



ING. AUTOMOTRIZ

**Trabajo integración Curricular previa a la obtención del título de
Ingeniería en Mecánica Automotriz**

AUTORES:

Baca Samaniego Camilo José

Hernández Naranjo Francisco Andrés

Zapata Guagchinga Steven Andrés

DIRECTOR:

Ing. Rubio Terán Juan Carlos

Comparación de diseños de discos de freno ventilados con pilares NACA y perforaciones en hierro fundido y acero inoxidable mediante simulaciones numéricas.

CERTIFICACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, **Baca Samaniego Camilo José, Hernández Naranjo Francisco Andrés, Zapata Guagchinga Steven Andrés**, declaramos bajo juramento, que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional y que se ha consultado la bibliografía detallada.



Baca Samaniego Camilo José
1720255213



Naranjo Francisco Andrés
1724022957



Zapata Guagchinga Steven Andrés
0504347568

APROBACIÓN DEL TUTOR

Yo, **Rubio Terán Juan Carlos**, certifico que conozco a los autores del presente trabajo, siendo el responsable exclusivo tanto de su originalidad y autenticidad, como de su contenido.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Rubio Terán Juan Carlos', enclosed within a large, loopy oval shape.

Rubio Terán Juan Carlos

No número de cedula

DEDICATORIAS

A mi familia, pilar fundamental en mi vida, por su amor incondicional y apoyo. Cada página de este trabajo lleva consigo el reflejo de sus enseñanzas y la fuerza que me transmitieron para superar cada obstáculo en este camino académico. Especialmente a mis padres, quienes con su ejemplo me enseñaron el valor del esfuerzo y la perseverancia. Sus sacrificios de hoy son mis logros de mañana.

Baca Samaniego Camilo José

Este documento es para todas esas personas que pusieron su confianza en mí para poder llegar a cumplir este sueño, agradecerle primero a Dios por darme la fuerza y sabiduría para cumplir con todas las metas propuestas y a mi madre quien fue un pilar fundamental en todo este trayecto, tuvimos altas y bajas, pero eso no me derrotó ya que siempre estabas conmigo.

A mis familiares y amigos incondicionales que estuvieron cuando más lo necesite, confiaron y creyeron en este proyecto el cual está a punto de culminar.

Hernández Naranjo Francisco Andrés

Un sueño que siempre quise cumplirlo, un deseo plasmado durante muchos años, hoy se vuelve realidad. El camino no ha sido fácil, un camino lleno de alegrías y decepciones, momentos buenos y malos; que me han forjado profesionalmente para poder superar todos los obstáculos en el camino, tiempos que me han hecho conocer el verdadero significado de la familia y amistad.

Con profundo agradecimiento, dedico este logro a Dios, fuente de toda sabiduría y fortaleza. A mis padres, Jorge Zapata y Marcela Guagchinga, mi primer y más grande apoyo. A mi familia, mi pilar fundamental. A mis amigos, presentes y ausentes, quienes han enriquecido mi vida con su amistad y confianza. A los que ya partieron, su legado vive en mi corazón. Este triunfo es un reflejo de todo lo que han significado para mí.

Zapata Guagchinga Steven Andrés

AGRADECIMIENTOS

Al concluir esta etapa académica, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que hicieron posible este trabajo de investigación. A la Universidad Internacional del Ecuador, por abrirme sus puertas y brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente en sus aulas. A mi director de tesis, Ing. Juan Carlos Rubio, por su valiosa guía, dedicación y paciencia. Sus conocimientos, orientaciones y motivación han sido fundamentales para mi formación como ingeniero. A los profesores de la facultad de ciencias técnicas, quienes compartieron generosamente sus conocimientos y experiencias a lo largo de mi formación académica. A mis amigos y compañeros de estudios, por los momentos compartidos, el apoyo mutuo y las experiencias vividas que hicieron más llevadero este camino. A mis amigos cercanos, por su amistad incondicional, por escucharme, aconsejarme y estar a mi lado en los momentos difíciles. A todas las personas que participaron en esta investigación, gracias por su tiempo y disposición. Finalmente, agradezco a la vida por este nuevo triunfo y a todas aquellas personas que, aunque no mencionadas aquí, formaron parte de este proceso y contribuyeron a la realización de este trabajo.

¡Gracias infinitas!

Baca Samaniego Camilo José

Primero agradezco a mi familia que siempre estuvo ahí para ayudarme en todo momento, brindarle un enorme agradecimiento a las personas que estuvieron apoyándome en todas las circunstancias de este recorrido universitario y de vida siempre voy a tener una gran gratitud por ustedes. A mis maestros que con su experiencia me brindaron conocimientos para formarme académicamente y a pesar de eso agradecerles por que se volvieron concejeros y un apoyo para mí en la parte laboral.

No por ser el último sea el menos importante pero siempre agradecerle a dios por todo lo que me ha brindado en mi vida y ahora gracias a él también estoy cumpliendo un sueño más de ser ingeniero automotriz.

Hernández Naranjo Francisco Andrés

Agradezco profundamente a Dios por permitirme alcanzar esta meta. A mis padres y hermano, por su incondicional apoyo y guía durante todos estos años, sobre todo a mi padre quien fue quien me inspiró desde pequeño en el mundo automotriz, y quien fue mi motivación para seguir y culminar mi carrera. Al Ingeniero Rubio, expreso mi gratitud por su invaluable orientación y acompañamiento en este proyecto de investigación. A mis compañeros y amigos, gracias por compartir conmigo este camino y hacer de esta etapa una experiencia inolvidable.

Finalmente agradezco a la Universidad Internacional del Ecuador por todos estos años de aprendizaje y enseñanza que me brindaron.

Zapata Guagchinga Steven Andrés

TABLA DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN DE AUTORÍA.....	III
APROBACIÓN DEL TUTOR	IV
DEDICATORIAS	V
AGRADECIMIENTOS.....	VI
RESUMEN.....	11
1. INTRODUCCIÓN.....	13
1.1 ANTECEDENTES	13
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	16
1.4 OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN	16
2. MARCO TEÓRICO.....	17
2.1 SISTEMAS DE FRENADO EN VEHÍCULOS DE COMPETICIÓN	17
2.2 DISCOS DE FRENO: TIPOS Y CARACTERÍSTICAS	18
2.3 PRINCIPIOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN DISCOS DE FRENO	20
2.4 PERFILES NACA Y SU APLICACIÓN EN DISCOS DE FRENO	21
2.5 NORMAS Y ESTÁNDARES PARA DISCOS DE FRENO	23
3. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	23
3.1 CRITERIOS DE DISEÑO DE LOS DISCOS VENTILADOS	24
3.2 MATERIALES	25
3.2.1 <i>Propiedades físicas y mecánicas</i>	25
3.2.2 <i>Influencia de las propiedades en el rendimiento del sistema de frenado</i>	27
3.3 ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO DE FRENADO	28
3.3.1 <i>Esfuerzos mecánicos y deformaciones</i>	30
3.3.2 <i>Conversión de energía cinética a térmica</i>	32
3.3.3 <i>Enfriamiento de los discos de freno</i>	33
3.4 MODELADO Y SIMULACIÓN	35
3.4.1 <i>Mallado</i>	35
3.4.2 <i>Condiciones de simulación</i>	38
4. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	39
4.1 ANÁLISIS COMPARATIVO RESPECTO A LA TEMPERATURA.	40
4.2 ANÁLISIS COMPARATIVO RESPECTO A LA TRANSFERENCIA DE CALOR	44
5. CONCLUSIONES.....	47
6. REFERENCIAS	49

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Discos de freno sólidos. Fuente: Prieto Amaya, Á. (2018)	18
Figura 2: Discos de freno perforados. Fuente: Prieto Amaya, Á. (2018)	18
Figura 3: Discos de freno ventilados. Fuente: Prieto Amaya, Á. (2018)	19
Figura 4: Modelo A - Disco de freno con pilares NACA. (Autores, 2024)	24
Figura 5: Modelo B - Disco de freno con pilares NACA y agujeros de ventilación. (Autores, 2024)	25
Figura 6: Perfil NACA 66-209. (Autores, 2024)	25
Figura 7: Perfil de velocidad usado en el análisis.	29
Figura 8: Derivada respecto al tiempo de la velocidad (perfil de aceleración y desaceleración)	29
Figura 9: Diagrama de cuerpo libre del disco de freno. (Degenstein, 2006)	31
Figura 10: Mallado del modelo A. (Autores, 2024)	36
Figura 11: Detalles del mallado - Modelo A	36
Figura 12: Mallado del modelo B. (Autores, 2024)	37
Figura 13: Detalles del mallado - Modelo B	37
Figura 14: Aplicación de la fuerza de frenado	38
Figura 15: Aplicación de cargas térmicas	39
Figura 16: Comparación de la distribución de temperatura al finalizar el frenado (t=5s). Corte transversal YZ. (Autores, 2025)	40
Figura 17: Comparación de la distribución de temperatura 7s después del frenado (t=12s). Corte transversal YZ. (Autores, 2025)	41
Figura 18: Comparación de la distribución de temperatura 7s después del frenado (t=12s). Corte transversal XZ. (Autores, 2025)	42
Figura 19: Temperatura vs tiempo - Modelo A – Hierro Fundido	42
Figura 20: Temperatura vs tiempo - Modelo A - Acero Inoxidable	43
Figura 21: Temperatura vs tiempo - Modelo B – Hierro fundido	43
Figura 22: Temperatura vs tiempo - Modelo B – Acero inoxidable	43
Figura 23: Comparación del perfil del flujo de calor. (Autores, 2024)	45

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Propiedades del hierro fundido SAE G4000 	26
Tabla 2: Propiedades del acero inoxidable martensítico AISI 410	26
Tabla 3: Consideraciones para el análisis.....	30
Tabla 4: Comparación de la temperatura máxima.....	44
Tabla 5: Comparación del flujo de calor.	45

INDICE DE FORMULAS

Ecuación 1: Flujo de calor por unidad de área.	20
Ecuación 2: Transferencia de calor por convección.....	20
Ecuación 3: Transferencia de calor por radiación	21
Ecuación 4: Fuerza aplicada por cada pastilla.....	30
Ecuación 5: La fuerza de fricción ejercida por cada pastilla.....	31
Ecuación 6: Fuerza necesaria para desacelerar el vehículo.....	31
Ecuación 7: El torque ejercido en cada llanta para desacelerar el vehículo.....	31
Ecuación 8: Energía cinética del vehículo antes del frenado	32
Ecuación 9: Calor generado por rotor	32
Ecuación 10: Potencia generada por cada disco.....	32
Ecuación 11: Flujo de calor a través de cada disco.....	33
Ecuación 12: Flujo de calor través del disco (Belhocine, 2018).	33
Ecuación 13: El calor disipado por convección.	34
Ecuación 14: El calor disipado (convección y radiación)	34

COMPARACIÓN DE DISEÑOS DE DISCOS DE FRENO VENTILADOS CON PILARES NACA Y PERFORACIONES EN HIERRO FUNDIDO Y ACERO INOXIDABLE MEDIANTE SIMULACIONES NUMÉRICAS

Ing. Rubio Juan,¹, Baca Camilo,², Hernández Andrés,³, Zapata Andrés,⁴.

Maestría Especialidad - Universidad, Titulo Obtenido, jurubiote@internacional.edu.ec, Quito – Ecuador

² Ingeniería Automotriz Universidad Internacional del Ecuador, cabacasa@uide.edu.ec, Quito - Ecuador

³ Ingeniería Automotriz – Universidad Internacional del Ecuador, frhernandezna@uide.edu.ec, Quito – Ecuador

⁴ Ingeniería Automotriz – Universidad Internacional del Ecuador, stzapatagu@uide.edu.ec, Quito – Ecuador

RESUMEN

Este estudio evalúa el rendimiento térmico de dos configuraciones de discos de freno ventilados en un escenario de frenada urbana simple (60 km/h, -5 m/s^2 , $\approx 3,3 \text{ s}$), comparando un diseño con pilares de perfil NACA (Modelo A) y otro que añade perforaciones (Modelo B), y dos materiales: hierro fundido SAE G4000 y acero inoxidable martensítico AISI 410. Mediante simulaciones transitorias de transferencia de calor en ANSYS®, se determinó la temperatura máxima y el flujo de calor superficial para cada combinación. En SAE G4000, el Modelo B redujo marginalmente la temperatura de 332,01 K a 331,10 K ($-0,27 \%$) y aumentó el flujo térmico de $178\,540 \text{ W/m}^2$ a $184\,070 \text{ W/m}^2$ ($+3,10 \%$). En AISI 410, la temperatura se incrementó de 348,91 K a 349,49 K ($+0,17 \%$), mientras que el flujo aumentó de $170\,350 \text{ W/m}^2$ a $180\,620 \text{ W/m}^2$ ($+6,03 \%$). Estos resultados indican que las perforaciones mejoran ligeramente la disipación en materiales de alta conductividad, siendo el hierro fundido SAE G4000 con Modelo B la opción más equilibrada para aplicaciones urbanas, aunque el diseño de pilares NACA por sí solo ofrece un rendimiento casi equivalente con menor complejidad de fabricación.

Palabras clave: Frenos, discos, termodinámica, ventilación, fricción, simulación, ANSYS.

ABSTRACT

This study investigates the thermal performance of two ventilated brake disc configurations under a simple urban braking scenario (60 km/h, -5 m/s^2 , $\approx 3.3 \text{ s}$), comparing a NACA-pillar design (Model A) to one with additional perforations (Model B), and two materials: SAE G4000 cast iron and martensitic stainless steel AISI 410. Transient heat-transfer simulations in ANSYS® were used to determine peak temperature and surface heat flux for each combination. For SAE G4000, Model B marginally reduced peak temperature from 332.01 K to 331.10 K (-0.27%) and increased heat flux from $178,540 \text{ W/m}^2$ to $184,070 \text{ W/m}^2$ ($+3.10 \%$). In AISI 410, temperature rose from 348.91 K to 349.49 K ($+0.17 \%$), while heat flux increased from $170,350 \text{ W/m}^2$ to $180,620 \text{ W/m}^2$ ($+6.03 \%$). These findings show that perforations slightly enhance dissipation in high-conductivity materials, making SAE G4000 with Model B the most balanced choice for urban use, although the NACA-only design delivers nearly equivalent performance with reduced manufacturing complexity.

