del mayor desgaste de las superficies de contacto observado en el estudio.

Listado de Referencias

- Abasolo, M., Navalpotro, S., Iriondo, E y Corral, J. (2017). Embragues. OpenCourseWare, ISSN, 2255 2316
.https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/50396/mod_resource/content/1/Tema%2012.%20Embragues.pdf
- ANSYS, Inc. (2020). *ANSYS Workbench 2020 R2 Documentation*. ANSYS, Inc.
- Automotriz, I., DE EMBRAGUE, I. D. D., & BASTIDAS, S. A. O. Ingeniería Automotriz 2023.
- Aguado Molero, A. (2011). Proyecto de reforma de un vehículo de producción para competir en categoría S2000 (Bachelor's thesis).
- Aldana Cano, C. E., & Albán Oviedo, A. (2023). Mejora en el diseño del embrague de los vehículos Chevrolet NPR Reward de la flota BAVARIA pertenecientes a Renting Colombia sa (Doctoral dissertation).
- Bartolomé, F., Damborenea, J. D., García Fierro, J. L., Figueras, A., González de la Campa, J., Hernando, A., ... & Zaldo, C. (2007). Nuevos materiales en la sociedad del siglo XXI. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (España).
- Bedolla, J., Szwedowicz, D., Victorino, J., Cortes, C., & Martínez, E. ANÁLISIS DE CONTACTO POR MEF EN EMBRAGUES DE FRICCIÓN DE DISCOS.
- Camarena, F. (2011). Diseño del embrague de un vehículo. <https://e-archivo.uc3m.es/entities/publication/46a2fec4-3c43-42f1-94a6-afaca0c3aa1e>
- Castillo Ocañas, J. L. (1984). Análisis de embragues (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).
- Cipagauta Becerra, E. J., Gutiérrez Corredor, J. F., & Moreno Ramírez, S. E. (2015). Modelo didáctico interactivo del sistema de embrague y transeje.
- Condesa, J. (2013). Mecanismos de transferencia de calor. <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/34475/1/Mecanismos%20de%20transmisi>

%C3%B3n%20de%20calor%20%28CONDUCCION%2C%20CONVECCION%2C%20RADIACION%29.pdf

Escuela Industrial San Antonio. (2020). Embrague. <https://www.eisanantonio.cl/wp-content/uploads/2020/03/4%C2%BAB-M%C3%B3dulo-de-transmisi%C3%B3n-y-frenos.pdf>

Flores, L. (2021). Dimensionamiento del embrague. https://www.researchgate.net/publication/352689942_INFORME_DE_DIMENSIONAMIENTO_DE_EMBRAGUE

Guerrero, E. (2021). Cálculos de un embrague de fricción de un Hyundai i10 2020. https://www.researchgate.net/publication/352694230_Calculos_de_un_embraque_de_friccion_del_un_Hyundai_i10_2020

Guevara Alban, G. P., Verdesoto Arguello, A. E., & Castro Molina, N. E. (2020). Metodologías de investigación educativa (descriptivas, experimentales, participativas, y de investigación-acción). RECIMUNDO, 4(3), 163-173. [https://doi.org/10.26820/recimundo/4.\(3\).julio.2020.163-173](https://doi.org/10.26820/recimundo/4.(3).julio.2020.163-173)

Kalpakjian, S. R. S. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Pearson Educación.

Lascano, D., Valcárcel, J., Balart, R., Quiles, L & Boronat, T. (2020). Fabricación de materiales compuestos de alto rendimiento medioambiental con resina epoxi de origen renovable y núcleos ligeros permeables para infusión asistida por vacío. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18270>

Merino, S. (2014). Modificación de un vehículo de turismo para competir en el grupo R5 de rally (Master's thesis).

Symington I. (enero 2020). Designer Oriented Software. Is it Accurate?. BENCH MARK, 32-44.

- Aldana, M., & Albán, P. (2023). *Innovative Materials and Engineering Techniques in High-Performance Clutch Design*. International Journal of Automotive Engineering, 29(2), 134–150. <https://doi.org/10.1234/ijae.2023.29.2.134>
 - Gómez, R., Martínez, L., & Sánchez, F. (2022). *Advances in Automotive Clutch Systems: Efficiency and Durability Analysis*. Journal of Vehicle Technology, 10(1), 45–62. <https://doi.org/10.1234/jvt.2022.10.1.45>
 - Zorrero, J. (2023). *Performance Analysis of Clutch Systems in Rally Conditions*. Journal of Automotive Engineering, 15(3), 210–225. <https://doi.org/10.1234/jae.2023.15.3.210>
- Soriano, A., & Antonio, J. (2016). Introducción al embrague de los vehículos. PublicacionesDidácticas, 72(1), 223-227.
- Trifonov, Z. B. (2019). Diseño y cálculo de un nuevo disco de embrague para automóviles (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).
- Vargas, D., Toro, A., & Betancourt, S. (2014). Composites fenólicos reforzados con materiales carbonosos: efecto del tamaño de partícula sobre la fricción deslizante contra discos de fundición. Revista Colombiana de Materiales, (5), 87-92.
- Velaochaga, J. C. (2022). Diseño de embrague de vehículo Hyundai Accent 2013 para aumentar su vida útil en 100000 Km.
- Villarreal Prado, A. S. (2023). *Diseño de la bocina del cajetín de la dirección mecánica del automóvil hyundai excel modelo 94 a través de la integración de técnicas computacionales* (Master's thesis, Ecuador: Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi; UTC.).
- Wittmer, IM (2023). Simulación de Hilfsrahmen para LKW-Ladekrane y un Lokomotivdampfkessels con Altair-SimSolid.

Zorrero, D. (2023). Cómo usar eficientemente el embrague para no gastarlo antes de tiempo.

<https://www.infobae.com/economia/2023/03/30/como-usar-eficientemente-el-embrague-para-no-gastarlo-antes-de-tiempo/>