



UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ

**ESTUDIO Y SIMULACIÓN DE LA
VIBRACIÓN CAUSADA POR EL
FENÓMENO ALABEO QUE SE PRESENTA
EN UN SISTEMA DE FRENO A DISCO DE
AUTOMÓVILES LIVIANOS.**

Autores:
Duarte, Diego
Herrera, Fernando

Urb. Yuma II, calle n° 3. Municipio San Diego
Teléfono (0241) 8714240 (master)-Fax: (0241) 87123



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE ING. MECANICA
CARRERA INGENIERÍA MECÁNICA

**ESTUDIO Y SIMULACIÓN DE LA VIBRACIÓN CAUSADA POR EL
FENÓMENO ALABEO QUE SE PRESENTA EN UN SISTEMA DE FRENO A
DISCO DE AUTOMÓVILES LIVIANOS.**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO.**

Autores: Diego Duarte

C.I: 26.020.550

Fernando Herrera

C.I: 26.280.910

Tutor: Prof. Ing. Tomás González

San Diego, octubre 2019



FI-N -003-2019-2CR (TG)

Valencia, 02 de Julio de 2019

Ciudadanos:
Diego Duarte
C.I:26.020.550
Fernando Herrera
C.I:26.280.910
Presente-

Cumplo con informarle que la Comisión de Trabajo de Grado y Pasantías de la Facultad de Ingeniería en su reunión N° 01-2019 de fecha 02-07-2019 aprobó el proyecto de trabajo de grado titulado **ESTUDIO Y SIMULACIÓN DE LA VIBRACIÓN CAUSADA POR EL FENÓMENO ALABEO QUE SE PRESENTA EN UN SISTEMA DE FRENO A DISCO DE AUTOMÓVILES LIVIANOS**. Presentado por usted(es) como requisitos para optar al título de Ingeniero Mecánico.

Se ratifica la designación del Ing. Tomás González, C.I:18.861.190 y la Ing. Alicia De Pizzella, C.I: 4.598.880 como Tutores Académico y Metodológico que los asesorarán en el desarrollo de este proyecto.

Atentamente,

Prof. Luis Lira

Decano de la Facultad de Ingeniería



c.c. Coordinación de Pasantías y Trabajo de Grado (1).

L/lc.




REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE ING. MECÁNICA
CARRERA INGENIERÍA MECÁNICA

ACEPTACIÓN DEL TUTOR

Quien suscribe, Tomás D. González R., portador(a) de la cédula de identidad N° V-18.861.190, hace constar que he leído el proyecto del trabajo de grado, presentado por el ciudadano(a) Duarte Padilla Diego Alexander, portador(a) de la cédula de identidad N° V-26.020.550, y Fernando Andrés Herrera Parra, portador(a) de la cédula de identidad N°V-26.280.910, titulado **ESTUDIO Y SIMULACIÓN DE LA VIBRACIÓN CAUSADA POR EL FENÓMENO ALABEO QUE SE PRESENTA EN UN SISTEMA DE FRENO A DISCO DE AUTOMÓVILES LIVIANOS** presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Mecánico, considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se designe.

En San Diego, a los 3 días del mes de octubre del año dos mil diecinueve


Ing. Tomás González
V-18.861.190
Tutor académico

AGRADECIMIENTOS

Fernando A. Herrera P.

Quiero agradecerle primeramente a Dios por guiarme, escucharme y darme la fortaleza en esos momentos difíciles, para poder lograr mis metas planteadas.

Les agradezco a mis abuelas Adelaida Morloy, que desde el cielo debe estar orgullosa y celebrando este logro; y en especial a mi vieja querida Silvina García, gracias por todo ese amor y apoyo que recibí de tu parte, por esos bellos momentos que compartimos juntos, desde el cielo debes estar muy contenta y orgullosa de tu nieto. También les agradezco a mis abuelos Medardo Herrera, por ser una guía y protector desde las tierras de papá Dios; y a Cruz Parra, por todo su apoyo, cariño y sabiduría durante todas las etapas de mi vida, le agradezco mucho a Dios por tenerme a mi lado y así puedas celebrar con orgullo todos mis logros.

A mis padres y hermano, Adriana Parra, Ramón Herrera y Alexander Herrera, por su apoyo incondicional durante toda mi vida, por todo ese amor entregado, por su motivación constante, por ayudarme a levantarme en los momentos más difíciles y por todos esos consejos que me han ayudado en la vida, ustedes son mis pilares y por ustedes mejoraré cada día. Este logro es para ustedes, los amo.

A mis tías, tíos, primos, primas y demás familiares, por todo ese apoyo, motivación y consejos, gracias por estar presente durante todo este camino.

A mi compañero de tesis Diego Duarte, por dedicarle largas horas de trabajo para que pudiéramos lograr este objetivo en conjunto.

A mis amigos, Eliomar Ramírez, Víctor Mier y Terán, Roberto Rojas, José Ledezma y María Moreno, por estar presente a lo largo de esta experiencia y por todos esos grandes momentos que disfrutamos.

A mi tutor Ing. Tomás González y todos esos profesores que compartieron sus conocimientos y sabiduría para que este logro fuera posible.

Diego A. Duarte P.

En primer lugar le agradezco a dios por haberme permitido cumplir esta meta que con gran esfuerzo pude lograrlo, todas gracias a que me dio salud y sabiduría.

A mi padre Juvenal Duarte Soto y mi madre Soraida Padilla Rojas por darme la vida primero, luego por educarme y enseñarnos valores a mí y a mi hermana Angie Tatiana Duarte espero que este logro te motive a ti a cumplir tus propias metas y que veas que todo es posible, cuenta conmigo siempre,les agradezco enseñarme el trabajar fuertemente y ganarse las cosas con el esfuerzo a pesar de los problemas siempre mantenernos unidos y seguir procurando el bienestar de nuestra familia. Estaré eternamente agradecido por el apoyo que me brindaron para que pueda cumplir esta meta. Me siento orgulloso de tener unos padres como ustedes. .

A todos mis familiares en especial a mis abuelos, Luis Padilla, Benita Rojas que desde el cielo nos cuidan y seguro están orgullosos de su hija Soraida y su nieto , al igual que Vicente Duarte y Josefina Soto que desde la distancia nos llenan de bendiciones y orgullosos de su hijo Juvenal y su nieto.

A mi novia Sharit Michelle Riera por acompañarme en este momento tan importante en mi vida, me siento feliz de que también cumplas tu meta de graduarte y de acompañarte en este momento que lograste con tanto esfuerzo

A mis amigos y colegas Christian Ojeda, Neil Serrano y Alejandro morales por darme su confianza desde el comienzo y hacer de esto una experiencia única les deseo mucho éxito en sus vidas.

A mi compañero de tesis Fernando Herrera por aceptar el reto de realizar este arduo trabajo dando lo mejor de sí mismo, para que juntos hiciéramos posible este gran trabajo.

A mi tutor el Ingeniero Tomas Gonzales por sus concejos para la realización de este trabajo, al igual que todos mis profesores que dieron lo mejor de sí enseñándome con ética y moral los valores profesionales.

ÍNDICE

CONTENIDO	Pp.
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE TABLAS	xviii
RESUMEN	xix
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO	
I EL PROBLEMA	3
1.1. Planteamiento del Problema.	3
1.2. Formulación del Problema.....	5
1.3. Objetivos de la Investigación	5
1.3.1. Objetivo general.....	5
1.3.2. Objetivos específicos	6
1.4. Justificación	6
1.5. Alcance	7
1.6. Limitaciones	8
II MARCO TEÓRICO	9
2.1. Antecedentes.....	9
2.2. Bases teóricas	12
2.2.1. Frenos de disco	12
2.2.2. Disco de Freno	14
2.2.2.1. Material de los Discos de Freno	15
2.2.2.2. Tipos de Disco de Frenos	16
2.2.3. Pastillas de Freno	21
2.2.3.1. Composición de las pastillas de freno.	24
2.2.4. Pinzas de freno.....	27

2.2.4.1. Tipos de montaje	28
2.2.5. Sistema de frenos hidráulico	33
2.2.6. Servofreno.....	33
2.2.7. Sistema antibloqueo de ruedas (ABS)	34
2.2.8. Esfuerzo mecánico generado en la superficie de contacto disco- pastilla.	35
2.2.9. Esfuerzo térmico generado en la superficie de contacto disco-pastilla.	36
2.2.10. Parámetros de diseño de un sistema de freno a disco.	36
2.2.11. Energía disipada en sistema de freno.....	38
2.2.12. Fuerza de roce sobre la calzada.	39
2.2.13. Longitud de frenado.....	40
2.2.14. Aceleración del disco de freno.....	40
2.2.15. Tiempo de frenado.	41
2.2.16. Cálculo del calor generado en el proceso de frenado.....	41
2.2.17. Difusividad térmica.....	41
2.2.18. Análisis térmico del disco de freno.....	42
2.2.18.1. Aumento de temperatura.	42
2.2.18.2. Enfriamiento	43
2.2.18.3. Convección en el disco de freno.....	43
2.2.18.4. Numero de Reynolds.	44
2.2.18.4. Numero de Nusselt.	44
III MARCO METODOLÓGICO	49
3.1. Tipo de investigación.....	49
3.2. Diseño de la investigación	49
3.3. Nivel de Investigación	50
3.4. Población y Muestra	51
3.4.1. Población.....	51

3.4.2. Muestra	51
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.	51
3.6. Fases de Investigación	52
IV RESULTADOS	54
5.1. Búsqueda y revisión de información bibliográfica acerca de las variables que causan el fenómeno en estudio en los sistemas de discos de freno.	54
5.1.1. Sistemas de frenos.....	55
5.1.1.1. Freno de tambor.....	56
5.1.1.2. Freno de disco.....	56
5.1.2. Distribución de la fuerza de frenado en un vehículo.	57
5.1.3. Diagnósis de ruidos y vibraciones.	58
5.1.4. Chirrido del freno.....	59
5.1.4.1. Modificar el contacto de las pastillas con el disco.	59
5.1.4.2. Modificar el contacto de las pastillas con la pinza.	60
5.1.5. Ruido del freno.	61
5.1.6. Vibración del freno.	62
5.1.7. Desgaste desigual del disco.	63
5.1.8. Óxido en la superficie de fricción.....	63
5.1.9. Deformación del disco.	64
5.1.10. Comprobación de los discos.	65
5.1.10.1. Discos azulados.	66
5.1.10.2. Discos agrietados.....	66
5.1.10.3. Discos rayados.....	67
5.1.10.4. Discos oxidados.....	67
5.1.10.4. Discos con fisuras en los orificios.....	68
5.1.11. Mediciones.....	68
5.1.11.1. Espesor del disco.	68
5.1.11.2. Alabeo.....	70

5.1.12. Comprobación de las pastillas.	71
5.1.12.1. Pastillas cristalizadas.	71
5.1.12.2. Pastillas contaminadas.	71
5.1.12.3. Pastillas quemadas.	72
5.1.12.4. Pastillas con desgaste irregular.	73
5.1.13. Comprobación de las pinzas.	75
5.1.13.1. Comprobación visual.	75
5.1.13.2. Comprobación del funcionamiento.	75
5.2. Analizar e identificar el funcionamiento del sistema de discos de freno de vehículos ligeros en general.	76
5.2.1. Sistema de frenos de un vehículo liviano.	76
5.2.2. Circuito principal de frenos.	77
5.2.2.1. Distribución "II".	77
5.2.2.2. Distribución "X".	78
5.2.2.4. Distribución "LL".	78
5.2.2.5. Distribución "HH".	79
5.2.3. Funcionamiento de los frenos hidráulicos.	79
5.2.4. Servofreno.	79
5.2.5. Cilindro principal o Bomba de freno.	80
5.2.6. Conjunto de freno delantero de disco.	81
5.2.7. Conjunto de freno posterior de tambor.	82
5.2.8. Freno de mano.	82
5.2.9. Líquido del circuito de frenos.	83
5.2.10. Sistemas de Frenos Antibloqueo (A.B.S.).	86
5.2.10.1. Componentes del sistema ABS.	89
5.2.11. Fuerzas y momentos que actúan en el proceso de frenado.	94
5.2.12. Fuerza de frenado.	95
5.2.13. Resistencia a la rodadura.	96
5.2.14. Acciones aerodinámicas.	96

5.2.15. Resistencia del motor y transmisión.	97
5.2.16. Adherencia y condiciones.	97
5.2.17. Deslizamiento.	100
5.2.17.1. Deslizamiento longitudinal.....	100
5.2.17.2. Deslizamiento transversal.....	103
5.2.18. Parámetros de diseño.	103
5.2.18.1. Cálculo de la energía absorbida en los discos de freno, generada por el trabajo de roce.....	103
5.2.18.2. Calculo de la fuerza de roce sobre la calzada.....	105
5.2.18.3. Calculo de la longitud de frenado.....	106
5.2.18.4. Aceleración del disco de freno.	106
5.2.18.5. Tiempo de detención del vehículo.....	106
5.2.18.6. Cálculo de calor generado en el proceso de frenado.	107
5.2.18.7. Cálculo de la difusividad térmica.	108
5.2.18.8. Análisis térmico del disco de Freno.	108
5.2.18.9. Cálculo de la velocidad periférica.	116
5.2.18.10. Cálculo de fuerza de presión ejercida sobre el disco de freno y el pedal de freno.	116
5.2.18.11. Calculo del Torque total de Frenado.	118
5.2.19. Comportamiento del material del disco de freno.	118
5.3. Evaluar los distintos avances tecnológicos que se han creado para contrarrestar específicamente el fenómeno del alabeo en los sistemas de frenos de disco.	120
5.3.1. Importancia de los sistemas de frenos.	120
5.3.2. Par Residual.	121
5.3.3. Diseños de disco de frenos.....	121
5.3.3.1. Ventajas e inconvenientes de cada diseño.....	122
5.3.4. Material del disco de frenos.....	126
5.3.5. Nuevas Tecnologías.	127

5.3.5.1. Electrohidráulico.	127
5.3.5.2. Sistema eléctrico.....	127
5.3.5.3. Brake-by-Were.	127
5.4. Realizar una simulación del comportamiento del sistema de discos de frenos de un vehículo liviano con el fin de determinar las condiciones que producen el labeo en el automóvil.	128
5.4.1. Análisis térmico.	130
5.4.2. Análisis de frecuencia.	137
5.5. Proponer el uso y selección adecuado del sistema de frenos del automóvil para reducir el riesgo de producir el alabeo, alargando la vida útil de los discos de freno.	144
5.5.1. ¿Cómo frenar correctamente?	145
5.5.2. ¿Qué hacer si fallan los frenos?	148
5.5.3. Cómo seleccionar los mejores discos de freno.	149
5.5.4. Discos de freno según su uso.	149
5.5.5. ¿Cuánto cuesta sustituir los discos de freno?.....	150
5.5.6. Mantenimiento de sistema de frenos.....	150
CONCLUSIONES	152
RECOMENDACIONES	154
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	155
APENDICES	157
ANEXOS	159

LISTA DE FIGURAS

FIGURA		Pp.
1	Elementos que constituyen el conjunto de frenos de disco.....	13
2	Vista de un disco de freno de una pieza, un disco flexibilizado y un disco flotante.....	14
3	Características básicas de la fundición de los discos.....	15
4	Composición de los discos de frenos.....	15
5	Disco de freno macizo.....	16
6	Canales de refrigeración radiales y direccionales en discos de freno....	17
7	Ventilación dinámica de disco de frenos.....	18
8	Vista de discos de frenos con refrigeración direccional.....	18
9	Disco de freno perforado o flotante.....	19
10	Disco de freno estriado o ranurado	19
11	Disco de freno bimaternal.....	20
12	Disco de freno fabricado en carbono y pastillas de freno específicas....	21
13	Vista de unas pastillas de freno.....	21
14	Grafica de coeficiente de fricción correcto e incorrecto en función de la temperatura.....	22
	...	
15	Partes de una pastilla de freno.....	23
16	Clasificación de los coeficientes de fricción y su codificación en una pastilla de freno.....	24
17	Composición porcentual de los materiales de fricción.....	25
18	Representación gráfica de características de una pastilla de freno normal y de alto rendimiento.....	26
19	Recalentamiento y desvanecimiento del disco y las pastillas.....	26
20	Despiece de una pinza de frenos.....	27
21	Despiece de un freno de disco con pinza fija.....	28

22	Despiece de un freno de disco con pinza flotante.....	29
23	Fases de funcionamiento de un freno de disco con marco flotante.....	30
24	Constitución de una pinza de freno oscilante.....	30
25	Fases de funcionamiento de un freno de disco con pinza oscilante.....	31
26	Constitución de una pinza de freno flotante que incorpora el sistema de freno de estacionamiento.....	32
27	Funcionamiento de una pinza de freno flotante con freno de estacionamiento incorporado.....	33
28	Servofreno.....	34
29	Esfuerzos mecánicos a los que se encuentran sometida la superficie de contacto disco-pastilla.....	35
30	Vista frontal y lateral del disco y pastilla de freno.....	36
31	Situación de contacto entre la pastilla y el disco.....	55
32	Dispositivo de frenado de tambor y zapatas.....	56
33	Dispositivo de freno de disco.....	57
34	Esfuerzos desarrollados en la acción de frenado.....	57
35	Diagnostico de avería.....	58
36	Biselado de una pastilla de freno.....	60
37	Lubricación de la base de las pastillas con pasta de cobre especial alta temperatura.....	61
38	Desgaste desigual por el alabeo del disco y el contacto con las pastillas de freno.....	63
39	Vista de un disco de freno oxidado por un largo periodo de tiempo con el vehículo estacionado.....	64
40	Vista de un disco de freno con puntos de calor (deformación térmica) provocados por sobrecalentamiento.....	65
41	Vista de un disco con la superficie de fricción con marcas azuladas.....	66
42	Vista de un disco con la superficie de fricción agrietada.....	67
43	Vista de un disco con la superficie de fricción rayada.....	67

44	Vista de un disco de freno oxidado.....	68
45	Vista de una fisura en el orificio del disco para el tornillo de la rueda.....	68
46	Medición del grosor del disco mediante micrómetro.....	69
47	Espesor mínimo troquelado en algunos discos de freno.....	69
48	Medición del alabeo de un disco de freno.....	70
49	Pastilla cristalizada.....	71
50	Pastilla contaminada.....	72
51	Pastilla quemada.....	72
52	Pastilla con desgaste irregular.....	73
53	Pastilla con desprendimiento de ferodo.....	74
54	Vista de una pinza de freno con los émbolos dañados.....	75
55	Esquema de un sistema de frenos básico.....	76
56	Distribución en "II".....	78
57	Distribución "X".....	78
58	Distribución "HI".....	78
59	Distribución "LL".....	78
60	Distribución "HH".....	79
61	Elementos del servofreno.....	80
62	Cilindro principal.....	81
63	Conjunto de freno posterior de tambor.....	82
64	Líquido de freno transmitiendo la fuerza de frenado.....	84
65	Características de líquido de frenos.....	84
66	Componentes del ABS.....	88
67	Sensor en la rueda.....	90
68	Colocación del sensor de rueda.....	91
69	Unidad de Control Electrónico (ECU).....	92
70	Hidrogrupo.....	93

71	Válvula moduladora ABS.....	94
72	Fuerzas principales en el proceso de frenado.....	94
73	Resistencia aerodinámica y de rodadura frente a velocidad del vehículo.	97
74	Coefficiente de adherencia según carretera y neumático.....	98
75	Fuerzas generadas en la rueda.....	99
76	Transferencia de peso del eje trasero al delantero.....	100
77	Esfuerzos en condición normal y bloqueo del eje trasero.....	101
78	Inestabilidad direccional.....	101
79	Bloqueo de las ruedas traseras.....	102
80	Condición normal y de bloqueo en eje delantero.....	102
81	Pérdida de control direccional.....	102
82	Coefficiente de adherencia o presión de frenado (μ_b).....	105
83	Área de contacto de la pastilla.....	107
84	Propiedades de la fundición gris.....	108
85	Flujo alrededor de un cilindro.....	111
86	Convección periférica.....	111
87	Convección en la campana del disco.....	113
88	Convección lateral en el disco.....	114
89	Aumento de la fuerza en cada elemento del sistema de freno.....	117
90	Discos de freno ondulados.....	125
91	Vista frontal y posterior del disco de freno en estudio.....	128
92	Propiedades de masa para el disco de freno.....	129
93	Modelo 3D de la pastilla.....	130
94	Propiedades del análisis térmico.....	131
95	Carga de temperatura.....	132
96	Carga de convección.....	134
97	Carga de energía térmica o potencia calórica.....	135

98	Apariencia del mallado para el análisis térmico.....	135
99	Resultados del análisis térmico.....	136
100	Resultados del análisis térmico (corte transversal).....	136
101	Propiedades del análisis de frecuencia.....	138
102	Vista frontal y posterior del disco con desgaste desigual.....	139
103	Cargas aplicables en el análisis de frecuencia.....	139
104	Cargas centrifuga.....	141
105	Apariencia del mallado para el análisis de frecuencia.....	142
106	Resultado del análisis para una frecuencia de 36,8336 Hz.....	142
107	Resultado del análisis para una frecuencia de 36,8659 Hz.....	143

LISTA DE TABLAS

TABLA		Pp.
1	Propiedades del aire a 300,05 °F.....	112
2	Descripción del mallado para el análisis térmico.....	134
3	Detalles del mallado para el análisis térmico.....	135
4	Descripción del mallado para el análisis de frecuencia.....	141
5	Detalles del mallado para el análisis de frecuencia.....	141
6	Lista de modos frecuenciales.....	143
7	Temperatura de Enfriamiento de Newton.....	157
8	Resultado del análisis para una frecuencia de 36,8336 Hz (resumen).....	157
9	Resultado del análisis para una frecuencia de 36,8659 Hz (resumen).....	158



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE ING. MECANICA
CARRERA INGENIERÍA MECÁNICA

ESTUDIO Y SIMULACIÓN DE LA VIBRACIÓN CAUSADA POR EL FENÓMENO ALABEO QUE SE PRESENTA EN UN SISTEMA DE FRENO A DISCO DE AUTOMÓVILES LIVIANOS.

Autores: Duarte Diego, Herrera Fernando.

Tutor: Ing. Tomás González.

Fecha: Junio, 2019

RESUMEN

La presente investigación se basará en el “**Estudio y simulación de la vibración causada por el fenómeno alabeo que se presenta en un sistema de freno a disco de automóviles livianos**”. Con ello se analizarán las causas detalladamente a partir de varios campos de estudio, como lo son el intercambio de calor entre componentes, materiales y diseños propuestos para un sistema de freno a disco, con el fin de determinar el comportamiento ocasionado en un sistema de frenos a disco, evaluando las deformaciones, desgastes y vibraciones que generen en los componentes que lo conforman. La propuesta tiene como objetivo general investigar la vibración ocasionada en un sistema de freno a disco analizando las posibles causas que generan el fenómeno alabeo, y así proporcionar una base teórica y práctica que generen hipótesis correctivas que minimicen el alabeo, así mismo poder minimizar una problemática que puede ocasionar accidentes tránsito, hasta ocasionar pérdida de vidas humanas. Además, se comprobarán todos estos datos a través de un programa computarizado que simule en tiempo real parámetros asociados a las causas que generan el alabeo, y así comprobar estas causas de la problemática.

Descriptor: Freno, Diseño, Materiales, Transferencia de calor.

INTRODUCCIÓN

El estudio del campo automotriz ha tenido a lo largo de los años una constante evolución, para asimilar las continuas exigencias del mercado, por lo tanto tienen la obligación de generar nuevas tecnologías para garantizar la seguridad, ya que este se basa en un medio de transporte que moviliza personas y por ende los automóviles deben mantener estándares de seguridad muy altos, una de las ramas más importantes y de mayor desarrollo es el sistema de desaceleración.

Es en este sistema que esta investigación tiene mayor enfoque específicamente en el estudio del fenómeno de alabeo ocurrido en los discos de freno de los automóviles livianos, El alabeo del disco causa un contacto desequilibrado con las pastillas, generando un desgaste descompensado en el disco, siendo obligado a trabajar entre dos bases en la que una de ellas no es plana. Un alabeo del disco provoca que el sistema de frenado trabaje de forma incorrecta, generando una vibración que resulta muy perceptible en el timón del vehículo.

Se estudiara y simulara el comportamiento de este fenómeno en los discos de frenos se podrá determinar las principales causas que generan esta problemática además de generar las posibles soluciones, recomendaciones y pasos a seguir cuando esto sucede. En Venezuela la industria automotriz se basa en el ensamblaje de los vehículos y la comercialización de los repuestos, teniendo un déficit en la investigación de las piezas necesarias para el mejoramiento de las especificaciones de los sistemas de frenos en los vehículos por tal motivo investigaciones de este carácter tiene gran impacto en la inteligencia colectiva.

Para lograr este propósito, la investigación se desarrolla a través de la siguiente estructura:

Capítulo I: Está constituido por el planteamiento del problema formulación del mismo, objetivos de la investigación, justificación de la investigación, alcance del problema. Su objetivo es establecer el objeto de estudio de esta investigación

Capítulo II: Marco Teórico, este capítulo se presentan investigaciones similares en las cuales se basa el desarrollo de este proyecto. Su objetivo es presentar los fundamentos teóricos de las técnicas y herramientas a utilizar en el desarrollo de esta investigación.

Capítulo III: se muestra la metodología que se va a implementar, se describe el tipo de investigación las técnicas y los procedimientos para llevar a cabo la misma. Donde, se explica detalladamente las diversas fases y actividades que conforman el aspecto experimental.

Capítulo IV: se presentan los recursos que serán necesarios para llevar a cabo el acto investigativo.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1. Planteamiento del Problema.