Keywords: Brakes, discs, thermodynamics, ventilation, friction, simulation, ANSYS.

1. INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la ingeniería automotriz de competición, la eficiencia y fiabilidad del sistema de frenado son factores cruciales que influyen directamente en el rendimiento y la seguridad del vehículo. Los discos de freno, componentes fundamentales de este sistema, desempeñan un papel crítico en la conversión de energía cinética en energía térmica durante el proceso de frenado. Este proceso implica la generación de cantidades significativas de calor, que debe ser eficientemente disipado para mantener la integridad y el rendimiento del sistema (Jesús Eduardo Rivera López et al., 2017, p.14).

La importancia de un diseño óptimo de discos de freno se hace evidente al considerar que aproximadamente el 90% de la energía térmica generada durante el frenado es absorbida por el disco (Esteban Cañibano Álvarez et al., 2005, p.28). Cuando la temperatura del disco supera el valor crítico del material utilizado, pueden surgir diversos problemas, incluyendo falla del freno, desgaste severo, falla del rodamiento, grietas térmicas o vaporización del líquido de freno (Lampert Rudolf, 1975). Durante frenados intensos, las temperaturas pueden elevarse en fracciones de segundos generando dos posibles resultados: shock térmico produciendo fracturas superficiales y/o deformación plástica en el disco de freno (Talati et al., 2008), para mitigar estos riesgos la elección del diseño y material adecuados es fundamental.

Esta investigación tiene como propósito fundamental comparar la eficiencia térmica y estructural de dos diseños de discos de freno ventilados utilizando simulaciones numéricas, con el fin de identificar el diseño y material más adecuados. El estudio examina cómo el uso de diferentes configuraciones de pilares de ventilación con perfiles NACA (National Advisory Committee for Aeronautics), el uso de agujeros para circular el aire, y la selección de materiales afectan el rendimiento del sistema de frenado bajo condiciones de alta exigencia.

1.1 Antecedentes

Históricamente, los discos de freno de hierro fundido han sido la solución predominante en la industria automotriz debido a su favorable relación costo-efectividad y su capacidad para disipar el calor en condiciones de uso moderado. Sin embargo, la creciente demanda de rendimiento en aplicaciones deportivas y de competición ha revelado las limitaciones de este material. En situaciones de frenado intenso y repetido, el hierro fundido puede sufrir deformaciones y pérdida de eficacia debido al calor excesivo, lo que compromete la seguridad y el rendimiento del vehículo (Varejão Ferreira Pasqual et al., 2020).

En respuesta a estos desafíos, la industria ha explorado materiales avanzados como el acero inoxidable martensítico, que ofrece una mayor resistencia a la deformación y una mejor

estabilidad térmica. Este material, con su estructura cristalina martensítica, proporciona una mayor dureza y resistencia al desgaste, lo que se traduce en una mayor durabilidad y un rendimiento de frenado más consistente en condiciones extremas.

Además de la selección de materiales, el diseño de los discos de freno ha sido objeto de una constante evolución. El desarrollo de discos ventilados, con canales internos que facilitan la circulación de aire, ha permitido mejorar significativamente la disipación del calor. En particular, los pilares de ventilación con perfiles aerodinámicos, inspirados en los perfiles NACA utilizados en la industria aeronáutica, han demostrado ser altamente efectivos en la optimización del flujo de aire. Estos perfiles minimizan la resistencia al flujo y generan un flujo laminar eficiente, lo que se traduce en una mayor transferencia de calor y una menor acumulación de calor en el disco (Jesús Eduardo Rivera López et al., 2017).

La optimización de la geometría de los discos de freno no se limita al diseño de los pilares de ventilación. También se consideran otros factores, como el número y la disposición de los canales de ventilación, el espesor del disco y la forma de la superficie de fricción. La simulación computacional, mediante técnicas como el análisis de elementos finitos (FEA) y la dinámica de fluidos computacional (CFD), se ha convertido en una herramienta esencial para optimizar estos parámetros y mejorar el rendimiento de los discos de freno.

Además de los materiales y la geometría, la investigación actual también se centra en el desarrollo de recubrimientos y tratamientos superficiales para mejorar la durabilidad y el rendimiento de los discos de freno. Los recubrimientos cerámicos, por ejemplo, pueden aumentar la resistencia al desgaste y mejorar la disipación térmica.

En resumen, la evolución de los discos de freno ha estado impulsada por la necesidad de mejorar la seguridad, el rendimiento y la durabilidad en condiciones extremas. La investigación actual se centra en la exploración de materiales avanzados, la optimización del diseño mediante simulación computacional y el desarrollo de recubrimientos y tratamientos superficiales innovadores.

1.2 Planteamiento del problema

El diseño y la selección de materiales óptimos para los discos de freno constituyen un desafío de ingeniería automotriz de significativa complejidad, intrínsecamente ligado a la seguridad y al rendimiento dinámico. Los sistemas de frenado son sometidos a ciclos de carga severos y repetitivos, caracterizados por elevadas velocidades de fricción, intensas fuerzas de contacto. Un diseño inadecuado o la elección de materiales con propiedades insuficientes pueden predisponer al sistema a un fenómeno crítico y potencialmente peligroso conocido como "brake

fade", el cual se manifiesta como una disminución progresiva y en ocasiones abrupta de la eficiencia de frenado tras aplicaciones reiteradas o prolongadas de los frenos, especialmente en las condiciones operacionales límite de alta carga dinámica y velocidades elevadas (Jesús Eduardo Rivera López et al., 2017). Este fenómeno se atribuye principalmente a la acumulación excesiva de calor en los componentes del freno, particularmente en la interfaz entre las pastillas y el disco. El incremento de la temperatura puede inducir alteraciones en las propiedades tribológicas de los materiales de fricción, la formación de gases entre las superficies de contacto o incluso deformaciones plásticas, reduciendo drásticamente el coeficiente de fricción efectivo y por ende la fuerza de frenado disponible.

La presente investigación se enfoca en el análisis comparativo detallado de dos diseños ventilados específicos de discos de freno, con el objetivo primordial de discernir cuál de ellos exhibe una superior eficiencia en la gestión térmica y una mayor integridad estructural bajo las exigencias del frenado. La ventilación en los discos de freno es una estrategia de diseño fundamental para mejorar la disipación del calor generado durante la frenada, a través del aumento de la superficie de transferencia de calor y la promoción del flujo de aire.

Para abordar esta problemática, se llevará a cabo una modelización detallada de la transferencia de calor (conducción a través del material del disco, convección hacia el aire circundante y radiación hacia el entorno) para cada uno de los diseños ventilados bajo condiciones de frenado simuladas que emulen las exigencias de frenado. Esta modelización se resolverá numéricamente utilizando software especializado en análisis térmico, permitiendo obtener la distribución de temperatura transitoria y en estado estacionario a través del volumen del disco. Se realizará un análisis de elementos finitos (FEA) para evaluar la respuesta estructural de cada diseño ante las cargas térmicas generadas durante el frenado. Este análisis permitirá determinar la distribución de tensiones de cada diseño bajo cargas operacionales realistas.

Los resultados derivados de esta investigación proporcionarán información valiosa y fundamentada para la optimización del diseño de discos de freno ventilados y la selección de materiales en aplicaciones de alto rendimiento. Se espera que este estudio contribuya al desarrollo de sistemas de frenado más eficientes, seguros y duraderos, capaces de operar de manera confiable bajo las condiciones extremas que caracterizan el automovilismo de alto nivel.

1.3 Justificación

El desarrollo de sistemas de frenado altamente eficientes y confiables es un pilar fundamental para garantizar la seguridad y el rendimiento óptimo de los vehículos. En este contexto, la optimización de los discos de freno trasciende la mejora del rendimiento en la vía, impactando directamente en la seguridad del conductor y la longevidad del vehículo. La capacidad de un sistema de frenado para disipar el calor generado durante frenadas intensas y repetidas es crucial para prevenir el fading, un fenómeno que reduce drásticamente la eficacia de frenado y aumenta el riesgo de accidentes.

La presente investigación se centra en la comparación exhaustiva de materiales de vanguardia, como el acero inoxidable martensítico, con el tradicional hierro fundido, con el objetivo de dilucidar las ventajas y limitaciones de cada uno. A través de la experimentación rigurosa y el análisis detallado, se obtendrán datos cuantitativos sobre el comportamiento térmico de diferentes diseños de discos de freno bajo condiciones extremas de uso. Estos datos serán esenciales para comprender a fondo los mecanismos de fallo y las variables que influyen en la eficacia de frenado.

En última instancia, esta investigación busca impulsar la innovación en el campo de los sistemas de frenado, proporcionando información valiosa y datos empíricos que permitan a los ingenieros y diseñadores tomar decisiones informadas sobre la selección de materiales, la geometría de los discos y las estrategias de enfriamiento. Al mejorar la seguridad y el rendimiento de los sistemas de frenado, se contribuye a la creación de vehículos más seguros, eficientes y confiables.

1.4 Objetivos de investigación

Objetivo principal: Comparar el rendimiento térmico y estructural de dos diseños de discos de freno ventilados (pilares de perfil NACA y perforaciones adicionales) fabricados en hierro fundido SAE G4000 y acero inoxidable martensítico AISI 410 para automóviles, mediante simulaciones numéricas.

Objetivos específicos:

- Evaluar la influencia de los diseños de ventilación (pilares NACA vs. perforaciones) en la disipación de calor, midiendo la temperatura máxima y el flujo de calor en cada combinación de diseño y material.

- Analizar la respuesta estructural de los discos de freno bajo cargas térmicas y mecánicas, determinando la deformación y los esfuerzos mecánicos para cada diseño y material.
- Determinar la combinación óptima de diseño y material que ofrezca el mejor balance entre eficiencia térmica y resistencia estructural.

2. MARCO TEÓRICO

El marco teórico establece las bases conceptuales y técnicas sobre las que se sustentará el análisis de los discos de freno ventilados en esta investigación. Para abordar de manera integral la eficiencia térmica y estructural de estos componentes, es fundamental explorar los principios de los sistemas de frenado, los tipos de discos disponibles, las propiedades de los materiales utilizados y los mecanismos de transferencia de calor. Además, se revisarán los perfiles NACA, que son clave en el diseño de los pilares de ventilación de los discos, y las normativas relevantes que guían su fabricación y evaluación.

2.1 Sistemas de frenado en vehículos de competición

Los sistemas de frenado en vehículos convencionales están diseñados para ofrecer un equilibrio entre seguridad, durabilidad, eficiencia y costo. Su función principal es convertir la energía cinética del vehículo en calor mediante fricción, reduciendo la velocidad o deteniéndolo de manera controlada. Aunque operan en condiciones menos extremas que los sistemas utilizados en vehículos de competición, estos sistemas deben responder eficientemente a diversas situaciones de conducción, como frenadas de emergencia, tráfico urbano, pendientes pronunciadas y cambios ambientales (Varejão Ferreira Pasqual et al., 2020).

Los componentes principales de estos sistemas incluyen:

1. Discos de freno
2. Pastillas de freno
3. Pinzas de freno
4. Sistema hidráulico

La interacción entre estos componentes es crucial para el rendimiento del vehículo. Cuando el conductor acciona el pedal de freno, el sistema hidráulico aplica presión a las pastillas, que se comprimen contra el disco. Esta fricción transforma la energía cinética del vehículo en calor,

que debe ser disipado rápidamente para mantener la eficacia del frenado (Rivera-López et al., 2019).

2.2 Discos de freno: tipos y características

Los discos de freno se clasifican principalmente en tres categorías, cada una con características específicas que determinan su idoneidad para diferentes aplicaciones:

1. Discos sólidos:



Figura 1: Discos de freno sólidos. Fuente: Prieto Amaya, Á. (2018)

- Estructura: Pieza única de metal sin perforaciones o canales.
- Ventajas: Económicos, buena capacidad de frenado en condiciones moderadas.
- Desventajas: Enfriamiento limitado, propensos al sobrecalentamiento en uso intensivo.
- Aplicaciones: Vehículos de calle con requisitos de frenado moderados.

2. Discos perforados:



Figura 2: Discos de freno perforados. Fuente: Prieto Amaya, Á. (2018)

- Estructura: Superficie con agujeros o ranuras.

- Ventajas: Mejor disipación de calor que los discos sólidos, eliminación eficiente de residuos de las pastillas.
- Desventajas: Potencial debilitamiento estructural, susceptibilidad a grietas bajo condiciones extremas.

3. Discos ventilados:



Figura 3: Discos de freno ventilados. Fuente: Prieto Amaya, Á. (2018)

- Estructura: Dos capas de material separadas por canales o pilares.
- Ventajas: Excelente disipación de calor, mayor resistencia a la fatiga térmica.
- Desventajas: Mayor complejidad de fabricación, potencialmente más pesados.

En vehículos convencionales, los discos ventilados son ampliamente utilizados debido a su capacidad para mantener temperaturas operativas estables. La eficiencia térmica del disco depende, en gran parte, del diseño de los canales internos y de los pilares que permiten el paso del aire. Investigaciones recientes han demostrado que la geometría de estos elementos afecta significativamente la circulación del flujo de aire y, por ende, la disipación térmica (Agrawal et al., 2022).

Las tendencias actuales en diseño incluyen:

1. Optimización de la geometría de los pilares utilizando análisis computacional de dinámica de fluidos (CFD).
2. Experimentación con materiales compuestos para reducir el peso manteniendo la eficiencia térmica.
3. Implementación de diseños asimétricos para mejorar el flujo de aire en diferentes condiciones de uso.

2.3 Principios de transferencia de calor en discos de freno

La comprensión de los mecanismos de transferencia de calor es fundamental para el diseño eficiente de discos de freno ventilados. En estos sistemas, operan tres modos principales de transferencia de calor:

1. Conducción:

- Descripción: Transferencia de calor a través del material del disco.
- Ecuación básica:

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Ecuación 1: Flujo de calor por unidad de área.

