



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE GUAYAQUIL**  
**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA EFICIENCIA DE FRENADO ENTRE COM-  
PUESTOS DE FORRO DE FRICCIÓN DE PASTILLAS DE FRENO PARA UN  
VEHÍCULO SUBCATEGORÍA M1 MEDIANTE PRUEBA DE CARRETERA**

Trabajo de titulación previo a la obtención del

Título de Ingeniero Automotriz

**AUTOR: BRYAN JESUS PINARGOTE BASURTO**

**MARCOS GABRIEL VERA GRIJALVA**

**TUTOR: ING. MARCELO ESTRELLA GUAYASAMÍN, PHD**

Guayaquil – Ecuador

2024

## CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Bryan Jesús Pinargote Basurto con documento de identificación N° 1313525774 y Marcos Gabriel Vera Grijalva con documento de identificación N° 1350042378; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 06 de septiembre del año 2024

Atentamente,



---

Bryan Jesús Pinargote Basurto

1313525774



---

Marcos Gabriel Vera Grijalva

1350042378

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Bryan Jesús Pinargote Basurto con documento de identificación No. 1313525774 y Marcos Gabriel Vera Grijalva con documento de identificación No. 1350042378, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Artículo Académico: “ Análisis Comparativo de la Eficiencia de Frenado entre Compuestos de Forro de Fricción de Pastillas de Freno para un Vehículo Subcategoría M1 Mediante Prueba de Carretera”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Automotriz, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 09 de septiembre del año 2024

Atentamente,



---

Bryan Jesús Pinargote Basurto

1313525774



---

Marcos Gabriel Vera Grijalva

1350042378

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Marcelo Xavier Estrella Guayasamín con documento de identificación N° 1714460761, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA EFICIENCIA DE FRENADO ENTRE COMPUESTOS DE FORRO DE FRICCIÓN DE PASTILLAS DE FRENO PARA UN VEHÍCULO SUBCATEGORÍA M1 MEDIANTE PRUEBA DE CARRETERA , realizado por Bryan Jesús Pinargote Basurto con documento de identificación N° 1313525774 y por Marcos Gabriel Vera Grijalva con documento de identificación N° 1350042378, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 09 de septiembre del año 2024

Atentamente,



Marcelo Xavier Estrella Guayasamín

1714460761

## DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo a todas las personas que me han ayudado a poder culminar mis estudios, a mis amigos más allegados, docentes y familiares, con su apoyo y presencia me han ayudado a seguir y poder culminar este arduo camino.

Mi profundo agradecimiento a mi Tía, María Basurto, a mis hermanos, Lisbeth Pinargote y Jeison Pinargote, a mi padre, Ramon Pinargote, por todo su apoyo incondicional, ayuda y cariño brindado, han sido mis pilares fundamentales en este camino universitario.

Atentamente,

[Bryan Pinargote Basurto]

Dedico el presente trabajo a mis padres, por su apoyo constante y por estar siempre ahí cuando los he necesitado. Sin su aliento y confianza, este proyecto no habría sido posible.

A mis tíos, por sus consejos y respaldo durante todo el proceso.

Y a mi novia, por su paciencia y apoyo incondicional. Gracias por estar a mi lado y ayudarme a superar los desafíos.

Atentamente,

[Marcos Vera]

## AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a Dios por darme la fuerza día a día para poder seguir adelante y ayudarme a superar cada obstáculo que se ha presentado en mis estudios universitarios.

Mi agradecimiento a mi familia por siempre estar dispuestos ayudarme en todo que he propuesto y necesitado, no existen palabra para agradecer todo lo que han hecho por mí, sin su apoyo y aliento nada de esto hubiera sido posible, nunca existirán palabras de agradecimiento por todo el amor y apoyo incondicional que me han brindado.

Mi agradecimiento a mi tutor de titulación, Ing. Marcelo Estrella por toda su ayuda, orientación y paciencia brindada en este proceso, sus enseñanzas han sido de mucha ayuda para poder culminar mi carrera.

Quiero agradecer a todos los docentes de la carrera Ingeniería Automotriz que me brindaron su orientación y enseñanzas en todos estos años, han sido fundamentales para poder culminar mi formación como ingeniero.

Atentamente,

[Bryan Pinargote Basurto]

## AGRADECIMIENTO

Primero quiero agradecer a Dios por guiarme cada día en este complejo proceso de la etapa universitaria.

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a mi familia, cuyo apoyo ha sido fundamental en la culminación de este proyecto.

A mis padres, por su inquebrantable apoyo y por siempre estar a mi lado, brindándome el aliento y la confianza necesarios para seguir adelante. Su paciencia y comprensión han sido cruciales en cada etapa de este proceso.

A mi tutor, Ing. Marcelo Estrella y a todos quienes conforman la carrea de Ingeniería Automotriz.

Gracias a todos por ser mi pilar durante este viaje.

Atentamente,

[Marcos Vera]

## ÍNDICE DE CONTENIDO

Resumen:.....	1
1. Introducción .....	2
2. Materiales y Métodos .....	3
2.1 <i>Montaje experimental</i> .....	3
2.2 <i>Metodología Experimental</i> .....	4
2.3 <i>Protocolo de Pruebas</i> .....	5
3. Resultados .....	6
4. Discusión.....	9
5. Conclusiones .....	10
Apéndice A .....	11
Referencias.....	12

Artículo

# Análisis comparativo de la eficiencia de frenado entre compuestos de forro de fricción de pastillas de freno para un vehículo subcategoría M1 mediante prueba de carretera

Bryan Pinargote Basurto<sup>1</sup>, Marcos Vera Grijalva<sup>2</sup> y Marcelo Estrella-Guayasamín<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidad Politécnica Salesiana; bpinargote@est.ups.edu.ec

<sup>2</sup> Universidad Politécnica Salesiana; mverag2@est.ups.edu.ec

<sup>3</sup> Universidad Politécnica Salesiana; mestrellag@ups.edu.ec

## Resumen:

El presente trabajo presenta un análisis comparativo de la eficiencia de frenado entre compuestos de forros de fricción en un vehículo subcategoría M1. Se utilizó un Kia Picanto 2018 1.2l el cual fue instrumentado mediante un GPS, una interfaz OBDII y sensores de temperatura en las pastillas de freno, para obtener las variables de distancia, tiempo, temperatura y velocidad. Con el fin de obtener la distancia de frenado y la desaceleración media estabilizada, parámetros que según la norma 13H, determinan la eficiencia de frenado. Se analizaron tres compuestos: carbón/asbesto, carbón y cerámica, bajo dos condiciones de carga (carga mínima y carga máxima) y velocidad (50km/h y 70km/h). Los resultados obtenidos al finalizar el estudio fueron que la eficiencia de frenado de la pastilla de cerámica fue un 1,29% mayor que las de carbón/asbesto y 7,31% mayor frente a las de carbón. Las temperaturas alcanzadas estuvieron en un rango mínimo de 50°C hasta un rango máximo de 86°C.

**Palabras clave:** pastillas de freno; distancia de frenado; desaceleración; coeficiente de fricción, eficiencia de frenado.

**Abstract:** This paper presents a comparative analysis of the braking efficiency between friction lining compounds in a M1 subcategory vehicle. A 2018 Kia Picanto 1.2l was used, which was instrumented by means of a GPS, an OBDII interface and temperature sensors in the brake pads, to obtain the variables of distance, time, temperature and speed. In order to obtain the braking distance and the average stabilized deceleration, parameters that according to the 13H standard, determine the braking efficiency. Three compounds were analyzed: carbon/asbestos, carbon and ceramic, under two load conditions (minimum load and maximum load) and speed (50km/h and 70km/h). The results obtained at the end of the study were that the braking efficiency of the ceramic pad was 1.29% higher than that of carbon/asbestos and 7.31% higher than that of carbon. The temperatures reached were in a minimum range of 50°C up to a maximum range of 86°C.