En cuanto a la industria automotriz ha tenido un crecimiento significativo en los últimos años, produciendo cada vez más vehículos para satisfacer la demanda del mercado, mejorando sus productos con nuevas tecnologías, las cuales ayudan al rendimiento, confort y seguridad. Las empresas dedicadas al campo automotriz tienen la obligación de garantizar la seguridad, ya que este se basa en un medio de transportes que moviliza personas y por ende los automóviles deben mantener estándares de seguridad muy altos, por tal motivo los estudios enfocados en los sistemas de seguridad representan un importante porcentaje en las inversiones de la industria.

Por un lado, aunque los estándares de seguridad de los automóviles son elevados, ocurren accidentes de tránsito que pueden ser imprevistos o ajenos al factor humano, ocasionando así lesiones hasta pérdidas de vidas. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) (2019), en su artículo “Accidentes de Tránsitos”, disponible en el sitio web https://www.who.int/violence_injury_prevention/road_traffic/es/, afirma que: “Cada día alrededor de 3500 personas fallecen en las carreteras. Decenas de millones de personas sufren heridas o discapacidades cada año. Los niños, los peatones, los ciclistas y los ancianos son los usuarios más vulnerables de la vía pública”. Además esta organización determinó los principales factores causantes que provocan accidentes de tránsito, siendo: comportamientos irresponsables de conductores y pasajeros, el consumo de alcohol, la utilización de teléfonos móviles, el estado técnico de los vehículos y la calidad de las infraestructuras y señalizaciones viales.

En el caso de fallas técnicas en el estado del vehículo, se pueden tener dos

causas principales: condiciones no adecuadas de los mecanismos que componen al vehículo y mantenimiento; sin duda tener un automóvil en malas condiciones puede provocar siniestros que provoquen pérdidas fatales. Los estudios recientes revelan que por la parte mecánica, lo más probable a fallar en un vehículo es el sistema de frenos, debido al desgaste, corrosión, deformación y hasta el montaje inadecuado de los componentes que constituyen al sistema de frenos. Ahora bien, los vehículos por lo general salen de fábrica con frenos a disco o tambor, pero al pasar de los años los frenos a disco se han popularizado por su rendimiento y seguridad, desplazando así los frenos a tambor.

Con respecto a los frenos a disco, es un sistema más sencillo, preciso, ligero y eficaz que el freno de tambor. El conjunto de freno de disco se compone de los siguientes elementos: disco de freno, pastillas de freno y pinza o mordaza. Debido a su constitución, los frenos de disco disponen de una mejor refrigeración y dosificación, lo cual conlleva un rendimiento y fiabilidad de funcionamiento superior; el funcionamiento de los frenos de disco consiste en transformar la energía cinética del vehículo en calor mediante la fricción entre el disco y las pastillas. Sin embargo, las cargas que se generan en el sistema de frenos a disco son muy elevadas y generan cambios en sus componentes, tanto en lo físico como en sus propiedades, produciendo así el fenómeno llamado alabeo.

El alabeo es una vibración que se produce en un vehículo a la hora de frenarlo, provocado por un defecto en el buje de la rueda, disco de freno o las pastillas. El alabeo del disco causa un contacto desequilibrado con las pastillas, generando un desgaste descompensado en el disco, siendo obligado a trabajar entre dos bases en la que una de ellas no es plana. Un alabeo del disco provoca que el sistema de frenado trabaje de forma incorrecta, generando una vibración que resulta muy perceptible en el timón del vehículo.

Otro punto a considerar es el material de los componentes principales que constituyen el sistema de frenos, los cuales son el disco y las pastillas de freno. Los discos de frenos son fabricados de fundición gris de grafito laminar, ya que este

material adquiere una mayor ventaja sobre otros por sus buenas propiedades mecánicas y térmicas, además garantiza una estabilidad de las prestaciones durante el periodo de vida de los discos. En cuanto a las pastillas de frenos, la componen de distintos materiales pero esto depende del fabricante, cada uno tiene una composición diferente a los demás, por lo general los materiales son: aglomerantes, metales, fibras, cerámicos como relleno y deslizantes. Ahora bien, la interacción de estos componentes son los que generan el frenado de un vehículo, utilizando la fricción como mecanismo básico de la transformación de la energía cinética en energía térmica, las temperaturas en la interacción de ambos materiales pueden llegar alcanzar los 900 °C, llegando a penetrar hasta 2 mm de la superficie del disco, ver la figura 2. Un choque térmico en el disco entre altas y bajas temperaturas puede ocasionar una deformación en el disco, lo que conlleva a presentarse el alabeo en el sistema.

En definitiva, una vibración en el timón o volante que un conductor maneje puede ocasionar cierta inestabilidad en el vehículo provocando que este se desvíe o como también puede provocar que el sistema de frenos falle en su totalidad y no detenga al automóvil, produciendo así una colisión con otro vehículo, un peatón o elementos del entorno de aquellos caminos por los cuales pueden transitar los automóviles.

1.2. Formulación del Problema

¿Cómo se podría demostrar las causas que producen vibraciones en los sistemas de frenos de disco debido al fenómeno alabeo mediante un análisis de comportamiento mecánico y térmico de dicho sistema?

1.3. Objetivos de la Investigación

1.3.1. Objetivo general

Investigar la vibración ocasionada en un sistema de freno de disco analizando las posibles causas que generan el fenómeno alabeo, y así proporcionar una base teórica y práctica que generen hipótesis correctivas que minimicen el alabeo.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar las posibles causas que generan el fenómeno alabeo en un sistema de freno a disco estudiando las propiedades que este pueda presentar para encontrar soluciones factibles.
- Analizar el comportamiento en el freno a disco tomando datos de pruebas teóricos y prácticos, para observar los cambios que se producen en dicho sistema.
- Evaluar los distintos avances tecnológicos propuestos en sistemas de frenos a disco para contrarrestar el alabeo.
- Simular el comportamiento del sistema de freno a discos de un vehículo liviano para así demostrar las causas que producen el alabeo al frenar el automóvil.
- Proponer el uso adecuado para el sistema de frenos de un automóvil y así evitar que ocurra el alabeo, alargando la vida útil del sistema y minimizar los riesgos de accidentes de tránsito.

1.4. Justificación

En relación con los principales inconvenientes producidos por el alabeo del sistema de frenos a disco en automóviles livianos es la vibración ocurrida en el volante o pedal, es uno de los más importantes y notorios problemas que estos presentan, puesto que no solamente es el único síntoma del alabeo en los sistemas de frenos a discos, la pérdida de potencia en el frenado está asociada a altas temperaturas que se presentan en el disco consecuencia de esta problemática.

Esta pérdida de potencia en el frenado se percibe como una reducción considerable en la capacidad de detener el vehículo, aun cuando el pedal del freno se siente firme y con buena presión, es esa sensación de empujar el pedal con fuerza y sentir que la reducción de la velocidad en el vehículo es mínima. De hecho, no hay que confundir este síntoma con el de pérdida de presión por un exceso de temperatura en el líquido de frenos, pues son dos problemas distintos, en el caso del líquido de frenos con mucha temperatura el pedal termina por tocar fondo, se siente flácido, no

se genera presión, mientras que en el caso de la pérdida de potencia en el frenado el pedal se siente duro, con buena presión desde el inicio y por más duro que se empuje la reducción de la velocidad será mínima, este problema puede representar un riesgo de seguridad considerable al momento de un frenado en una situación de emergencia.

En cuanto a estudiar y simular el comportamiento de este fenómeno en los discos de frenos se podrá determinar cómo y qué provoca esta problemática dando así mayor amplitud de información para detectar las principales causas que nos generan el alabeo, además de generar las posibles soluciones, recomendaciones y pasos a seguir cuando esto sucede. Esto podría brindar un gran aporte al campo de la ingeniería mecánica, contribuyendo en el campo de la industria automotriz, específicamente en los sistemas de frenos, sumamente importante en la actualidad. Abarcar las nuevas tecnologías que surgen a medida que las especificaciones de los vehículos aumentan, en velocidad, peso y confort.

En Venezuela si bien la industria automotriz se basa en el ensamblaje de los vehículos y la comercialización de los repuestos, el campo de la investigación de las piezas y componentes no ocupa un porcentaje importante en los presupuestos de inversión de las empresas. Por lo cual esta investigación representa un aporte para la comunidad en general.

1.5. Alcance

La investigación será desarrollada en el entorno de vehículos livianos, excluyendo así a los de carga y medianamente pesados, además solo se estudiarán los frenos a disco ya que son los más comunes donde se presenta el alabeo. La simulación será realizada por un programa computarizado que proporcione características relacionadas con el estudio.

Las simulaciones se ejecutarán al disco de freno, excluyendo algún estudio a las pastillas de freno, debido a que el programa a utilizar no contiene en su biblioteca dicho material con el cual se fabrican las pastillas de freno. Las simulaciones a ejecutar serán análisis térmico y análisis de frecuencias, para el disco de freno.

Cabe resaltar que el estudio se basa en un disco y pastillas existentes en el mercado, no se realizará un diseño de los mismos pero si se comprobaran mediante cálculos numéricos.

1.6. Limitaciones

Para el estudio del proyecto se requiere de un banco de pruebas especializado para un sistema de frenos a disco, la escuela no cuenta con instrumentos de tales características, por tal motivo se llevo el estudio a un programa computarizado que suministre un entorno relacionado al proyecto y permita la simulación de dicho estudio.

Con respecto al programa computarizado, este exige una gran capacidad de procesamiento de datos, debido a esto se genera la necesidad de utilizar equipos de alto rendimiento que permitan la correcta simulación y análisis del estudio, sin que afecte el debido funcionamiento del computador.

Por otro lado, el tiempo es un factor a tomar en cuenta, en el presente trabajo de investigación se tiene estipulado un tiempo de 8 meses, sin embargo se debe tener en consideración de que en el transcurso de la investigación se pueda generar algún tipo de contratiempo o surgir una serie de nuevas variables de estudios que se deban tomar en cuenta, las cuales poder modificar el desarrollo de la investigación.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

Los trabajos y artículos de investigación que se citan a continuación estructuran las bases que servirán de orientación en el desarrollo tratado en este estudio, en tal sentido a afianzar los pasos direccionados a despejar el camino del proyecto entre ellos se tienen:

En el artículo de investigación García R., Echavez R. y Flórez E. (2018) **“Análisis termodinámico de un disco de freno automotriz con pilares de ventilación tipo naca 66-209”** publicado en la Universidad de la Costa (Colombia) como objetivo se realizó el análisis del sistema de freno a partir del pedal como inicio de los cálculos de cinética y dinámica de los elementos constitutivos, y, de esta manera, simular el comportamiento de un freno automotriz con pilares de ventilación tipo NACA 66-209. El desarrollo de la investigación se llevó a cabo mediante la ejecución de un Análisis de Elementos Finitos (FEA) con la ayuda del programa de computador SolidWorks Simulation, con el que se llevó a cabo el modelo geométrico del disco para identificar los elementos sometidos a máximas variaciones de temperatura. Con los resultados numéricos obtenidos se demuestra que, con los cálculos matemáticos, se logró validar el correcto funcionamiento de sistema de frenado en diferentes condiciones de operación, optimizando el tipo de geometría de los discos y ayudando así a la evacuación más rápida de calor con respecto a otros tipos de frenos de disco.

Se relaciona a la investigación en curso aportando una guía sobre el análisis térmico importante ya que estos sistemas se fundamentan en la fricción para detener el movimiento del vehículo, teniendo como principio la presión hidráulica que empuja las pastillas de freno contra el disco de hierro fundido. En consecuencia, el

comportamiento que produce este tipo de dispositivos, a través de la energía cinética, es el de crear un calor considerablemente alto durante el frenado, aumentando la temperatura por fricción. Este calor se disipa rápidamente con el aire circundante por medio del fenómeno de convección (transferencia de calor que se produce entre masas a diferente temperatura), y esto depende de la geometría del disco y del material del que se fabrica. Los factores ambientales también son determinantes para que la etapa de transferencia de calor se produzca. Además, cuando la temperatura alcanza valores elevados aparece el fenómeno de radiación, que también ayuda a disipar la energía en forma de calor almacenada en el disco.

Loayza W. (2017) quien realizo **“Análisis comparativo de un disco de freno original frente a un alterno para un vehículo chevrolet aveo mediante simulación y pruebas experimentales”** presentado en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba (Ecuador), previa a la obtención del Título de Ingeniero Automotriz tiene como objetivo realizar la comparación de un disco de freno original frente a un alterno para un vehículo Chevrolet Aveo mediante pruebas experimentales y simulación en software CAE. Loayza al realizar un análisis comparativo de los discos de freno original frente a un alterno, mediante pruebas experimentales y simulación por el método de los elementos finitos con ayuda de software CAE, se establecerán sus particularidades con la obtención de datos en los ensayos. De esta manera se pretende ayudar a la sociedad que no tiene conocimiento apropiado para adquirir repuestos de este tipo con información de las características, propiedades de cada uno. De su proyecto se destaca que mediante el análisis estadístico se concluye que los discos de freno originales poseen mayor resistencia a esfuerzos que los discos alternos durante su funcionamiento. Con esto se ratifica que los repuestos originales son más apropiados para su uso en los vehículos.

Este trabajo contribuye con la investigación en curso ya que tiene un análisis profundo de la conformación de los materiales utilizados en los discos de frenos los cuales deben cumplir con una serie de parámetros ya que están expuestos a exigencias altas.

García R. y Estremera V.(2014) realizaron “**Análisis y diseño de un disco de freno**” presentado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación de la Universidad Pública de Navarra, Pamplona (España), para optar por el título de Ingeniero Técnico Industrial Mecánico, que tiene como objetivo el estudio térmico y de deformación del disco de freno así como una comparativa entre los dos tipos de disco de freno existentes (ventilados y no ventilados).

El diseño del disco se realiza mediante el programa de elementos finitos Catia ya que a través de este proyecto se pretende aprender a manejar dicho programa ya que es esta muy demandado en el ámbito profesional. Dicho diseño se basa en un modelo de disco de freno ya existente pero modificado para poder experimentar con otra geometría de ventilación y ver los resultados que ofrece. Así mismo, han diseñado el mismo disco pero sin ventilación y con ello se pretende demostrar a través del estudio térmico que los discos ventilados disipan mejor el calor que los discos sin ventilar. Además del diseño de los discos, realizaron el diseño del área de contacto de las pastillas de freno para poder realizar un estudio de deformación que ofrece el programa Catia. Teniendo los resultados obtenidos en la simulación concluyeron la eficacia de dicho programa a la hora de realizar el estudio térmico.

En relación al presente proyecto sirve como guía en el proceso básico de frenado. En los frenos de disco, la fuerza de frenado es obtenida por la aplicación de fuerzas axiales y no radiales como en los frenos de tambor, que son ejercidas en sentido inverso al de la dilatación. Estas fuerzas se generan por el apriete de un disco entre dos plaquetas o pastillas simétricas, alojadas en un estribo o pinza de freno , que son desplazadas hacia las dos caras del disco por sendos pistones accionados hidráulicamente. También aporta la teoría esencial para la definición del disco de freno y de todos sus componentes.

Por ultimo Gil G. y Trujillo R. (2010) realizaron la investigación titulada “**Diseño del sistema de freno para el prototipo formula SAE UCV**” presentado en la Universidad Central de Venezuela para optar por el título de Ingeniero mecánico, tiene como objetivo diseñar las bombas y mordazas del sistema de frenos del

prototipo Formula SAE UCV ,mediante cálculo de distribución hidrostática de presión las nuevas dimensiones de los émbolos de las mordazas y de las bombas de frenado, cumpliendo con los nuevos requerimientos de prototipo Formula SAE UCV, así como haciendo uso de la información de los neumáticos y realizar el diseño ,cálculos de esfuerzos, mediante software de análisis de elemento finito de la bomba de freno, de acuerdo a la funcionalidad, la posibilidad de manufactura y la interacción con los otros sistemas del prototipo teniendo como conclusión en su investigación que aunque las curvas desplazamiento/energía de deformación vs número de nodos convergen no se puede asegurar que las piezas no fallen, por no poseer modelos físicos. Sin embargo se localizaron las zonas más críticas de las piezas, donde se puede ver que el punto más crítico tanto para las mordazas delanteras como traseras se encuentra cercano al área de contacto con las arandelas y en las pestañas que soportan la carga tangencial de la pastilla de freno. Para el caso de las bombas de freno la zona más crítica es la junta esférica seleccionada.

Su principal aporte al proyecto fue el estudio de la dinámica del vehículo durante el frenado que tiene como objetivo desacelerar el vehículo tan efectivamente como sea posible. Esto puede significar llegar a los límites de fricción en ocasiones para alcanzar la máxima desaceleración de los frenos. Para que el sistema de frenado funcione eficazmente debe ser capaz de soportar los grandes torques que actuarán sobre él, por otra parte fue de gran utilidad su estudio de la distribución de peso durante la frenada la intensidad de la desaceleración determina la cantidad de transferencia del carga que experimenta el vehículo, por lo que se puede afirmar que una mayor desaceleración causa mayor transferencia del carga, lo cual implica que habrá mayor carga dinámica al frente del vehículo que atrás. Esto significa que al aumentar la desaceleración se requerirá mayor torque de frenado en el frente y menos atrás.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Frenos de disco

Al igual que el freno de tambor, el freno de disco es un dispositivo de freno que

genera la fuerza de frenado por fricción.

Es un sistema más sencillo, preciso, ligero y eficaz que el freno de tambor, siendo empleado en la actualidad siempre en el eje delantero y en la mayoría de casos también en el eje trasero del vehículo. El peso del conjunto es inferior al de los frenos de tambor, por lo que se mejora la masa no suspendida del vehículo y, en consecuencia, el comportamiento y confort del automóvil. Debido a su constitución, los frenos de disco disponen de una mejor refrigeración y dosificación que los frenos de tambor, lo cual conlleva un rendimiento y confiabilidad de funcionamiento superior.

La figura 1 muestra el conjunto de freno de disco, este se compone de los siguientes elementos:

- Disco de freno
- Pastillas de freno
- Pinza o mordaza

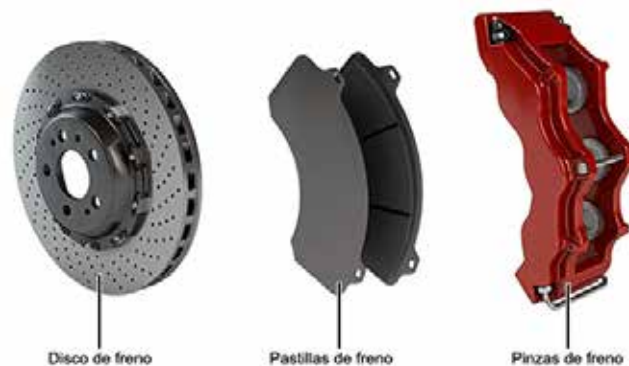


Figura 1. Elementos que constituyen el conjunto de frenos de disco.

Fuente: Kashima University, (2019).

El funcionamiento de los frenos de disco consiste en transformar la energía cinética del vehículo en calor mediante la fricción entre el disco y las pastillas. Los discos de freno se encuentran fijados a las ruedas, girando de manera solidaria a estas mientras que las pastillas están dispuestas en las pinzas de freno, mecánicamente fijadas a la mangueta o puente del vehículo. Cuando se acciona el pedal de freno, la presión hidráulica generada por la bomba de freno se transmite hasta las pinzas de

freno por las tuberías. En el interior de la pinza, la superficie plana de los pistones transforma la presión hidráulica en fuerza que provoca su desplazamiento, empujando las pastillas contra el disco y provocando la fricción entre ambos para reducir la velocidad de giro.

2.2.2. Disco de Freno

El disco es el elemento móvil del dispositivo de freno y gira anclado al buje de la rueda mediante los tornillos de la misma, pudiendo montar además uno o dos tornillos de fijación para facilitar su montaje. Consta de dos partes: la banda o pista de fricción; que es la parte donde se apoyan las pastillas de freno y donde se genera la fricción para frenar el disco, y la campana o cubo; que es donde se disponen los orificios para los tornillos y el agujero de centrado del disco con el buje (ver figura 2).



Figura 2. Vista de un disco de freno de una pieza, un disco flexibilizado y un disco flotante.

Fuente: Kashima University (2019).

Aunque tradicionalmente el cubo y la pista de fricción se fabrican en una única pieza, actualmente también se producen discos de frenos en que estas dos partes son elementos independientes, atornillados posteriormente entre ellos. Esta configuración se denomina disco flotante y permite que la deformación de la banda de fricción producida por la temperatura resultante de la fricción no afecte al cubo, evitando además la transmisión de vibraciones en fuertes frenadas. También existen discos de una pieza de altas prestaciones de comportamiento optimizado. La zona de unión entre la pista y el cubo se flexibiliza por mecanizado de modo que se reduce la

transmisión de vibraciones y mejora la refrigeración. La elevada variación de temperatura de los discos de freno los somete a constantes procesos de dilatación y contracción, especialmente a la banda de fricción, que al dilatarse aumenta ligeramente de diámetro. Los discos flotantes y los flexibilizados facilitan la dilatación de la pista de fricción, reduciendo la posible aparición de grietas y deformaciones del material.

2.2.2.1. Material de los Discos de Freno

El material escogido para fabricar los discos de freno para un vehículo de prestaciones medias, es decir vehículos comerciales, es la fundición gris de grafito laminar, ya que garantiza una estabilidad de las prestaciones durante el periodo de vida de los discos, la figura 3 nos detalla las propiedades mecánicas de la fundición. Existen también, discos de materiales compuestos en matriz de carbono, usados en la alta competición y en los frenos de los aviones, aunque debido al alto costo que tienen no son viables para los vehículos comunes.

<u>Propiedades físicas</u>	<u>Valores</u>
Resistencia a tracción	240 N / mm ²
Dureza	170 – 250 HB

Figura 3. Características básicas de la fundición de los discos.

Fuente: Lillo Sebastián (2006).

La composición básica del material de los discos es una fundición gris de grafito laminar, que contiene entre un 92% y un 93% de hierro. Además de otros componentes básicos tales como el silicio, manganeso y otros que garantizan la calidad de un elemento crítico en el frenado como es el disco (ver la figura 4).

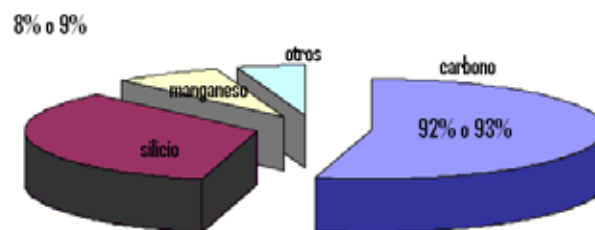


Figura 4. Composición de los discos de frenos.

Fuente: Lillo Sebastián (2006).

Existen también disco de materiales compuestos en matriz de carbono, usados en vehículos de alto rendimiento y en los frenos de aviones, aunque debido al alto costo que tienen son inviables para los vehículos comunes. En la actualidad se están desarrollando discos de freno en aluminio con una base de carburo de silicio, ya que su menor peso los hace muy atractivos, pero la mala disipación de calor que poseen los hacen poco factibles de emplear, ya que necesitan un sobredimensionamiento que hace que pierdan las ventajas de reducción en peso.

2.2.2.2. Tipos de Disco de Frenos

Ø Discos de freno macizos

Fabricados en una sola pieza de hierro fundido y torneado (ver figura 5). El volumen situado entre las pistas de fricción es macizo y se somete a altas temperaturas, con una capacidad de evacuación inferior al resto de modelos.

Su refrigeración se realiza exclusivamente por contacto con el aire y resulta muy diferente entre la cara interna y externa del disco. La cara interna de los discos suele resguardarse de las inclemencias meteorológicas, la suciedad de la vía e incluso de las posibles proyecciones de grasa de las juntas homocinéticas mediante un protector metálico, cuya presencia limita el flujo de aire y la dispersión térmica. Por otra parte, la capacidad de refrigeración de la cara externa depende en gran parte del diseño del rin y la velocidad de rotación. En frenadas prolongadas, la diferencia de temperatura entre las dos superficies puede provocar la deformación del disco y diferencias de fricción entre ambas pastillas de freno, dando lugar a vibraciones.



Figura 5. Disco de freno macizo.

Fuente: Sánchez L. Sara (2019).

Es por ello, que suelen montarse en vehículos pequeños o en los frenos traseros

para vehículos de potencia o carga mayor, ya que así sufrirán una menor carga en la acción de frenado. Frente a los discos de tambor suponen una mejora debido a su capacidad para dosificar la potencia.

Ø Discos de freno ventilados

Dispone de dos pistas de fricción separadas por unos canales de ventilación que permiten el flujo de aire por el interior del disco, acelerando la disipación de calor (ver figura 6). Existen varios diseños para los canales internos de refrigeración aunque, en la mayoría de los casos, se aprovecha el giro del disco para forzar el flujo de aire por centrifugado. Adicionalmente, pueden disponer de orificios perforados o ranuras sobre la superficie de fricción que además de mejorar la refrigeración, favorecen la limpieza del disco, la liberación de vapores y el desgaste homogéneo de las pastillas de freno.



Figura 6. Canales de refrigeración radial y direccional en discos de freno.

Fuente: Kashima University (2019).

En la mayoría de vehículos, los discos se fabrican de fundición gris perlítica y aleación de cromo, permitiendo alcanzar temperaturas de funcionamiento de hasta 400°C aunque también existen otras aleaciones, empleadas especialmente en vehículos deportivos y de alta gama o en vehículos de competición. En función de la temperatura y la humedad ambiental de los diferentes mercados, las exigencias mecánicas y de duración, las restricciones medioambientales y otros muchos factores, se utilizan hasta 30 aleaciones metálicas diferentes en la fabricación de discos de freno.