Donde:

- q es el flujo de calor por unidad de área $\left[\frac{W}{m^2}\right]$,
 - k es la constante conductividad térmica del material $\left[\frac{W}{mK}\right]$,
 - $\frac{dT}{dx}$ es la gradiente de temperatura.
- Importancia: Determina cómo se distribuye el calor dentro del disco.

2. Convección:

- Descripción: Transferencia de calor entre el disco y el aire circundante.
- Ecuación básica:

$$q = hA(T_s - T_\infty) \quad (2)$$

Ecuación 2: Transferencia de calor por convección

Donde:

- q es la tasa de transferencia de calor [W],
 - h es el coeficiente de transferencia de calor por convección $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$,
 - A es el área de superficie m^2 ,
 - T_s es la temperatura de la superficie,
 - T_∞ es la temperatura del fluido circundante.
- Importancia: Principal mecanismo de enfriamiento en discos ventilados.

3. Radiación:

- Descripción: Emisión de energía térmica desde la superficie del disco.
- Ecuación básica:

$$q = \varepsilon \sigma A (T_s^4 - T_{surr}^4) \quad (3)$$

Ecuación 3: Transferencia de calor por radiación

Donde:

- q es la tasa de transferencia de calor [W],
 - ε es la emisividad de la superficie (adimensional),
 - σ es la constante de Stefan-Boltzmann $\left[\frac{W}{m^2 K^4} \right]$,
 - T_{surr} es la temperatura de los alrededores.
- Importancia: Significativa a altas temperaturas, especialmente en competiciones de larga duración.

La interacción entre estos mecanismos es compleja y varía según las condiciones de operación. Por ejemplo, durante una frenada intensa, la conducción domina inicialmente a medida que el calor se propaga por el disco. Luego, la convección y la radiación se vuelven más prominentes en la fase de enfriamiento (García León et al., 2015)

En discos ventilados, la optimización de estos mecanismos se centra en:

1. Selección de materiales con alta conductividad térmica para mejorar la conducción.
2. Diseño de geometrías de pilares que maximicen el flujo de aire para mejorar la convección.
3. Tratamientos superficiales que aumenten la emisividad para mejorar la radiación a altas temperaturas.

2.4 Perfiles NACA y su aplicación en discos de freno

Los perfiles NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) son diseños aerodinámicos originalmente desarrollados para alas de aviones, pero su aplicación se ha extendido a diversos campos, incluyendo el diseño de discos de freno ventilados.

Características clave de los perfiles NACA:

1. Forma aerodinámica que minimiza la resistencia al flujo de aire.

2. Capacidad para generar sustentación o, en el caso de discos de freno, mejorar el flujo de aire.
3. Variedad de perfiles con diferentes características de rendimiento.

En el contexto de los discos de freno ventilados, los perfiles NACA se adaptan para formar los pilares que separan las capas del disco. Esta adaptación busca optimizar el flujo de aire a través del disco durante su rotación, maximizando la transferencia de calor por convección (Jesús Eduardo Rivera López et al., 2017).

La implementación de perfiles NACA en discos de freno presenta varias ventajas potenciales:

1. Mejora del flujo de aire: Los perfiles pueden reducir la resistencia al flujo, permitiendo que más aire circule por los canales del disco.
2. Aumento de la eficiencia de enfriamiento: Un mejor flujo de aire puede resultar en una disipación de calor más eficiente.
3. Potencial reducción de peso: La optimización del diseño podría permitir el uso de menos material sin comprometer el rendimiento.

Sin embargo, también existen desafíos en su implementación:

1. Complejidad de fabricación: Los perfiles NACA pueden ser más difíciles y costosos de producir que los pilares convencionales.
2. Optimización para diferentes velocidades de rotación: El rendimiento de los perfiles puede variar según la velocidad de giro del disco.
3. Equilibrio entre rendimiento aerodinámico y resistencia estructural: Es necesario asegurar que la mejora en el flujo de aire no comprometa la integridad estructural del disco.

La investigación actual en este campo se centra en:

1. Simulaciones CFD para optimizar la geometría de los perfiles para aplicaciones específicas en discos de freno.
2. Pruebas experimentales para validar los beneficios teóricos en condiciones reales.
3. Desarrollo de métodos de fabricación más eficientes para producir discos con perfiles NACA complejos.

2.5 Normas y estándares para discos de freno

El diseño y producción de discos de freno para vehículos convencionales está regulado por diversas normas técnicas que aseguran su seguridad, fiabilidad y desempeño. Las más relevantes incluyen:

1. Society of Automotive Engineers (SAE) J431: "Automotive Gray Iron Castings" - Define las propiedades y características del hierro fundido utilizado en discos de freno (Society of Automotive Engineers, 2012).
2. International Organization for Standardization (ISO) 6312: "Road vehicles — Brake linings — Shear test procedure for disc brake pad and drum brake shoe assemblies" (International Organization for Standardization, 2009b).
3. United Nations Economic Commission for Europe (ECE) R90: "Uniform provisions concerning the approval of replacement brake lining assemblies, drum brake linings and discs and drums for power-driven vehicles and their trailers" (United Nations Economic Commission for Europe, 2018).
4. ISO 6310:2009: Especifica métodos para probar y medir el desplazamiento por compresión de las zapatas de freno o conjuntos de pastillas de freno debido a la carga y la temperatura (International Organization for Standardization, 2009a).
5. ISO 26867:2009: Proporciona un procedimiento estandarizado para comparar materiales de fricción bajo condiciones controladas utilizando un dinamómetro de inercia (International Organization for Standardization, 2009c).
6. SAE J2468:2018: Describe los métodos para probar y medir la deflexión de los conjuntos de materiales de fricción y la compresibilidad de los materiales de fricción (Society of Automotive Engineers., 2018).
7. SAE J2933:2022: Describe métodos estándar de prueba, métodos de análisis y métodos de informe para medir los modos de resonancia de los rotores y tambores de freno de disco automotrices (Society of Automotive Engineers, 2022).

3. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

La presente investigación cuantitativa-comparativa combina análisis teórico y simulaciones computacionales para evaluar el rendimiento térmico y estructural de discos de freno ventilados. El estudio examina la interacción entre dos configuraciones geométricas distintas

y dos materiales de alto rendimiento, estableciendo un diseño factorial 2x2 que permite analizar sistemáticamente la influencia de cada variable.

Las variables independientes comprenden el diseño geométrico (pilares NACA simples versus pilares NACA con perforaciones) y el material (hierro fundido versus acero inoxidable martensítico). Como variables dependientes se analizan la temperatura máxima alcanzada, la tasa de disipación de calor, y la deformación térmica resultante. La hipótesis central propone que la implementación de perforaciones adicionales en los canales ventilados mejorará significativamente la capacidad de disipación térmica sin comprometer la integridad estructural del disco.

3.1 Criterios de diseño de los discos ventilados

Los diseños propuestos se fundamentan en la implementación de perfiles NACA, cuya eficacia en aplicaciones de disipación térmica ha sido ampliamente documentada. El perfil aerodinámico de los pilares ayuda a mejorar la eficiencia térmica, optimizando el contacto entre el aire y la superficie del disco. El primer diseño incorpora 12 pilares tipo NACA 66-209 distribuidos uniformemente en configuración radial, con canales de ventilación continuos. El segundo diseño mantiene la base del primero, pero introduce 64 perforaciones estratégicamente distribuidas, cuyo diámetro ha sido optimizado mediante análisis de elementos finitos.

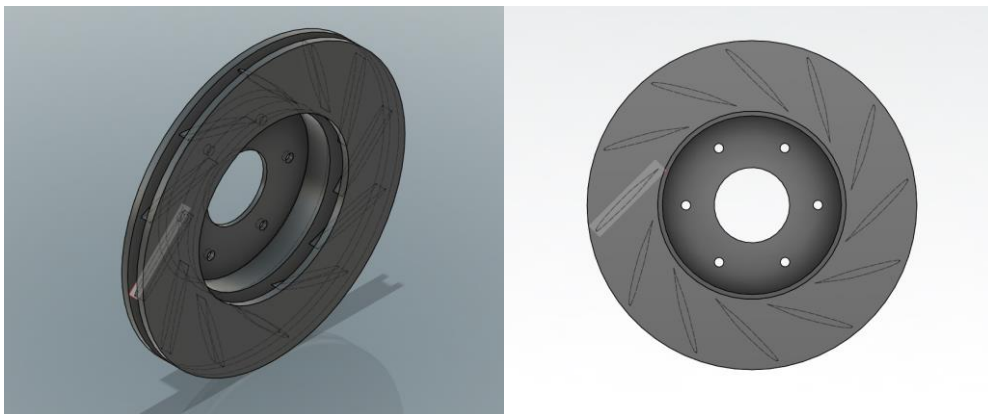


Figura 4: Modelo A - Disco de freno con pilares NACA. (Autores, 2024)

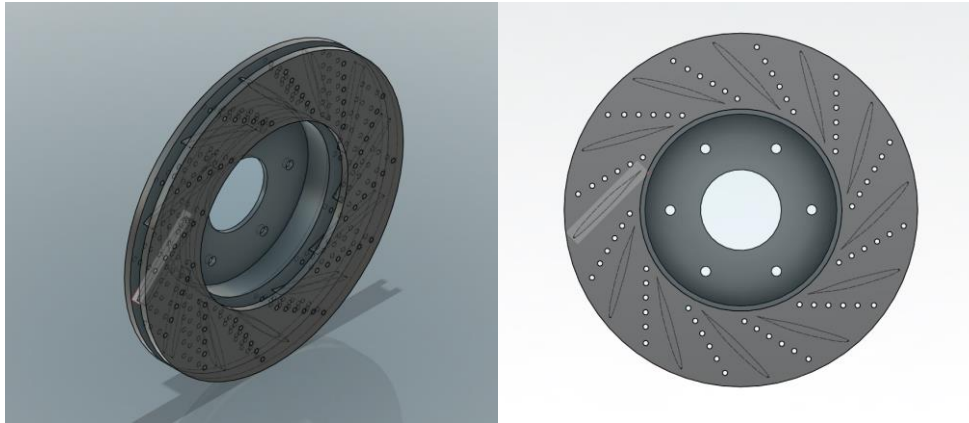


Figura 5: Modelo B - Disco de freno con pilares NACA y agujeros de ventilación. (Autores, 2024)

La selección del perfil NACA 66-209 responde a su comprobada eficiencia aerodinámica y capacidad para reducir la resistencia al flujo (García-León et al., 2018). Este perfil específico ofrece un equilibrio óptimo entre la resistencia al flujo de aire, la capacidad de disipación térmica y la integridad estructural, características fundamentales para el rendimiento del sistema de frenado (Jesús Eduardo Rivera López et al., 2017).



Figura 6: Perfil NACA 66-209. (Autores, 2024)

3.2 Materiales

En el diseño de discos de freno de alto rendimiento, los materiales juegan un papel fundamental, no solo para soportar los esfuerzos mecánicos y térmicos, sino también para optimizar la transferencia de calor. La elección de los materiales es clave para garantizar un rendimiento óptimo y duradero.

3.2.1 Propiedades físicas y mecánicas

Las dos principales opciones de materiales analizadas en este estudio son el hierro fundido SAE grado G4000 y el acero inoxidable martensítico AISI 410. Ambos tienen características que los hacen adecuados para aplicaciones de frenado, pero cada uno presenta ventajas y desventajas dependiendo de las condiciones operativas.

El hierro fundido SAE grado G4000, es un material usado en aplicaciones automovilísticas bajo la norma SAE J431. Este material tiene un contenido de carbono de al menos 4.3% y una matriz perlítica que brinda alta resistencia mecánica como a su vez un rango de deformación elástica amplio. Así mismo la estructura del grafito presente en este tipo de material brinda una

resistencia al desgaste por fricción, lo que lo hace duradero en aplicaciones de frenado intensas (SAE International, 2018).

Tabla 1: Propiedades del hierro fundido SAE G4000

Propiedades del material	Valor	Unidades
Densidad	7150	Kg/m ³
Módulo de Young E	6.611781e+10	N/m ²
Módulo de Corte	5e+10	N/m ²
Resistencia a la tensión	276658000	N/m ²
Resistencia a la compresión	572165000	N/m ²
Coeficiente de expansión térmica	1.2e-5	/K
Conductividad térmica	45	W/(m.K)
Calor específico	510	J/Kg.K

(SAE International, 2018)

Por otro lado, el acero inoxidable martensítico combina una excelente resistencia mecánica con una capacidad moderada de disipación de calor. Contiene aproximadamente un 12 % de Cr y, por lo tanto, ofrece una resistencia a la corrosión moderada. A diferencia de la austenita como AISI 304 y AISI 316, la martensita como el grado 410 es magnética y puede endurecerse mediante tratamiento térmico como el acero al carbono y el acero de baja aleación. Tiene buena resistencia a la tracción, resistencia a la fluencia y a la fatiga y otras propiedades mecánicas (AISI, 2020).

Tabla 2: Propiedades del acero inoxidable martensítico AISI 410

Propiedades del material	Valor	Unidades
Densidad	7639.7	Kg/m ³
Módulo de Young E	20e+10	N/m ²
Constante de Poisson	0.3	
Resistencia a la tensión	510e+6	N/m ²
Coeficiente de expansión térmica	5.9e-6	/K
Conductividad térmica	26.9	W/(m.K)
Calor específico	1925.928	J/Kg.K

(AISI, 2020)

3.2.2 Influencia de las propiedades en el rendimiento del sistema de frenado

Las propiedades físicas y mecánicas de los materiales seleccionados, hierro fundido y acero inoxidable martensítico tienen una influencia directa sobre el rendimiento del sistema de frenado, particularmente en términos de disipación de calor y resistencia al desgaste. Estas características afectan cómo los discos de freno responden a condiciones extremas de frenado.

El hierro fundido, específicamente el hierro de grafito vermicular y el hierro gris, es ampliamente utilizado en discos de freno debido a su excelente capacidad de disipación de calor, su resistencia al desgaste y su capacidad de amortiguación de vibraciones (Li et al., 2020). Estas propiedades permiten que el hierro fundido mantenga su rendimiento bajo condiciones de frenado prolongado, donde se generan altas temperaturas debido a la fricción constante entre el disco y las pastillas de freno (Varejão Ferreira Pasqual et al., 2020). La microestructura del hierro fundido permite la formación de una película de grafito en la superficie durante el uso, lo cual influye en el comportamiento de fricción y desgaste de este material, especialmente bajo altas presiones de carga (Sugishita et al., 1981).