**Citation:** To be added by editorial staff during production.

Academic Editor: Firstname Lastname

Received: date

Revised: date

Accepted: date

Published: date



**Copyright:** © 2023 por los autores. Presentado para su posible publicación en acceso abierto bajo los términos y condiciones de Creative Commons Attribution license.

**Keywords:** brake pads; braking distance; deceleration; coefficient of friction, braking efficiency.

## 1. Introducción

El sistema de freno es un componente esencial de la seguridad activa del vehículo, el cual debe garantizar un frenado seguro y estable tanto de forma parcial como total, a la hora de detener la marcha del automóvil [1]. Méndez [2] afirma que la energía disipada en el sistema de frenos que proviene de la energía cinética y potencial del vehículo se transforma en energía calorífica, que es generada en un corto intervalo de tiempo. Por tal razón, los elementos de frenado deben tener la capacidad de soportar elevados esfuerzos tanto mecánicos como térmicos, ya que el calor acumulado durante el frenado puede disminuir el coeficiente de fricción del disco y de los forros de fricción, generando una deficiencia en el frenado [3].

Según la Agencia Nacional de Tránsito de Ecuador [4], entre 2020 y 2023 se registraron en promedio anual 20,264 accidentes de tránsito, ocasionando 2000 muertes y 18000 lesionados aproximadamente.

Según Synak [5], la eficiencia de frenado de los vehículos se ve afectada debido al cambio en el coeficiente de fricción que sufren los forros de fricción debido a las altas temperaturas, la cual está relacionada con las propiedades del material. Esto fue comprobado por Bellini [6] mediante pruebas experimentales en un banco de pruebas de frenado, donde se evidenció que el coeficiente de fricción (COF) aumentó con el incremento de la temperatura, pasando de 0,4 a 0,6 con temperaturas de 100 °C a 180 °C respectivamente; sin embargo, un aumento excesivo de temperatura (350 °C) provocó un efecto contrario reduciendo el coeficiente de fricción a 0,2. Por su parte Amaguaya [7] llevó a cabo un análisis dinámico en carretera, el cual evalúa la temperatura del disco, el tiempo y la distancia de frenado al utilizar un disco de freno original y uno alterno en un vehículo Chevrolet Aveo 1.6l. Los resultados mostraron que la temperatura obtenida de los discos originales es menor (75.98°C) a diferencia de un disco alterno (80.96°C). El tiempo de frenado en promedio del disco original fue de 2.05 s a diferencia del alterno que fue de 2.22 s. Por otra parte, los valores de distancia de frenado obtenidas con un disco original fueron aproximadamente de 6.24 m a diferencia de lo obtenido por el disco alterno que fue de 7.64 m.

Por otra parte, varios estudios [8, 9] afirman que los discos cerámicos C/C-SiC presentan una mejor eficiencia de frenado debido a su resistencia y baja densidad, aunque el COF es menor en condiciones húmedas debido al agua pulverizada, sin embargo, a altas velocidades este se recupera rápidamente. Chen [10] afirma que el COF obtenido con el uso de pastillas de metalurgia de polvos (P/M) junto con discos cerámicos, superan a los obtenidos con los discos de acero mejorando la tasa de desgaste. Dichos estudios enfatizan la eficacia de los discos cerámicos C/C-SiC en aplicaciones de frenado de alta velocidad resaltando la importancia de considerar el uso de estas combinaciones para optimizar el rendimiento del sistema de frenado.

Existen varias técnicas experimentales para la evaluación de la eficacia de frenado. Una de ellas son las pruebas en ruta, como lo hizo Ochoa en su estudio [11], donde evaluó la eficacia de diferentes tipos de pastillas de freno en un Chevrolet Sail 2018, se realizaron mediciones de temperatura, tiempo y distancia de frenado, sus pruebas involucraron una variedad de maniobras de frenado en carretera para simular condiciones de conducción realistas. Como resultado se obtuvo que las pastillas de la marca Brake Pak (BPP) mostraron mejoras significativas en la capacidad de frenado, alcanzando temperaturas máximas de 115 °C, frente a los 140 °C registrados por las pastillas Double Link Brake (DLBE). Otra técnica experimental es la utilización de bancos de pruebas, como lo hizo Arteaga [12] el cual analizó pastillas de freno de carbono, cerámicas y semimetálicas en 3 distintos vehículos, concluyendo que las pastillas de carbono alcanzaron una eficacia de frenado del 66.5% mayor que los 62% obtenidos por las pastillas semimetálicas. Por otra parte, Benalcazar [13], utilizó un frenómetro modelo MAHA MBT2120 en un vehículo Peugeot 2003 utilizando pastillas de freno (cerámicas, semimetálicas y carbono). Se determinó que las pastillas de carbono mostraron la mayor eficiencia de frenado, con 60.56%. Las pastillas cerámicas también tuvieron un buen desempeño, con eficiencia de 57.75%. Por otro lado, las pastillas semimetálicas fueron las menos eficientes, con una eficiencia de frenado 49.73%. Otra técnica experimental fue realizada por Videršćak [14] mediante pruebas mixtas, combinando pruebas de campo y laboratorio, comparó pastillas

de freno de diferentes precios (bajo, medio y alto), en una van VW Transporter cargada. El estudio determinó que las más caras tuvieron una distancia de frenado un 10% más corta y una temperatura un 30% más baja durante el frenado, mientras que las más baratas mostraron temperaturas más altas, lo que produjo cristalización de los forros afectando su rendimiento.

Existen varios factores que afectan la eficacia de frenado uno de ellos es el peso. En el estudio de Antamba [15] utilizando un Chevrolet Grand Vitara. Se evaluó la fuerza, el tiempo y la eficiencia de frenado en relación con la carga. Las pruebas se realizaron según el reglamento ECE 13-H en un frenómetro Beissbarth BD 640 bajo diferentes cargas: vacío, media y máxima carga. Como resultado se obtuvo que el aumento de carga impacta negativamente en la eficiencia de frenado, presentando una disminución del 24% respecto a la carga mínima. Otro factor para considerar es el terreno, debido que este afecta positiva o negativamente el coeficiente de fricción de las ruedas y por ende, la eficacia de frenado, esto fue demostrado por Reyes [16] que realizó un análisis del desempeño de los frenos en vehículos que incorporan (ABS) en carretera de asfalto y empedrada, Se utilizó tres vehículos (Chevrolet Luv D-Max, Toyota Hilux y Mazda BT-50) donde se obtuvo el tiempo de frenado, distancia de frenado y desaceleración de cada uno de ellos; existen diferencias en las distancias de frenado en ambas superficies, para el vehículo Chevrolet Luv D-Max se tienen una diferencia en la distancia del 1% más en la carretera empedrada, para la camioneta Mazda BT-50 la diferencia es de casi 55,3% y finalmente para el modelo Toyota Hilux la diferencia es el 11,6% comparado con la carretera de asfalto. Los tiempos de frenado promedio entre ambas carreteras se diferencian en aproximadamente un 1 segundo.