La ventilación de los discos se realiza generalmente de forma natural por el

efecto combinado de la aspiración y la centrifugación del aire (ver figura 7). En aplicaciones de alto rendimiento, además se utilizan sistemas dinámicos que fuerzan el flujo del aire hacia los discos.

El mayor volumen y superficie de la parte más externa de los canales de ventilación calienta intensamente el aire que, al dilatarse, se desplaza hacia el exterior del disco provocando un flujo de aspiración natural del aire del centro y mitad interior. Según el diseño y la orientación de los canales de ventilación, los discos pueden ser de refrigeración radial o direccional.



Figura 7. Ventilación dinámica de disco de frenos.

Fuente: Kashima University (2019).

Los discos de ventilación direccional generan un efecto turbina que mejora la velocidad y el flujo de aire para una mayor refrigeración (ver figura 8). Su diseño en turbina implica que tienen sentido de rotación que debe ser respetado durante el montaje. La orientación de los canales de la parte superior del disco debe ser hacia la parte posterior del vehículo, contraria al sentido de marcha.

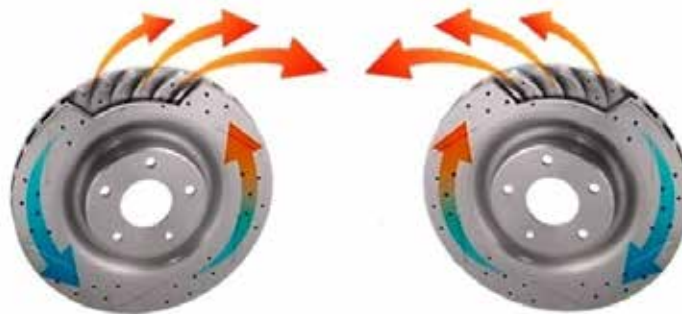


Figura 8. Vista de discos de frenos con refrigeración direccional.

Fuente: Kashima University (2019).

Ø Disco de freno perforado o flotante

Su característica principal es que poseen unas perforaciones en las pistas, lo que permite además de aligerar peso, evitar una propagación de una hipotética fisura en caso de sobrecalentamiento (visualizar la figura 9). Ya que estos canales permiten una mejor refrigeración directa entre disco y pastilla. También tienen como función mantener limpia la superficie del disco de los depósitos de ferodo producidos por el desgaste de las pastillas, esto evita la pérdida de eficacia en la frenada.



Figura 9. Disco de freno perforado o flotante.

Fuente: Sánchez L. Sara (2019).

Ø Disco de freno estriado o ranurado

Como en los discos perforados, se tallan las pistas del rotor con el fin de eliminarla suciedad producida por el desgaste entre pastilla y disco y para una mejor refrigeración entre ambos. En lugar de llevar perforaciones en su superficie, se practican ranuras en distintas direcciones, las cuales no influyen en la dirección de giro del disco para la evacuación de calor (ver la figura 10). Este tipo de disco permite una frenada más efectiva, por ello son usadas en vehículos de alto rendimiento.

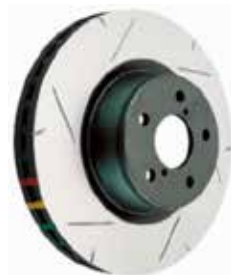


Figura 10. Disco de freno estriado o ranurado.

Fuente: Sánchez L. Sara (2019).

En condiciones meteorológicas adversas, tales como lluvia o barro, consiguen

mejorar hasta en un 30% la capacidad de frenada, frente a unos discos normales. Por contra, el desgaste de las pastillas es más efectivo, hasta un 40% más que un disco con pistas no ranuradas.

Ø **Disco de freno bimaternal**

Con el fin de reducir el peso de los discos de freno, este tipo de discos se fabrican en dos piezas, separando el cubo o parte que se une al buje, y por otro lado las pistas o rotor (observar la figura 11).



Figura 11. Disco de freno bimaternal.

Fuente: Sánchez L. Sara (2019).

La primera parte se aligera ya que se realiza en una aleación de aluminio, que por su coeficiente térmico permite una transmisión de calor más rápida, reduciendo el estrés térmico. Por otro lado, el rotor se mantiene en el tradicional hierro fundido y será la zona de desgaste. Siendo las pistas la zona caliente del disco y la campana la parte fría. Ambas piezas están unidas mediante un sistema de montaje que permite una flotación radial y axial, el cual evita las deformaciones producidas por el calor disipado entre ellas.

Ø **Disco de freno de carbono**

Los frenos de carbono son empleados únicamente en vehículos de alto rendimiento. Tanto los discos como las pastillas se fabrican principalmente con fibras de carbono y resina compactadas a alta presión, permitiendo crear un conjunto con un peso en torno al 50% inferior a uno convencional, además de mejorar notablemente la capacidad de frenado del vehículo (ver la figura 12). En la utilización de este tipo de discos, se montan pinzas fijas de aluminio, y pastillas especiales con un coeficiente de fricción un 25% superior al normal.



Figura 12. Disco de freno fabricado en carbono y pastillas de freno específicas.
Fuente: Kashima University (2019).

Requieren temperaturas de trabajo superiores a los 400°C , disminuyendo considerablemente su rendimiento si la temperatura es inferior. La temperatura idónea de funcionamiento es entre 600°C y 750°C , pudiendo alcanzar temperaturas superiores a 1.000°C . El empleo de este material supone un elevado coeficiente de fricción, permitiendo realizar frenadas mucho más enérgicas respecto a la utilización de otros materiales. Sin embargo, también presentan ciertos inconvenientes, como un elevado desgaste debido a su alto coeficiente de fricción o la oxidación de los discos por contacto con el oxígeno ambiental y las altas temperaturas de trabajo.

2.2.3. Pastillas de Freno

Son el elemento fijo del dispositivo de freno y se hallan sujetas por la pinza de freno o su soporte al buje de la rueda, en la figura 13 se puede apreciar un modelado de las pastillas de freno. Sobre ellas se produce el principal desgaste del conjunto de fricción debido al roce sobre el disco para realizar el frenado del vehículo. Su desgaste depende de la naturaleza del compuesto utilizado y de la proporción entre las respectivas superficies de los discos y las pastillas.



Figura 13. Vista de unas pastillas de freno.
Fuente: Kashima University (2019).

El proceso de transferencia de calor que ocurre en una pastilla durante la operación de frenado, tiene la particularidad de ser inestable o transitorio, es decir, los fenómenos varían con el tiempo y la posición en el elemento en cuestión. La difusividad térmica es una propiedad de los materiales que caracteriza los procesos de transferencia de estado inestable. Durante el frenado, el perfil de temperatura a través de pastilla es transitorio, y por consiguiente, el flujo de calor está asociado a la difusividad térmica.

La figura 14 muestra el comportamiento de la pastilla de freno, pero para realizar correctamente su función, las pastillas deben tener unas cualidades muy específicas:

- Soportar altas temperaturas sin deformarse.
- Ser resistentes a la abrasión.
-

metálico encajado en la pinza mantiene la pastilla en su posición tanto vertical como longitudinalmente, permitiendo únicamente su desplazamiento lateral. El elevado margen térmico de trabajo de las pastillas implica una gran dilatación y contracción, por lo cual las tolerancias mecánicas entre la pastilla y su alojamiento deben ser suficientes para asegurar su movilidad lateral y evitar durezas o bloqueos que alterarían el rendimiento de freno.

El material de fricción se une al soporte con adhesivos colocando, en algunos casos, una lámina de material aislante térmico entre ambos (visualizar figura 15). Para reforzar dicha unión se combinan los adhesivos específicos con tetones y taladros de fijación. El material de fricción puede presentar una o varias ranuras que ayudan a limpiar el polvo generado por el desgaste y absorber la dilatación superficial del compuesto de fricción a altas temperaturas.



Figura 15.Partes de una pastilla de freno.

Fuente: Kashima University (2019).

En la parte posterior de algunas pastillas, se dispone una lámina de goma o metálica adherida sobre el soporte para amortiguar las vibraciones de las pastillas y evitar ruidos. Para minimizar el calentamiento de los émbolos de las pinzas de freno y, en consecuencia, del líquido de frenos, a menudo se coloca una segunda lámina de material aislante térmico en la parte posterior de las mismas, limitando el puente térmico.

El desgaste y excesivo calentamiento de las pastillas alarga las distancias de frenado a alta velocidad y compromete la seguridad del vehículo. Igualmente, puede provocar el desprendimiento del material por recocido y su cristalización. En los vehículos que no tienen indicador de desgaste activo, es necesario realizar una comprobación visual regular.

Bajo la normativa SAE J866, las pastillas disponen de una clasificación según su coeficiente de fricción, identificada mediante un código de dos letras. La primera letra se utiliza para designar el coeficiente de fricción a baja temperatura (93 - 204 °C), mientras que la segunda letra designa el coeficiente a alta temperatura (232 - 343 °C). Esta codificación suele disponerse como prefijo o sufijo del número de serie de las pastillas (visualizar figura 16).



Figura 16. Clasificación de los coeficientes de fricción y su codificación en una pastilla de freno.

Fuente: Kashima University (2019).

2.2.3.1. Composición de las pastillas de freno.

En la actualidad la mayoría de los fabricantes de pastillas de freno emplean en mayor o menor medida la base que a continuación se presenta:

- Fibras: Son los elementos encargados de aglutinar. Es decir, las fibras son el “armazón” de las pastillas de freno, a través de sus múltiples ramificaciones van uniendo al resto de los elementos. Existen dos tipos las sintéticas y las minerales. Las más usadas en el campo de la fricción son: fibras de vidrio, fibras de aramida, lana de roca, etc.
- Cargas minerales: Son las encargadas de dar consistencia mecánica al conjunto, es decir, le aportan resistencia a la abrasión, resistencia a cortadura. Están encargadas también, de aportar resistencia a las altas temperaturas. Las más utilizadas son: barita, magnesita, talco, mica, carbonato, feldespato y otros.
- Componentes metálicos: Se añaden en forma de polvo o viruta para conseguir

homogeneizar el coeficiente de fricción así como la transferencia de calor de la pastilla. Los más utilizados son, latón, cobre, bronce entre otros.

- Lubricantes o deslizantes: Son los encargados de hacer variar el coeficiente de fricción normalmente a la baja, dependiendo del rango de temperatura de funcionamiento. Son empleados en forma de polvo suelen ser grafitos, sulfuros, antracitas, etc.
- Materiales orgánicos: Son los encargados de aglomerar el resto de los materiales. Cuando alcanzan una determinada temperatura fluyen y ligan el resto de componentes, hasta que se polimerizan. Las más importantes son las resinas fenólicas termoendurecibles, aunque también son empleados diferentes tipos de cauchos, ceras, aceites.
- Abrasivos: Cumplen principalmente la misión de incrementar el coeficiente de fricción y también renuevan y limpian la superficie del disco permitiendo la formación de la capa intermedia o también conocida como tercera capa.

La figura 17 presenta la composición porcentual de los elementos que conforman la pastilla de freno.



Figura 17. Composición porcentual de los materiales de fricción.

Fuente: Lillo Sebastián (2006).

La proporción y cualidades de los materiales utilizados determinan el poder de fricción, desgaste en frío y en caliente, conductividad térmica, modulación, resistencia al desvanecimiento y otras características de rendimiento de las pastillas de freno. El comportamiento de los diferentes compuestos de ferodo se representa en muchos casos mediante gráficos radiales que representan comparativamente sus

cualidades, la figura 18 muestra dos tipos de comportamiento, cada uno con diferente composición, uno alto rendimiento y uno convencional.

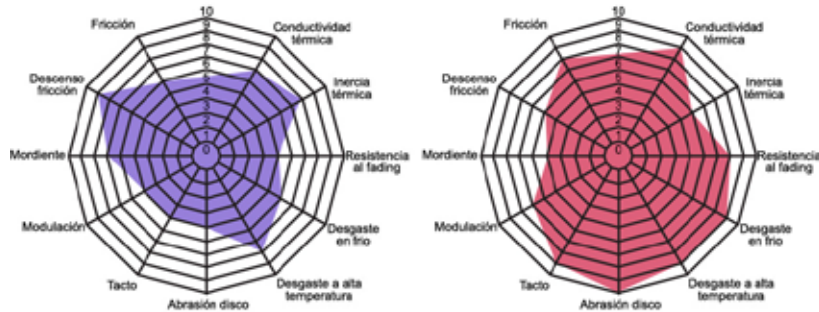


Figura 18. Representación gráfica de características de una pastilla de freno normal y de alto rendimiento.

Fuente: Kashima University (2019).

La calidad y naturaleza de las sustancias aglutinantes, pese a no determinar directamente el comportamiento dinámico de las pastillas de freno, resulta primordial en su formulación. La función de dichas sustancias es la de unir y dar consistencia al resto de materiales y mantener la estructura física del conjunto. Por su naturaleza, tanto las resinas sintéticas (fenólicas) como los derivados del caucho generan gases por descomposición cuando se someten a altas temperaturas (más de 350°C) (ver figura 19).



Figura 19. Recalentamiento y desvanecimiento del disco y las pastillas.

Fuente: Kashima University (2019).

Los gases producidos por la descomposición de las resinas en la superficie de contacto de las pastillas con el disco de freno actúan como amortiguador intermedio entre los materiales de fricción e impiden su contacto. Como consecuencia, el trabajo de fricción entre ambos desciende notablemente y con ello la capacidad de frenado, dando lugar al fenómeno conocido como desvanecimiento, en la figura 19 se puede observar dicho fenómeno. La descomposición de las resinas aglutinantes asociada al

de las pastillas.

El sello hidráulico se realiza mediante retenes de hermeticidad, alojados en ranuras mecanizadas en el cuerpo de la pinza o los propios émbolos. La flexión y retención de los retenes permite el desplazamiento en avance de los pistones a la vez que los retrae y mantiene en su posición cuando no existe presión hidráulica de trabajo.

Entre el cuerpo de la pinza y el de los émbolos se disponen guardapolvos para evitar la suciedad y la corrosión, asegurando un correcto deslizamiento.

2.2.4.1. Tipos de montaje

Las pinzas de freno pueden ser de dos tipos: fijas o flotantes. Durante el funcionamiento, en las pinzas fijas se desplazan únicamente los émbolos, en cambio, en las pinzas flotantes también se desplaza parte de la pinza. Según la constitución y principios de funcionamiento del conjunto, se utilizan diferentes sistemas de montaje. Los más empleados en los sistemas de freno de disco son:

Ø Freno de disco con pinza fija

La mordaza se encuentra fija en el cuerpo portante del eje. Interiormente y a cada lado del disco, se disponen uno o más cilindros. Mediante unas ballestas expansibles, se mantienen apretadas las pastillas en la cavidad de la mordaza para evitar su movimiento (visualizar la figura 21).

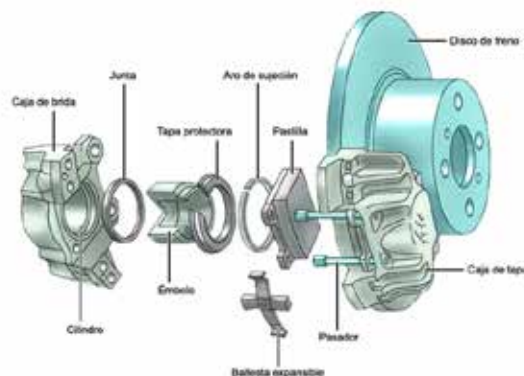


Figura 21. Despiece de un freno de disco con pinza fija.

Fuente: Kashima University (2019).

Al accionar el freno, la presión generada llega a través de las tuberías hasta los

émbolos de accionamiento. La presión desplaza los émbolos interiores y exteriores a la misma vez, apretando las pastillas contra el disco. Durante el desplazamiento de los émbolos se produce la deformación del retén, que recuperará su forma original una vez se libere la presión hidráulica, provocando el retroceso del émbolo. Las pastillas, en cambio, vuelven ayudadas por el tambaleo del disco.

Las características principales de este montaje son:

- Requiere un espacio relativamente grande para su montaje.
- Al circular el líquido de frenos dentro de la mordaza y cerca del disco, alcanza temperaturas elevadas, pudiendo formar burbujas.
- Permite utilizar discos de gran diámetro.
- Utilizado en vehículos de altas prestaciones o automóviles pesados.

Ø Freno de disco con pinza flotante

Está formado por dos componentes principales, la caja y el soporte. La caja incorpora el cilindro con su émbolo y las pastillas de freno, manteniéndose unida mediante los pasadores al soporte (ver la figura 22).

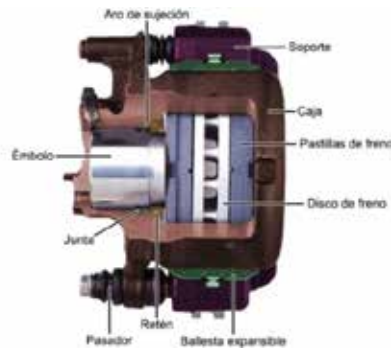


Figura 22. Despiece de un freno de disco con pinza flotante.

Fuente: Kashima University (2019).

Al accionar el freno, se desplaza el émbolo apretando la pastilla contra el disco de freno. La fuerza con la que el pistón aprieta genera una fuerza opuesta que desplaza el marco flotante, arrastrando consigo la otra pastilla de freno y apretándola contra el disco. Del mismo modo que con la pinza fija, el retroceso del conjunto se consigue por acción de los retenes del émbolo y el tambaleo del disco (visualizar la figura 23).

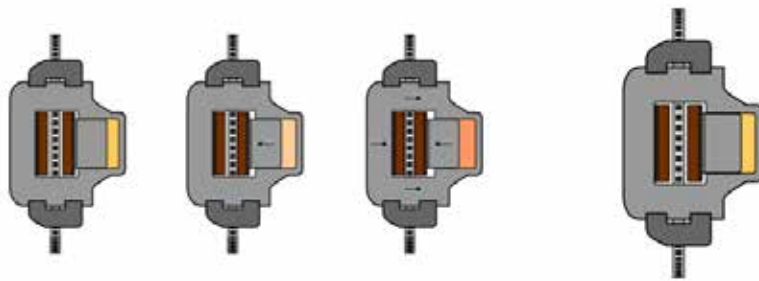


Figura 23. Fases de funcionamiento de un freno de disco con marco flotante.
Fuente: Kashima University (2019).

Las características principales de este montaje son:

- La forma de la caja permite una mayor superficie del émbolo y en consecuencia, una mayor fuerza de frenado.
- Espacio de montaje reducido.
- Menor calentamiento del líquido de frenos al circular a cierta distancia del disco.
- Idóneo para turismos y vehículos industriales ligeros.

Ø Freno de disco con pinza oscilante

Está formado por una mordaza alojada alrededor de un perno que hace la función de eje de giro. En la pinza se encuentra el cilindro con el émbolo y las pastillas de freno en forma de cuña (visualizar la figura 24).

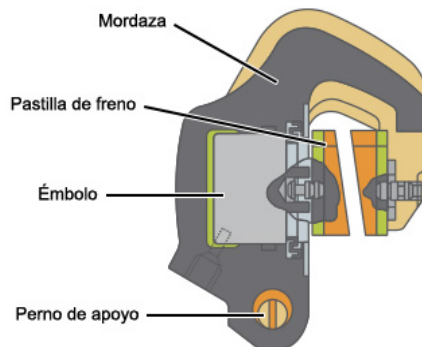


Figura 24. Constitución de una pinza de freno oscilante.
Fuente: Kashima University (2019).

Al accionar el freno, la presión hidráulica desplaza al émbolo hasta apretar la

pastilla interna contra el disco. A partir de la presión generada, se ejerce una presión sobre el extremo cerrado del cilindro, obligando a la mordaza a oscilar alrededor del perno y empujando a la pastilla externa hasta presionar esta contra el disco. (Ver figura 25).

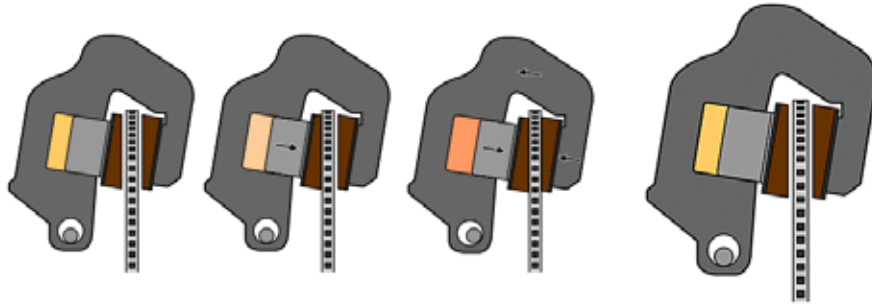


Figura 25. Fases de funcionamiento de un freno de disco con pinza oscilante.

Fuente: Kashima University (2019).

Las características principales de este montaje son:

- Forma compacta y ligera.
- Menor calentamiento del líquido de frenos.
- Idóneo para motocicletas.

Ø **Pinza con freno de estacionamiento**

Se trata de una pinza de freno empleada para el sistema de freno de estacionamiento, pudiendo utilizarse dos configuraciones distintas. En los montajes de pinzas de freno con varios pistones, se emplea una segunda pinza flotante de un único pistón exclusiva para el freno de estacionamiento y, por tanto, accionada mecánicamente. En los montajes con pinza flotante de un único pistón, se incorpora el sistema de accionamiento mecánico para el freno de estacionamiento en el interior del émbolo, utilizando la misma pinza para el freno de servicio (funcionamiento hidráulico) y el freno de estacionamiento (funcionamiento mecánico).

El sistema de accionamiento mecánico para el freno de estacionamiento está compuesto principalmente de un cono que se desplaza junto con el émbolo, una tuerca y un muelle de ajuste, encargados del tensado automático del sistema y un husillo, siendo el responsable de desplazar el conjunto al estirar del freno de mano

para desplazar las pastillas y bloquear el disco de freno (visualizar la figura 26).

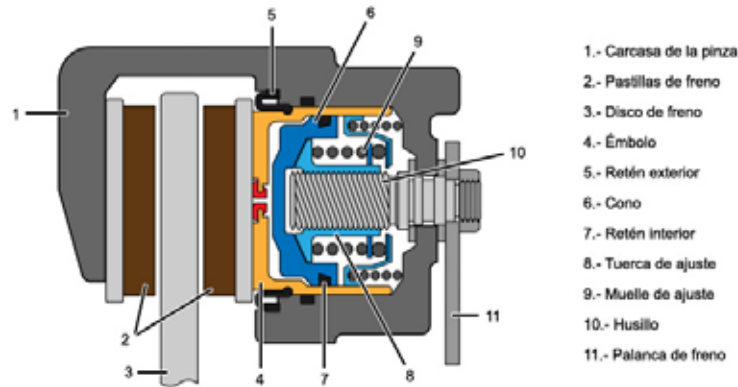


Figura 26. Constitución de una pinza de freno flotante que incorpora el sistema de freno de estacionamiento

Fuente: Kashima University (2019).

La pinza de freno de este tipo funciona de dos formas distintas:

- El funcionamiento hidráulico (ver figura 27.A) de esta pinza de freno es igual al de cualquier pinza flotante. Al presionar el pedal de freno, la presión hidráulica empuja al cono y este a su vez al émbolo, desplazando la pastilla interior hasta hacer contacto con el disco de freno. La fuerza aplicada provoca el desplazamiento del cuerpo de la pinza, arrastrando consigo la pastilla exterior hasta que también hace contacto con el disco de freno. El retorno del émbolo y del cono a su posición de reposo se realiza por la recuperación del retén de estanqueidad que al recobrar su forma natural retrae levemente el conjunto.
- El funcionamiento mecánico (ver figura 27.B) es producido al accionar el freno de estacionamiento. El cable Bowden actúa sobre la palanca de freno y esta sobre el husillo, haciéndolo girar. El husillo se encuentra fijado axialmente a la pinza, por lo que sólo puede rotar sobre si mismo, transmitiendo su giro a la tuerca de ajuste que transforma el movimiento giratorio en lineal desplazando el cono contra el pistón. El movimiento del émbolo empuja las pastillas contra el disco, produciendo el frenado el vehículo. Al liberar el freno de estacionamiento, el husillo gira en sentido contrario y retrae la tuerca de ajuste, mientras que el émbolo retorna a su posición por la deformación del retén.

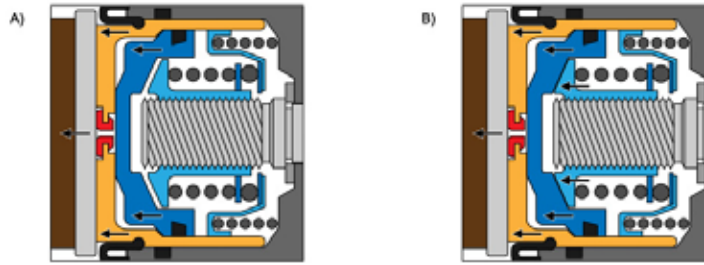


Figura 27. Funcionamiento de una pinza de freno flotante con freno de estacionamiento incorporado.

Fuente: Kashima University (2019).

2.2.5. Sistema de frenos hidráulico

El primer amplificador que se encuentra es el pedal y dependiendo de su mayor o menor longitud amplifica la fuerza. El segundo elemento amplificador es el servofreno, el cual ayudado por el motor crea una diferencia de presiones, vacío en un lado y presión atmosférica al otro; al accionar el freno colabora con el esfuerzo del conductor. Entre mayor sea el diámetro mayor será la amplificación. Como tercera ayuda está el sistema hidráulico comprendido entre el cilindro maestro (Bomba) y los cilindros receptores (De rueda), a mayor diferencia entre las áreas de los pistones del cilindro maestro y de los pistones del cilindro de rueda, mayor amplificación se obtendrá.