Además, el hierro fundido gris, que posee una resistencia a la tracción de 250 MPa y una alta resistencia a la compresión, soporta el estrés generado en ciclos de frenado repetitivos sin comprometer su integridad estructural (Li et al., 2020). Estas propiedades lo hacen particularmente adecuado para ciclos de larga duración, donde la disipación de calor y la estabilidad estructural son esenciales para evitar el sobrecalentamiento y la deformación del disco. Sin embargo, el peso del hierro fundido, que es significativamente mayor en comparación con otros materiales, puede afectar la maniobrabilidad del vehículo, especialmente en condiciones donde se requiere una aceleración y desaceleración rápidas y constantes (İlker Rodrig et al., 2021).

El acero inoxidable martensítico es otra opción popular para discos de freno debido a su resistencia a la corrosión, bajo coeficiente de fricción y su menor peso en comparación con el hierro fundido (Cardoso et al., 2016). Este material permite un diseño más liviano, lo cual reduce la masa no suspendida del vehículo y mejora su dinámica general, una ventaja notable en situaciones donde el sistema de frenado no está sujeto a acumulación excesiva de calor.

No obstante, la menor eficiencia en la transferencia de calor del acero inoxidable limita su capacidad para disipar la temperatura generada durante el frenado continuo. Esto puede llevar a un sobrecalentamiento de la región de fricción, lo cual afecta negativamente el coeficiente de fricción entre las pastillas y el disco a temperaturas elevadas (Cardoso et al., 2016). Además,

este calor puede ser transferido al fluido de frenos, lo que podría llevar a la vaporización de este si no se utilizan fluidos de alto punto de ebullición.

3.3 Análisis del rendimiento de frenado

El rendimiento de frenado representa un factor determinante en la operación de cualquier vehículo, donde el sistema de frenos debe enfrentar condiciones extremas de uso. En esta sección, se realizará un análisis exhaustivo de los esfuerzos mecánicos y térmicos que actúan sobre los discos de freno, junto con los mecanismos de disipación de energía y el papel fundamental de la convección en la eficiencia del sistema.

Para mantener la consistencia con los parámetros de simulación referenciados, todas las propiedades térmicas se consideran constantes, ya que su variación en el rango de temperatura operacional es mínima. El coeficiente de fricción entre la pastilla de freno y el disco de freno proviene de Brembo, asegurando fuerzas de interacción realistas.

Para modelar con precisión el proceso de frenado, se construye una función por partes que representa la velocidad del coche a lo largo del tiempo durante las fases de frenado y aceleración. La derivada respecto al tiempo de esta función proporciona la desaceleración e aceleraciones instantáneas del coche, permitiendo una representación precisa de la dinámica de frenado (Society of Automotive Engineers, 1995).

La simulación del frenado parte de una velocidad inicial de 60 km/h (equivalente a 16.67 m/s), que representa un escenario típico de circulación en avenidas urbanas. Este valor coincide con límites de velocidad establecidos en zonas urbanas por organismos de transporte (National Highway Traffic Safety Administration [NHTSA], 2013). Para representar una frenada controlada, se adopta una desaceleración constante de -5 m/s^2 , valor considerado seguro y representativo de condiciones reales de frenado sin intervención de sistemas antibloqueo (ABS) (Gillespie, 1992; Bosch, 2020). Bajo esta condición, la duración estimada de la fase de frenado es de aproximadamente 3.3 segundos.

Tras el frenado, se considera una fase de aceleración moderada con una aceleración constante de 2 m/s^2 , valor típico para salidas desde parada o incrementos suaves de velocidad en ciudad (Gillespie, 1992). Este enfoque permite representar de manera completa la dinámica de tránsito urbano, incluyendo frenadas por semáforos o intersecciones, seguidas de reanudación de marcha.

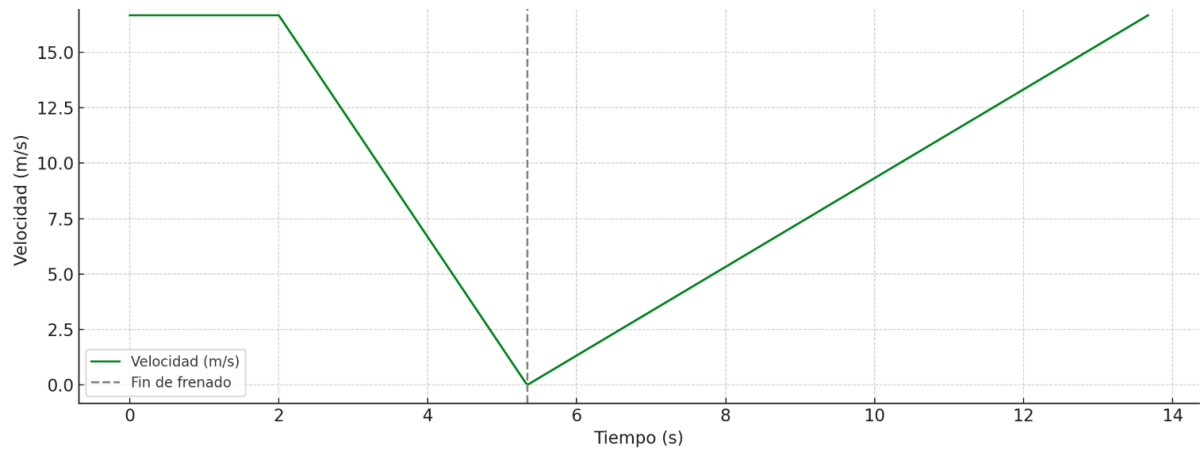


Figura 7: Perfil de velocidad usado en el análisis.

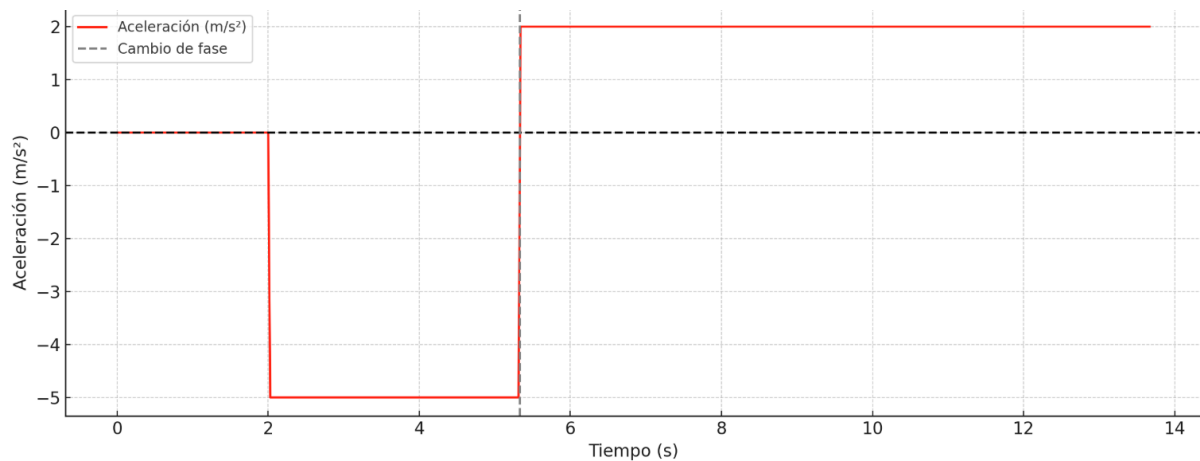


Figura 8: Derivada respecto al tiempo de la velocidad (perfil de aceleración y desaceleración)

Para el análisis térmico del sistema de frenos, se consideran dimensiones típicas de discos ventilados empleados en vehículos urbanos compactos. Según Bosch (2020) y datos de fabricantes como Brembo (2023), el diámetro externo del disco se estima en 260 mm y el diámetro interno en 140 mm, valores que delimitan el área efectiva de fricción. Estas dimensiones permiten una representación realista de la superficie de contacto, fundamental para el cálculo de la transferencia de calor por fricción.

En cuanto a la masa del vehículo, se establece un valor de 1,350 kg, el cual incluye la masa del vehículo vacío más una carga moderada, como un conductor y equipaje ligero. Este rango de masa coincide con vehículos urbanos como el Toyota Corolla o el Hyundai Elantra, según datos proporcionados por sus fichas técnicas (Toyota Motor Corporation, 2022; Hyundai Motor Group, 2022).

Por otro lado, la temperatura del aire circundante, relevante para los procesos de transferencia de calor por convección, se establece en 17 °C (290.15 K), valor que corresponde a la

temperatura media anual en la ciudad de Quito, Ecuador, según datos climáticos oficiales del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI, 2021). Este parámetro se utiliza como condición de contorno para las simulaciones térmicas del sistema de frenos.

Los parámetros para el análisis se listan en la siguiente tabla:

Tabla 3: Consideraciones para el análisis

Parámetros	Valor	Unidad
Masa del vehículo [m]	1350	Kg
Velocidad inicial [V_0]	16.67	m/s
Desaceleración al frenar [a_0]	-5	m/s ²
Inicio del tiempo de frenado	2	s
Fin del tiempo de frenado	5.3	s
Aceleración posterior al frenado	2	m/s ²
Inicio de la aceleración	5.3	s
Fin de la aceleración	8.5	s
Temperatura del aire	290.15	K

(İlker Rodrig et al., 2021)

3.3.1 Esfuerzos mecánicos y deformaciones

Suponiendo líquidos incompresibles y recipientes hidráulicos infinitamente rígidos, la presión generada por el pedal de freno será transmitida al cilindro principal a través de presión hidráulica. La misma que se transmite a las pastillas de freno, como en el sistema de frenado se consideran dos pastillas en el proceso de frenado, la fuerza de la abrazadera de las pastillas es la suma de la fuerza aplicada por cada pastilla:

$$F_{Clamp} = F_{Cal} \times 2 \quad (4)$$

Ecuación 4: Fuerza aplicada por cada pastilla

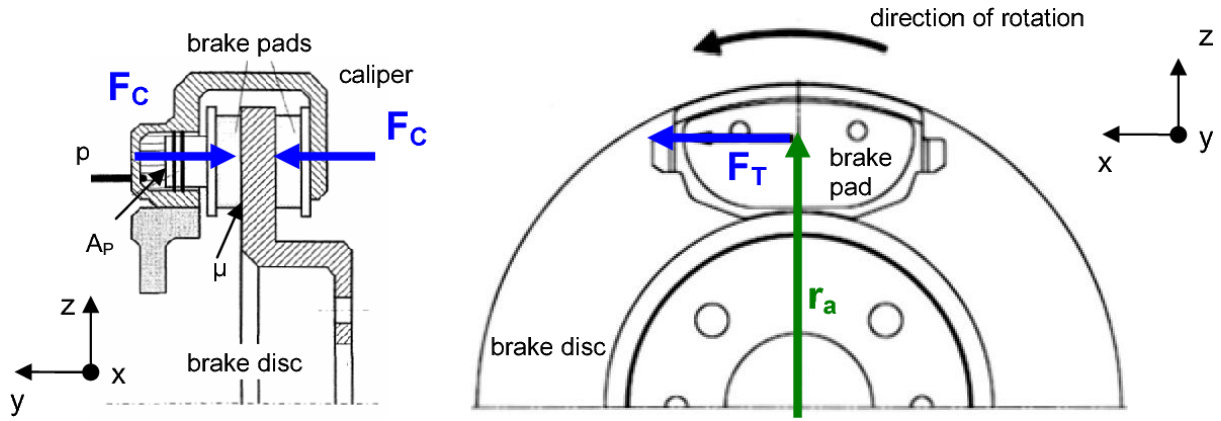


Figura 9: Diagrama de cuerpo libre del disco de freno. (Degenstein, 2006)

La fuerza de apriete provoca una fricción que actúa normal a esta fuerza y tangencial al plano del rotor. La fuerza de rozamiento viene dada por:

$$F_{friction} = F_{Clamp} \times \mu_{bp} \quad (5)$$

Ecuación 5: La fuerza de fricción ejercida por cada pastilla.

Siendo μ_{bp} el coeficiente de fricción entre las pastillas y el disco.

La fuerza total requerida para desacelerar el automóvil es de:

$$F = m \times a = 1350Kg \times -5 \frac{m}{s^2} = 6750N \quad (6)$$

Ecuación 6: Fuerza necesaria para desacelerar el vehículo.

El torque requerido para desacelerar el vehículo es:

$$T_r = \frac{F}{4} \times R_W = \frac{6750N}{4} \times 0.3 = 506.25Nm \quad (7)$$

Ecuación 7: El torque ejercido en cada llanta para desacelerar el vehículo.

Donde R_W es el radio de la llanta.

Durante el proceso de frenado, los discos están sujetos a esfuerzos mecánicos significativos, principalmente debido a la fricción entre las pastillas de freno y la superficie del disco. Estos esfuerzos generan tensiones que pueden provocar deformaciones, desgaste y, en casos extremos, fractura. La resistencia de los discos a estos esfuerzos está determinada por la combinación de su diseño y los materiales utilizados.

En ambos diseños evaluados, los pilares con perfil NACA permiten una distribución más uniforme de las fuerzas mecánicas en el disco, minimizando las concentraciones de tensiones en zonas críticas. No obstante, el segundo diseño, que incorpora perforaciones adicionales, exige un análisis más exhaustivo, ya que estas perforaciones podrían funcionar como

concentradores de esfuerzos. La geometría y disposición de las perforaciones resultan determinantes para prevenir la formación de grietas por fatiga.

El análisis de esfuerzos se realiza utilizando simulaciones por el método de elementos finitos (FEM), que permite observar las zonas donde se concentran las mayores tensiones durante el frenado. Estas simulaciones también ayudan a predecir las deformaciones que podría sufrir el disco bajo condiciones extremas, y aseguran que, incluso con las perforaciones, el diseño mantenga una integridad estructural adecuada.