Otro factor para considerar es el tipo de discos de frenos; es así que varios estudios demostraron que la implementación de discos hiperventilados reduce considerablemente la temperatura generada por la fricción del frenado y pueden aumentar su eficiencia hasta un 88% aproximadamente. [17-19]

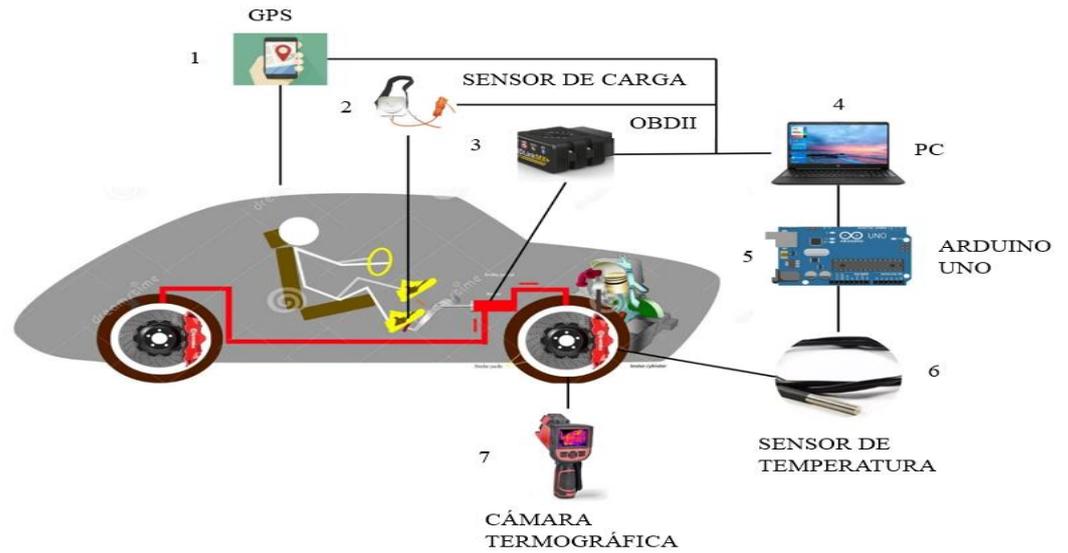
Según los estudios presentados, que han evaluado la eficiencia de frenado, el común denominador es el uso de metodología manual de medición y tiempos cronometrados, es por ello que en este estudio se presenta una metodología para evaluar la eficacia de frenado, mediante instrumentación diferente que permite obtener tanto la distancia, tiempo y velocidades a través de interfaz OBDII y GPS en condiciones reales en carretera y además registrar las temperaturas pico en las pastillas de freno mediante sensores en las ruedas en un vehículo subcategoría M1

## 2. Materiales y Métodos

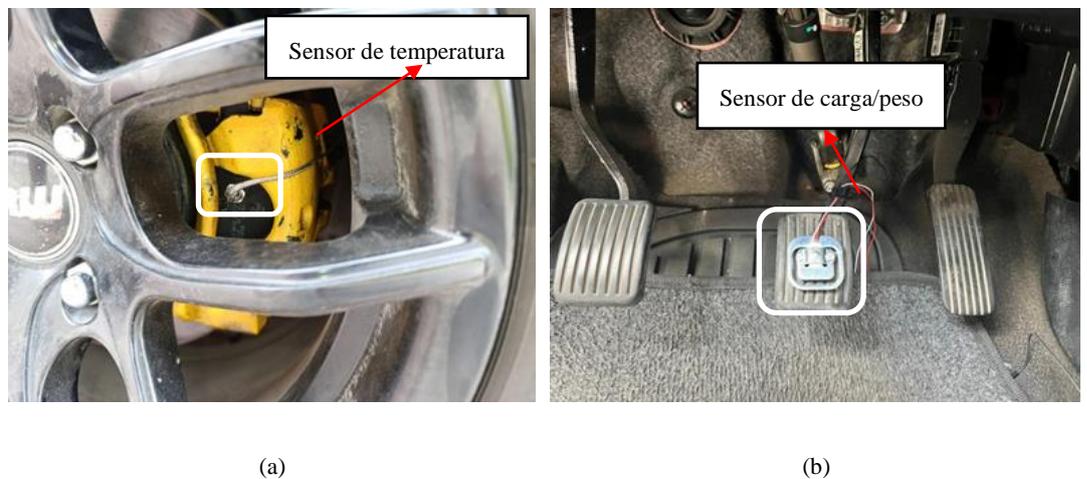
### 2.1 Montaje experimental

Para lograr dicho objetivo se utilizó un vehículo marca Kia modelo Picanto año 2018, el cual en el año 2023 fue el tercer automóvil más vendido a nivel nacional [20]. Este vehículo cuenta con un motor 1200 cc naturalmente aspirado. Su sistema de frenos cuenta con discos de frenos ventilados en la parte delantera y tambor en la parte posterior, el peso del vehículo en vacío es de 894 kg y soporta un peso máximo de 1300 kg.

En la Figura 1 se describe el montaje experimental utilizado para la toma de los datos; según la norma 13H, la cual define que los parámetros que se utilizan para determinar la eficacia de frenado son: la distancia de frenado y desaceleración media. Para obtener la distancia de frenado se utilizó la aplicación Speedometer GPS la cual registra este parámetro en tiempo real, el mismo que fue corroborado utilizando una interfaz OBDII que registra la velocidad del vehículo en tiempo real. Por otra parte, el registro de las temperaturas pico en las pastillas de freno se utilizó dos sensores de temperatura [termocuplas tipo K] y un módulo Max 6675 conectados a un Arduino Uno que permite registrar estos datos en una computadora (Figura 2(a)). Así mismo, la norma 13H determina que la fuerza de frenado admisible para las pruebas de eficiencia de frenado debe estar por debajo de los 50 daN, por lo que para verificar la fuerza ejercida en el pedal se utilizó un sensor de carga y un módulo HX711 conectado igualmente al Arduino Uno y a la computadora (Figura 2(b)). Por último, con ayuda de una cámara termográfica se obtuvo el mapa térmico del conjunto de frenos de las ruedas delanteras.



**Figura 1.** Montaje experimental para pruebas.



**Figura 2.** (a) Termocupla tipo K instalada en la pastilla de freno y (b) Sensor de carga/peso instalado en el pedal de freno.

## 2.2 Metodología Experimental

Se evaluaron 3 forros de fricción (factor A) cuyos materiales fueron, carbón/asbesto, carbono y cerámica. Las pruebas de carretera se realizaron bajo dos condiciones de carga (factor B), carga mínima (893 kg) y carga máxima (1300 kg), a velocidades (factor C) de 50 km/h y 70km/h.

Se realizó un diseño de experimento multifactorial completamente al azar con las variables de estudio y cada uno de sus factores como se muestra en la tabla, con el fin de evaluar su efecto en las variables de salida: distancia [m], desaceleración [m/s<sup>2</sup>] y temperatura [°C]. Se realizaron 6 repeticiones para cada uno de los tratamientos del diseño de experimentos basado en estudios previos similares [7,16].