Entre más grande sea el diámetro de los cilindros en las ruedas y más pequeño el de la bomba, la amplificación de la fuerza de frenado es mayor. Al llegar al final del sistema encontramos que las zapatas son otro amplificador que actúan como una palanca mecánica y su efecto es directamente proporcional a la longitud, entre el punto de apoyo (anclaje) y el punto en que se aplica la fuerza (del pistón). El elemento que se encuentra en movimiento es la campana en conjunto con la rueda y sobre aquella actuarán las zapatas para detener el movimiento (Freno de tambor). A mayor diámetro de campana mayor potencia. En el freno de disco, el elemento que gira es el rotor (Disco) y contra el se apoyarán las pastillas para inmovilizarlo.

2.2.6. Servofreno

Es el elemento que se utiliza para ayudar al conductor en la acción de frenado.

La acción del servofreno (ver figura 28) se suma a la fuerza ejercida por el conductor sobre el pedal de freno, con el fin de mejorar la frenada. El servofreno se fue implantando en todos los vehículos a medida que estos ganaban en peso y potencia. El servofreno funciona por medio del vacío generado en el colector de admisión del propio motor del vehículo.



Figura 28. Servofreno.

Fuente: Loayza W. (2017).

En los automóviles se utilizan principalmente dos tipos de servofreno: el "Hidrovac" que se instala entre la bomba de frenos y los cilindros receptores y el "Mastervac" que se instala entre el pedal de freno y la bomba. El Mastervac se tiene que ubicar teniendo en cuenta la situación del pedal de freno, mientras que el Hidrovac se puede instalar en cualquier sitio del vano motor. Cualquiera que sea el tipo de servofreno utilizado, se tiene que garantizar que en caso de fallo de éste, el sistema de frenos tiene que seguir funcionando. En caso de avería del servo, los frenos son accionados únicamente por la fuerza del conductor sobre el pedal.

2.2.7. Sistema antibloqueo de ruedas (ABS)

El sistema antibloqueo de ruedas es un dispositivo utilizado en automóviles y en modelos avanzados de motocicletas que hace variar la fuerza de frenado para evitar que los neumáticos resbalen con el suelo. Básicamente consiste en un sistema que impide que las ruedas se bloqueen al momento de frenar el vehículo, e impide que el vehículo se deslice sobre el suelo sin control.

El ABS permite que el conductor siga teniendo el control sobre la trayectoria del vehículo, con la consiguiente posibilidad de poder esquivar posibles obstáculos

mediante el giro del volante de dirección.

2.2.8. Esfuerzo mecánico generado en la superficie de contacto disco-pastilla.

Cuando el vehículo está en marcha, independientemente de las fases de frenado, el disco de freno está sometido a escaso estrés mecánico. Bajo el efecto centrifugo debido a la rotación del disco crea un esfuerzo de tracción. Al frenar, el disco se ve sometido por dos nuevas fuerzas. Ante todo, la fuerza de compresión, que deriva del apoyo de las pastillas perpendicularmente a la superficie del disco (ver la figura 29). Esta fuerza a su vez es el resultado de la aplicación de la presión del líquido de los frenos en la superficie del pistón en la pinza.

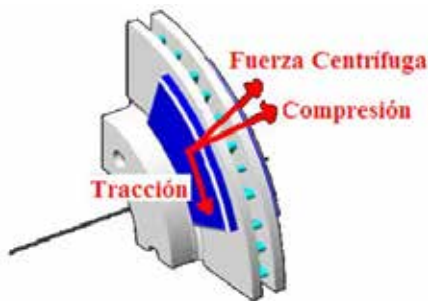


Figura 29. Esfuerzos mecánicos a los que se encuentran sometida la superficie de contacto disco-pastilla.

Fuente: Mena Eric (2011).

La fuerza frenante debida al roce de la pastilla contra la superficie del disco se traduce en la fundición en un esfuerzo de tracción. De hecho la parte situada en contacto con la pastilla es frenada, es decir sufre una fuerza opuesta al movimiento rotativo, consiguen valores de esfuerzo de tracción del orden de 10 – 20 Mpa, que hay que comparar con la resistencia a la tracción de la fundición, que equivale a 200 Mpa de manera general, dado que dicho esfuerzo está repartido en toda la superficie de la pastilla, su valor es aun más reducido y bastante lejano del límite de ruptura, cabe destacar que este límite disminuye con la temperatura y en medida mucho más acentuada si existen grietas en el material del disco. Entonces se pueden producir severas rupturas. Las microgrietas que pueden producirse después de largos periodos de funcionamiento están relacionadas con este tipo de estrés repetido que se llama fatiga.

2.2.9. Esfuerzo térmico generado en la superficie de contacto disco-pastilla.

Toda la energía mecánica que pierde el vehículo al frenar se encuentra en forma de calor generado en la interfaz disco-pastilla. El flujo de calor aportado al principio del frenado es muy alto. El calor se genera al entrar en contacto las dos superficies: las pastillas y el disco, el reparto de los flujos de calor depende de las características físico-químicas de los dos materiales, relativamente constantes por lo que concierne a las fundiciones. Se destaca que en la mayoría de los casos más del 80% del calor generado termina en los discos. Se puede aumentar la superficie de intercambio, como ocurre en los discos ventilados, también se puede incrementar el caudal del aire, mejorando el rendimiento a través de la conformación de aletas.

El excesivo aumento de la temperatura en los disco de freno también tiene numerosas consecuencias, puede ocurrir una transformación de la fundición con azulado en la superficie, o una deformación permanente del mismo. Por conducción, el calor se traslada hacia la campana, en este caso la pista del disco se curva y se transforma en un cono, no encontrando la forma original al enfriarse.

2.2.10. Parámetros de diseño de un sistema de freno a disco.

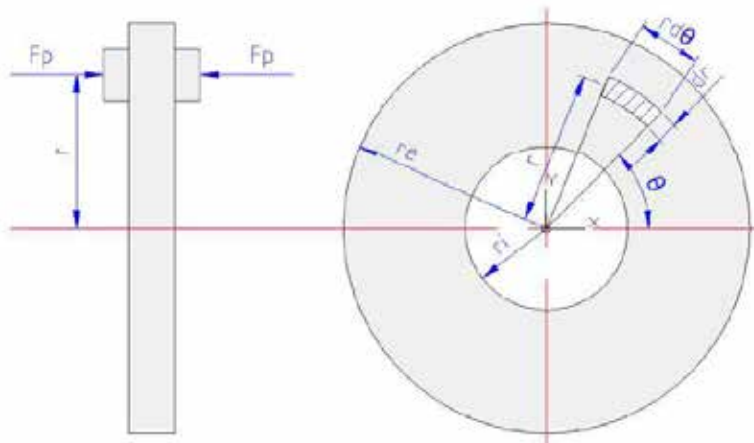


Figura 30. Vista frontal y lateral del disco y pastilla de freno.

Fuente: Venegas William (2012).

Consideremos los elementos principales de cálculo para un freno de este tipo, utilizaremos la geometría y las dimensiones indicadas en la figura 30. Para un sector

circular, el área viene dada por la expresión:

$$A = \frac{r^2 \theta}{2} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

r = Radio del círculo.

θ = Ángulo que abarca el sector circular (rad).

Para la pastilla de fricción de este tipo de freno, que es una corona circular, el área es la siguiente:

$$A_{pastilla} = \left(\frac{r_e^2 - r_i^2}{2} \right) \theta \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

$A_{pastilla}$ = Area de la pastilla (m^2)

r_e = Radio exterior de la pastilla (mm).

r_i = Radio interior de la pastilla (mm).

Se puede hacer que el material de fricción de las pastillas opere en condiciones, tales que, sobre toda su extensión, esté presente la máxima presión que pueda soportar dicho material, producto de la carga que ejerce el sistema que acciona las pastillas. Estas condiciones de trabajo presentan la ventaja siguiente: se están aprovechando al máximo las características que posee el material de fricción; en consecuencia, el freno resultante opera con la mejor eficiencia de frenado, para los materiales seleccionados por el diseñador. Bajo esta premisa, para la máxima condición de frenado de este dispositivo, tendremos que aprovechamos al máximo el material, haciendo la carga de frenado igual a:

$$F_p = p_a \cdot A_{pastilla} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

F_p = Carga ejercida sobre las pastillas (N).

p_a = Presión máxima soportada por el material de las pastillas de freno (Pa).

Es decir, que en esta situación de trabajo, sustituyendo la ecuación 2 y 3, podemos decir:

$$F_p = p_a \left(\frac{r_e^2 + r_i^2}{2} \right) \theta \quad (\text{Ec. 4})$$

El efecto de frenado de una pastilla de freno (fuerza de roce que se produce por fricción) es:

$$\mu F_p = \mu p_a \left(\frac{r_e^2 + r_i^2}{2} \right) \theta \quad (\text{Ec. 5})$$

Se sabe que al seleccionar el material de fricción se fijan μ y p_a . El efecto frenante de la ecuación 5 genera un torque de frenado, expresado por:

$$T_{frenado} = \mu P r_m = \mu p_a A_p r_m \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

r_m = Radio medio (mm).

Siendo:

$$r_m = \frac{r_e + r_i}{2} \quad (\text{Ec. 7})$$

Como se puede observar en la figura 30. Pero la ecuación 6 representa una pastilla (una cara al disco); al considerar las dos pastillas (ambas caras al disco) y sustituyendo el valor de r_m , así como de A_p en la ecuación 6, el par de frenado total T_{total} , puede escribirse según la ecuación 8.a o la ecuación 8.b, según sea el caso:

a. Si es una pastilla de sector de corona circular:

$$T_{total} = 2 \mu p_a \left(\frac{r_e^2 + r_i^2}{2} \right) \theta r_m = \mu p_a \theta (r_e^2 + r_i^2) \left(\frac{r_e + r_i}{2} \right) \quad (\text{Ec. 8.a})$$

b. Si es una pastilla circular:

$$T_{total} = 2 \mu p_a \left(\frac{r^2 \theta}{2} \right) r_m = \mu p_a \theta r \left(\frac{r_e + r_i}{2} \right)^2 \quad (\text{Ec. 8.b})$$

En fin, independientemente de la forma, si se conoce T_{total} del modo obtendremos las dimensiones de las pastillas.

2.2.11. Energía disipada en sistema de freno.

La energía absorbida por los frenos por los frenos depende de la traslación del vehículo, ya que su velocidad es reducida cuando se aplica el freno. Por lo tanto, el cambio de energía cinética de traslación de un vehículo es:

$$E_{cinetica} = \frac{1}{2} m (V_i^2 - V_f^2) \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde:

$E_{cinetica}$ = Energía cinética o absorbida por el freno (J).

m = Masa del vehículo (Kg).

V_i = Velocidad inicial del vehículo (m/s).

V_f = Velocidad final del vehículo (m/s).

Para calcular la energía disipada en el freno delantero (E_d) es necesario saber que la energía total se distribuye entre un 75 % y 80 % en el eje delantero debido a que la mayor cantidad de masa del vehículo se presenta en ese eje, de lo que resulta:

$$E_d = E_{cinetica} \cdot 0,75 \quad (\text{Ec. 10})$$

Del total de energía que se absorbe en el eje delantero, un 90 % se disipa en el disco de freno y un 10 % en la pastilla, como lo indica:

$$E_{disco} = E_d \cdot 0,90 \quad (\text{Ec. 11})$$

Un automóvil tiene 2 ejes y cada eje tiene dos discos, así que la energía disipada se reparte entre ellos:

$$E_{total} = \frac{E_d}{2} \quad (\text{Ec. 12})$$

2.2.12. Fuerza de roce sobre la calzada.

La fuerza resultante (F_r), entre la calzada y el neumático está en función de la masa y el factor de adherencia, donde la fuerza normal es perpendicular a la calzada y el factor de adherencia horizontal a ésta. Se denota con la ecuación:

$$F_r = \mu_b \cdot m \cdot g \quad (\text{Ec. 13})$$

Donde:

F_r = Fuerza de roce sobre la calzada (N).

μ_b = Coeficiente de adherencia.

m = Masa del vehículo (Kg).

g = Gravedad (m/s^2).

2.2.13. Longitud de frenado.

Es el espacio recorrido por el vehículo desde que se accionan los frenos hasta que se detiene por completo. Esta distancia depende de la fuerza de roce entre el neumático y el suelo, la velocidad y masa del vehículo. La longitud de frenado se calcula con la siguiente expresión:

$$l = \frac{1}{2} \frac{m}{F_r} (V_i^2 - V_f^2) \quad (\text{Ec. 14})$$

Donde:

l = Longitud de frenado (m).

F_r = Fuerza de roce sobre la calzada (N).

m = Masa del vehículo (Kg).

g = Gravedad (m/s^2).

V_i = Velocidad inicial (m/s).

V_f = Velocidad final (m/s).

2.2.14. Aceleración del disco de freno.

En física, la aceleración es una magnitud derivada vectorial que nos indica la variación de velocidad por unidad de tiempo. El cálculo de la aceleración del vehículo está basado en las ecuaciones fundamentales de movimiento rectilíneo. Cuando el resultado de la aceleración da negativo, significa que el vehículo está desacelerando. Esta se puede determinar por la siguiente ecuación:

$$a = \frac{(V_f^2 - V_i^2)}{2(X_f - X_i)} \quad (\text{Ec. 15})$$

Donde:

a = Aceleración (m).

V_i = Velocidad inicial (m/s).

V_f = Velocidad final (m/s).

X_i = Distancia inicial (m).

X_f = Distancia Final (m).

2.2.15. Tiempo de frenado.

Este tiempo es necesario para ver si un disco de freno es óptimo en relación con otros tipos, ya que la integridad del conductor se ve involucrada en este lapso de tiempo. Para calcularlo se necesita la distancia de frenado y la velocidad a la que el vehículo empieza a frenar. El tiempo de frenado se puede calcular por la siguiente expresión:

$$t = \frac{2(x_f - x_i)}{(V_f + V_i)} \quad (\text{Ec. 16})$$

Donde:

t = Tiempo de frenado (seg).

x_f = Distancia final (m).

x_i = Distancia inicial (m).

V_i = Velocidad inicial (m/s).

V_f = Velocidad final (m/s).

2.2.16. Cálculo del calor generado en el proceso de frenado.

Para determinar la temperatura que se genera en el proceso de frenado, es necesario tener en consideración el área de la pastilla de freno, el tiempo que se demora en detenerse el vehículo, la longitud de la pastilla y las propiedades térmicas y físicas de los elementos de freno, teniendo en cuenta todos estos parámetros se puede calcular el calor generado en la superficie de contacto disco-pastilla por la siguiente expresión:

$$q_{total} = \frac{E_{total}}{A_{pastilla} \cdot t} \quad (\text{Ec. 17})$$

2.2.17. Difusividad térmica.

La difusividad térmica es una propiedad de los materiales que caracteriza los procesos de transferencia de calor de estado inestable. Esta se determina según la siguiente expresión:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot Cp} \quad (\text{Ec. 18})$$

Donde:

α = Difusividad Térmica ($m^2 \text{ s}$)

k = Conductividad térmica ($W/m \text{ K}$)

ρ = Densidad (Kg/m^3).

C_p = Calor específico ($J/Kg \text{ K}$)

2.2.18. Análisis térmico del disco de freno.

La potencia disipada en el sistema de frenos que proviene de la energía cinética y potencial del vehículo se transforma en energía calorífica, la cual va a ser generada en un corto intervalo de tiempo. Para que el sistema de frenos funcione correctamente, el calor generado debe ser evacuado con la mayor rapidez posible, para que las sucesivas frenadas no produzcan una elevada temperatura y así perder la seguridad del sistema. El propio avance del vehículo permite la disipación del calor generado esencialmente por convección y radiación. Cuando se producen frenadas excesivas, la temperatura se eleva hasta llegar a un límite (temperatura de saturación) en función de la capacidad de disipación térmica del disco de freno.

2.2.18.1. Aumento de temperatura.

El aumento de temperatura del conjunto de un freno se evalúa por la siguiente expresión:

$$T = \frac{E_{total}}{m \cdot C_p} \quad (\text{Ec. 19})$$

Donde:

T = Aumento de la temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

C_p = Capacidad térmica específica ($J/kg \text{ }^{\circ}\text{C}$); emplee $500 J/kg \text{ }^{\circ}\text{C}$ para acero o hierro fundido.

m = masa del freno (Kg).

Para calcular la temperatura en la superficie del disco se utiliza la siguiente ecuación:

$$T_1 - T_{\infty} = T \quad (\text{Ec. 20})$$

Donde:

T_1 = Temperatura en la superficie del disco (°C).

T_∞ = Temperatura ambiente (°C).

2.2.18.2. Enfriamiento

Si un objeto se encuentra a una temperatura inicial T_1 en un entorno con temperatura T_∞ , el modelo de enfriamiento de Newton se expresa como:

$$\frac{T - T_\infty}{T_1 - T_\infty} = e^{\left(-\frac{A U}{m c_p} t\right)} \quad (\text{Ec. 21})$$

Donde:

T = Temperatura para un determinado tiempo (°C).

T_1 = Temperatura inicial (°C).

T_∞ = Temperatura ambiente (°C).

U = Coeficiente de transmisión térmica superficial de material ($\text{J/s m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$).

A = Área de superficie lateral (m^2).

m = Masa del objeto (Kg).

C_p = Capacidad térmica específica del objeto ($\text{J/Kg } ^\circ\text{C}$).

t = Tiempo de enfriamiento de Newton (seg).

2.2.18.3. Convección en el disco de freno.

La convección es una de las tres formas de transferencia de calor (conducción, convección y radiación) que transporta el calor entre zonas con diferentes temperaturas. La convección se produce únicamente por medio de materiales, la evaporación del agua o fluidos. La convección en sí es el transporte de calor por medio del movimiento del fluido. Esta se define mediante la siguiente expresión:

$$\overline{h}_c = \frac{k}{D} Nu \quad (\text{Ec. 22})$$

Donde:

\overline{h}_c = Coeficiente de convección ($\text{W m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$).

k = Conductividad térmica ($W/m \ K$).

D = Diámetro (m).

Nu = Numero de Nusselt.

La transferencia de calor implica el transporte de calor en un volumen y la mezcla de elementos macroscópicos de porciones calientes y frías de un gas o un líquido. Incluye también el intercambio de energía entre una superficie sólida y un fluido o por medio de una bomba, un ventilador u otro dispositivo mecánico (convección mecánica, forzada o asistida).

En este apartado se analizará los distintos tipos de convección que aparecen en los discos de freno en función de la superficie del disco que este en contacto con el aire. Debido a que no hay un estudio específico para un disco de freno, aplicaremos la teoría para otros cuerpos de similar geometría para las diferentes superficies del disco. Los tipos de convección que encontramos en un disco de freno son:

- Convección frontal.
- Convección lateral.

2.2.18.4. Numero de Reynolds.

El número de Reynolds (Re) es un número adimensional utilizado en mecánica de fluidos, diseño de reactores y fenómenos de transporte para caracterizar el movimiento de un fluido. Su valor indica si el flujo sigue un modelo laminar o turbulento. Se determina según la siguiente expresión:

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (\text{Ec. 23})$$

Donde:

Re = Número de Reynolds.

V = Velocidad del fluido (m/s)

D = Diámetro (m).

ν = Viscosidad cinemática (m^2/s)

2.2.18.4. Numero de Nusselt.

El número de Nusselt (Nu) es un número adimensional que mide el aumento de

la transmisión de calor desde una superficie por la que un fluido discurre (transferencia de calor por convección) comparada con la transferencia de calor si ésta ocurriera solamente por conducción.

- Numero de Nusselt para flujo turbulento:

$$Nu = 0,027 Re^{0,805} Pr^{1/3} \quad (\text{Ec. 24})$$

Donde:

Pr = Numero de Prandlt.

- Numero de Nusselt para flujo laminar:

$$Nu = 0,664 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (\text{Ec. 25})$$

2.3. Definición de términos.

Emisión de energía o de partículas que producen algunos cuerpos y que se propaga a través del espacio.

El freno de tambor o freno de campana es un tipo de freno en el que la fricción se causa por un par de zapatas que presionan contra la superficie interior de un tambor giratorio, el cual está conectado al eje o la rueda.

Rendimiento térmico o eficiencia de una máquina térmica es un coeficiente adimensional calculado como el cociente de la energía producida y la energía suministrada a la máquina.

Designa la probabilidad de que un sistema cumpla satisfactoriamente con la función para la que fue diseñado, durante determinado período y en condiciones especificadas de operación.

En física, la energía cinética de un cuerpo es aquella energía que posee debido a su movimiento. Se define como el trabajo necesario para acelerar un cuerpo de una masa determinada desde el reposo hasta la velocidad indicada.

La fuerza de fricción o la fuerza de rozamiento es la fuerza que existe entre dos superficies en contacto, que se opone al movimiento relativo entre ambas superficies (fuerza de fricción dinámica) o a la fuerza que se opone al inicio del deslizamiento (fuerza de fricción estática).

La presión hidráulica es un procedimiento que permite multiplicar la fuerza ejercida mediante la presión de fluidos a través de dos pistones que, según el principio de Pascal, hará que sea posible el levantamiento de una carga muy pesada.

Es dar a algo dimensiones excesivas.

Conocida como tripoide, es una pieza compleja, que unida al palier de transmisión tiene como finalidad conectar dos ejes dispuestos longitudinalmente, no continuos, de modo que la velocidad de giro entre ellos sea igual en todo momento.

Se basa en la ley cero de la termodinámica, transferir el calor de una parte caliente hacia el aire.

Se denomina dilatación térmica al aumento de longitud, volumen o alguna otra dimensión métrica que sufre un cuerpo físico debido al aumento de temperatura que provoca cualquier medio.

La turbina es un motor rotativo que convierte en energía mecánica la energía de una corriente de agua, vapor de agua o gas.

Los ferodos son forros de fibras e hilos metálicos que se colocan en las zapatas de los frenos.

Es una combinación de propiedades metálicas, que está compuesta de dos o más elementos metálicos sólidos.

El coeficiente de conductividad térmica es una característica de cada sustancia y expresa la magnitud de su capacidad de conducir el calor. Su símbolo es la letra K.

Vincula la oposición al deslizamiento que ofrecen las superficies de dos cuerpos en contacto según la intensidad del apoyo mutuo que experimentan.

En transferencia de calor, es el valor obtenido de dividir la conductividad térmica de un cierto material dividida entre el producto del valor de su densidad y la capacidad calorífica específica del mismo.

Un aislante térmico es un material usado en la construcción y en la industria, caracterizado por su alta resistencia térmica.

Son sustancias que a través de reacciones químicas o físicas tienen la capacidad de unir fragmentos de uno o más materiales, para constituir un producto o sub-producto compacto de utilidad en el campo de la construcción.

Pieza que se mueve dentro de un cuerpo de bomba para producir la compresión de un fluido o para recibir movimiento de él.

Se denomina tracción al esfuerzo interno a que está sometido un cuerpo por la aplicación de dos fuerzas que actúan en sentido opuesto, y tienden a estirarlo.

Es la resultante de las tensiones o presiones que existen dentro de un sólido deformable, caracterizado porque tiende a una reducción de volumen del cuerpo, y a un acortamiento del cuerpo en determinada dirección.

Máximo esfuerzo de tracción que un cuerpo puede soportar antes de romperse.

Se denomina tensión de rotura a la máxima tensión que un material puede soportar bajo tensión antes de que su sección transversal se contraiga de manera significativa.

Se refiere a un fenómeno por el cual la rotura de los materiales bajo cargas dinámicas cíclicas se produce más fácilmente que con cargas estáticas

Se puede definir como la capacidad de producir un trabajo mecánico, el cual posee un cuerpo, debido a causas de origen mecánico, como su posición o sus velocidades que tiene los cuerpos la que es por su posición.

Es la variación, alteración o transformación en el valor, cualidad o intensidad de algo.

Se produce por un sobrecalentamiento de la superficie de frenado que provoca una deformación en el disco.

La deformación es el cambio en el tamaño o forma de un cuerpo debido a esfuerzos internos producidos por una o más fuerzas aplicadas sobre el mismo o a la ocurrencia de dilatación térmica.

El torque es la fuerza aplicada en una palanca que hace rotar alguna pieza.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se describen los métodos, técnicas y procedimientos que se utilizarán para alcanzar los objetivos planteados al inicio de la investigación, a fin de obtener resultados concretos para la problemática expuesta.

3.1. Tipo de investigación

El desarrollo de este trabajo investigativo estará enmarcado bajo los lineamientos de un Proyecto Factible. Según el Manual de trabajos de grado, de especialización, maestría y tesis doctorales de la UPEL (2006) “un proyecto factible consiste en la investigación, elaboración y desarrollo de una propuesta de un modelo operativo viable para solucionar problemas, requerimientos o necesidades de organizaciones o grupos sociales” (p.16). Indica, además que entre este tipo de proyectos se encuentran la formulación de políticas, tecnologías, programas, métodos y procesos.

En cuanto a la presente investigación se proyecta al estudio y simulación de la vibración causada por el fenómeno alabeo presente en un sistema de freno de disco de automóviles livianos, a partir de todas las posibles causas existentes en condiciones comunes de manejo, con el fin de generar oportunas recomendaciones para alargar la vida útil de los discos de frenos y brindar mayor seguridad al usuario.

3.2. Diseño de la investigación

Según Arias (2012), define el diseño de la investigación como “El diseño de investigación es la estrategia general que adopta el investigador para responder al problema planteado. En atención al diseño, la investigación se clasifica en: documental, de campo y experimental.” (p.27), lo que da fundamento al objetivo de la investigación.