3.3.2 Conversión de energía cinética a térmica

El proceso de frenado convierte la energía cinética del vehículo en energía térmica debido a la fricción entre el disco y las pastillas de freno. Esta energía térmica se disipa en forma de calor, y la eficiencia con la que el sistema puede manejar esta conversión es clave para evitar el sobrecalentamiento.

La energía cinética del vehículo se puede calcular con la siguiente expresión:

$$KE = \frac{1}{2}mV^2 = \frac{1}{2}(1350Kg)(16.67ms^{-1})^2 = 187575J \quad (8)$$

Ecuación 8: Energía cinética del vehículo antes del frenado

Donde m es la masa del vehículo y V es la velocidad antes del frenado.

La energía/calor de frenado total necesaria para el vehículo es igual a la energía cinética total generada por el vehículo, por lo tanto, el calor generado Q_g es 187575J.

Dado que durante el frenado se produce una transferencia de peso hacia el eje delantero, la distribución de las fuerzas de frenado no es uniforme entre las cuatro ruedas del vehículo. En un turismo típico, los frenos delanteros suelen soportar aproximadamente el 80% de la fuerza total de frenado, mientras que los traseros manejan el 20% restante, según principios de diseño automotriz en condiciones de alto rendimiento. Por lo tanto, el calor generado se distribuye de manera desigual entre los rotores. El calor generado en un rotor delantero es:

$$Q_{fd} = \frac{Q_g \times 0.8}{2} = 75030 J \quad (9)$$

Ecuación 9: Calor generado por rotor

Por tanto, la potencia generada en un rotor es:

$$P = \frac{Q_{gr}}{t} = \frac{75030 J}{3.3} = 22736.36 W \quad (10)$$

Ecuación 10: Potencia generada por cada disco

Podemos calcular el flujo de calor a través de un disco de 0.260 m de diámetro exterior y 0,140 m de diámetro interior de acuerdo con regulaciones de la FIA (Fédération Internationale de l'Automobile, 2025)

$$q = 4 \frac{P}{3.14(D_o^2 - D_i^2)} = \frac{22736.36 \text{ W}}{3.14(0.260^2 - 0.140^2)} = 603406.58 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad (11)$$

Ecuación 11: Flujo de calor a través de cada disco.

Sin embargo, mediante análisis exhaustivos se han llegado a fórmulas que definen de manera más precisa el flujo de calor hacia el disco (Belhocine et al., 2018).

$$q = \frac{1 - \phi}{2} \frac{mgv_0z}{A_d \varepsilon_p} \quad (12)$$

Ecuación 12: Flujo de calor través del disco (Belhocine, 2018).

Donde:

- ϕ = Distribución de las fuerzas de frenado respecto a las llantas traseras (0.2)
- g es la aceleración de la gravedad (9.81 ms^{-2}).
- z es el factor de efectividad de frenado definida por la relación entre la deceleración (a) y la aceleración (g).
- A_d = es la superficie del rotor sobre la que pivota una pastilla de freno (m^2).
- ε_p = es el factor de distribución de la carga del disco (0.5).

En ambos diseños, la capacidad de transferencia de calor está directamente influenciada por la geometría de los pilares ventilados. El diseño con perfil NACA optimiza el flujo de aire, lo que ayuda a mantener una temperatura más baja en el disco durante la conversión de energía. Sin embargo, el segundo diseño, que incorpora perforaciones, aumenta la superficie de contacto entre el aire y el disco, lo que mejora la tasa de disipación de calor y permite una mayor eficiencia en la conversión de energía térmica.

El análisis de este fenómeno incluye simulaciones térmicas que permiten observar cómo el calor se distribuye a través del disco y cómo las modificaciones en los pilares y las perforaciones influyen en la capacidad de enfriamiento del disco bajo cargas térmicas extremas.

3.3.3 Enfriamiento de los discos de freno

El calor se disipa a través de tres modos de transferencia térmica: conducción, convección y radiación. Sin embargo, la conducción únicamente redistribuye el calor y, por ende, la

temperatura, lo cual puede afectar de manera peligrosa a otros componentes críticos como los rodamientos, los lubricantes o los sellos (Rudolf Limpert, 2011).

Para el calor disipado por convección en el tiempo «t» a una distancia «r» del centro se rige por la ecuación:

$$q(r, t) = -f_f \times V_d(r, t) = -\frac{mR^2\alpha}{4r_m A} r(w_0 + \alpha t) \quad (13)$$

Ecuación 13: El calor disipado por convección.

- m es la masa del coche [kg],
- v indica su velocidad $\left[\frac{m}{s}\right]$,
- R es el radio de la rueda [m],
- ω es la velocidad angular $\left[\frac{rad}{s}\right]$,
- α es la aceleración angular $\left[\frac{rad}{s^2}\right]$,
- r_m es la distancia desde el centro del disco al centro de masa de la pastilla de freno [m],
- A es el área de la pastilla [m^2],
- «4» significa 8 pastillas.
- La aceleración angular se supondrá constante en este caso por simplicidad, de modo que $\omega(t) = \omega_0 + \alpha t$.

El calor disipado por convección y radiación de las superficies del disco y la pastilla puede describirse como:

$$q_{diss} = -h(T_d - T_\infty) - \varepsilon\sigma(T_d^4 - T_\infty^4) \quad (14)$$

Ecuación 14: El calor disipado (convección y radiación)

Donde:

- q_{diss} es la disipación de calor por unidad de área $\left[\frac{W}{m^2}\right]$,
- h es el coeficiente de convección térmica $\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$,
- T_d es la temperatura de la superficie del disco K,
- T_∞ es la temperatura del ambiente K,
- ε es la emisividad térmica de la superficie del disco,

- σ = es la constante de Stefan-Boltzmann para la radiación, cuyo valor es

$$5.670 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

La convección es uno de los principales mecanismos de disipación de calor en los discos de freno ventilados. El flujo de aire a través de los canales internos del disco retira el calor generado por la fricción, enfriando así el sistema de manera efectiva. La eficiencia de este enfriamiento depende no solo del material del disco, sino también del diseño de los pilares y de los canales de ventilación.

El diseño con pilares NACA ofrece un flujo de aire más eficiente, minimizando las turbulencias y maximizando el contacto entre el aire y la superficie interna del disco. En el segundo diseño, las perforaciones a lo largo de los canales aumentan la superficie de contacto, lo que mejora el intercambio de calor por convección. Esto resulta en una mayor eficiencia de enfriamiento, lo que permite que el sistema de frenado mantenga una temperatura de operación más baja durante períodos prolongados.

3.4 Modelado y simulación

En este proyecto, el comportamiento térmico de un disco de freno en condiciones representativas de circulación urbana se analiza mediante el módulo de transferencia de calor de ANSYS®, un software de simulación basado en el método de los elementos finitos. Esta herramienta permite modelar la distribución y evolución de temperatura en componentes sometidos a cargas térmicas transitorias, como las generadas durante maniobras de frenado. El método de los elementos finitos es ampliamente utilizado en ingeniería para resolver numéricamente problemas de transferencia de calor en geometrías complejas y bajo condiciones de contorno variables. Su capacidad para representar materiales heterogéneos y simular escenarios con diferentes parámetros de diseño lo convierte en una herramienta robusta para la evaluación térmica de sistemas de freno en vehículos urbanos (Agrawal et al., 2022).

3.4.1 Mallado

El mallado antes de resolver el sistema es necesario definir el tamaño de la malla y el tipo de malla para obtener el resultado más aproximado. Se comprobó la calidad de la malla antes de cada análisis y se comprobó que era adecuada para el análisis. La calidad ortogonal de la malla obtenida estaba dentro de los parámetros requeridos. La calidad de la malla utilizada es buena, ya que la calidad mínima fue superior a 0,1 y la calidad media se aproximó a 0,85.

Para el Modelo A:

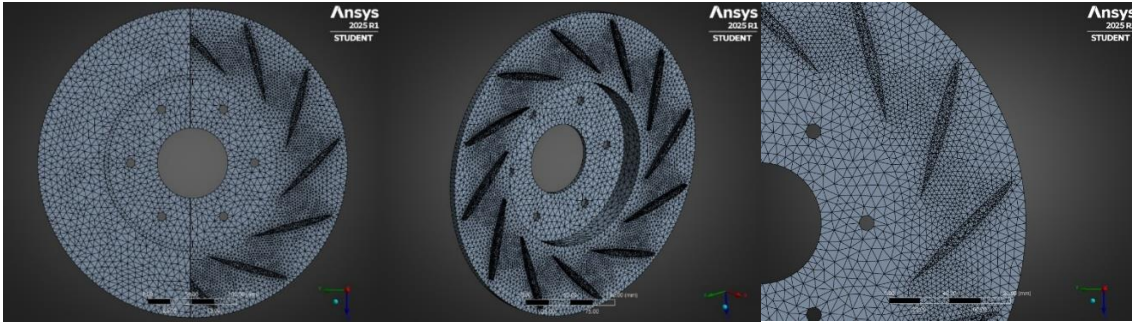


Figura 10: Mallado del modelo A. (Autores, 2024)

Details of "Mesh"	
Display	
Display Style	Use Geometry Setting
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Program Controlled
Element Size	Default
Sizing	
Use Adaptive Sizing	Yes
Resolution	5
Mesh Defeaturing	Yes
Defeature Size	Default
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Initial Size Seed	Assembly
Bounding Box Diagonal	497.91 mm
Average Surface Area	7120.6 mm ²
Minimum Edge Length	2.1751e-002 mm
Quality	
Inflation	
Advanced	
Automatic Methods	
Sheet Body Method	Quad Dominant
Sweepable Body Method	Sweep
Statistics	
Nodes	69154
Elements	38994
Show Detailed Statistics	No

Figura 11: Detalles del mallado - Modelo A

En este estudio, se empleó un mallado adaptativo que permite refinar las áreas de mayor interés, como las zonas cercanas a los pilares y perforaciones, donde se espera que se concentren los esfuerzos y las mayores variaciones de temperatura.

Para el Modelo B:

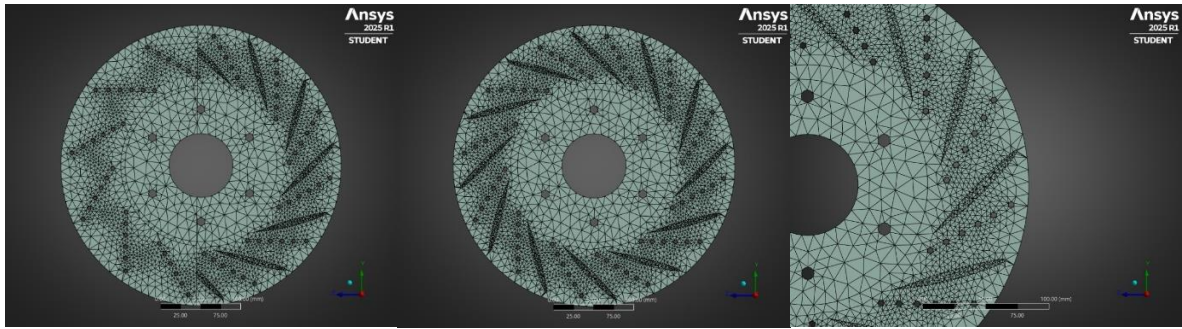


Figura 12: Mallado del modelo B. (Autores, 2024)

Details of "Mesh"	
Display	
Display Style	Use Geometry Setting
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Program Controlled
Element Size	Default
Sizing	
Use Adaptive Sizing	Yes
Resolution	5
Mesh Defeaturing	Yes
Defeature Size	Default
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Initial Size Seed	Assembly
Bounding Box Diagonal	497.93 mm
Average Surface Area	2005.2 mm ²
Minimum Edge Length	2.1751e-002 mm
Quality	
Inflation	
Advanced	
Automatic Methods	
Sheet Body Method	Quad Dominant
Sweepable Body Meth...	Sweep
Statistics	
Nodes	121464
Elements	68762
Show Detailed Statistics	No

Figura 13: Detalles del mallado - Modelo B

El uso de software de modelado y simulación es esencial para predecir el comportamiento de los discos de freno bajo condiciones reales sin la necesidad de fabricar múltiples prototipos. En este estudio, se utilizaron herramientas de simulación avanzadas para analizar tanto los esfuerzos mecánicos como la transferencia de calor y el comportamiento del flujo de aire.