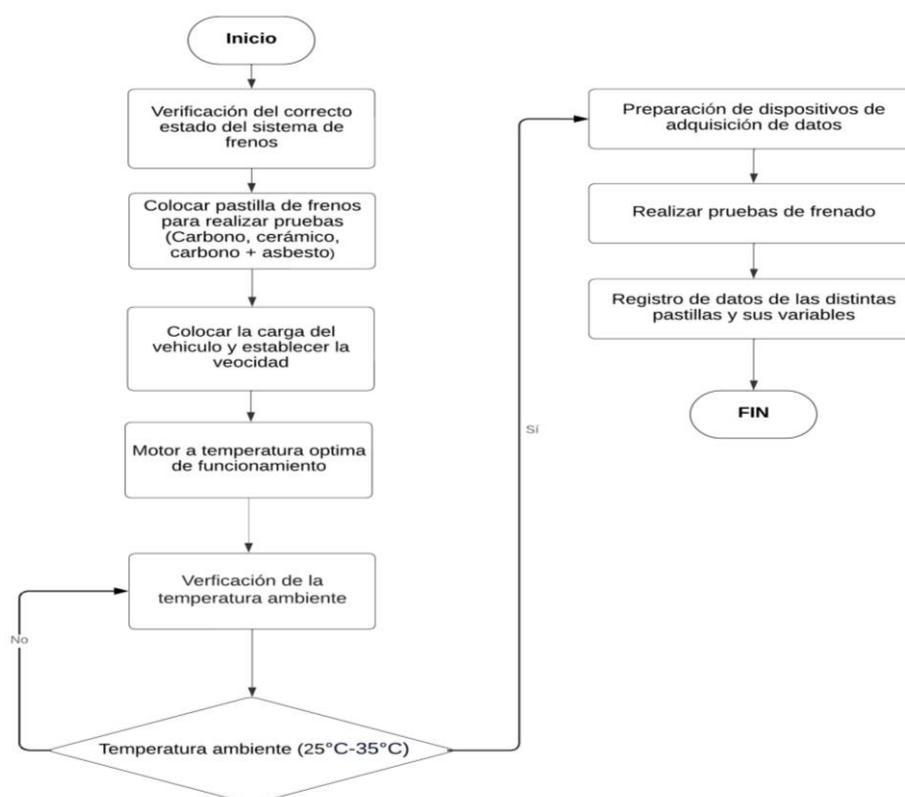
**Tabla 1.** Tratamientos y factores

Tratamientos	Factores			Tratamientos	Factores			Tratamientos	Factores		
	A	B	C		A	B	C		A	B	C
T1	1	1	1	T5	2	1	1	T9	3	1	1
T2	1	1	2	T6	2	1	2	T10	3	1	2
T3	1	2	1	T7	2	2	1	T11	3	2	1
T4	1	2	2	T8	2	2	2	T12	3	2	2

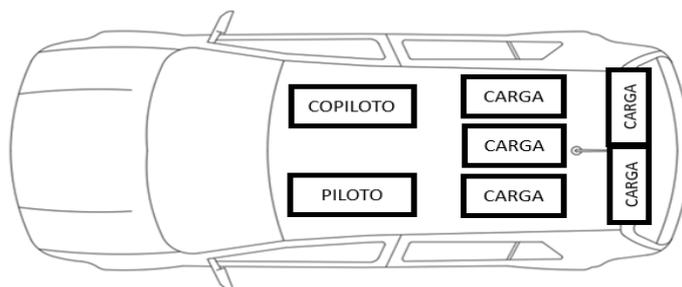
Factor A (Pastilla, Nivel: 1=Carbón/asbesto, 2=Carbón, 3=Cerámica), Factor B (Carga del vehículo, Nivel: 1=Carga mínima, 2=Carga máxima), Factor C (Velocidad, Nivel: 1=50 km/h, 2=70 km/h).

### 2.3 Protocolo de Pruebas

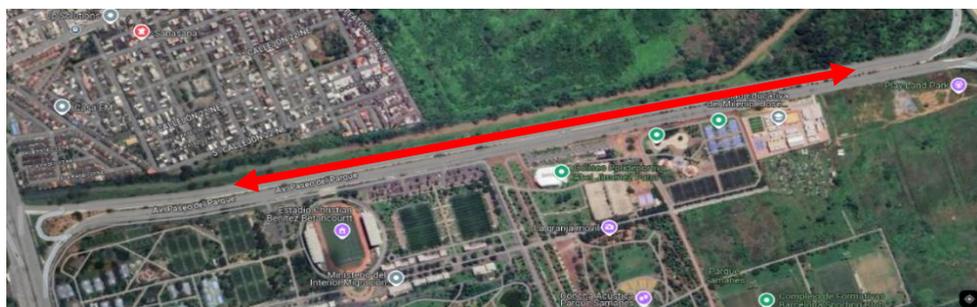
En la Figura 3, se observa el flujograma usado para realizar las pruebas correspondientes. Primero se realizó una inspección del correcto estado y funcionamiento del sistema de frenos, en el cual se verificó la tolerancia mínima permitida para el espesor de los discos que según fabricante es 16mm. Además, se corroboró la profundidad mínima de la banda de rodadura que no debe ser inferior a 1,6 mm y la presión de los neumáticos debe estar en 30 psi. A continuación, se procede a establecer las condiciones de prueba como: tipo de pastillas de freno, distribución de carga (Figura 4) y la velocidad. Posteriormente se verifica que el motor esté a temperatura de funcionamiento, luego se verifica que la temperatura ambiente este entre 25°-35°, y se preparan los dispositivos de adquisición de datos para proceder a realizar la prueba. Al término de la prueba se toma el registro de los datos obtenidos y el mapa térmico del sistema de frenos en las ruedas.

**Figura 3.** Flujograma del protocolo de pruebas.

Las pruebas se realizaron en una carretera de hormigón ubicada en el parque samanes Av. Paseo del Parque Norte de la ciudad de Guayaquil (Figura 5). Con una longitud vial de 2100m, un ancho de vía de 60m, con un total de 10 carriles, 5 de ida y 5 de regreso.



**Figura 4.** Distribución de carga



**Figura 5.** Trayecto utilizado para la realización de las pruebas de carretera, Av. Paseo del parque norte.

### 3. Resultados

Los resultados obtenidos de las pruebas experimentales para distancia, desaceleración y temperatura de las 6 repeticiones desarrolladas para cada tratamiento se muestran en las tablas 2, 3 y 4, respectivamente.

Con el fin de validar los datos experimentales obtenidos se realizó una prueba de normalidad de residuos para cada una de las variables de distancia, desaceleración y temperatura, donde los valores p obtenidos fueron mayores al índice de significancia 0,05 para cada uno de los tratamientos. Así mismo, se realizó la prueba de homocedasticidad donde se observa la tendencia y sugiere que las predicciones del modelo son en su mayoría precisas por lo que el supuesto se cumple. Las figuras de prueba de normalidad y homocedasticidad se pueden observar en el Apéndice A-1.

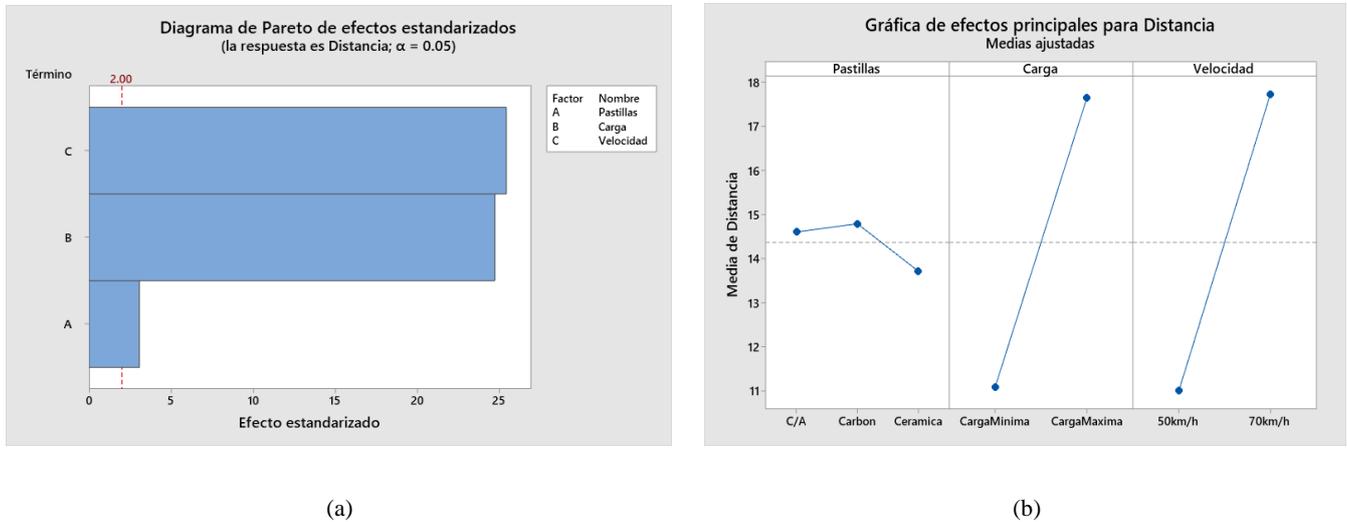
**Tabla 2.** Distancia de Frenado obtenida durante las pruebas de eficiencia de frenado