Se considera que la investigación es de diseño documental, ya que el análisis e

interpretación de datos obtenidos a través de la simulación de un sistema de frenos se basa en parámetros teóricos y prácticos derivados de estudios experimentales, y así poder determinar las causas probables del fenómeno alabeo.

Según Arias (2012) define la investigación documental como:

La investigación documental es un proceso basado en la búsqueda, recuperación, análisis, crítica e interpretación de datos secundarios, es decir, los obtenidos y registrados por otros investigadores en fuentes documentales: impresas, audiovisuales o electrónicas. Como en toda investigación, el propósito de este diseño es el aporte de nuevos conocimientos. (p. 27)

3.3. Nivel de Investigación

El nivel de investigación se refiere a la profundidad con la que se aborda el estudio, el cual se clasifica como descriptivo para la presente investigación, ya que se tomarán en cuenta las características y propiedades de cada uno de los elementos que integran un sistema de freno a disco, además serán descritas detalladamente para obtener los parámetros fundamentales que necesita la simulación, generando así resultados confiables.

Según Hernández, Fernández y Baptista (2010), establece que la investigación descriptiva “Los estudios descriptivos buscan especificar las propiedades, las características y los perfiles de personas, grupos, comunidades, procesos, objetos o cualquier otro fenómeno que se someta a un análisis.”, (p.80). En este orden de ideas, para Sabino, C (2002), la investigación de tipo descriptiva:

Trabaja sobre realidades de hechos, y su característica fundamental es la de presentar una interpretación correcta. Para la investigación descriptiva, su preocupación primordial radica en descubrir algunas características fundamentales de conjuntos homogéneos de fenómenos, utilizando criterios sistemáticos que permitan poner de manifiesto su estructura o comportamiento. De esta forma se pueden obtener las notas que caracterizan a la realidad estudiada. (p.62)

3.4. Población y Muestra

3.4.1. Población

Tamayo y Tamayo, M. (2004), “La población se define como la totalidad del fenómeno a estudiar donde las unidades de población poseen una característica común la cual se estudia y da origen a los datos de la investigación.”, (p.114). En este sentido, la población que se utilizara para la presente investigación está formada por todos los tipos de frenos a disco, los cuales son configurados entre tipo de caliper o pinza, pastilla de freno y disco.

3.4.2. Muestra

Según Balestrini, (2002), establece que “La muestra es una parte de la población, o sea, el número de individuos u objetos señalados científicamente cada uno de los cuales es un elemento del universo.”, (p.141). En este caso la muestra seleccionada para la investigación será un sistema de freno de discos de frenos ventilados, caliper o pinza flotante con pastillas tipo F (coeficiente de fricción entre 0,35 y 0,45).

3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

Las técnicas para la recolección de datos son básicamente: revisiones bibliográficas, entrevistas, registros de prensa, observaciones directas, entre otras. Según Arias (2012), plantea que “Se entenderá por técnica de investigación, el procedimiento o forma particular de obtener datos o información.” (p.67). Las técnicas de recolección a utilizar en la presente investigación serán:

- Localización y consolidación de los datos.
- Revisión documental: “Es una técnica en la cual se recurre a información escrita, ya sea bajo la toma de datos que pueden haber sido producto de mediciones hechas por otros o como texto que en sí mismo constituyen los eventos de estudio” (Hurtado, J2006, p.53). En esta investigación se aplicará la técnica de revisión documental, consultando textos asociados a los sistemas de información digital en forma de presentaciones y manuales; y de forma física

mediante la clasificación de documentos involucrados con los elementos bajo estudio.

En cuanto a los instrumentos, según Arias (2012) establece que “Un instrumento de recolección de datos es cualquier recurso, dispositivo o formato (en papel o digital), que se utiliza para obtener, registrar o almacenar información.” (p.68). En este sentido se contará con la utilidad de computadoras para conseguir resultados obtenidos por simulación de parámetros relacionados al diseño de frenos a discos, con los cuales se procede a comparar con valores experimentales realizados anteriormente y poder comprobar el comportamiento que produce el alabeo.

3.6. Fases de Investigación

En la investigación en curso se describirá de manera puntual cada una de los procedimientos, técnicas y actividades a realizar para logra cumplir con los objetivos propuestos del proyecto.

Fase I. “Búsqueda y revisión de información bibliográfica acerca de las variables que causan el fenómeno en estudio en los sistemas de discos de freno”

Con las herramientas de búsqueda de información digital en primer lugar partiendo como base los antecedentes de la investigación, con la finalidad de definir, localizar por ultimo identificar las variables y condiciones que deben existir para que se produzca el alabeo en los discos de freno.

Fase II. “Analizar e identificar el funcionamiento del sistema de discos de freno de vehículos ligeros en general”.

En esta fase se debe realizar un análisis completo del sistema de discos de freno en los vehículos ligeros, con todos sus componentes y sistema de accionamiento incluidos de igual manera las definiciones físicas, matemáticas que logran que sea posible la desaceleración, esto contribuirá con la identificación de los factores que generan la problemática cuando sus condiciones normales se ven afectadas.

Fase III. “Evaluar los distintos avances tecnológicos que se han creado para contrarrestar específicamente el fenómeno del alabeo en los sistemas de frenos de disco”

Consiste en hacer una comparación de las distintas tecnologías utilizadas en la actualidad que contrarrestan los problemas generados por el sobrecalentamiento de los discos, el objetivo es presentar las especificaciones de cada una de estos avances y así realizar una relación costo-beneficio que se adecue a la necesidad requerida.

Fase IV. “Realizar una simulación del comportamiento del sistema de discos de frenos de un vehículo liviano con el fin de determinar las condiciones que producen el alabeo en el automóvil”.

Esta fase es de suma importancia para el proyecto por su capacidad de representar de manera virtual las causas que generan problemas en los discos de frenos, específicamente en el que estamos haciendo más énfasis como lo es el alabeo. Esta simulación se realizara en el programa de diseño asistido el Software Solidworks Premiun 2015 que brindara los resultados gráficos y cuantitativos necesarios, se simulara con distintas cargas y condiciones para poder interpretar los resultados con el fin de obtener los datos que generan el alabeo en el automóvil.

Fase V. “Proponer el uso y selección adecuado del sistema de frenos del automóvil para reducir el riesgo de producir el alabeo, alargando la vida útil de los discos de freno”.

Para culminar es necesario proponer el buen uso y mejor selección del tipo de disco de acuerdo a la necesidad del vehículo tomando en cuenta el peso del vehículo, el correcto uso del frenado y mantenimiento de los discos, variables importantes que aumentan la vida útil del disco, evitando un sobre costo por servicios de rectificación o el cambio total del disco. Para ello se tomaran en cuenta los resultados obtenidos en la fase anterior que brindaran los resultados pudiendo así reducir las condiciones que generan el alabeo en los vehículos.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

En este capítulo se presenta el resultado de cada una de las fases metodológicas a fin de cumplir con los objetivos para de las actividades y de toda la investigación en sí. Usando las fases metodológicas se logra tener una secuencia precisa para lograr el objetivo principal del texto.

5.1. Búsqueda y revisión de información bibliográfica acerca de las variables que causan el fenómeno en estudio en los sistemas de discos de freno.

El sistema de frenos es, sin duda, el componente más importante para la seguridad vial del automóvil, ya que de este depende la detención total o parcial del vehículo, y en consecuencia la integridad de sus pasajeros. Generalmente el 70% de la energía cinética producida en el movimiento es absorbida por los frenos de disco delanteros y el restante por el freno trasero, que suele ser de tambor. Estos sistemas se fundamentan en la fricción para detener el movimiento del vehículo, teniendo como principio la presión hidráulica que empuja las pastillas de freno contra el disco de hierro fundido.

En consecuencia, el comportamiento que produce este tipo de dispositivos, a través de la energía cinética, es crear un calor considerablemente alto durante el frenado, aumentando la temperatura por fricción (visualizar figura 31); este calor se disipa rápidamente con el aire circundante por medio del fenómeno de convección (transferencia de calor que se produce entre masas a diferente temperatura). Los factores ambientales también son determinantes para que la etapa de transferencia de calor se produzca, y debido a estos comportamientos el proceso de corrosión se acelera rápidamente. Además, cuando la temperatura alcanza valores elevados aparece el fenómeno por radiación, que también ayuda a disipar la energía en forma de calor almacenada en el disco.

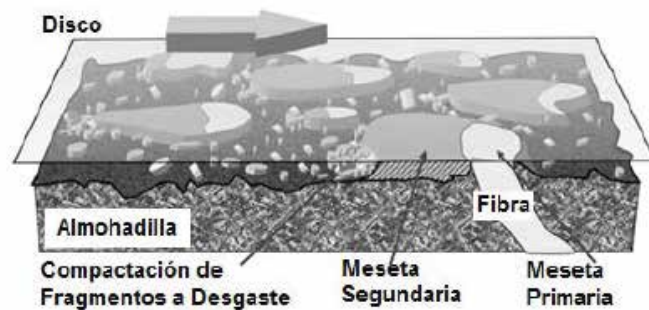


Figura 31. Situación de contacto entre la pastilla y el disco.

Fuente: García León, R. A., Acosta Pérez, M. A., & Flórez Solano, E. (2015).

El alabeo se produce por un sobrecalentamiento de la superficie de frenado que provoca una deformación en el disco. Esto provoca vibraciones en la frenada y una disminución en la potencia de frenado. El alabeo puede ser prevenido con una conducción menos exigente con los frenos, aprovechando el freno motor con un uso inteligente de la caja de cambios para reducir la carga del freno de servicio. Pisar el freno continuamente provoca una gran cantidad de calor, por lo que debe evitarse para verificar se mide con micrómetro (el espesor) y con un comparador de dial o carátula (para medir la deformación).

5.1.1. Sistemas de frenos.

Su principal función es disminuir o anular progresivamente la velocidad del vehículo, o mantenerlo inmovilizado cuando está detenido.

El sistema de freno principal, o freno de servicio, permite controlar el movimiento del vehículo, llegando a detenerlo si fuera preciso de una forma segura, rápida y eficaz, en cualquier condición de velocidad y carga en las que rueda. Para inmovilizar el vehículo, se utiliza el freno de estacionamiento, que puede ser utilizado también como freno de emergencia en caso de fallo del sistema principal. Debe cumplir los requisitos de inmovilizar al vehículo en pendiente, incluso en ausencia del conductor.

Un freno es eficaz, cuando al activarlo se obtiene la detención del vehículo en un tiempo y distancia mínimos.

La estabilidad de frenada es buena cuando el vehículo no se desvía de su

trayectoria. Una frenada es progresiva, cuando el esfuerzo realizado por el conductor es proporcional a la acción de frenado.

5.1.1.1. Freno de tambor.

Un freno de tambor (ver figura 32), está fijado a la rueda por medio de tornillos, en cuyo interior van alojadas las zapatas (B), provistas de forros de un material muy resistente al calor y que pueden ser aplicadas contra la periferia interna del tambor por la acción del bombín (C), produciéndose en este caso el frotamiento de ambas partes.

Como las zapatas van montadas en el plato (D), sujeto al chasis por el sistema de suspensión y que no gira, es el tambor el que queda frenado en su giro por el frotamiento con las zapatas.

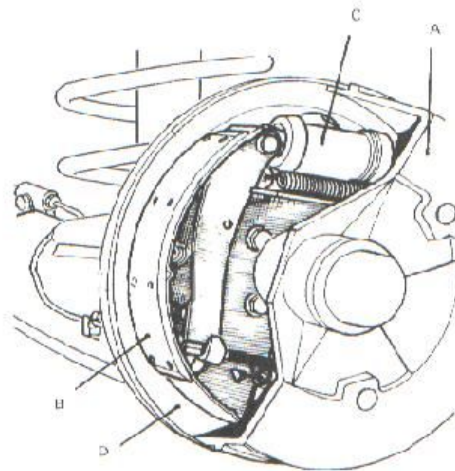


Figura 32. Dispositivo de frenado de tambor y zapatas.

Fuente: García R. y Estremera V. (2014).

5.1.1.2. Freno de disco.

El freno de disco sustituye el tambor por un disco, que también se une a la rueda por medio de tornillos. Este disco puede ser frenado por medio de unas plaquetas (B), que son accionadas por un émbolo (D) y pinza de freno (C), que se aplican lateralmente contra él deteniendo su giro (ver figura 33). Suelen ir convenientemente protegidos y refrigerados, para evitar un calentamiento excesivo de los mismos.

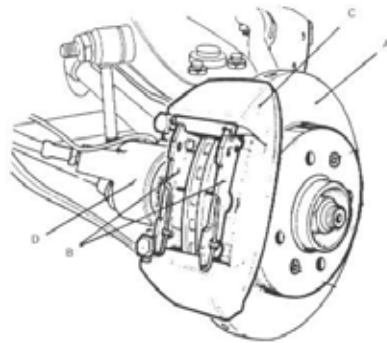


Figura 33. Dispositivo de freno de disco.

Fuente: García R. y Estremera V. (2014).

El calentamiento excesivo de los frenos disminuye la adherencia del material empleado en los forros de las zapatas, al mismo tiempo que dilata el tambor, que queda más separado de ellas, por cuyas causas aparece el fenómeno llamado “fading”, que es una pérdida temporal de la eficacia de los frenos. Una vez que se enfrían vuelve la normalidad. Este fenómeno aparece también cuando el líquido de frenos es de mala calidad y se vaporiza parcialmente en los bombines.

5.1.2. Distribución de la fuerza de frenado en un vehículo.

Se reparte de manera desigual, pues al ser frenado un vehículo que se encuentra en movimiento (visualizar figura 34), la fuerza de inercia (I) aplicada a su centro de gravedad (G), forma con las fuerzas de frenado (F_1) y (F_2) un par que obliga a inclinarse hacia abajo al vehículo de su parte delantera, mientras que en la trasera ocurre lo contrario. Decimos que el peso del vehículo ha sido transferido en parte al eje delantero, al mismo tiempo que el trasero se ha deslastrado.

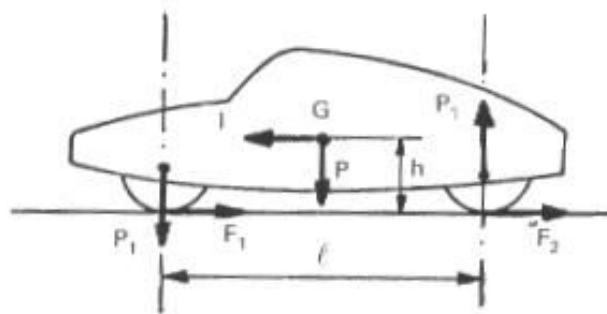


Figura 34. Esfuerzos desarrollados en la acción de frenado.

Fuente: Mena Eric (2011).

Debido a esto la fuerza de frenado debe de estar repartida entre los ejes con relación al peso soportado por los mismos; dependiendo de la distribución de los distintos mecanismos, como motor, caja de velocidades, depósito de combustible, etc., y de la transferencia de peso al frenar (que depende fundamentalmente de la altura del centro de gravedad), peso total del vehículo y distancia entre ejes.

En cuanto a la eficacia del frenado, deben de ser exactamente iguales en las dos ruedas de un mismo eje, para evitar “tiros” hacia uno de los lados, que provocarían la inestabilidad del vehículo en las frenadas.

5.1.3. Diagnóstico de ruidos y vibraciones.

Los ruidos y vibraciones en el sistema de frenado son síntomas habituales cuando existe algún defecto de funcionamiento o avería en el mismo. Estos síntomas difieren en cuanto a la avería que los provoca, siendo necesario emplear métodos de reparación distintos en cada caso. Por ello, es importante identificar claramente el síntoma para poder efectuar una correcta diagnosis y reparación del sistema. Visualizar figura 35.



Figura 35. Diagnóstico de avería.

Fuente: Kashima University, (2019).

Una avería en alguno de los componentes del sistema puede provocar varios síntomas a la vez, siendo necesario aplicar diversos métodos de reparación. A continuación, se explicará cada síntoma por separado, las causas que lo provoca y las

principales comprobaciones o medidas para solventar el defecto.

5.1.4. Chirrido del freno.

El chirrido del freno es un sonido producido por la vibración debida al contacto discontinuo entre la pastilla y el disco de freno. Este fenómeno es comparable al silbido provocado por el acoplamiento de los sistemas de sonido y megafonía. Es un sonido agudo, fácilmente perceptible localizado fuera del habitáculo y con un volumen mayor cuanto mayor es la vibración producida entre el disco y la pastilla de freno.

El primer paso para efectuar la reparación de chirridos es localizar la rueda o ruedas de las que procede el sonido, siendo a menudo en ambas ruedas de un mismo eje. Para ello, es imperativo realizar una prueba de conducción simulando diversas condiciones de frenado hasta lograr reproducir y localizar el sonido.

La reparación de estas anomalías se centra en las pastillas de freno, centrándose en los siguientes puntos.

5.1.4.1. Modificar el contacto de las pastillas con el disco.

El mal contacto de la pastilla con el disco o la superficie cristalizada de uno de estos elementos, son las causas más comunes que provocan el chirrido de los frenos, sobre todo cuando se aplica poca fuerza de frenado. Los principales métodos de reparación para solventar este problema son:

- Biselar los laterales de las pastillas de freno si son completamente planas y tienen un grosor suficiente, reduciendo la energía que provoca las vibraciones. El biselado de la pastilla debe ser de unos 10 mm de largo desde cada extremo de la pastilla y con una profundidad de 5 mm aproximadamente. Visualizar figura 36.
- Limar la superficie de las pastillas en el caso de estar cristalizadas o contaminadas, eliminando la capa que se encuentra en dicho estado, o sustituirlas de no ser posible su reparación por encontrarse muy desgastadas o en mal estado.

- Rectificar o sustituir el disco de freno en el caso de encontrarse en mal estado. Del mismo modo que las pastillas, si la superficie de fricción no se encuentra en óptimas condiciones, durante el proceso de frenado pueden provocarse chirridos, además de disponer de una menor eficacia de frenado.

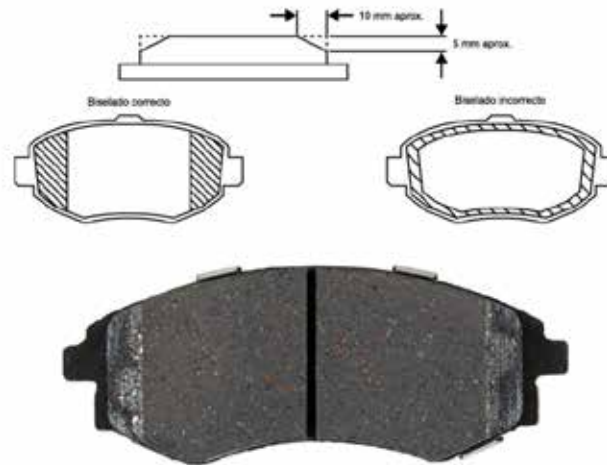


Figura 36. Biselado de una pastilla de freno.

Fuente: Kashima University, (2019).

5.1.4.2. Modificar el contacto de las pastillas con la pinza.

Si la fuerza aplicada sobre las pastillas durante la frenada no se distribuye de forma correcta, posiblemente se generarán vibraciones de las pastillas, ocasionado el chirrido. Las principales causas de este defecto son el apoyo incorrecto de la pastilla sobre el émbolo y el agarrotamiento de la pinza de freno, siendo necesario realizar los siguientes métodos de reparación:

- Comprobar la deformación de la pastilla, sobretodo en la zona de contacto de esta con el émbolo o émbolos de la pinza. Un soporte deformado puede provocar un mal apoyo de la pastilla, siendo necesaria su sustitución. También es necesario verificar el estado de la superficie de apoyo de los émbolos de freno para asegurar que el contacto con la pastilla se efectúa de modo uniforme.
- Sustituir los elementos antivibración de la pastilla dispuesta en el soporte metálico de la misma. Si estos elementos, ya sea en forma de láminas metálicas o revestimiento de goma, están deteriorados, absorben en menor medida las

vibraciones de la pastilla durante la frenada, originando el chirrido por el contacto variable entre el soporte metálico de la pastilla y la pinza de freno.

- Verificar el apoyo de las pastillas con la pinza de freno. Suelen emplearse clips o láminas metálicas que aseguran una buena fijación de la pastilla sobre la pinza de freno para evitar el movimiento y amortiguar la vibración. Si no se montan o se rompen, la pastilla puede no sujetarse correctamente, aumentando las vibraciones producidas y originando el chirrido de frenos.
- Lubricar, en caso necesario, con una pequeña película de grasa específica para frenos o pasta de cobre de alta temperatura las superficies de contacto de las pastillas con los émbolos y su soporte. Ver figura 37.



Figura 37. Lubricación de la base de las pastillas con pasta de cobre especial alta temperatura.

Fuente: Kashima University, (2019).

5.1.5. Ruido del freno.

Al igual que los chirridos, es un síntoma en el que se produce sonido al frenar. Se entiende como ruido de freno al sonido generado cuando la fricción del sistema de frenado se transforma en una fuerza vibratoria y se transmite a ciertos elementos del vehículo como carrocería o las suspensiones, haciéndolos vibrar y emitir sonidos.

Este ruido suele ser más grave que los chirridos y, al transmitirse a otros elementos además del sistema de frenado, puede percibirse como ruido interior del vehículo. En la mayoría de casos, no supone una disminución de la eficacia de frenado, produciéndose con relativa normalidad en algunas situaciones específicas de conducción (frenadas al límite de adherencia a velocidad muy elevada o pavimento muy rugoso). En ocasiones puede ir acompañado de vibraciones perceptibles de baja

frecuencia (zumbido).

En los casos que el ruido se acompaña de vibraciones sensibles en situaciones de frenado "normales", es necesario identificar su procedencia y causa, como se describe a continuación.

5.1.6. Vibración del freno.

La vibración del freno es un síntoma que se percibe como temblores o palpitaciones en algunas zonas del vehículo como la carrocería, el salpicadero, el timón o el pedal de freno únicamente durante la acción de frenado. Este síntoma suele presentarse con mayor facilidad a altas velocidades y en frenadas fuertes, aunque puede reproducirse a baja velocidad y con frenadas moderadas durante la marcha por inercia en descenso del vehículo.

Para poder llevar a cabo la reparación pertinente, es necesario conocer en que dispositivo de freno se produce la vibración, comenzando por identificar de que eje procede mediante una prueba de conducción. Se accionará progresivamente el freno de estacionamiento a una velocidad moderada. Si se reproduce la vibración (perceptible incluso en el mando del freno de mano), indica que la avería proviene del eje trasero mientras que, en caso contrario, proviene del eje delantero. Este método de diagnosis no es válido si el vehículo dispone de freno de estacionamiento de tambor integrado en el disco.

En caso de equipar dicho sistema, durante la prueba de conducción se realizará una frenada con el freno de servicio (pie) a velocidad moderada, comprobando si la vibración provoca temblores sobre el timón de sentido circular, efecto que indica que la avería se localiza en los frenos delanteros. En el caso de seguir resultando difícil identificar la procedencia de la vibración, será necesario comprobar el estado, coloración, grosor y alabeo de los discos de ambos ejes.

En la mayoría de casos, la vibración viene provocada por una variación excesiva del grosor del disco, provocando una fluctuación en la presión hidráulica que se transmite mecánicamente hasta el pedal de freno. Esta variación de grosor puede deberse a un desgaste desigual del disco, óxido en la superficie de fricción o la

deformación del disco de freno.

5.1.7. Desgaste desigual del disco.

El desgaste del disco se produce por la fricción con las pastillas durante la conducción. Si el contacto entre la pastilla y el disco no es uniforme o la superficie del disco presenta algún defecto, el desgaste se produce de manera desigual, provocando una variación de grosor que se acentúa cada vez más a medida que se conduce el vehículo. Las causas más típicas de este desgaste son:

- Rozamiento de la pastilla no uniforme que puede ser originado por agarrotamiento de la pinza, ya sea de los pasadores o de los émbolos, defecto en el soporte de la pinza o defecto localizado en la propia pastilla de freno o en su asiento, causando un contacto desigual con el disco. Ver figura 38.

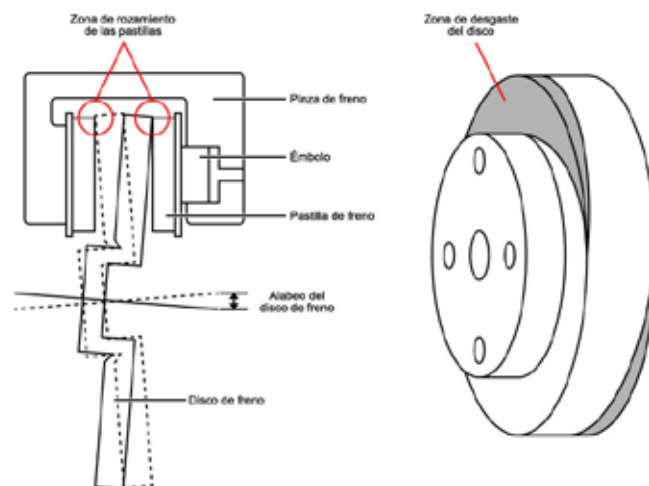


Figura 38. Desgaste desigual por el alabeo del disco y el contacto con las pastillas de freno.

Fuente: Kashima University (2019)

- Alabeo del disco que puede ser provocado por un defecto en el buje de la rueda o en el propio disco de freno. El alabeo del disco causa un contacto desequilibrado con las pastillas, generando un desgaste descompensado en el disco. Dicho alabeo es perceptible, en la mayoría de casos, al tacto en el timón.

5.1.8. Óxido en la superficie de fricción.