3.4.2 Condiciones de simulación

Fuerzas de frenado:

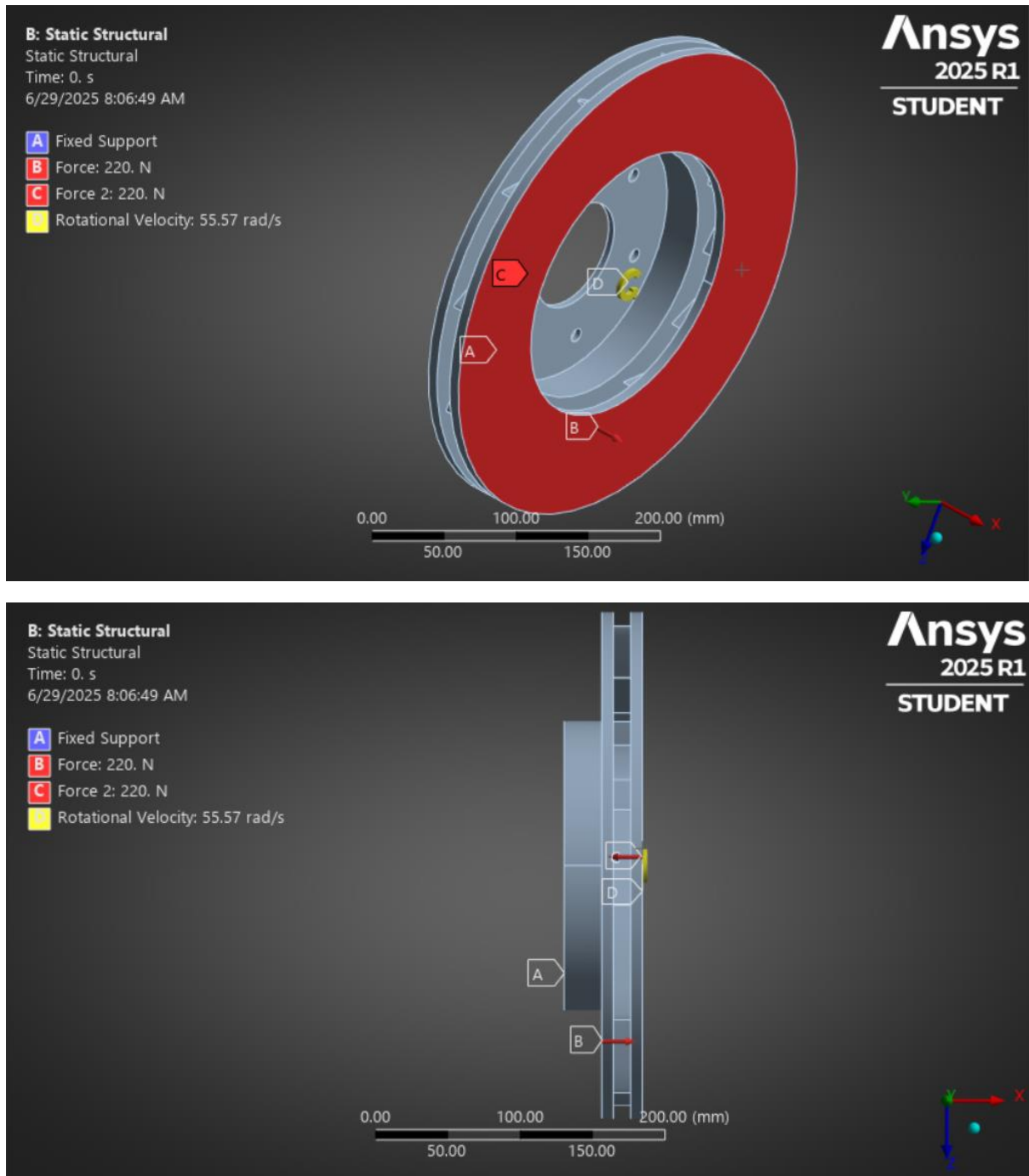


Figura 14: Aplicación de la fuerza de frenado

Cargas térmicas:

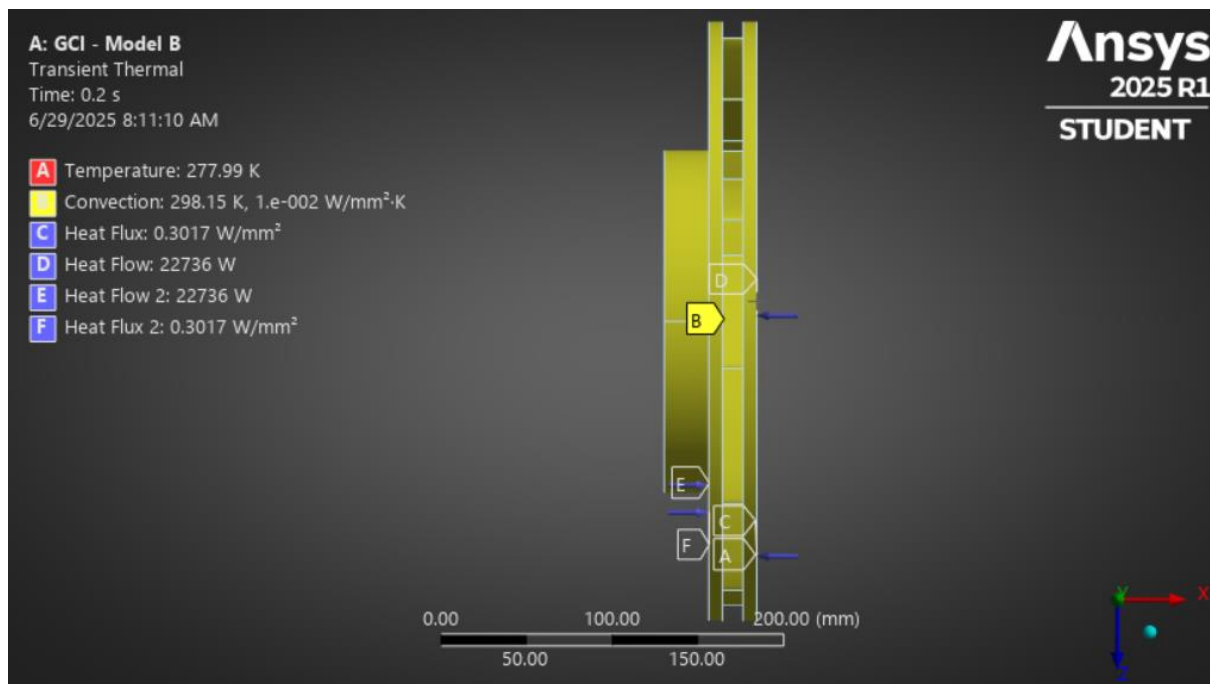


Figura 15: Aplicación de cargas térmicas

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Los resultados de las simulaciones realizadas en ANSYS Workbench para evaluar el desempeño de dos diseños de discos de freno—Modelo A (pilares tipo NACA) y Modelo B (pilares y agujeros)—fabricados en hierro fundido SAE G4000 y acero inoxidable martensítico AISI 410, se presentan a continuación. Se analizaron la temperatura máxima y el flujo de calor máximo. Para visualizar los fenómenos a lo largo del disco, se emplearon planos de corte en los ejes YZ y XZ, permitiendo observar la distribución de las variables de interés.

El análisis térmico se llevó a cabo utilizando el módulo “Transient Thermal” de ANSYS, donde se definieron condiciones de frontera que incluyen la convección térmica por el flujo de aire alrededor del disco, la radiación generada por las altas temperaturas y el flujo de calor resultante de la conversión de energía cinética en energía térmica durante el frenado. El análisis estructural consideró las cargas mecánicas inducidas por la presión de las pastillas de freno y los efectos térmicos.

4.1 Análisis comparativo respecto a la temperatura.

Durante el proceso de frenado, la fricción entre las pastillas y el disco genera un aumento abrupto de temperatura en la superficie de contacto. Debido a la menor conductividad térmica del acero inoxidable AISI 410 ($24.9 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) en comparación con el hierro fundido SAE G4000 ($46.7 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), el calor se disipa más lentamente en el acero inoxidable, resultando en temperaturas más altas.

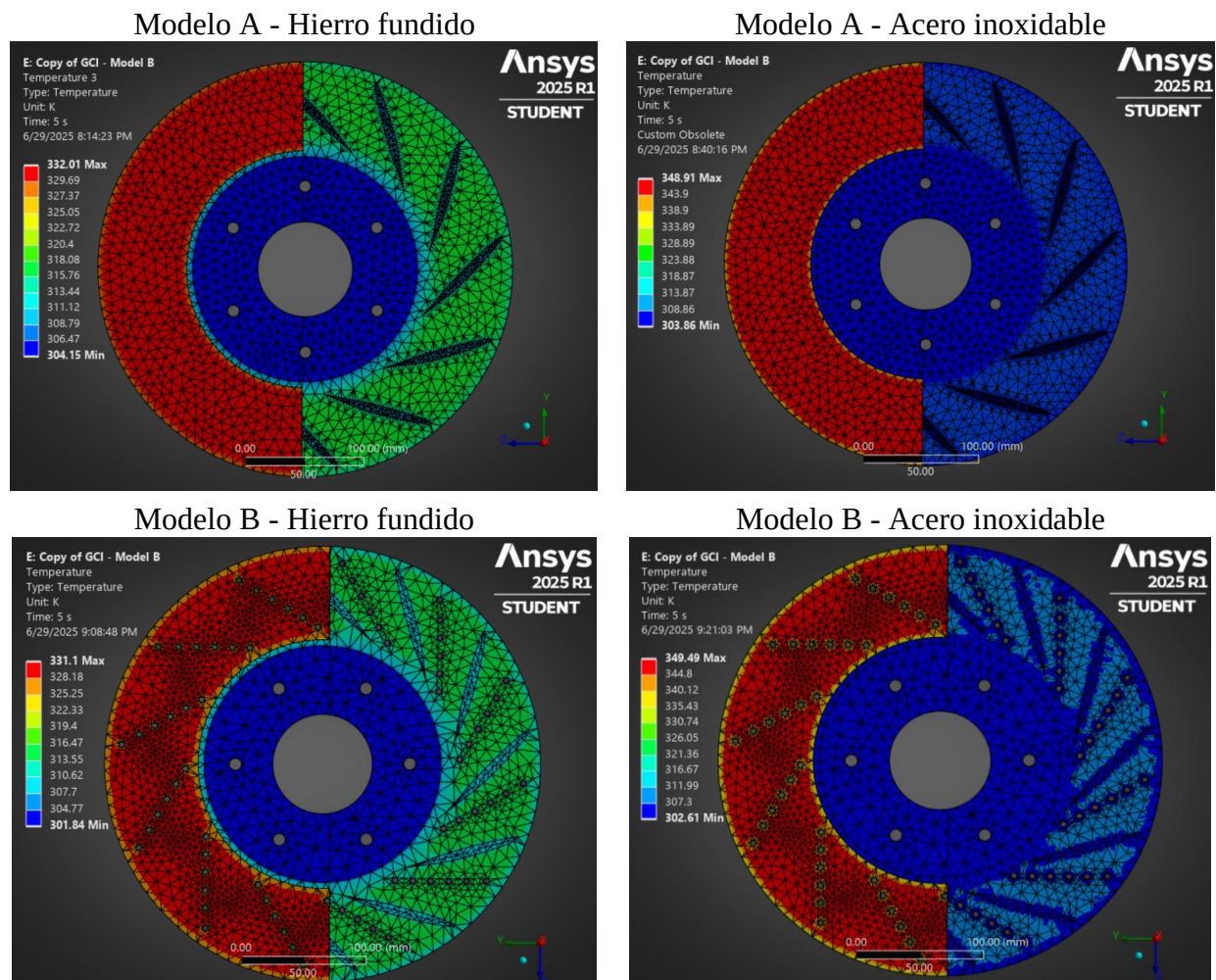
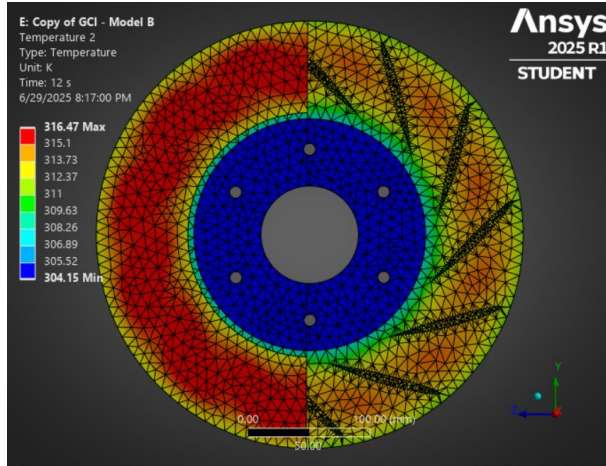
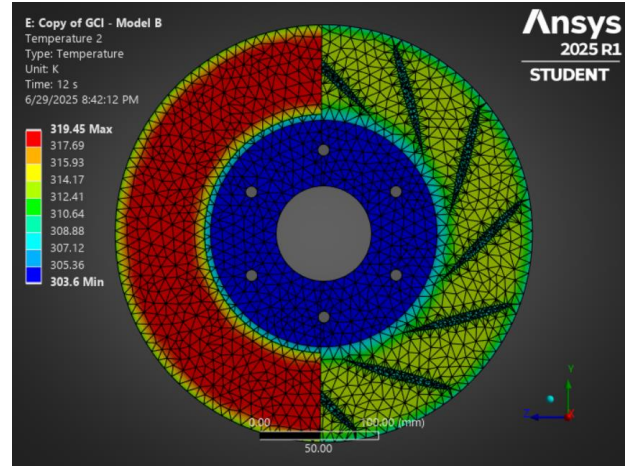


Figura 16: Comparación de la distribución de temperatura al finalizar el frenado ($t=5\text{s}$). Corte transversal YZ. (Autores, 2025)

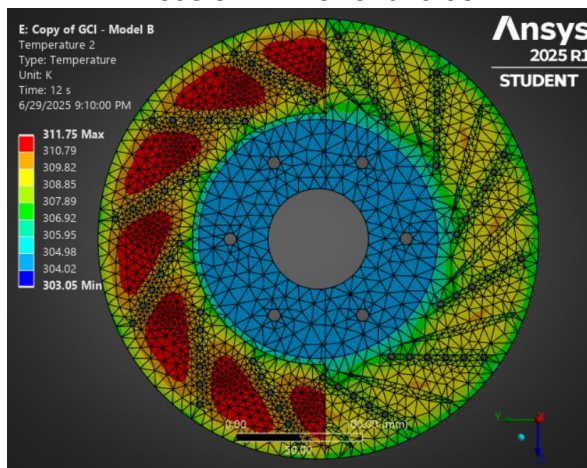
Modelo A - Hierro fundido



Modelo A - Acero inoxidable



Modelo B - Hierro fundido



Modelo B - Acero inoxidable

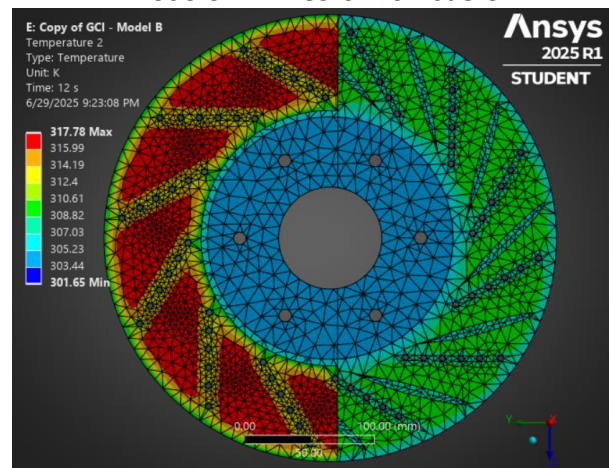
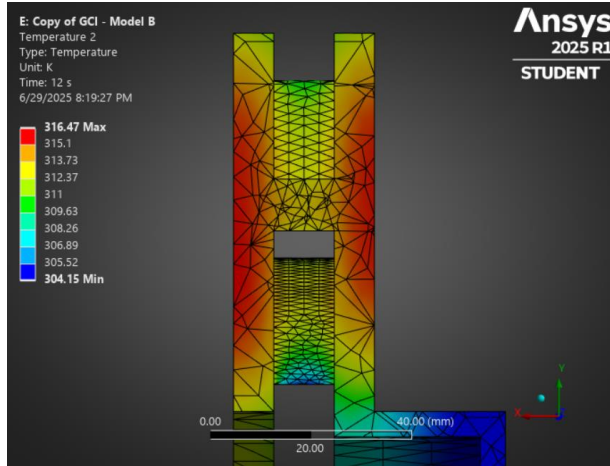
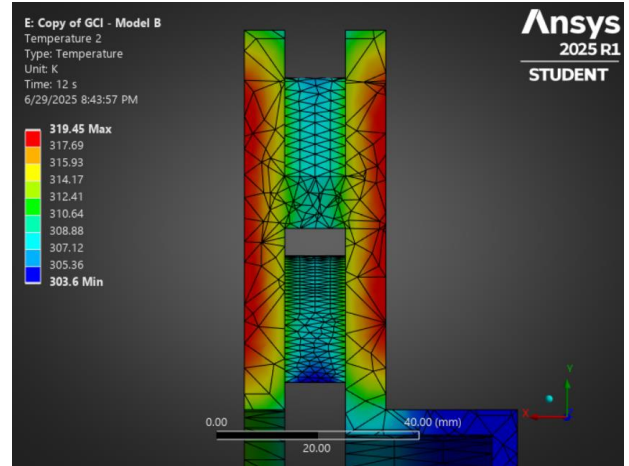