TRATAMIENTO	FACTOR			DISTANCIA DE FRENADO[m]						
	A	B	C	R1	R2	R3	R4	R5	R6	MEDIA
<b>T1</b>	1	1	1	8,86	7,74	7,85	8,06	7,44	7,52	7,91
<b>T2</b>	1	1	2	12,57	12,26	12,30	14,31	13,79	13,02	13,04
<b>T3</b>	1	2	1	15,65	15,35	14,76	14,96	15,50	14,99	15,20
<b>T4</b>	1	2	2	21,54	22,74	22,81	21,46	22,46	22,44	22,24
<b>T5</b>	2	1	1	8,14	7,33	7,38	8,60	8,68	8,67	8,13
<b>T6</b>	2	1	2	14,91	14,87	14,14	14,02	15,67	14,51	14,68
<b>T7</b>	2	2	1	13,13	13,00	13,70	13,77	13,33	13,75	13,44
<b>T8</b>	2	2	2	23,85	22,71	22,92	22,24	22,40	23,18	22,88
<b>T9</b>	3	1	1	8,62	8,49	8,69	8,92	8,73	8,70	8,69
<b>T10</b>	3	1	2	13,23	13,18	13,77	14,13	13,32	13,49	13,52
<b>T11</b>	3	2	1	13,11	12,68	13,13	13,84	13,02	13,11	13,14
<b>T12</b>	3	2	2	19,69	19,73	19,37	18,48	19,86	19,70	19,47

Factor A (Pastilla, Nivel: 1=Carbón/asbesto, 2=Carbón, 3=Cerámica), Factor B (Carga del vehículo, Nivel: 1=Carga mínima, 2=Carga máxima), Factor C (Velocidad, Nivel: 1=50 km/h, 2=70 km/h).

En la figura 6a se presenta el Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para la variable distancia, donde se observa que el factor C (Velocidad) y el factor B (Carga) tienen mayor efecto sobre la variable de respuesta superando ampliamente el umbral de significancia. Por otro parte, el factor A (Pastillas) presenta un efecto en el umbral de significancia menor que los otros factores, sin embargo, también impacta sobre la distancia de frenado en menor proporción.

La figura 6b se observa la gráfica de efectos principales donde se puede apreciar como varia la distancia promedio en función de los diferentes niveles de cada factor, en cuanto al compuesto de los forros de las pastillas de freno se observa que el compuesto que mayor distancia media presenta es el de carbón, le sigue el de carbón/asbesto, siendo la de cerámica la de menor distancia de frenado. Por otra parte, al analizar el efecto de la carga y la velocidad de frenado, se observa que la distancia promedio aumenta de forma significativa al pasar de carga mínima a carga máxima y de 50km/h a 70km/h, lo cual es consistente con el Diagrama de Pareto.



**Figura 6.** (a) Diagrama de Pareto y (b) Graficas de Efectos Principales para la variable de Distancia de Frenado.

**Tabla 3.** Desaceleración media obtenida durante las pruebas de eficiencia de frenado

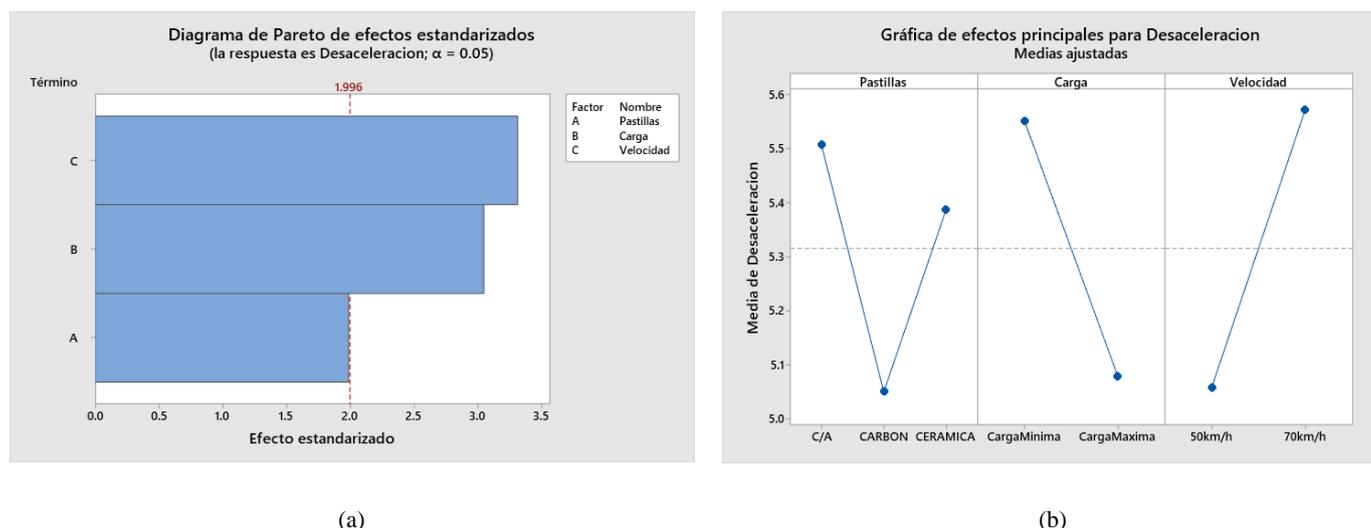
TRATAMIENTO	FACTOR			DESACELERACION [m/s <sup>2</sup> ]						MEDIA
	A	B	C	R1	R2	R3	R4	R5	R6	
T1	1	1	1	4,63	5,67	5,67	7,09	5,78	4,82	5,61
T2	1	1	2	5,67	4,73	4,82	5,45	5,67	4,54	5,14
T3	1	2	1	5,56	6,58	5,56	5,56	4,93	5,56	5,62
T4	1	2	2	4,86	6,58	6,49	5,56	5,56	4,86	5,65
T5	2	1	1	3,97	5,78	4,73	5,67	5,45	5,78	5,32
T6	2	1	2	4,05	4,73	4,63	4,82	4,63	4,05	4,48
T7	2	2	1	6,49	5,64	5,56	5,56	5,56	5,56	5,72
T8	2	2	2	5,48	4,86	5,56	5,48	3,39	3,78	4,75
T9	3	1	1	5,56	5,67	4,82	4,63	4,63	5,89	5,20
T10	3	1	2	3,97	3,97	4,82	4,82	5,67	4,82	4,67
T11	3	2	1	4,93	6,49	5,56	6,58	5,56	6,39	5,91
T12	3	2	2	4,86	5,56	5,56	6,49	6,49	5,56	5,75

Factor A (Pastilla, Nivel: 1=Carbón/asbesto, 2=Carbón, 3=Cerámica), Factor B (Carga del vehículo, Nivel: 1=Carga mínima, 2=Carga máxima), Factor C (Velocidad, Nivel: 1=50 km/h, 2=70 km/h).

En la figura 7a se presenta el Diagrama de Pareto de efectos estandarizados, donde se observa la importancia relativa de los factores involucrados en el experimento respecto a la variable de respuesta desaceleración. Se puede observar que el factor C (Velocidad) y el factor B (Carga) tienen mayor efecto estandarizado sobre la variable de respuesta superando ampliamente el umbral de significancia. Por otro parte el factor A (Pastillas) no supera el umbral de significancia lo que sugiere que este nivel no tiene un impacto significativo sobre la desaceleración a diferencia de los otros factores.