Después de largos periodos de tiempo con el vehículo estacionado en el

exterior, a menudo aparece óxido que provoca una variación del grosor del disco. Este óxido no se produce por igual en toda la superficie del disco, atacando al metal con diferente intensidad en la banda de fricción (ver figura 39). Cuando la oxidación es superficial, suele eliminarse correctamente aplicando el freno varias veces. Sin embargo, cuando es oxidación profunda y desigual altera el coeficiente de fricción del metal, provocando vibraciones al variar rápidamente las fuerzas de fricción entre ambos lados del disco. Para eliminar por completo el óxido es necesario rectificar el disco si, después de ello, se mantiene dentro de los valores de desgaste proporcionados por el fabricante. En caso contrario, es necesario sustituirlos para eliminar estas vibraciones.



Figura 39. Vista de un disco de freno oxidado por un largo periodo de tiempo con el vehículo estacionado.

Fuente: Kashima University (2019)

5.1.9. Deformación del disco.

Del mismo modo que un desgaste anómalo, la deformación del disco produce la variación del grosor con la consiguiente vibración durante el frenado, siendo en este caso, más perceptible en el pedal de freno que en el timón. La deformación puede producirse por varias causas:

- La deformación por sobrecarga térmica es la causa más común, provocándose por estrés térmico del disco (visualizar la figura 40). Se produce por sobrecalentamiento del metal del disco que, unido a la compresión, lo deforma físicamente. Suele deberse a un uso abusivo del freno o un defecto en alguno de

los elementos del sistema, provocando el contacto continuo de la pastilla contra el disco. La variable coloración de la superficie de fricción es un claro indicativo de sobrecarga térmica que, de producirse por utilización abusiva, debe ser visible en ambas ruedas del mismo eje y más común en el delantero que el trasero. En caso de producirse en el tren trasero, se deberá comprobar el correcto trabajo de los cables de accionamiento del freno de estacionamiento, en especial de su retroceso.

- Un alabeo del disco debido a un defecto en el buje o un apriete excesivo de la rueda que obliga al disco a trabajar de forma incorrecta, provocando su deformación y alabeo con el uso del sistema. El alabeo resulta más perceptible en el timón que en el pedal y se produce por la deformación mecánica del disco, obligado a trabajar entre dos bases en la que una de ellas no es plana.

Independientemente de la causa que provoca la deformación del disco, es necesario solventar el problema antes de efectuar el rectificado o la sustitución del disco, evitando la repetición de la misma avería en el futuro.



Figura 40. Vista de un disco de freno con puntos de calor (deformación térmica) provocados por sobrecalentamiento.

Fuente: Kashima University (2019)

5.1.10. Comprobación de los discos.

La comprobación visual de los discos de freno es uno de los métodos más rápidos y efectivos para diagnosticar su estado y las causas que provocan dicho estado. A continuación, se mostrarán algunos de los daños más frecuentes en los

discos así como sus causas.

5.1.10.1. Discos azulados.

El cambio de coloración en la superficie del disco (ver figura 41) indica una transformación en la estructura del material (cristalización). Este cambio se produce por trabajar a temperaturas superiores a su límite de trabajo, ya sea por frenadas prolongadas, por mantener el pie apoyado en pedal mientras se circula o por agarrotamiento mecánico de la pastilla o el émbolo de freno, manteniéndose la pastilla en contacto con el disco. La cristalización del disco provoca un frenado deficiente junto con ruidos molestos. El exceso de temperatura puede provocar, además de la cristalización, deformaciones en el disco que se traducen en vibraciones al frenar. La sustitución del disco es obligatoria.

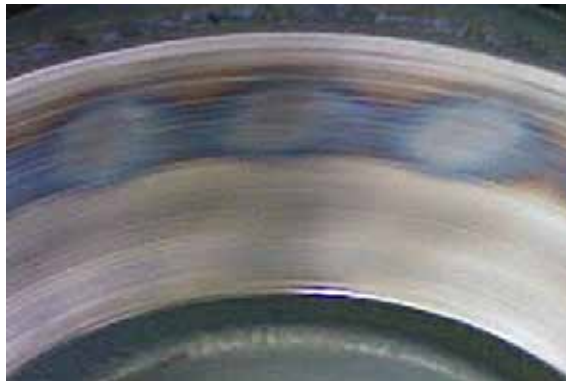


Figura 41. Vista de un disco con la superficie de fricción con marcas azuladas.

Fuente: Kashima University (2019)

5.1.10.2. Discos agrietados.

Las grietas en la superficie de fricción del disco suelen producirse por un desgaste excesivo del mismo, que resulta claramente apreciable por el surco generado en el borde exterior del disco (rebaba externa). En ocasiones, el trabajo constante a altas temperaturas del disco puede generar el mismo efecto, debilitando su estructura y provocando la aparición de dichas grietas (ver figura 42). Las grietas provocan ruidos molestos durante la frenada y reducen notablemente la resistencia del disco, pudiendo ser causa de su rotura. La sustitución del disco es obligatoria aunque el tamaño de las grietas sea mínimo.



Figura 42. Vista de un disco con la superficie de fricción agrietada.

Fuente: Kashima University (2019)

5.1.10.3. Discos rayados.

Las rayadas producidas en el disco por lo general se deben a un desgaste excesivo de la pastilla (llegando a rozar el propio soporte de la pastilla con el disco), pastillas/discos de mala calidad o a cuerpos extraños entre la pastilla y el disco. Estas rayadas suponen una deficiencia en la eficacia del sistema y puede provocar ruidos al frenar. Ver figura 43.



Figura 43. Vista de un disco con la superficie de fricción rayada.

Fuente: Kashima University (2019)

5.1.10.4. Discos oxidados.

El óxido en los discos de freno está provocado por un estacionamiento muy prolongado del vehículo con el freno de mano puesto y las influencias del tiempo normalmente, aunque también puede deberse a la falta de contacto de la pastilla con el disco provocado por un defecto en la propia pastilla de freno. Hasta que no se elimina el óxido mediante las frenadas, la eficacia del sistema decae y puede producir

ruidos y vibraciones. Además, puede producirse sobrecalentamiento en los puntos oxidados. Visualizar figura 44.



Figura 44. Vista de un disco de freno oxidado.

Fuente: Kashima University (2019)

5.1.10.4. Discos con fisuras en los orificios.

Las fisuras en los orificios del disco suelen producirse por un apriete excesivo de los tornillos de la rueda (ver figura 45). Estas fisuras pueden provocar movimiento excéntrico del disco, deformación de la superficie de contacto del disco o incluso la rotura del disco bajo carga.



Figura 45. Vista de una fisura en el orificio del disco para el tornillo de la rueda.

Fuente: Kashima University (2019)

5.1.11. Mediciones.

Las mediciones permiten conocer el desgaste del disco y si presenta alabeo o surcos que puedan producir vibraciones durante la frenada. Las mediciones a realizar son las siguientes.

5.1.11.1. Espesor del disco.

Para realizar esta medición es necesario utilizar un micrómetro. Debe efectuarse la medición comprobando, como mínimo, tres puntos depuesta a punto 120° alrededor

de la banda de fricción del disco, manteniendo siempre la misma distancia respecto al borde. Visualizar figura 46.



Figura 46. Medición del grosor del disco mediante micrómetro.

Fuente: Kashima University (2019)

Esta medición permite conocer el desgaste del disco, siendo necesaria la sustitución si el valor obtenido de alguna de las tres mediciones es inferior al mínimo establecido por el fabricante.



Figura 47. Espesor mínimo troquelado en algunos discos de freno.

Fuente: Kashima University (2019)

En muchos casos, la medida mínima aceptable del disco se indica sobre el mismo, troquelada en el plano externo de su circunferencia o en la superficie del cubo (ver figura 47). Como se ha mencionado anteriormente, un disco excesivamente desgastado puede producir grietas y cristalizar con facilidad la superficie de fricción del disco, llegando incluso a romperse en casos extremos.

En los discos cerámicos, el desgaste del mismo no suele provocar una disminución del grosor del disco pronunciada sino la disminución del peso del disco. Esto viene provocado por la combustión de las fibras de carbono del disco al alcanzar altas temperaturas. La combustión de las fibras no altera su volumen pero sí su resistencia, lo cual compromete la rigidez del disco. Por ello, para comprobar el

desgaste es necesario pesar el disco y sustituirlo en caso de no alcanzar el peso mínimo marcado por el fabricante.

5.1.11.2. Alabeo

La medición debe realizarse utilizando un reloj comparador, fijado a la mangueta mediante un soporte magnético u otro medio de sujeción fiable. El palpador del reloj debe colocarse sobre la superficie de fricción del disco, a unos 10 mm del borde externo del mismo. Después de girar 360° el disco, comparar las desviaciones máximas obtenidas con los valores proporcionados por el fabricante y sustituir el disco de freno si es necesario. Ver figura 48.

En discos que presenten cambios de coloración, se recomienda realizar la medición de alabeo sobre las zonas externa, interna e intermedia de la banda de fricción y, si es posible, sobre sus dos caras a fin de comprobar la posible ondulación. Por regla general la desviación máxima permisible es 0,2 mm.

El alabeo del disco puede deberse a su propia deformación o a un defecto en el buje de la rueda, por sobrecalentamiento o par de apriete de las ruedas excesivo o desigual. El alabeo pronunciado del disco provoca vibraciones en el pedal y el timón durante la frenada y el desgaste asimétrico de las pastillas de freno.



Figura 48. Medición del alabeo de un disco de freno.

Fuente: Kashima University (2019)

La sustitución de un disco de freno supone el cambio de las pastillas de freno aunque estas no estén desgastadas, así como el cambio del conjunto de fricción en la otra rueda del mismo eje.

5.1.12. Comprobación de las pastillas.

5.1.12.1. Pastillas cristalizadas.

La superficie de contacto de la pastilla presenta un reflejo brillante producido por el sobrecalentamiento frecuente durante cortos periodos de tiempo (visualizar figura 49). Esto sucede cuando se mantiene el pedal de freno pisado sin llegar a efectuar una fuerza de frenado suficiente, generando una ligera fricción y manteniendo el contacto de las pastillas con el disco de manera continua. La temperatura media superficial de las pastillas aumenta y, por falta de presión de contacto, no logran transmitirla ni al disco ni a la pinza de frenos. La superficie de fricción se endurece disminuyendo su coeficiente de fricción.

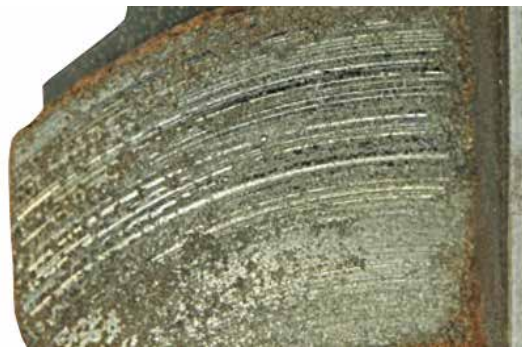


Figura 49. Pastilla cristalizada.

Fuente: Kashima University (2019)

La cristalización de las pastillas produce una disminución de la eficacia de frenado y, en ocasiones, chirrido al frenar. Si la cristalización es leve, puede eliminarse realizando frenadas más contundentes. Si la cristalización es severa, deben sustituirse las pastillas y revisar la superficie del disco de freno.

5.1.12.2. Pastillas contaminadas.

Existen manchas o una coloración variable en la superficie del ferodo que puede deberse a contaminación por suciedad, corrosión o contacto con sustancias como grasas, aceites, u otros elementos con las pastillas de freno (ver figura 50). También puede producirse por un apoyo insuficiente de la pastilla en algún punto, evitando alcanzar la temperatura de funcionamiento y evitando que se limpie la superficie de la pastilla.

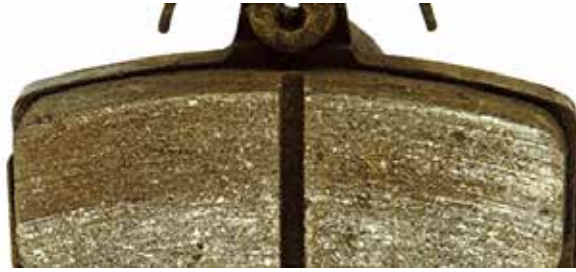


Figura 50. Pastilla contaminada.

Fuente: Kashima University (2019)

Unas pastillas contaminadas frenan en menor medida, reduciendo la eficacia de frenado y pudiendo llegar incluso a notarse una desviación en frenadas fuertes. Antes de sustituir las pastillas de freno, es necesario averiguar la fuente que ha provocado la contaminación de las pastillas y actuar en consecuencia.

5.1.12.3. Pastillas quemadas.

Las pastillas presentan un aspecto marrón rojizo, pudiendo estar agrietado o descompuesto el ferodo en algunos puntos, incluso despegándose del soporte metálico por culpa de un exceso de temperatura (ver figura 51). Dicho exceso puede producirse por un uso abusivo del freno, estrés térmico por defecto de alguno de los elementos de freno o algún fallo en el sistema ESP del vehículo, produciendo la activación continua del sistema de frenos en alguna rueda.



Figura 51. Pastilla quemada.

Fuente: Kashima University (2019)

Unas pastillas quemadas suponen una reducción de la eficiencia de frenada, pudiendo producirse un desgaste anormal de las pastillas e incluso el desprendimiento del ferodo, siendo necesario buscar y corregir el motivo por el cual se produce el sobrecalentamiento, sustituyendo a continuación las pastillas de freno.

5.1.12.4. Pastillas con desgaste irregular.

Un desgaste irregular de las pastillas puede efectuarse de varias formas distintas:

- **Desgaste irregular de las pastillas de un freno.**

Las pastillas presentan un desgaste en un ángulo diagonal o en una parte de la pastilla, sin llegar a tocar de manera uniforme con el disco (ver figura 52). Esto puede producirse por un defecto en los pistones de la pinza, evitando que hagan una fuerza uniforme, un soporte de la pinza con algún desperfecto o que la superficie de apoyo de las pastillas esté sucia o dañada, evitando que la pastilla se asiente correctamente.



Figura 52. Pastilla con desgaste irregular.
Fuente: Kashima University (2019)

Este defecto puede provocar chirridos al frenar así como una presión de frenado irregular y un sobrecalentamiento de la pastilla, siendo necesario revisar la pinza de freno y sustituir las pastillas.

- **Desgaste irregular entre las dos pastillas de un mismo freno.**

En una misma pinza de freno, las pastillas presentan diferente desgaste entre ellas, pudiendo estar una de las pastillas muy gastada mientras la otra no tiene un desgaste tan pronunciado. Este defecto puede deberse a un defecto en los pistones de la pinza, ya sea porque no retornan correctamente a su posición o porque están clavados.

Además del desgaste, a menudo puede producirse un sobrecalentamiento de la pastilla, quemándola y cristalizándola. Esto provoca una disminución de la eficacia de frenado así como chirridos a la hora de frenar, siendo necesario revisar o sustituir la pinza de freno y cambiar las pastillas.

- **Desgaste irregular entre las pastillas de los dos frenos del mismo eje.**

Las pastillas de frenos de una rueda presentan un desgaste distinto a las pastillas del otro freno del mismo eje. Esto puede producirse por un agarrotamiento de la pinza de freno, evitando que el émbolo retorne correctamente o por una obstrucción en las tuberías hacia una de las pinzas, efectuando un reparto de presión distinto entre las ruedas.

Esta avería puede producir la tendencia a girarse el vehículo hacia un lado en frenadas fuertes, así como una eficacia de frenado reducida, siendo necesario revisar las tuberías del sistema de frenos y las pinzas de freno, sustituyendo las pastillas una vez se corrija la avería.

- **Pastillas con desprendimientos de ferodo.**

El ferodo de las pastillas de freno está dañado, agrietándose y desprendiéndose algunos trozos de ferodo de la pastilla pero no presenta signos de fatiga térmica como una pastilla quemada (visualizar figura 53). Este defecto suele producirse por un asiento incorrecto de la pastilla con el disco, ya sea por un montaje incorrecto o un desperfecto en algún elemento como pinzas o discos que provoca un estrés mecánico en la pastilla.



Figura 53. Pastilla con desprendimiento de ferodo.

Fuente: Kashima University (2019)

Dicha avería supone una deficiencia en el rendimiento del sistema, pudiendo llegar incluso la destrucción de la pastilla con un uso continuo en ese estado. Es necesario revisar tanto las pinzas como los discos de freno en busca de algún desperfecto, así como sustituir las pastillas de freno si el daño en las mismas es considerable.

5.1.13. Comprobación de las pinzas.

Las averías en las pinzas de freno no sólo suponen una reducción de la eficacia de frenado sino que, en muchos casos, provocan el funcionamiento irregular del disco y las pastillas de freno que deriva en la avería de los mismos, siendo necesaria su sustitución con el tiempo. Las comprobaciones principales a realizar sobre las pinzas de freno son las siguientes.

5.1.13.1. Comprobación visual.

La primera comprobación a realizar y la más fácil es la comprobación visual de la pinza. En ella se trata de localizar cualquier desperfecto o grieta que pueda tener el cuerpo de la pinza de freno o alguno de sus elementos y afecte a su funcionamiento, así como pérdidas de líquido de frenos o suciedad que pueda afectar a las pastillas o discos de freno. Se debe prestar atención a la posible presencia de grasas o lubricantes centrifugados por los ejes de transmisión. Ver figura 54.



Figura 54 Vista de una pinza de freno con los émbolos dañados.

Fuente: Kashima University (2019)

Los desperfectos visiblemente detectables más comunes son los émbolos dañados, las juntas de estanqueidad rotas o los guardapolvos de los pasadores (en las pinzas flotantes) en mal estado.

5.1.13.2. Comprobación del funcionamiento.

Los defectos de funcionamiento, cuya causa no resulte visualmente perceptible en reposo, requieren de una prueba de funcionamiento de las pinzas de freno. Mediante el accionamiento del sistema de frenos, es importante verificar el correcto desplazamiento de los émbolos para comprobar que no se mueven con dificultad,

están agarrotados o no retornan correctamente una vez se libera el pedal de freno. Para ello, se deben desmontar las ruedas del vehículo y retraer los émbolos haciendo palanca sobre las pastillas y la pinza. Comprobar el desplazamiento progresivo y lineal de los émbolos al accionar el freno lentamente.

En el caso de las pinzas flotantes, es importante asegurar de igual modo el correcto desplazamiento de la pinza por sus pasadores durante el funcionamiento. El agarrotamiento de la pinza, puede dificultar la transmisión de fuerza de trabajo a la pastilla de freno externa o, cuanto menos, su retroceso provocando el contacto permanente con el disco, desgaste desigual y recalentamiento del conjunto de fricción. La dureza de desplazamiento de las pinzas flotantes altera el equilibrio de fuerzas de frenado, pudiendo influir en la trayectoria del vehículo.

5.2. Analizar e identificar el funcionamiento del sistema de discos de freno de vehículos ligeros en general.

5.2.1. Sistema de frenos de un vehículo liviano.

Los vehículos livianos tienen por lo general equipados con un sistema de frenos hidráulicos con doble circuito en diagonal, del cilindro maestro se derivan cuatro cañerías que se van para cada una de las ruedas del vehículo, las ruedas delanteras vienen equipadas con un sistema de frenos de disco y las ruedas posteriores con un sistema de frenos de tambor. Ver figura 55.

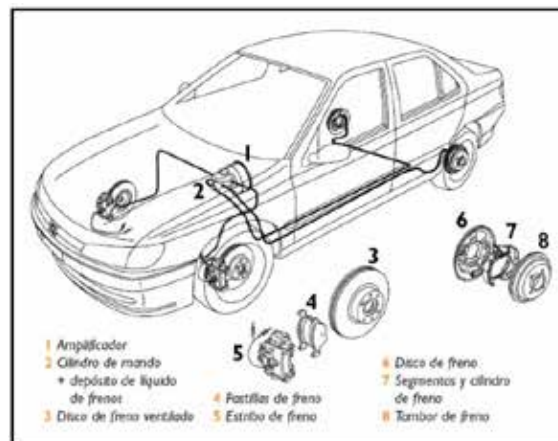


Figura 55 Esquema de un sistema de frenos básico.

Fuente: García R. y Estremera V. (2014).

5.2.2. Circuito principal de frenos.

El circuito principal es accionado por un mando de pedal situado en el interior del habitáculo que transmite la fuerza aplicada por el conductor a los elementos de frenado de las ruedas. La transmisión de esfuerzos se realiza a través de un circuito hidráulico o neumático, aprovechando la energía transmitida por estos fluidos a través de un sistema multiplicador de esfuerzos, para que llegue a las ruedas con la fuerza necesaria para detener el vehículo.

Centrándonos en el circuito principal de frenos podemos distinguir diferentes configuraciones. Las disposiciones legales exigen una instalación de frenos principal con dos circuitos.

Según la normativa "DIN 74000" hay cinco posibilidades de configurar los circuitos de frenos en un vehículo. Los circuitos de freno se distinguen a este fin mediante letras: denominándose las distribuciones en: II, X, HI, LL y HH.

La forma de las letras se asemeja aproximadamente a la disposición de las tuberías de freno entre el cilindro principal y los frenos de rueda. De estas cinco posibilidades de distribuir los circuitos de freno, las que más se utilizan son la II y la X, que requieren un empleo mínimo de tuberías rígidas, tubos flexibles, empalmes separables y juntas estáticas o dinámicas. Por eso el riesgo de un fallo a causa de fugas es tan bajo en cada uno de sus dos circuitos de freno como en un sistema de freno de un circuito. En caso de fallar un circuito de freno a consecuencia de sobrecarga térmica de un freno de rueda, son particularmente críticas las distribuciones HI, LL y HH, puesto que un fallo de ambos circuitos de freno en una rueda puede causar el fallo total del freno.

Para cumplir las disposiciones legales relativas al efecto del freno auxiliar, los vehículos con carga predominantemente sobre la parte frontal se equipan con la distribución X. La distribución II es apropiada especialmente para turismos con carga sobre la parte trasera.

5.2.2.1. Distribución "II".

Distribución eje delantero/eje trasero, un circuito de freno (1) actúa en el eje

delantero y el otro circuito (2) actúa en el eje trasero. Ver figura 56.

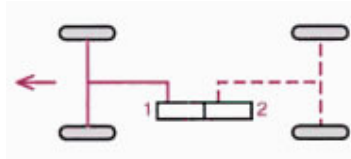


Figura 56. Distribución en "II".
Fuente: García R. y Estremera V. (2014).

5.2.2.2. Distribución "X".

Distribución diagonal: cada circuito de freno actúa en una rueda delantera y en la rueda trasera diagonalmente opuesta. Ver figura 57.

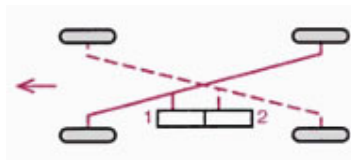


Figura 57. Distribución "X".
Fuente: García R. y Estremera V. (2014).

5.2.2.3. Distribución "HI".

Distribución ejes delantero y trasero/eje delantero: un circuito de freno actúa en los ejes delanteros y trasero, el otro sólo en el eje delantero. Ver figura 58.

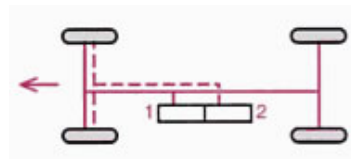


Figura 58. Distribución "HI".
Fuente: García R. y Estremera V. (2014).

5.2.2.4. Distribución "LL".

Distribución eje delantero y rueda trasera/eje delantero y rueda trasera. Cada circuito de freno actúa en el eje delantero y en una rueda trasera. Ver figura 59.

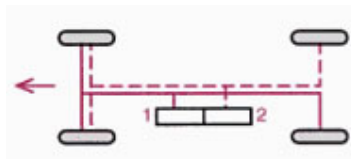


Figura 59. Distribución "LL".
Fuente: García R. y Estremera V. (2014).

5.2.2.5. Distribución "HH".

Distribución ejes delantero y trasero/ejes delantero y trasero. Cada circuito de freno actúa en el eje delantero y en el eje trasero. Ver figura 60.

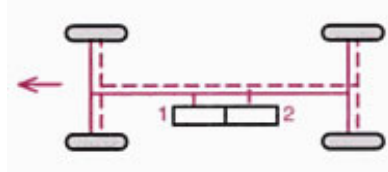


Figura 60. Distribución "HH".

Fuente: García R. y Estremera V. (2014).

5.2.3. Funcionamiento de los frenos hidráulicos.

Cuando el pedal del freno es accionado, la presión del pedal de freno mueve el pistón dentro del cilindro maestro, forzando el fluido del freno desde el cilindro maestro por medio del tubo y la manguera flexible del cilindro de las llantas.

El cilindro de las llantas contiene dos pistones colocados de forma opuesta y desconectados, cada uno de ellos sostiene la zapata de frenado ajustada dentro del tambor. Cada uno de los pistones presiona la zapata contra la pared del tambor provocando el frenado de la rotación de la llanta.

5.2.4. Servofreno.

El servofreno es el elemento que ayuda al conductor en la acción de frenado. Su función es incrementar la fuerza que ejerce el conductor sobre el pedal de freno, mejorando considerablemente la frenada.

Funciona por medio del vacío generado en el colector de admisión del propio motor del vehículo. En los motores gasolina este vacío es suficiente para el funcionamiento, pero en los motores diesel, la depresión que se origina en el colector de admisión no es suficiente y se necesita de una bomba de vacío auxiliar.