Figura 17: Comparación de la distribución de temperatura 7s después del frenado ($t=12s$). Corte transversal YZ. (Autores, 2025)

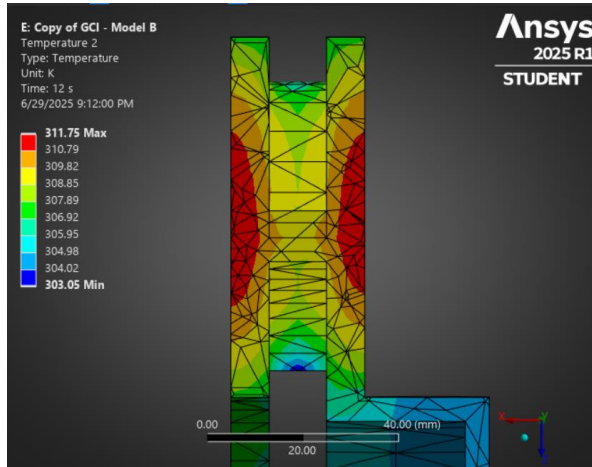
Modelo A - Hierro fundido



Modelo A - Acero inoxidable



Modelo B - Hierro fundido



Modelo B - Acero inoxidable

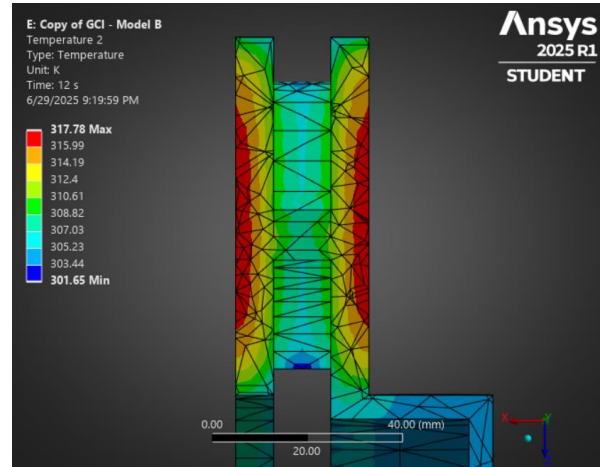


Figura 18: Comparación de la distribución de temperatura 7s después del frenado ($t=12s$). Corte transversal XZ. (Autores, 2025)

En la **Figura 16** se ve el perfil de temperatura del disco luego de tan solo pocos segundos de frenado, desde la temperatura más alta en los extremos en donde el disco absorbe calor, hasta el centro en donde el efecto de la convección está más presente.

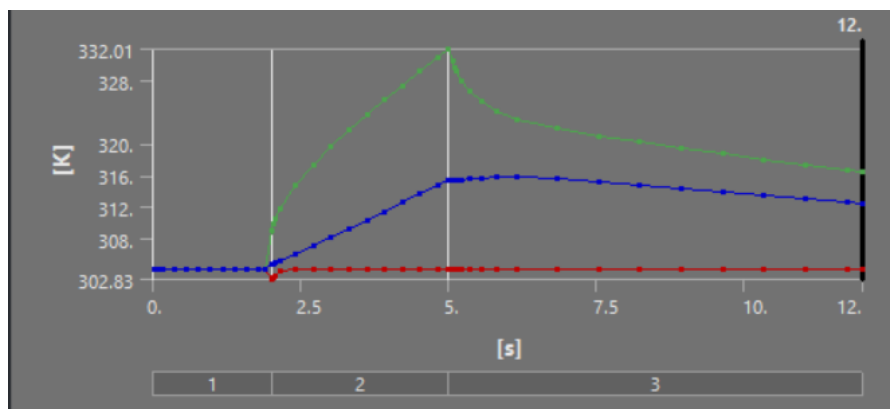


Figura 19: Temperatura vs tiempo - Modelo A – Hierro Fundido

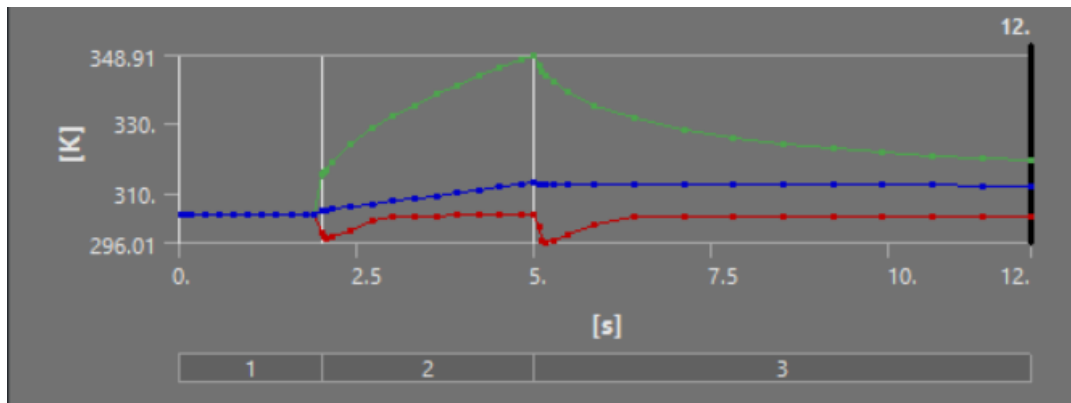


Figura 20: Temperatura vs tiempo - Modelo A - Acero Inoxidable

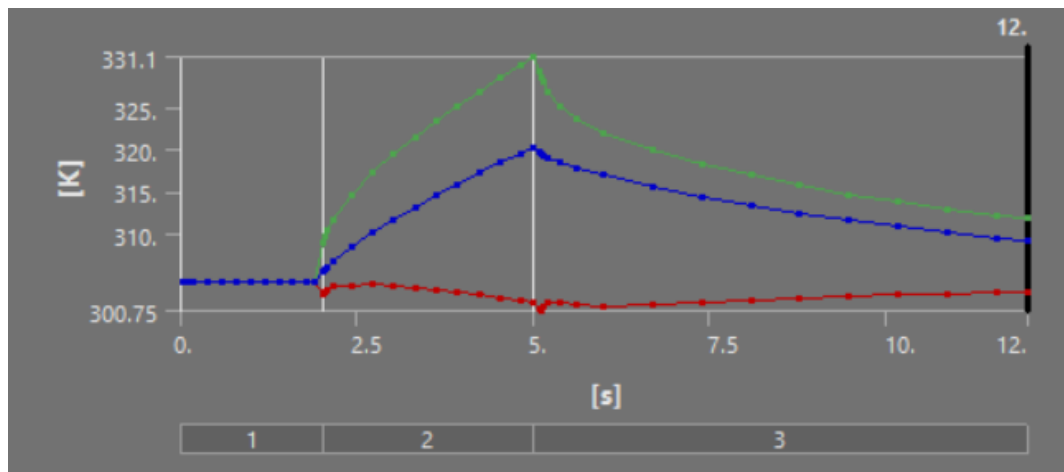


Figura 21: Temperatura vs tiempo - Modelo B – Hierro fundido

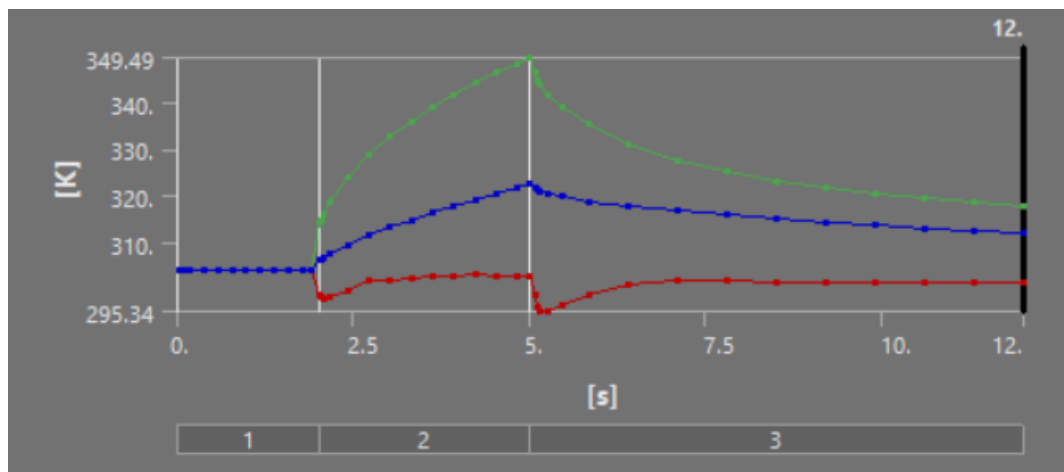


Figura 22: Temperatura vs tiempo - Modelo B – Acero inoxidable

La **Tabla 4** presenta las temperaturas máximas alcanzadas para cada combinación de modelo y material tras el evento de frenado simulado.

Tabla 4: Comparación de la temperatura máxima

	Hierro fundido SAE grado G4000	Acero inoxidable martensítico AISI 410
Modelo A	332.01 K	348.91 K
Modelo B	331.1 K	349.49 K

(Autores, 2025)

Para el hierro fundido SAE grado G4000, el Modelo B presenta una temperatura máxima de 331.10 K, lo que supone una reducción de tan solo el 0.27 % frente a los 332.01 K del Modelo A. Aunque este descenso es muy modesto, sugiere que la adición de perforaciones de ventilación mejora ligeramente la convección del aire en el disco, favoreciendo la evacuación de calor desde la superficie de fricción hacia los canales internos. Esta mejora mínima concuerda con hallazgos previos que reportan reducciones de temperatura inferiores al 1 % en geometrías ventiladas optimizadas para aplicaciones de frenado moderado (Belhocine et al., 2018).

Por su parte, el acero inoxidable martensítico AISI 410 exhibe un comportamiento inverso: el Modelo B alcanza 349.49 K, un aumento del 0.17 % respecto a los 348.91 K del Modelo A. Este ligero incremento indica que las perforaciones de ventilación no aportan mejora térmica en este material, probablemente debido a su menor conductividad térmica, que limita la transferencia de calor desde la zona de contacto con la pastilla hacia las áreas ventiladas. En consecuencia, el calor tiende a concentrarse en torno a los agujeros, dando lugar a temperaturas marginalmente superiores.

En conjunto, ambos resultados confirman que, bajo condiciones de frenada urbana moderada, la geometría ventilada solo contribuye a variaciones de temperatura de décimas de grado. Esto pone de manifiesto la importancia de la conductividad del material en la eficacia de los diseños de ventilación para discos de freno en vehículos convencionales.

4.2 Análisis comparativo respecto a la transferencia de calor

El flujo de calor máximo, que representa la tasa máxima de transferencia de calor por unidad de área desde el disco hacia el entorno (principalmente por convección y radiación), se presenta en la **Tabla 5**.