La figura 7b muestra la gráfica de efectos principales donde se aprecia como varia la desaceleración promedio en función de los diferentes niveles en cada factor; al analizar el compuesto de las pastillas de freno se observa un comportamiento en zigzag lo que sugiere que el tipo de material carbón/asbesto tiene un mayor impacto en la desaceleración media estabilizada, seguido por el compuesto de cerámica y de carbón. Por otro lado, si se analiza el factor de carga se observa que a mayor carga se reduce la desaceleración;

mientras que con el factor de velocidad el efecto es contrario, a mayor velocidad la desaceleración será mayor.



**Figura 7.** (a) Diagrama de Pareto y (b) Graficas de Efectos Principales para la variable de Desaceleración.

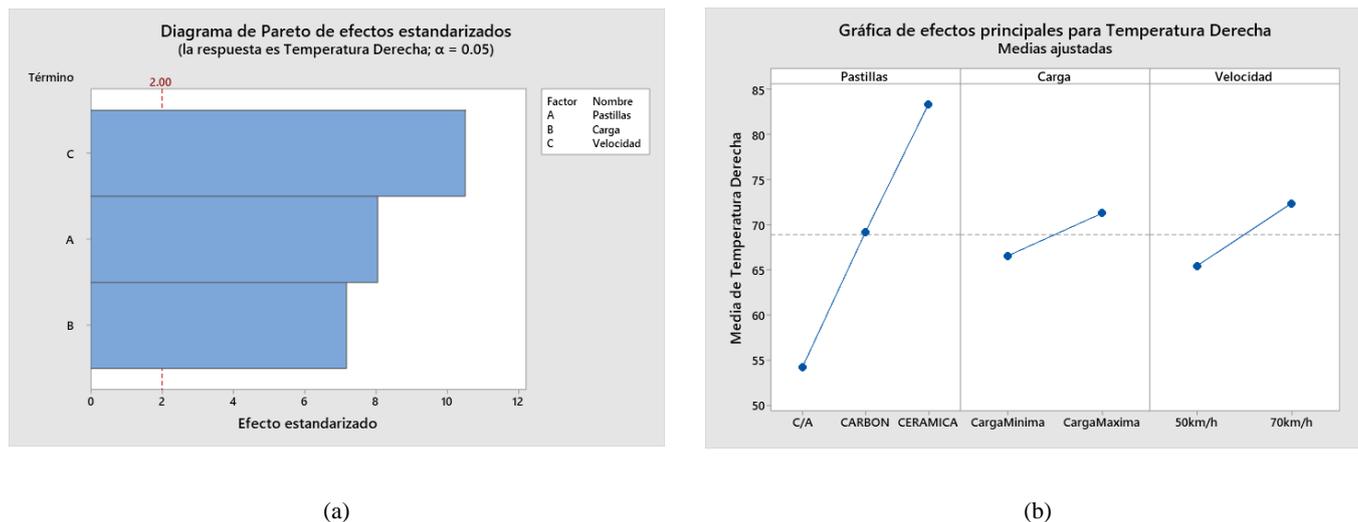
**Tabla 4.** Temperatura de la Pastilla media obtenida durante las pruebas de eficiencia de frenado

TRATAMIENTO	FACTOR			TEMPERATURA [°C]												MEDIA LH	MEDIA RH
	A	B	C	R1		R2		R3		R4		R5		R6			
T1	1	1	1	52,0	50,0	51,2	49,2	51,2	50,0	50,0	52,7	51,5	50,5	50,2	51,7	51,0	50,7
T2	1	1	2	54,2	53,7	55,2	53,5	54,5	55,0	54,7	53,0	54,7	52,0	55,2	54,0	54,7	53,5
T3	1	2	1	56,5	51,5	55,2	51,0	54,5	52,5	55,2	52,0	55,2	53,0	55,5	52,0	55,3	52,0
T4	1	2	2	62,2	59,5	62,2	60,0	63,0	62,5	61,0	58,5	62,7	61,0	62,5	61,7	62,2	60,5
T5	2	1	1	63,0	60,2	63,2	62,7	62,5	61,5	64,0	60,0	61,5	60,7	64,7	63,2	63,1	61,4
T6	2	1	2	67,0	64,2	66,2	64,7	67,7	63,7	68,0	65,7	68,2	62,0	67,0	67,0	67,3	64,5
T7	2	2	1	71,2	70,2	72,7	70,2	71,0	71,2	70,5	70,0	71,2	70,2	72,0	70,2	71,4	70,3
T8	2	2	2	86,2	80,5	85,0	80,5	85,7	80,0	85,5	79,7	85,0	81,0	85,0	80,0	85,4	80,2
T9	3	1	1	80,0	79,7	81,7	79,7	81,5	79,5	79,5	80,2	81,5	81,5	79,2	80,7	80,5	80,2
T10	3	1	2	82,5	81,2	83,2	82,2	83,5	81,0	82,5	83,7	83,0	81,0	82,7	83,2	82,9	82,0
T11	3	2	1	85,0	84,5	85,0	83,7	85,5	84,0	84,0	83,7	84,2	85,7	85,7	84,7	84,9	84,4
T12	3	2	2	88,0	87,0	87,0	86,2	88,5	87,5	87,5	85,7	86,2	84,7	88,7	87,7	87,6	86,5

Factor A (Pastilla, Nivel: 1=Carbón/asbesto, 2=Carbón, 3=Cerámica), Factor B (Carga del vehículo, Nivel: 1=Carga mínima, 2=Carga máxima), Factor C (Velocidad, Nivel: 1=50 km/h, 2=70 km/h).

En la figura 8a se presenta el Diagrama de Pareto de efectos estandarizados, donde se observa la importancia relativa de los factores involucrados en el experimento respecto a la variable de respuesta temperatura, el factor C (Velocidad) y el factor B (Carga) tienen mayor efecto estandarizado sobre la variable de respuesta superando ampliamente el umbral de significancia, por otro parte el factor A (Pastillas) tiene un efecto en el umbral de significancia competitivo con un impacto importante sobre la temperatura.

La figura 8b se muestra la gráfica de efectos principales donde se puede apreciar como varía la temperatura promedio en función de los diferentes niveles en cada factor en la rueda derecha. En cuanto al compuesto de los forros de las pastillas en las pastillas de freno se observa que el compuesto que mayor temperatura media presenta es la de cerámica, le sigue el carbón, siendo la de carbón/asbesto la que menos temperatura presenta. Por otra parte, al analizar el efecto de la carga y la velocidad de frenado, se observa que la distancia promedio aumenta de forma significativa al pasar de carga mínima a carga máxima y de 50km/h a 70km/h, lo cual es consistente con el Diagrama de Pareto.