Al pisar el pedal del freno, la fuerza generada se transmite desde el pistón del cilindro maestro, a la varilla de mando de la válvula de aire del servofreno, al disco de reacción y al vástago del pistón. La diferencia de presiones entre la cámaras, genera una fuerza que actúa sobre el pistón al mismo tiempo que la que se al pedal, incrementando la fuerza de frenado

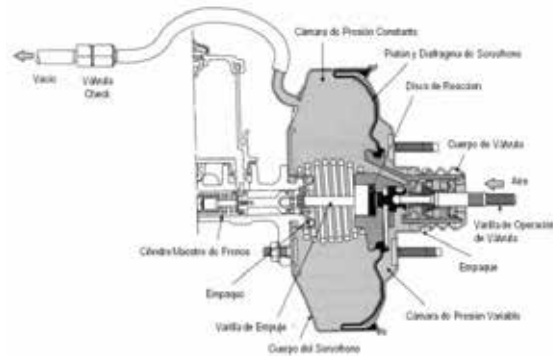


Figura 61. Elementos del servofreno.

Fuente: Venegas W. (2012).

El cuerpo de válvula cumple con la doble función de válvula de vacío y válvula de aire, separando las cámaras junto con el asiento del pistón hacen la función de válvulas de vacío y aire respectivamente (visualizar figura 61). Cuando se presiona el pedal de freno, el vástago de mando empuja a la válvula de aire hacia la izquierda hasta la chaveta tope. Del mismo modo, la válvula de control es empujada hacia la izquierda hasta hacer tope con el asiento del pistón, en este momento la válvula de vacío se cierra pero la válvula de aire continua cerrada impidiendo la comunicación entre las cámaras. Todavía no se obtiene ningún aumento de fuerza por parte del servofreno.

Al aumentar la fuerza de frenado sobre el pedal, el vástago de mando continúa presionando hacia la izquierda a la válvula de aire hasta que esta se abre. Al abrirse la válvula de aire permite que el aire exterior ingrese en una de las cámaras, creando así una diferencia de presión entre las dos cámaras.

Cuando esta diferencia de presión vence al muelle de recuperación, se desplaza del pistón del servofreno hacia la izquierda produciendo un gran empuje sobre el pistón del cilindro maestro aumentando considerablemente la fuerza aplicada sobre el pedal.

5.2.5. Cilindro principal o Bomba de freno.

La presión hidráulica es proporcionada por un cilindro principal que consta de una bomba de dos cámaras, una cámara primaria y otra secundaria (ver figura 62). La

cámara primaria envía líquido a los cilindros receptores de las ruedas posteriores izquierda y delantera derecha y la cámara secundaria a las ruedas delanteras izquierda y posterior derecha, cada vez que se acciona el pedal del freno.

Como ya se mencionó, el cilindro principal posee dos cámaras (principal y secundaria) y dos pistones. La presión se genera cuando el líquido es comprimido por acción del pedal de freno y los pistones internos, que se desplazan en el interior del cilindro comprimiendo el líquido. El pistón primario comienza su carrera de compresión, para luego continuar el pistón secundario, y finalmente el líquido es conducido hacia sus respectivas cañerías para luego ser distribuido para cada rueda de cada cilindro.

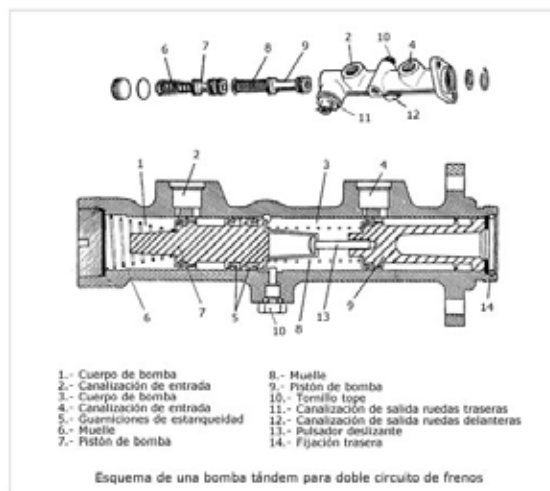


Figura 62. Cilindro principal.

Fuente: Venegas W. (2012).

5.2.6. Conjunto de freno delantero de disco.

Estos conjuntos están compuestos por una mordaza o pinza en cuyo interior tiene un pistón para cada rueda delantera, visualizar figura 21. Esta mordaza va montada sobre un soporte y se desliza sobre sus espárragos de sujeción. La presión hidráulica se genera cuando el conductor pisa el pedal de freno, el pistón actúa sobre la pastilla y este sobre el disco, produciendo fricción y frenando el vehículo.

La presión en el líquido generado en el cilindro hace que la pastilla situada en el lado del pistón presione contra el disco. Esta presión obliga a la pinza a desplazarse

hacia la derecha, presionando la pastilla contra el disco y produciendo así la frenada de la rueda.

5.2.7. Conjunto de freno posterior de tambor.

Este conjunto está compuesto por dos zapatas una a cada lado del conjunto (ver figura 63). Entre las zapatas, tenemos el cilindro de la rueda con dos pistones que accionan a cada zapata, cuando se pisa el pedal de freno, los dos pistones equipados en el cilindro de rueda empujan las zapatas hacia afuera, reteniendo el giro del tambor, cuando mayor sea el desgaste de las zapatas, mayor será la distancia que tendrán que recorrer los pistones. Como resultado, el recorrido del pedal de freno aumentara, siendo necesario ajustar la holgura de las zapatas mediante los tornillos de ajuste.

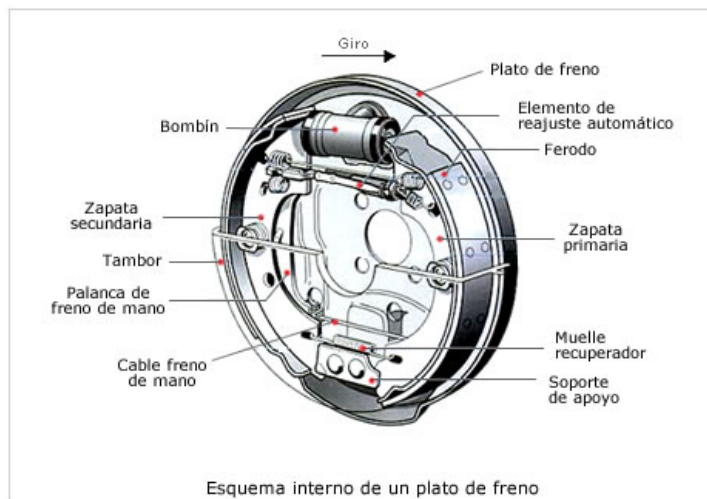


Figura 63. Conjunto de freno posterior de tambor.

Fuente: Venegas W. (2012).

5.2.8. Freno de mano.

Cuando se acciona la palanca del freno de mano, el cable tira la palanca de que dispone la zapata trasera de ambas ruedas, estas palancas van unidas en la parte inferior de las zapatas por medio de un pivote que a su vez permite el giro de estas palancas hacia adelante y hacia atrás.

Al tirar de la palanca hacia adelante, esta se apoya en el dispositivo separador de zapatas produciéndose un desplazamiento hacia atrás de la zapata hasta que este

llega a contactar con el tambor de freno.

Cuando la zapata ha contactado con el tambor, comienza a expandirse, la delantera hasta que igual que la trasera contacte con el tambor. Iniciándose de esta manera el bloqueo de las ruedas traseras con mayor o menor eficiencia; dependiendo de la fuerza aplicada en la palanca de freno.

La funda del cable de accionamiento se fija al plato porta zapatas por medio de un conector especial. El muelle de retención es guiado por el soporte. El cable se conecta a la palanca de accionamiento en el ojal y dispone de un tope, para tirar de ella, tiene por misión mantener conectado el cable de accionamiento.

5.2.9. Líquido del circuito de frenos.

El líquido de frenos es un líquido hidráulico que hace posible la transmisión de la fuerza ejercida sobre el pedal de freno a los cilindros de freno en las ruedas de automóviles, motocicletas, camionetas y algunas bicicletas avanzadas. Visualizar figura 64.

El líquido de frenos se compone normalmente de derivados de poli glicol. En casos extraordinarios (ej. coches antiguos, ejército) se usan líquidos de silicona y aceites minerales.

El punto de ebullición del líquido de frenos ha de ser elevado ya que las aplicaciones de frenos producen mucho calor, además la formación de burbujas puede dañar el freno, y la temperatura de congelación ha de ser también muy baja, para que no se congele con el frío. Los líquidos de frenos convencionales tienen, según el Department of Transportation, DOT (del inglés Departamento de Transportes) temperaturas de ebullición de 205 °C (DOT 3), 230 °C (DOT 4) o 260 °C (DOT 5). Como puede observarse, cuanto mayor es el índice DOT mayor es la temperatura de ebullición.

Debido a que el líquido de frenos es higroscópico, es decir, atrae y absorbe humedad (ej. del aire) se corre el peligro de que pequeñas cantidades de agua puedan llevar consigo una disminución considerable de la temperatura de ebullición (este fenómeno se denomina “desvanecimiento gradual de los frenos”). El hecho de que el

líquido de frenos sea higroscópico tiene por motivo impedir la formación de gotas de agua (se diluyen) que puedan provocar corrosión local y que pudiera helarse a bajas temperaturas. Debido a su propiedad higroscópica se ha de cerrar la tapa del recipiente lo antes posible

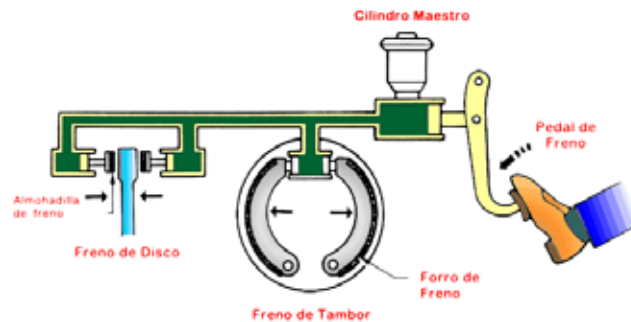


Figura 64. Líquido de freno transmitiendo la fuerza de frenado.

Fuente: Venegas W. (2012).

5.2.9.1. Tipos de líquido de frenos.

Los líquidos de freno no son todos iguales y, de hecho, cada vehículo debe usar el que sugiera el fabricante. Es menester indicar que la utilización del líquido de frenos sucio o caducado causa daños en el sistema del auto. En ese caso, se recomienda extraer el líquido en su totalidad, limpiar todo el sistema y llenarlo nuevamente.

Los tipos de líquido de frenos existentes se reflejan en la figura 65.

GRADO DOT	BASE	PUNTO EBULLICIÓN	CARACTERÍSTICAS
DOT 3	Glicol	205°C	Es uno de los más empleados por su bajo precio, aunque es el que absorbe con más facilidad el agua.
DOT 4	Glicol	230°C	No absorbe el agua tan fácilmente como el anterior por la presencia de ciertos aditivos, pero su precio es más alto.
DOT 5	Silicona	260°C	No absorbe agua.
DOT 5.1	Glicol	270°C	Presenta las mismas ventajas que los que poseen como base la silicona.

Figura 65. Características de líquido de frenos.

Fuente: Loayza W. (2017).

Uno de los aspectos al que no le solemos dar excesiva importancia es al líquido de frenos, tal vez por no tener clara su función dentro del sistema de frenado, así que vamos a ver en primer lugar las partes que componen la mayor parte de ellos:

- **Sistema de mando:** es el elemento que debes accionar para desencadenar la acción frenante. Si hablamos del freno de servicio (pie) normalmente se trata de un pedal o en el caso del freno de estacionamiento (mano) de una palanca.
- **Sistema de transmisión:** que es la encargada de trasladar tu acción en el sistema de mando hasta el elemento frenante. En concreto si hablamos de un sistema mecánico sería normalmente de un cable o palanca. Si fuese un sistema neumático se trataría del propio aire o en el caso de un sistema hidráulico, que es lo más habitual en los turismos, de un líquido.
- **El elemento frenante:** son los elementos que ejercen la acción de frenado propiamente. En el caso de los frenos de disco se trata de unas pastillas y en los frenos de tambor, unas zapatas.

Nos centraremos en el líquido de frenos que, como ya hemos dicho, en muchas ocasiones no recibe la atención que se merece cuando la realidad es que se trata de un elemento que debe:

- Resistir altas temperaturas sin llegar a la ebullición.
- No ser corrosivo con los metales y gomas con los que entra en contacto.
- No debe entrar en ebullición, porque eso provocaría la formación de vapor dentro del circuito, que al no ser incompresible como el líquido haría que el sistema de freno dejara de funcionar correctamente haciéndose peligroso su uso.

Como puedes ver sus funciones son muy exigentes, lo que obliga a que exista una normativa que establezca las condiciones mínimas que debe poseer el líquido. Existen diferentes normativas que especifican estas propiedades, pero las más habitual es la DOT. Esta norma define las diferentes propiedades mínimas de los líquidos como por ejemplo las siguientes:

- Baja compresibilidad: para poder transferir la presión del cilindro maestro hasta

los frenos de las ruedas de una manera efectiva.

- Alto punto de ebullición: “seco”, para poder resistir las condiciones de trabajo más extremas. Un alto punto de ebullición “húmedo” cuando el agua entra para controlar la bajada del punto de ebullición “seco”.
- Capacidad para absorber agua, hasta ciertos límites, sin perder sus prestaciones (anticorrosión, duración, etc.).
- Excelente capacidad anticorrosión para proteger todos los metales.
- Perfecta compatibilidad con los cauchos y elastómeros del sistema.
- Buenas propiedades lubricantes con las piezas móviles del sistema.
- Viscosidad adecuada para garantizar el buen funcionamiento del sistema de frenos.

Básicamente existen dos tipos de líquidos, los que tienen base glicol, y los que tienen base silicona. La silicona no es miscible (no puede mezclarse) con el glicol por lo que puedes utilizar indistintamente una clase u otra de líquido pero bajo ningún concepto puedes mezclarlos. Para que te hagas una idea, esto sería como pretender combinar aceite con agua.

Los que tienen como base el glicol son afines al agua (higroscópicos). Esto supone que al absorber agua:

- Se produce una mayor corrosión del circuito.
- Se reduce el punto de ebullición y como consecuencia el rendimiento de los frenos a temperaturas elevadas. En estas circunstancias se podría llegar a evaporar el líquido de frenos y en cualquier caso disminuye drásticamente su capacidad de frenado.

5.2.10. Sistemas de Frenos Antibloqueo (A.B.S.).

Con el objetivo de hacer la frenada más eficiente y segura se ideó y se ha ido perfeccionando el llamado sistema de frenado antibloqueo ("Antilock Bracking System, o ABS).

Básicamente consiste un sistema que evita el bloqueo de las ruedas al frenar, y

por tanto evita que se pierda el control direccional del vehículo. Esto es así porque sólo una rueda que gira, sin bloquearse, puede generar unas fuerzas laterales que pueden cumplir con las funciones de dirección y control del vehículo.

Este sistema de regulación de la frenada comienza con unos sensores ubicados en las ruedas que controlan permanentemente la velocidad de giro de las mismas, por eso que también se les llama captadores RPM de ruedas. A partir de los datos que suministra cada uno de los sensores, la unidad de control electrónica (la ECU) es capaz de calcular mediante un algoritmo matemático una velocidad media, que se toma que corresponde aproximadamente a la velocidad del vehículo. Comparando las distintas velocidades que va adquiriendo una rueda con la media global se puede saber si esta rueda amenaza o no con bloquearse.

Si es así, el sistema ABS se activa reduciendo automáticamente la presión de frenado en la rueda en cuestión hasta alcanzar un valor umbral fijado de antemano y que queda por debajo del límite de bloqueo. Cuando la rueda vuelve a girar libremente se vuelve a aumentar al máximo la presión de frenado. Este proceso (reducir la presión de frenado / aumentar la presión de frenado) se repite hasta que el conductor retira el pie del freno o disminuye la fuerza de activación del mismo.

El sistema antibloqueo ABS constituye un elemento de seguridad adicional en el vehículo. Durante un frenado que presente riesgo de bloqueo de una o varias ruedas, el ABS actúa evitando este riesgo, y consiguiéndose además las siguientes ventajas:

- **Estabilidad en la conducción:** es importante mantener la estabilidad del vehículo durante la frenada en cualquier situación.
- **Control de la conducción:** se debe mantener el control direccional del vehículo en todo momento, incluso en situaciones extremas de frenada en curva, y aunque se pierda adherencia en algunas ruedas.
- **Distancia de frenado:** con el uso del ABS las distancias de frenado en condiciones límites se reducen considerablemente, manteniéndose el control del

vehículo.

Debido a que la respuesta del sistema para que sea efectiva debe ser muy rápida y exacta, el sistema cuenta con un componente electrónico muy potente, que permite además un análisis de la situación en cada instante y una respuesta en consonancia con la nueva situación. Los nuevos sistemas permiten tomar datos hasta quince veces por segundo de la situación de cada rueda y obrar en consecuencia.

Este sistema actúa sobre la fuerza de frenado que se ejerce en los tambores (caso de los camiones) o de los bombines (en caso de vehículos ligeros) de freno. Al momento de sentir una traba o amenaza de bloqueo en las ruedas, proporciona una reducción gradual de la rotación y, adicionalmente, minimiza su deslizamiento de forma tal que la rueda permanezca lo más adherida posible al pavimento, sin deslizarse.

Un sistema de regulación de presión para camión equipado con ABS se configura según el esquema ilustrado en la figura 66.

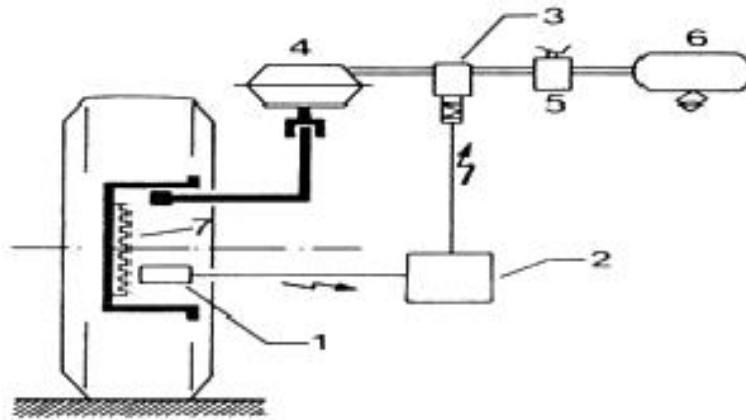


Figura 66. Componentes del ABS.

Fuente: Venegas W. (2012).

1. Sensores de velocidad en las ruedas.
2. Una Unidad Electrónica de Control (ECU).
3. Válvulas moduladoras de presión.
4. Cilindro de diafragma.
5. Válvula de pedal de freno.
6. Tanque de aire comprimido.

7. Ruedas dentadas.

La unidad de control electrónico (ECU) recibe y procesa las señales recibidas por los sensores de velocidad de las ruedas. La ECU, que está constituido por microprocesadores, calcula una velocidad de referencia o media de entre todas las recibidas, que se considera que corresponde con la velocidad del vehículo. Este dato va a ayudar a detectar si una rueda amenaza con bloquearse, dado que el sistema va a ir comparando sucesivamente esta media global o de referencia con las velocidades específicas que va recibiendo de cada rueda, por lo que se puede intuir si alguna de las ruedas, por la tendencia que lleva en su velocidad, es propensa a bloquearse o no, y actuar en consecuencia.

Si efectivamente, una de las ruedas amenaza con bloquearse, la ECU actúa de inmediato reduciendo la presión de frenado de esa rueda hasta alcanzar un valor fijado por debajo del límite de bloqueo, para que cuando la rueda vuelva a girar libremente se vuelva a aumentar la presión de frenado para que continúe el proceso de parada. Este proceso se repite hasta que el conductor deja de accionar el pedal de freno, o disminuye la presión de activación del mismo.

5.2.10.1. Componentes del sistema ABS.

En esta sección se van a exponer los distintos componentes eléctricos y electrónicos que conforman el sistema ABS. Estos componentes, además de dar funcionalidad al sistema, sirven para realizar la diagnosis y comprobación de su correcto funcionamiento.

Ø Sensores de rueda

Los sistemas de sensores ABS, también llamados captadores de rueda, miden la velocidad instantánea en cada rueda, enviando constantemente esta información a la ECU. El conjunto está compuesto por el captador o sensor (ver figura 67) y un generador de impulsos o rueda fónica (dentada) que gira con la rueda. El sensor de rueda se instala en el buje de la rueda, donde queda posicionado frente a la corona dentada que forma parte del propio eje de transmisión, dejando un entrehierro de un milímetro entre ambos.

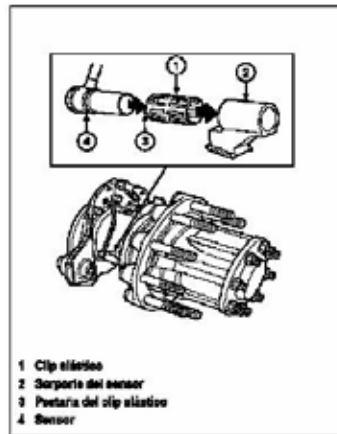


Figura 67. Sensor en la rueda.

Fuente: Venegas W. (2012).

El captador funciona según el principio de la inducción. Se instala en el buje de la propia rueda, donde queda posicionado frente a la corona dentada, que como se ha dicho anteriormente, forma parte del propio eje de giro de la rueda. Para obtener una señal correcta, conviene mantener un entrehierro o separación entre el captador y la rueda fónica. Ver figura 68.

El sensor constantemente envía información de la velocidad de la rueda a la ECU mediante el correspondiente cableado que los une. El sensor se sujeta en su lugar contra la rueda dentada con un clip a presión. El tipo del eje determina la ubicación de montaje del sensor. Así, los sensores del eje de la dirección se instalan sobre el muñón de la propia dirección o sobre un soporte convenientemente atornillado, mientras que los sensores del eje propulsor, o eje trasero, están montados sobre un bloque fijado al alojamiento del eje.

El sensor o captador se rige por el principio de inducción. Está formado por imán permanente y una bobina conectada con la unidad hidráulica. El imán permanente crea un flujo magnético que se ve afectado por el paso de los dientes de la corona frente al imán, de manera que genera una tensión eléctrica en la bobina de tipo alternativa casi sinusoidal, cuya frecuencia es proporcional a la velocidad de giro de la rueda. La amplitud de la tensión en el captador es función de la distancia (entrehierro) entre diente y captador y de la frecuencia.



Figura 68. Colocación del sensor de rueda.
Fuente: Venegas W. (2012).

A continuación se resume algunos aspectos que se debe tener en cuenta cuando se lleve a cabo la instalación del conjunto sensor/rueda dentada:

- Se debe asegurar que el desplazamiento longitudinal de la rueda dentada no supere los 0.2 mm.
- No se debe instalar ruedas dentadas con señales de daños tales como dientes picados ó deformados
- En el momento de la instalación, inicialmente el sensor deberá hacer contacto con la rueda dentada. El centro del sensor debe hacer contacto con la rueda dentada cerca del centro del ancho del diente, como mínimo a 3 mm de la orilla del mismo.
- Por último, generalmente para el sensor se requerirá un lubricante que debe ser a base de aceite mineral y contener molidisulfuro. Debe tener excelentes características anticorrosivas y de adhesión y ser capaz de funcionar continuamente con un margen de temperaturas de -40°C a 150°C.

Ø Unidad de Control Electrónico (ECU)

La ECU se encarga del tratamiento de las señales enviadas por los captadores o sensores de cada rueda. Es el cerebro del sistema ABS (ver figura 69). Recibe información de los sensores y envía señales a las válvulas ABS y a la unidad hidráulica para el caso de sistemas hidráulico de frenos. Hay ECUs para aplicaciones de montaje en la cabina o bien en el bastidor.

El sistema de funcionamiento de la ECU se inicia con las informaciones recibidas por cada sensor, que son tratadas en paralelo mediante unos

microcomputadores. En caso de desigualdad de las informaciones recibidas entre los sensores, la ECU supone que hay peligro de bloqueo en alguna rueda e inicia el proceso de regulación de la frenada, es decir, activa el ABS.

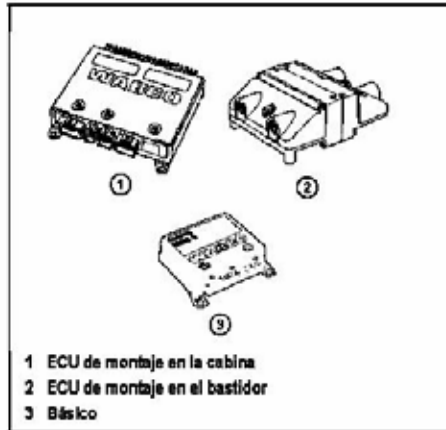


Figura 69. Unidad de Control Electrónico (ECU).

Fuente: Venegas W. (2012).

Ø Hidrogrupo

El hidrogrupo o unidad hidráulica es un conjunto formado por motor-bomba, ocho electroválvulas, cuatro de admisión y cuatro de escape, y un acumulador para el fluido hidráulico de baja presión (ver figura 70). A continuación se exponen las características más importantes de cada uno de ellos:

- Electroválvulas

Están constituidas de un solenoide y de un inducido móvil que desarrolla las funciones de apertura y cierre. La posición de reposo es asegurada por la acción de un muelle incorporado. Todas las entradas y salidas de las electroválvulas van protegidas por unos filtros.

Con el objeto de reducir la presión de los frenos se incorpora una válvula antirretorno a la válvula de admisión. La válvula se abre cuando la presión de la bomba de frenos sea inferior a la presión de estribo, por ejemplo, cuando se deja de frenar estando el ABS funcionando.

El circuito de frenado está provisto de dos electroválvulas de admisión abiertas en reposo y de dos electroválvulas de escape cerradas en reposo. Será la acción

separada o simultánea de las electroválvulas la que permitirá modular la presión en los circuitos de frenado.