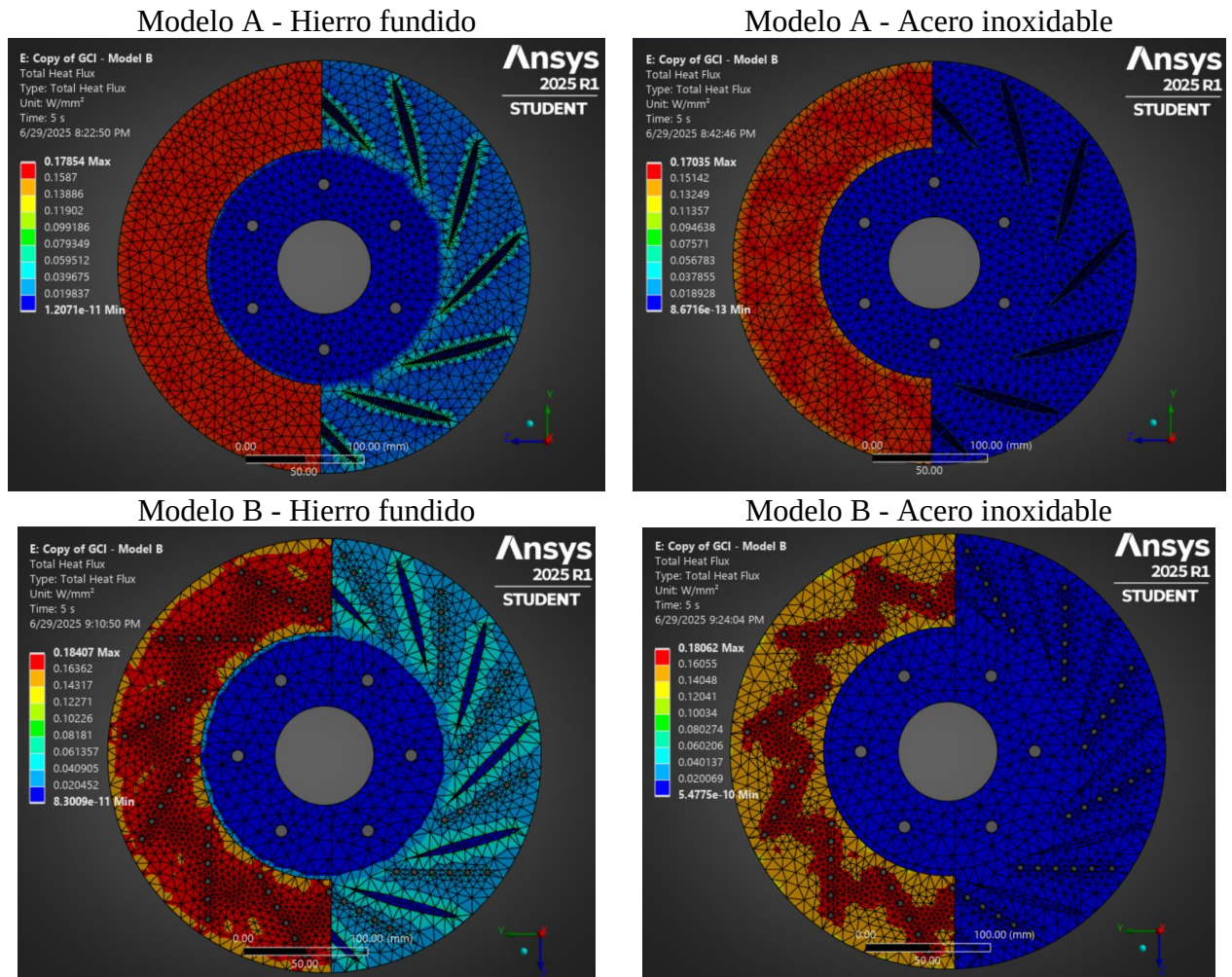


Figura 23: Comparación del perfil del flujo de calor. (Autores, 2024)

Para el flujo de calor:

Tabla 5: Comparación del flujo de calor.

	Hierro fundido SAE grado G4000	Acero inoxidable martensítico AISI 410
Modelo A	178540 W/m ²	170350 W/m ²
Modelo B	184070 W/m ²	180620 W/m ²

(Autores, 2025)

Para el hierro fundido SAE grado G4000, el flujo de calor máximo en el Modelo A es de 178 540 W/m², incrementándose a 184 070 W/m² en el Modelo B, lo que representa un aumento del 3.10 %. Este incremento indica que las perforaciones de ventilación del Modelo B facilitan

un mayor intercambio convectivo al ambiente, mejorando la disipación de calor desde la superficie de fricción hacia la atmósfera urbana.

En el caso del acero inoxidable martensítico AISI 410, el flujo de calor pasa de 170 350 W/m² en el Modelo A a 180 620 W/m² en el Modelo B, un aumento del 6.03 %. La mejora relativamente más pronunciada en este material puede atribuirse a un mayor gradiente térmico local en las áreas ventiladas, consecuencia de su menor conductividad térmica, que concentra calor en la superficie y favorece un intercambio más intenso en las perforaciones. Sin embargo, como se observó en el análisis de temperaturas máximas, esta mayor capacidad de flujo de calor no se traduce en una reducción de la temperatura pico, debido a la limitación en la conducción interna del material.

Estos incrementos de 3–6 % son moderados en comparación con mejoras superiores al 20 % reportadas en algunos estudios de discos altamente optimizados (Amrish, 2016), lo cual puede explicarse por las condiciones de simulación empleadas (velocidad de flujo de aire nominal, geometría y tamaño de perforaciones limitados, y breve duración del evento de frenado). En el contexto de una frenada urbana simple, estas variaciones confirman que los diseños ventilados aportan beneficios de disipación, aunque de magnitud reducida, y subrayan la influencia crítica de la conductividad térmica en la eficacia global del sistema de freno.

5. CONCLUSIONES

En este estudio se comparó el comportamiento térmico de dos configuraciones de discos ventilados (Modelo A: pilares NACA; Modelo B: pilares NACA + perforaciones) fabricados en hierro fundido SAE G4000 y acero inoxidable martensítico AISI 410, bajo un ciclo de frenada urbana simple (60 km/h a -5 m/s^2 en $\approx 3,3 \text{ s}$). Los objetivos planteados orientaron el análisis hacia la temperatura máxima alcanzada y el flujo de calor disipado en cada combinación de diseño y material:

1. Influencia del diseño de ventilación en la disipación de calor

- En hierro fundido SAE G4000, la configuración perforada (Modelo B) redujo la temperatura pico de 332,01 K a 331,10 K ($-0,27 \%$) y aumentó el flujo de calor de $178\,540 \text{ W/m}^2$ a $184\,070 \text{ W/m}^2$ ($+3,10 \%$).
- En AISI 410, el Modelo B elevó levemente la temperatura de 348,91 K a 349,49 K ($+0,17 \%$) y mejoró el flujo de calor de $170\,350 \text{ W/m}^2$ a $180\,620 \text{ W/m}^2$ ($+6,03 \%$).

Estos resultados indican que las perforaciones aportan un beneficio térmico marginal en materiales de alta conductividad (hierro fundido), mientras que, en el acero inoxidable de menor conductividad, concentran el calor en puntos locales, costando más disiparlo.

2. **Determinación de la combinación óptima:** El hierro fundido SAE G4000 con Modelo B ofrece la mejor relación entre reducción de temperatura y aumento de flujo de calor en el escenario urbano analizado. No obstante, la mejora térmica ($<1 \text{ K}$ y 3%) es modesta, lo que sugiere que el diseño de pilares NACA sin perforaciones (Modelo A) sería suficiente para aplicaciones de frenado moderado en ciudad, con una menor complejidad de fabricación.

3. Implicaciones prácticas y recomendaciones

- Bajo condiciones de frenada urbana única, las temperaturas alcanzadas ($\approx 331\text{--}331,1 \text{ K}$ en SAE G4000; $\approx 348,9\text{--}349,5 \text{ K}$ en AISI 410) se mantienen muy por debajo de los límites críticos térmicos de ambos materiales ($\geq 650 \text{ }^\circ\text{C}$ para SAE G4000; $\geq 700 \text{ }^\circ\text{C}$ para AISI 410), garantizando un amplio margen de seguridad.
- La elección de hierro fundido SAE G4000 está plenamente justificada para vehículos convencionales, al combinar buena conductividad térmica con bajo costo y propiedades de fabricación consolidadas.

- La adición de perforaciones proporciona ventajas de disipación, pero su complejidad y el beneficio térmico limitado no justifican su uso obligado en discos para vehículos de uso urbano.

Como línea de trabajo futuro, se propone llevar a cabo simulaciones transitorias que consideren múltiples ciclos de frenada con el fin de evaluar el efecto de la acumulación térmica en el disco; complementar estos análisis con modelos aerodinámicos realistas del vehículo en movimiento mediante la integración de CFD acoplado con FEM para determinar con mayor precisión los coeficientes de convección; y finalmente, validar tanto numérica como experimentalmente el desempeño de materiales avanzados (aleaciones ligeras, compuestos metálicos) y de configuraciones de ventilación alternativas que puedan ofrecer mejoras significativas en la disipación de calor.

En conclusión, los discos ventilados de hierro fundido SAE G4000 con pilares NACA constituyen la opción más equilibrada para aplicaciones urbanas, mientras que las perforaciones adicionales sólo aportan mejoras menores en disipación, reservándose su uso para escenarios de frenado más exigentes o diseños de alto rendimiento.

6. REFERENCIAS

- Agrawal, V. K., & Khairnar, H. P. (2022). Experimental & Analytical Investigation for Optimization of Disc Brake Heat Dissipation Using CFD. *Evergreen*, 9(4), 1076–1089. doi: 10.5109/6625720
- AISI. (2020). *AISI 410 Datasheet*. Retrieved from www.chilexpo.com
- Amrish, P. N. (2016). Computer Aided Design and Analysis of Disc Brake Rotors. *Advances in Automobile Engineering*, 05(02). doi: 10.4172/2167-7670.1000144
- Belhocine, A., & Bouchetara, M. (2018). *THERMOMECHANICAL BEHAVIOUR OF DRY CONTACTS IN DISC BRAKE ROTOR WITH A GREY CAST IRON COMPOSITION*.
- Cardoso, R., & Menezes, D. E. (2016). *AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA PRESSÃO DE CONTATO, DA VELOCIDADE DE ESCORREGAMENTO E DA TEMPERATURA NO DESGASTE E COEFICIENTE DE ATRITO DO PAR PASTILHA-DISCO DE UM MECANISMO DE FREIO VEICULAR UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO*.
- Degenstein. (2006). *DYNAMIC MEASUREMENT OF THE FORCES IN THE FRICTION AREA OF A DISC BRAKE DURING A BRAKING PROCESS*.
- Esteban Cañibano Álvarez, Manuel Ignacio González Hernández, & Omar del Amo Nieto. (2005). Diseño de discos de freno desde un punto de vista multidisciplinar. *DYNA*, 27–32.
- Fédération Internationale de l'Automobile. (2025). *FORMULA 1 TECHNICAL REGULATIONS*.
- García León, R. A., Acosta Pérez, M. A., & Flórez Solano, E. (2015). Análisis del comportamiento de los frenos de disco de los vehículos a partir de la aceleración del proceso de corrosión. *Revista Tecnura*, 19(45), 53. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.3.a04
- García-León, R. A., Echavez Díaz, R. D., & Flórez Solano, E. (2018). Análisis termodinámico de un disco de freno automotriz con pilares de ventilación tipo NACA 66-209. *INGE CUC*, 14(2), 9–18. doi: 10.17981/ingecuc.14.2.2018.01
- İlker Rodrig, & Deniz Önen. (2021). *A heat transfer analysis on formula 1 brake disc*. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/358166666>
- Informador. (2023, October 11). La FIA estudia medidas contra el calor extremo en las carreras. *Informador.Mx*.
- International Organization for Standardization. (2009a). ISO 6310:2009 - Road vehicles — Brake linings — Compressive strain test methods. In International Organization for Standardization.
- International Organization for Standardization. (2009b). ISO 6312:2009 - Road vehicles - Brake linings — Shear test procedure for disc brake pad and drum brake shoe assemblies.

- International Organization for Standardization. (2009c). *ISO 26867:2009 - Road vehicles — Brake lining friction materials — Friction behaviour assessment for automotive brake systems*.
- Jesús Eduardo Rivera López, José Luis Arciniega Martínez, & Guadalupe Juliana Gutiérrez Paredes. (2017). *Estudio numérico del comportamiento dinámico del flujo de aire a través de un disco de freno automotriz con pilares NACA 66-209*.
- Li, W., Yang, X., Wang, S., Xiao, J., & Hou, Q. (2020). Comprehensive analysis on the performance and material of automobile brake discs. In *Metals* (Vol. 10, Issue 3). MDPI AG. doi: 10.3390/met10030377
- Limpert Rudolf. (1975). *Cooling Analysis of Disc Brake Rotors*. Philadelphia. doi: <https://doi.org/10.4271/751014>
- Patil, N., & Jain, P. H. (2019). Ventilation Pattern Analysis Using Ansys CFD Fluent For Brake Disc. In *International Journal of Research and Scientific Innovation (IJRSI) |*: Vol. VI. Retrieved from www.rsisinternational.org
- Rivera-López, J. E., García-León, R. A., Quintero-Orozco, A., Díaz-Torrez, E. J., Gutiérrez-Paredes, G. J., Echavez-Díaz, R., & Arévalo-Ruedas, J. H. (2019). Thermal and fluid-dynamic analysis of an automotive disc brake with ventilation pillars aerodynamic type. *Journal of Physics: Conference Series*, 1386(1). doi: 10.1088/1742-6596/1386/1/012112
- Rudolf Limpert. (2011). *Brake Design and Safety Second Edition*. Retrieved from www.sae.org/BOOKSTORE
- SAE International. (2018). *Automotive Gray Iron Castings(STABILIZED Jan 2018) J431_201801*.
- Society of Automotive Engineers. (1995). *Race Car Vehicle Dynamics*.
- Society of Automotive Engineers. (2012). *SAE J431: “Automotive Gray Iron Castings.”*
- Society of Automotive Engineers. (2018). *SAE J2468TM NOV2018: High-preload deflection and compressibility test procedures for friction materials*. SAE International.
- Society of Automotive Engineers. (2022). *SAE J2933_202209: Verification of brake rotor and drum modal frequencies*. SAE International.
- Sugishita, J., & Fujiyoshi, S. (1981). THE EFFECT OF CAST IRON GRAPHITES ON FRICTION AND WEAR PERFORMANCE I: GRAPHITE FILM FORMATION ON GREY CAST IRON SURFACES. In *Wear* (Vol. 66). Elsevier Sequoia S.A.
- Talati, F., & Jalalifar, S. (2008). Investigation of Heat Transfer Phenomena in a Ventilated Disk Brake Rotor with Straight Radial Rounded Vanes. *Journal of Applied Sciences*, 8, 3583–3592. doi: <https://doi.org/10.3923/jas.2008.3583.3592>
- United Nations Economic Commission for Europe. (2018). *ECE R90: Uniform provisions concerning the approval of replacement brake lining assemblies, drum brake linings and discs and drums for power-driven vehicles and their trailers*.

Varejão Ferreira Pasqual, G., & Malcher, L. (2020, December 14). *Thermal Analysis of Brake Discs for Baja SAE Vehicle*. doi: 10.26678/abcm.encit2020.cit20-0644

IMAGENES:

Prieto Amaya, Á. (2018, 29 de agosto). *Tipos de discos de frenos: Ventajas e inconvenientes de cada uno*. Auto Noción. Archivado desde el original el 1 de abril de 2019.

<https://www.autonocion.com/tipos-discos-de-freno-pros-contras/>