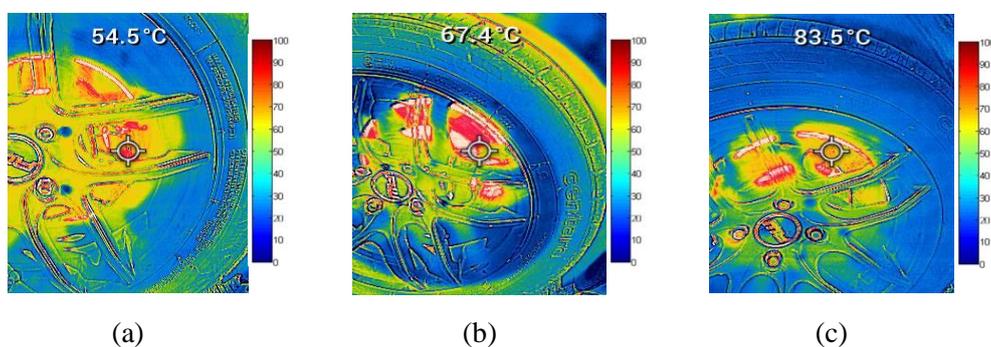


(a)

(b)

**Figura 8.** (a) Diagrama de Pareto y (b) Graficas de Efectos Principales para la variable de Temperatura.

Mediante una cámara termográfica se obtuvo los mapas térmicos de cada una de las ruedas para observar su comportamiento en el conjunto disco de frenos y pastilla. La figura 9(a), (b) y (c) muestra las distribuciones de temperatura alcanzadas en las pruebas por cada una de las pastillas con vehículo cargado y 50km/h.



**Figura 9.** (a) Pastilla de carbón/asbesto; (b) Pastilla de carbón; (c) Pastilla de cerámica.

#### 4. Discusión

Los valores obtenidos en las pruebas experimentales, para las condiciones de carga mínima y velocidad 70 km/h, se observó que la pastilla de cerámica alcanzó una distancia de frenado promedio menor igual a 13,14 m frente a los 15,20 m y 13,44 m de las pastillas de carbón/asbesto y carbón; estos resultados son consistentes con el estudio [13], que demostró el material de cerámica muestra una de las mayores eficiencias de frenado.

Así mismo para la condición de carga máxima a la misma velocidad se observó que la pastilla de cerámica alcanzó una distancia de frenado promedio menor (19,47 m) frente a los 22,44 m y 22,88 m de las pastillas de carbón/asbesto y carbón. Esto representa un 1,29% y 7,31% de mejora en distancia de frenado, respectivamente. Este comportamiento es similar a lo reportado por [15] que demostró que la distancia de frenado aumenta a medida que la carga es mayor, esto se debe a que el sistema de frenos debe soportar mayores esfuerzos por efecto de la inercia producida por el incremento de carga.

Por otra parte, en condiciones de carga mínima y velocidad de 70 km/h, se observó que la pastilla de cerámica tiene una mayor desaceleración promedio menor igual a 5,91 m/s frente a los 5,62 m/s y 5,72 m/s de las pastillas de carbón/asbesto y carbón. Para la misma velocidad en condición de carga máxima la pastilla de cerámica alcanzó una desaceleración mayor de 5,75 m/s frente a los 4,75 m/s y 5,65 m/s de las pastillas de carbón/asbesto y cerámica. Representa un 5,75% aproximadamente de mejora en desaceleración. Según, [12] la desaceleración disminuye cuando la velocidad sea menor y aumenta

cuando la velocidad sea mayor, esto se debe a la necesidad de disipar una mayor cantidad de energía cinética que produce la velocidad del vehículo al momento de frenar.

Por otro lado, si se analiza el factor de carga se observa que a mayor carga se reduce la desaceleración; mientras que con el factor de velocidad el efecto es contrario, a mayor velocidad la desaceleración será mayor. Esto se puede justificar debido a que, a mayor velocidad, la temperatura en los discos de frenos aumenta elevando el coeficiente térmico [11], que a su vez se traduce a una mayor fuerza de frenado y por ende una mayor desaceleración, sin embargo, la distancia de frenado aún sigue siendo mayor que a menor velocidad, esto se justifica por el efecto de la inercia del vehículo.

## 5. Conclusiones

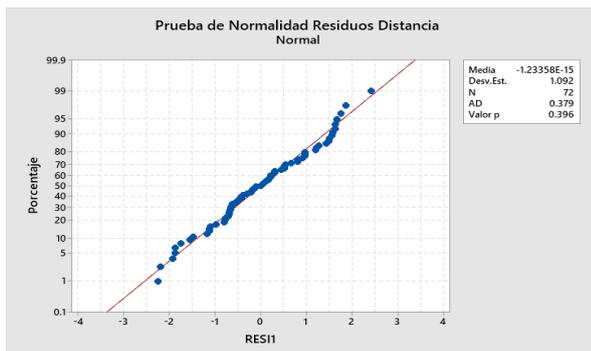
En este estudio se logró evaluar la distancia de frenado en un vehículo subcategoría M1 de tres pastillas de frenos de distinto material (carbón/asbesto, carbón, cerámica) mediante la realización de pruebas en carretera; utilizando aplicaciones tecnológicas como el Speedometer GPS, Interfaz OBD II e instrumentación electrónica para observar las temperaturas de las pastillas de frenos.

Se realizaron las pruebas de carretera considerando el reglamento 13H de las Naciones Unidas, en la ruta del Av. Paseo del Parque – Parque Samanes (2.5 km), donde se determinó que la pastilla de cerámica tiene una mejor eficiencia de frenado con una media de distancia de frenado de 13.70 m y una desaceleración media establecida de 5.38 m/s. Así mismo, la pastilla de carbón/asbesto fue la que tuvo valores similares con una distancia de frenado de 14.59 m y una desaceleración media establecida de 5.50 m/s.

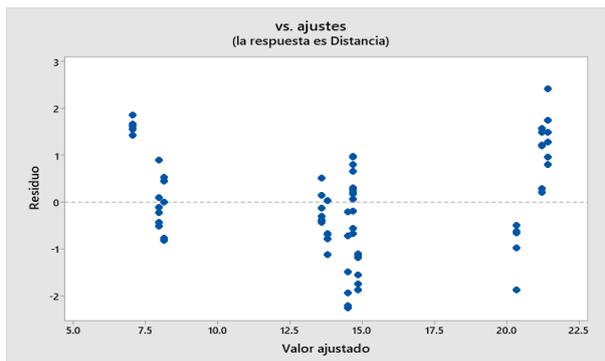
La pastilla de cerámica tuvo temperaturas máximas alcanzadas de 86,5 °C mientras que la pastilla de carbón/asbesto presentó temperaturas menores de 50,7 °C.

Se puede replicar este artículo empleando otro tipo de terreno: asfalto, caminos de segundo orden. Se puede usar distintos materiales de pastillas de frenos: semimetálicas, orgánicas, 100% metálicas. Velocidades más altas: 60 km/h, 80km/h, 100km/h.

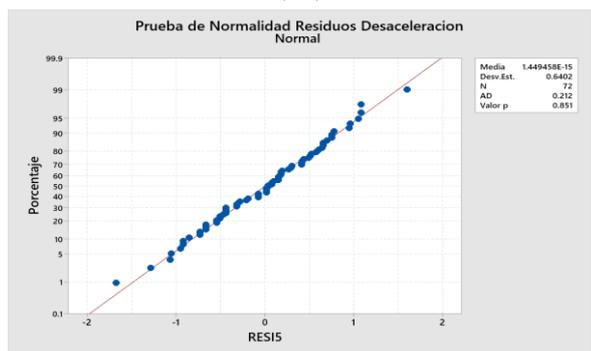
Apéndice A graficas de probabilidad de residuos y homocedasticidad.



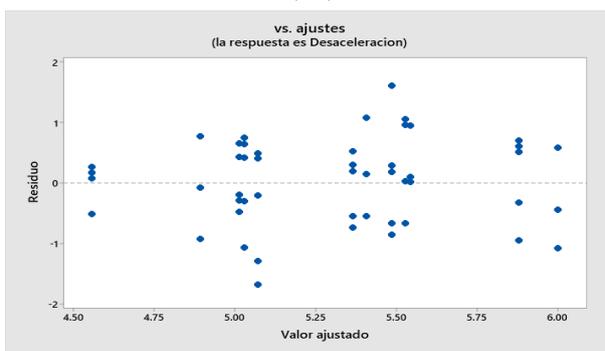
(A1)



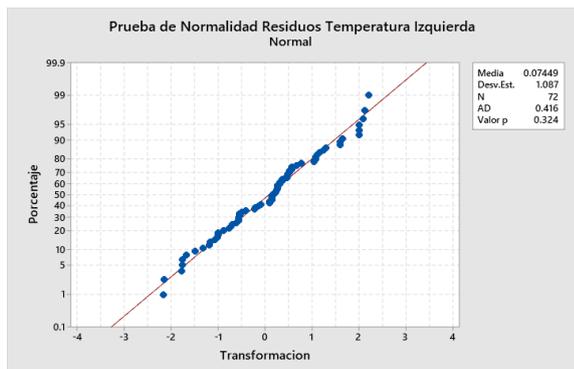
(A2)



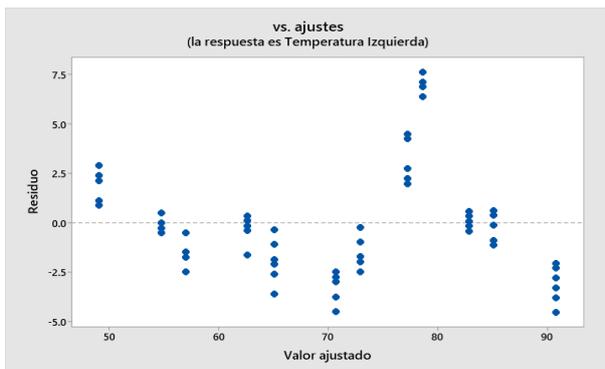
(A3)



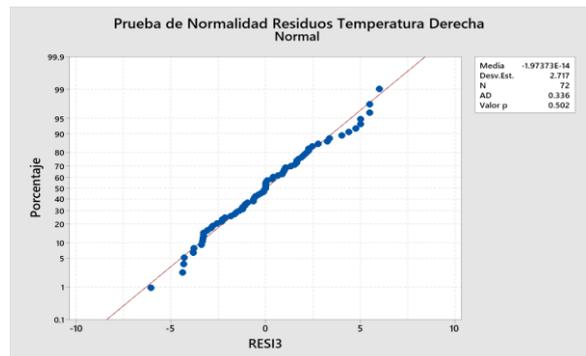
(A4)



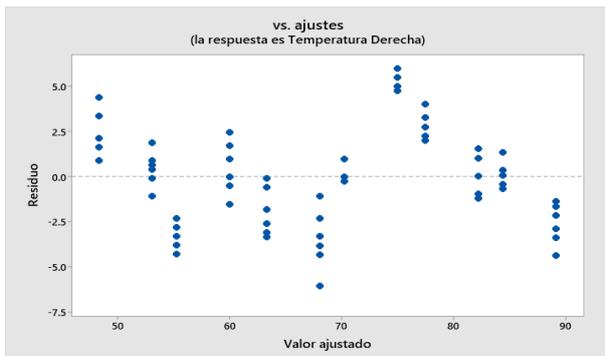
(A5)



(A6)



(A7)



(A8)

Figura A1. Prueba de Normalidad de Residuos y Homocedasticidad: (A), (B): Distancia, (C), (D): Desaceleración, (E), (F): Temperatura LH, (G), (H): Temperatura RH.

## Referencias

1. He, Y., Wang, Y., Wu, F., Yang, R., Wang, P., She, S., & Ren, D. (2023). Temperature monitoring of vehicle brake drum based on dual light fusion and deep learning. *Infrared Physics and Technology*, 133. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2023.104823>
2. Mendez, P., Muñoz, W. (2017) Diseño e implementación en un sistema de medición de temperatura de frenos de disco a bordo en un vehículo.
3. Ilie, F., & Cristescu, A. C. (2024). Structural and Tribological Analysis of Brake Disc–Pad Pair Material for Cars. *Applied Sciences*, 14(8), 3523. <https://doi.org/10.3390/app14083523>
4. ANT. (2024). <https://www.ant.gob.ec/visor-de-siniestralidad-estadisticas/>
5. Synák, F., Jakubovičová, L., & Klačko, M. (2022). Impact of the Choice of Available Brake Discs and Brake Pads at Different Prices on Selected Vehicle Features. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(14). <https://doi.org/10.3390/app12147325>
6. Bellini, C., Di Cocco, V., Iacoviello, D., & Iacoviello, F. (2023). Temperature Influence on Brake Pad Friction Coefficient Modelisation. *Materials* 2024, Vol. 17, Page 189, 17(1), 189. <https://doi.org/10.3390/MA17010189>
7. Amaguaya, E., Moreno, A. (2022). Análisis dinámico de un disco de freno en un vehículo Chevrolet Aveo Emotion 1.6 para el mejoramiento del sistema de frenado.
8. Zhao, S., Yan, Q., Peng, T., Zhang, X., & Wen, Y. (2020). The braking behaviors of Cu-Based powder metallurgy brake pads mated with C/C–SiC disk for high-speed train. *Wear*, 448–449. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203237>
9. Zhao, S., Zhang, X., Zhong, W., Wen, Y., & Yan, Q. (2021). The wet braking and recovery behaviors of the P/M pad mated with C/C–SiC disc for high-speed trains. *Wear*, 468–469. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203609>
10. Chen, F., Li, Z., Luo, Y., Li, D. jian, Ma, W. jie, Zhang, C., Tang, H. xian, Li, F., & Xiao, P. (2021). Braking behaviors of Cu-based PM brake pads mating with C/C–SiC and 30CrMnSi steel discs under high-energy braking. *Wear*, 486–487. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.204019>
11. Ochoa Llumiquinga, F. J., & Uchupanta Acero, B. I. (2021). Estudio de la eficacia de frenado de un vehículo con sistema ABS de subcategoría M1 en función de la temperatura de trabajo de las pastillas de freno.
12. Arteaga, R. J., & Heredia, P. D. (2022). Análisis comparativo de la incidencia de materiales de las pastillas de freno en la eficiencia del frenado en un vehículo.
13. Benalcazar J., Arellano R. (2024). Eficacia de frenado en un vehículo Peugeot año 2003 utilizando distintos materiales en las pastillas de freno.
14. Videršćak, D., Schauerl, Z., Ormuž, K., Šolić, S., Nikšić, M., Milčić, D., & Ormuž, P. (2022). INFLUENCE OF BRAKE PAD PROPERTIES TO BRAKING CHARACTERISTICS. *Promet - Traffic and Transportation*, 34(1). <https://doi.org/10.7307/ptt.v34i1.3846>
15. Antamba, J., Granja, M., Orozco, S. (2018). Análisis de la eficiencia de frenado con base a la capacidad de carga en un vehículo categoría M1. 435-446. ISSN 1390-9304
16. Reyes, G., Tamayo, J. (2015). Análisis del desempeño de los frenos en vehículos que incorporen el sistema antibloqueo (ABS) en caminos irregulares.
17. Rojas, V., Pancha, J., Romero, V., Lema, J. (2021). Análisis de la eficiencia de un disco de freno convencional ventilado con respecto a un disco hiperventilado mediante mecanizado. <https://doi.org/10.17163/ings.n25.2020.06>
18. Quito, S., Vicuña, M. (2023). Rediseño del disco de freno delanteros del vehículo Chevrolet Luv 2.2 para la comparación de la eficiencia de frenado y análisis térmico. <https://doi.org/10.17163/ings.n25.2020.06>
19. Morocho, S., Reza, A. (2022). Estudio de la eficiencia de frenado al adaptar discos de frenos hiperventilados a las cuatro ruedas en un vehículo Chevrolet Chevette año 86.
20. SRI. (2024). <https://srienlinea.sri.gob.ec/sri-en-linea/inicio/NAT>