- Equipo motor-bomba

Está constituido por un motor eléctrico y de una bomba hidráulica de doble circuito, controlado por la ECU. La función de este equipo es rechazar el líquido de freno durante la fase de regulación desde los bombines a la bomba de frenos. Cuando actúa el conjunto hidráulico el conductor lo nota dado que se produce un ligero movimiento del pedal de freno.

Básicamente el esquema de funcionamiento de esta unidad hidráulica se basa en transformar el movimiento de giro del motor eléctrico en un movimiento alternativo de los dos pistones que conforman la bomba hidráulica, según el principio de la biela-manivela.

- Acumulador de baja presión

Durante la actuación del sistema de ABS recibe el líquido de freno que pasa por la electroválvula de escape. El nivel de presión necesario para el llenado del acumulador de baja presión debe ser lo suficientemente bajo para no interferir en la caída de presión necesaria en la fase de regulación, pero lo suficientemente alta como para vencer el tarado de la válvula de entrada de la bomba.

El caudal medio evacuado por la bomba debe ser inferior al volumen máximo suministrado en situación de baja presión.

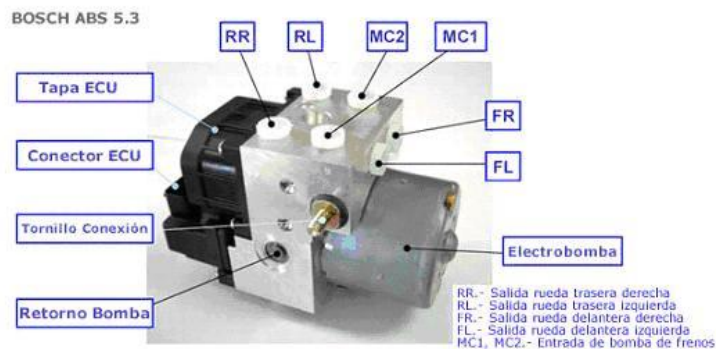


Figura 70. Hidrogrobo.
Fuente: Venegas W. (2012).

Ø Válvulas moduladoras ABS

En los vehículos industriales con sistema de frenos neumáticos, las válvulas moduladoras controlan la presión de aire a cada freno afectado durante la función de un ABS (ver figura 71). La válvula moduladora generalmente está instalada sobre un riel del bastidor o un miembro transversal próximo a la cámara del freno.

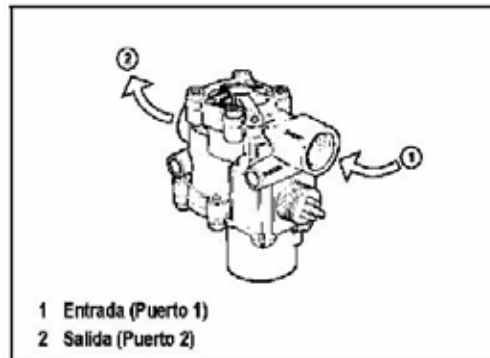


Figura 71. Válvula moduladora ABS.

Fuente: Venegas W. (2012).

5.2.11. Fuerzas y momentos que actúan en el proceso de frenado.

A continuación estudiaremos los diferentes esfuerzos que intervienen durante el proceso de frenado. A priori, algunos nos podrían parecer irrelevantes, pero dependiendo del tipo de conducción que realicemos pueden llegar a ser de suma importancia.

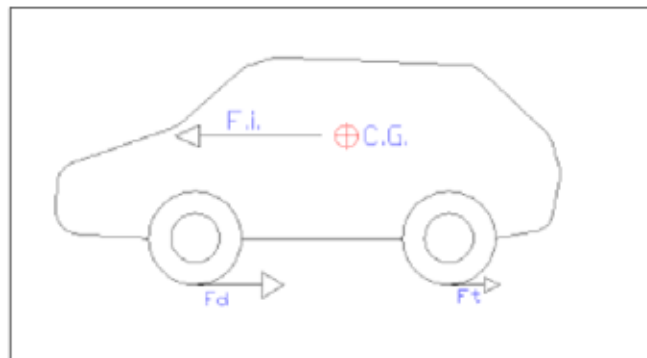


Figura 72. Fuerzas principales en el proceso de frenado.

Fuente: Lillo S. (2006).

Observando la figura 72, la inercia del vehículo al frenar genera una fuerza (F_i) que actúa sobre el centro de gravedad del vehículo y que al estar este punto situado,

normalmente, a mayor altura que el eje de las ruedas, genera un par de cabeceo en el vehículo que modifica el reparto de cargas sobre los ejes. Aunque dicho reparto de cargas dinámicas durante la frenada depende de otros factores tales como el reparto de cargas estáticas, alturas del centro de gravedad y otros podemos aproximar que en un vehículo estándar dicho reparto de masas en una situación dinámica es, aproximadamente, del 80% sobre el eje delantero y del 20% en el trasero.

Esta situación supone que tanto el dimensionamiento de los frenos delanteros y traseros, así como las características del material de fricción de las pastillas, han de tener distintas dimensiones y/o coeficientes para evitar el bloqueo de las ruedas traseras. Ya que de producirse el bloqueo del eje trasero traerá consecuencias nefastas como veremos más adelante.

5.2.12. Fuerza de frenado.

Las principales fuerzas retardadoras del vehículo en el proceso de frenado son las que se desarrollan en la superficie de las ruedas como consecuencia de su contacto con la calzada.

Ahora bien, si el conductor acelera, se genera un incremento de la velocidad o aceleración, y si frena, lo que se produce es un decremento de la velocidad o deceleración. Como sabemos, la aceleración se define como la variación de la velocidad en la unidad de tiempo. En las fases de aceleración y deceleración que se producen en el automóvil, se pone de manifiesto la fuerza de inercia, la cual es definida como la resistencia que opone todo cuerpo en los cambios de movimiento y cuya magnitud depende de la masa del vehículo en función del grado de intensidad de la aceleración o deceleración aplicada.

Cuando el conductor procede a frenar el vehículo, al soltar el pedal del acelerador se suprime la fuerza de impulsión y se inicia la deceleración del vehículo. A partir de este momento, el desplazamiento depende directamente de la fuerza de inercia generada en la deceleración, que mantiene la marcha continuada del automóvil.

Al pisar el pedal de freno, la fuerza de frenado que debe aplicarse para anular la

fuerza de impulsión, en este caso la fuerza de inercia, depende directamente de la oposición de la fuerza de rozamiento que estudiaremos a continuación.

Tenemos que decir que la fuerza de frenado máxima así como la fuerza de tracción máxima, tienen dos límites. En ambos casos es el impuesto por el conjunto neumático-suelo. En lo relativo a las fuerzas de frenado, existe otro límite impuesto que es el que tiene el sistema de freno y en lo referente a las fuerzas de tracción máxima que es el que impone la potencia del motor. Sin embargo, el límite crítico es el impuesto por la adherencia existente entre el neumático y el suelo, ya que cuando se rebasa ese límite, se produce el bloqueo de las ruedas sobre el pavimento.

5.2.13. Resistencia a la rodadura.

La resistencia a la rodadura así como la resistencia aerodinámica del vehículo, que veremos a continuación, intervienen como fuerzas retardadoras en el proceso de frenado.

Aunque realmente su influencia es pequeña frente a la fuerza de frenado, ayudan durante el proceso de deceleración. La resistencia a la rodadura está compuesta, fundamentalmente, por la fricción neumático-suelo y pérdidas mecánicas en el sistema de transmisión. Su valor es generalmente pequeño en comparación con las otras fuerzas en juego. Podemos decir que el valor de la resistencia a la rodadura crece casi proporcionalmente a la velocidad.

5.2.14. Acciones aerodinámicas.

En el movimiento del automóvil también existen fuerzas aerodinámicas, no obstante, como habíamos avanzado en el apartado anterior, éstas solo tienen interés como fuerzas retardadoras a altas velocidades, ya que a velocidades moderadas o bajas pueden despreciarse frente al valor de la fuerza de frenado. Sin embargo, las fuerzas aerodinámicas son importantes a altas velocidades ya que su valor aumenta con el cuadrado de la velocidad que el vehículo lleve. En la figura 73 podemos ver un ejemplo de cómo varían las resistencias en función de la velocidad del vehículo, así como la potencia que necesita desarrollar el mismo para un vehículo de tamaño medio.

Velocidad (Km/h)	Resistencia Aerodinámica (Kg)	Resistencia a la Rodadura (Kg)	Resistencia Total (Kg)	Potencia necesaria (CV)
40	5,3	10,0	15,3	2,3
80	21,6	14,0	35,6	10,7
120	48,6	19,0	67,6	30,6
160	86,4	26,0	112,4	67,9
200	135,0	32,0	167,0	126,2

Figura 73. Resistencia aerodinámica y de rodadura frente a velocidad del vehículo.

Fuente: García R. y Estremera V. (2014).

5.2.15. Resistencia del motor y transmisión.

La resistencia que ofrece el motor en muchos casos es un factor importante en el proceso de frenado. La potencia, como el par resistente, que ofrece el motor en procesos de frenado en los que permanece conectado a las ruedas a través de la transmisión, es importante cuando gira a un gran número de revoluciones y disminuye con la velocidad, hasta hacerse pequeño el último intervalo de un proceso de frenado.

De hecho, en bajadas prolongadas, la retención efectuada por el motor es de suma importancia para preservar los elementos del sistema de fricción de los frenos del calentamiento y consiguientes desgastes elevados.

5.2.16. Adherencia y condiciones.

Como hemos visto anteriormente, la eficacia de la frenada depende del contacto neumático-asfalto principalmente o, lo que es lo mismo, la adherencia.

El coeficiente de adherencia (f_r) es un valor experimental que define la mayor o menor adhesión de los cuerpos en contacto, neumático y calzada. Este coeficiente depende del desgaste de los neumáticos y del estado de la superficie de desplazamiento.

Por ejemplo, un valor de adherencia alto es el que corresponde a una calzada con superficie rugosa muy adherente y un valor bajo, podríamos decir que es sinónimo de calzada resbaladiza.

En la en la figura 74 adjunta podemos ver valores típicos de adherencia para distintos casos.

CARRETERA		NEUMATICOS	
TIPO	ESTADO	NUEVOS	USADOS
HORMIGON NORMAL	SECO	1.0	1.0
	MOJADO	0.7	0.5
ASFALTO GRUESO	SECO	1.0	1.0
	MOJADO	0.7	0.5
ASFALTO NORMAL	SECO	0.6	0.6
	MOJADO	0.5	0.3

Figura 74. Coeficiente de adherencia según carretera y neumático.

Fuente: García R. y Estremera V. (2014).

Como introducíamos anteriormente, el valor de la adherencia es muy difícil de calcular, pero se puede determinar experimentalmente mediante pruebas de frenado o de aceleración. Sin embargo, se conoce cuáles son los factores que concurren en la determinación del valor de adherencia. Algunos son variables o modificables y otros fijos. A continuación, indicamos los más importantes:

- 1) Factores dependientes del terreno: material del fondo de la carretera, rugosidad e irregularidad de la superficie, existencia de barro, aceite, hojas, humedad, nieve o hielo, y presencia de agua y altura de la misma.
- 2) Factores dependientes del vehículo: carga adherente sobre las ruedas motrices (y eventuales acciones dinámicas del viento sobre la carrocería); peso del vehículo, tipo de suspensiones y de amortiguadores; velocidad de marcha y par transmitido a las ruedas.
- 3) Factores dependientes del neumático: naturaleza de la mezcla, amplitud de la superficie de la huella, uniformidad de las presiones en dicha superficie.

Cuando un conductor acciona el pedal del acelerador, tras seleccionar la velocidad correspondiente en el cambio de marchas, se produce la transmisión de giro y fuerza desarrollados por el motor hasta las ruedas motrices del automóvil.

Esta transmisión de fuerza que reciben las ruedas es el que produce el giro y empuje de las mismas, permite el movimiento y desplazamiento del automóvil. Ver figura 75.

Este esfuerzo de empuje generado por las ruedas motrices que permite el desplazamiento del automóvil se denomina fuerza de impulsión o de tracción.

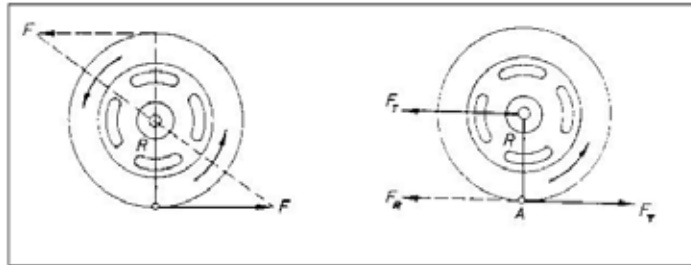


Figura 75. Fuerzas generadas en la rueda.
Fuente: Lillo S. (2006).

Obviamente, las ruedas motrices no deben girar en vacío, ya que si no existe una superficie de contacto no se produce el desplazamiento y el automóvil permanecerá inmóvil, al no existir ningún tipo de elemento adherente que se oponga al giro de las ruedas.

Por lo tanto, la condición necesaria para que un automóvil se pueda desplazar es, que la superficie de contacto entre los neumáticos y el asfalto pueda generar una resistencia opuesta a la fuerza de impulsión, denominada fuerza de rozamiento que veremos a continuación con más detalle.

En base a todo lo anterior, en la operación de frenado se contemplan dos situaciones a tener en cuenta:

- a) Frenado estable: si la fuerza de frenado aplicada a los elementos frenantes de las ruedas es menor que la fuerza de impulsión (fuerza de inercia), originada por su par resistente, la resultante es positiva. En este caso, la velocidad del automóvil se reduce de forma progresiva y con seguridad.
- b) Frenado inestable: si la fuerza de frenado aplicada a los elementos frenantes de las ruedas es mayor que la fuerza de impulsión (fuerza de inercia), la resultante es negativa. En esta situación, el par resistente generado por la fuerza de frenado contrario al giro de las ruedas, produce el bloqueo de las mismas y en consecuencia se provoca el arrastre o deslizamiento de las mismas.

Por lo tanto, la condición de no derrape o deslizamiento de las ruedas en la

frenada de todo automóvil que debe cumplirse es que la deceleración generada en la frenada no debe superar los límites de adherencia de los neumáticos y la calzada.

5.2.17. Deslizamiento.

El deslizamiento o derrape del automóvil en la operación de frenado, se produce en la situación crítica del bloqueo de las ruedas cuando la fuerza de frenado supera la fuerza de inercia.

Por tanto, la condición principal para un correcto frenado es detener el automóvil en el menor tiempo posible, pero sin llegar a bloquear las ruedas por los elementos frenantes del sistema de frenos.

Unos neumáticos muy desgastados, o bien, una calzada con lluvia, barro, nieve o hielo reducen considerablemente la adherencia de contacto, y el bloqueo de las ruedas se produce con una menor fuerza de frenado con el consiguiente deslizamiento y pérdida de direccionalidad del automóvil.

5.2.17.1. Deslizamiento longitudinal.

Debido a la inercia del automóvil, al acelerar y sobre todo en frenadas de elevada intensidad, se produce una transferencia de peso longitudinal como ya hemos visto anteriormente.

Al frenar, debido a la inercia del automóvil en marcha, se produce este cabeceo de la parte trasera a la delantera, es decir, el eje trasero se aligera y el delantero se sobrecarga. Ver figura 76.

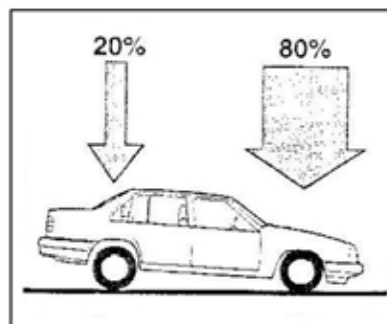


Figura 76. Transferencia de peso del eje trasero al delantero.

Fuente: García R. y Estremera V. (2014).

Al aumentar la carga en el eje delantero, se aumenta la fuerza de adherencia,

motivo por el que la fuerza de frenado se debe incrementar en los frenos de las ruedas delanteras, para que pueda aplicarse hasta el 80% del efecto de frenado cuando se pisa el pedal de freno.

Si la fuerza de frenado fuese por igual en las ruedas delanteras y traseras, ante frenadas de gran intensidad se produciría rápidamente el bloqueo de las ruedas traseras.

- Bloqueo del eje trasero

La siguiente situación se da cuando el eje delantero tiene adherencia pero el trasero se ha llegado a bloquear. Ver figura 77.

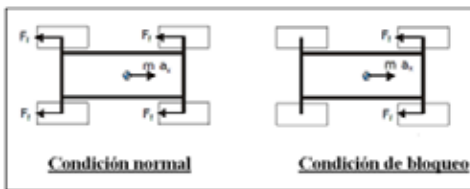


Figura 77. Esfuerzos en condición normal y bloqueo del eje trasero.

Fuente: García R. y Estremera V. (2014).

Sin embargo, cuando un vehículo circula, aunque sea por una recta, está

De esta manera se produce un momento de guiñada que hace que la parte trasera del vehículo tienda a girar en torno al eje perpendicular a la calzada que pasa por el centro de gravedad produciéndose la llamada inestabilidad direccional. Ver figura 78.

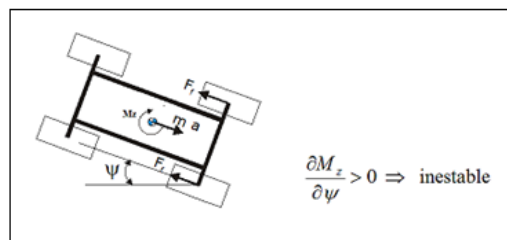


Figura 78. Inestabilidad direccional.

Fuente: García R. y Estremera V. (2014).

La consecuencia de este boqueo es un derrape o deslizamiento de las ruedas traseras que produce el giro del automóvil. La parte trasera avanza a la parte delantera del vehículo, provocando un trompo. Ver figura 79.

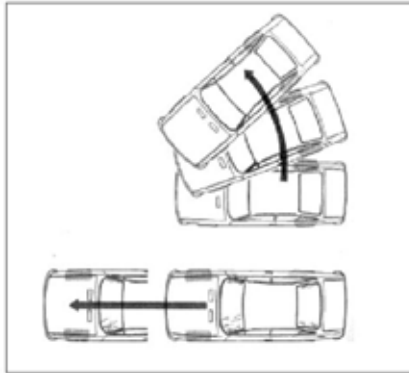


Figura 79. Bloqueo de las ruedas traseras.
Fuente: García R. y Estremera V. (2014).

Sin embargo, si por el contrario, el bloqueo se produjese en las ruedas delanteras, el efecto del derrape o deslizamiento sería diferente.

- Bloqueo del eje delantero

En este caso, el eje trasero sí que tiene adherencia con la calzada pero el eje delantero se ha llegado a bloquear. Visualizar figura 80.

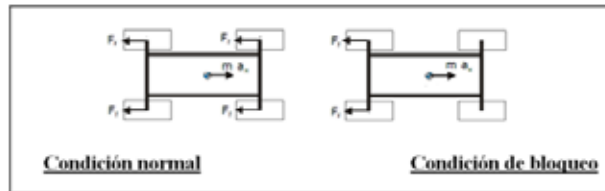


Figura 80. Condición normal y de bloqueo en eje delantero.
Fuente: García R. y Estremera V. (2014).

En este caso, las fuerzas de inercia aplicadas en el centro de gravedad y las de rozamiento o adherencia en las ruedas, proporcionan un momento de guiñada que disminuye con la perturbación lateral. Ver figura 81.

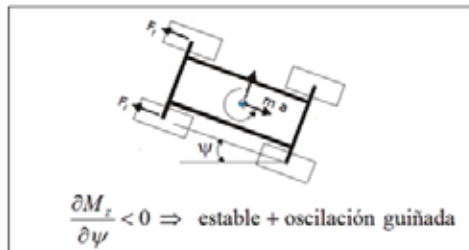


Figura 81. Pérdida de control direccional.
Fuente: García R. y Estremera V. (2014).

El ángulo de guiñada alcanzará un valor máximo, a partir del cual disminuirá, pudiendo cambiar de sentido, y produciendo cierta pérdida de control direccional, menos grave, en términos generales, que la inestabilidad.

5.2.17.2. Deslizamiento transversal.

Cuando un automóvil toma una curva, las ruedas directrices se orientan según la trayectoria curvilínea, pero debido a la acción de las fuerzas perturbadoras que actúan en el automóvil (fuerza centrífuga, viento lateral, fuerza de tracción del propio motor.), se genera un desplazamiento lateral que modifica el centro instantáneo de rotación y la trayectoria direccional teórica, provocando en el automóvil, una tendencia a salirse de la carretera.

La causa que más influye sobre la deriva de un automóvil en las curvas es la denominada Fuerza Centrífuga que se define como la relación entre la masa del vehículo en función del cuadrado de la velocidad de la marcha y el radio de la curva.

5.2.18. Parámetros de diseño.

5.2.18.1. Cálculo de la energía absorbida en los discos de freno, generada por el trabajo de roce.

El proceso de transferencia de calor que ocurre en los elementos del freno, durante el proceso de frenado, tiene la particularidad de ser inestable o transitorio, es decir, los fenómenos térmicos varían con el tiempo y la posición en el elemento en cuestión.

Para determinar la temperatura en el proceso de frenado de un vehículo, fue necesario identificar los distintos factores que están involucrados en este proceso tales como: las características de la calzada (calzada seca, mojada, con hielo, etc.) en donde se desplaza el automóvil; masa del vehículo, asociado a un centro de gravedad; velocidad final que se desea conseguir con la frenada; factor de adherencia entre el neumático y la calzada; temperatura del medio en el cual se desplaza el vehículo. Además fue necesario tener en cuenta las características físicas de los materiales (tales como: la conductividad térmica, calor específico, densidad de los materiales, difusividad térmica) de los elementos que están involucrados en el roce, es decir el

disco de freno y las pastillas de freno. Para el cálculo de la temperatura final del disco, se despreciarán las fuerzas secundarias, como lo son la resistencia aerodinámica, resistencia al balanceo del neumático y la fricción aerodinámica, por ser despreciables en comparación a la fuerza del frenado.

Cálculo de energía a disipar por el disco de freno.

Para llevar a cabo este cálculo, se supondrán una serie de datos con el fin de poder llegar a determinar una temperatura y una presión ejercida sobre el disco de freno.

- Masa del vehículo (m): 1592 Kg, peso máximo autorizado para un Chevrolet Aveo 1.6 115cv
- Velocidad inicial (Vi): 200 km/ m/s.
-

que se desplazan a velocidad intermedia (adimensional).

El primer paso fue determinar la energía a disipar por medio de los frenos, ésta equivale a la energía cinética que poseen los automóviles al encontrarse en movimiento. Utilizando la ecuación 9, es posible determinar la energía a disipar en el frenado del vehículo:

$$E_f = \frac{1.25 \cdot 1592kg \cdot (55.55^2 - 0^2)m^2/s^2}{2}$$

$$E_f = 3070373,488 J = 3070,373 kJ$$

El resultado obtenido en esta ecuación, representa la energía total que se debe disipar por el sistema de freno y corresponde a la energía cinética que lleva el vehículo a una velocidad de 200 Km . La masa del vehículo está distribuida entre los dos ejes, delantero y trasero respectivamente. Normalmente la mayor absorción de energía la efectúa el eje delantero, debido a que este soporta la mayor masa del vehículo, esta distribución de energía está dada por la ecuación 10:

$$E_d = 3070373,488 \cdot 0.75$$

$$E_d = 2302780,116 J = 2302,780 kJ$$

La energía que absorbe el eje delantero (E_d) es un 75% del total de la energía

disponible, a la vez la pastilla absorbe un 10% y el disco de freno un 90 %, respectivamente, de la energía disponible en el eje delantero, la ecuación 11 representa la absorción de calor de los discos de freno del eje delantero.

$$E_{dl} = 2302780,116 J \quad 0.9$$

$$E_{dl} = 2072502,104 J = 2072,502 kJ$$

El eje delantero cuenta con dos discos de freno, es por esta razón que a la energía que se absorbe un disco de freno está definido por la ecuación 12:

$$E_{disco} = \frac{2072502,104 J}{2}$$

$$E_{disco} = 1036251,052 J = 1036,251 kJ$$

El valor “ E_{disco} ” representa la energía que debe ser disipada por un disco de freno, para detener un vehículo de una masa de 1592 kg y que circula a una velocidad de 200 km/ h.

5.2.18.2. Calculo de la fuerza de roce sobre la calzada.

Antes del cálculo de la fuerza de roce se debe conocer el coeficiente de adherencia, se consideró un factor de adherencia de un 80%, en una calzada seca. Con estos dos datos es posible determinar el coeficiente de adherencia (μ_b), en la figura 82 obtenemos el valor para el coeficiente de adherencia. Para nuestros efectos, se seleccionó $\mu_b = 0,93$.

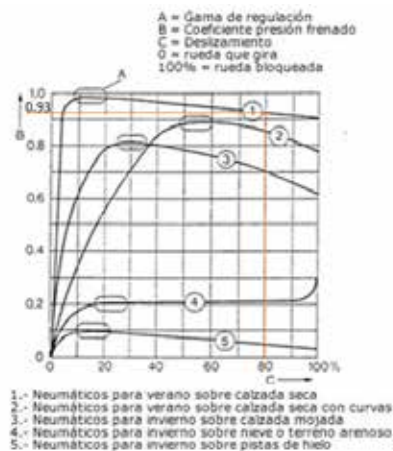


Figura 82. Coeficiente de adherencia o presión de frenado (μ_b).

Fuente: Lillo S. (2006).

Es preciso recordar que al principio de este capítulo se supuso un vehículo de una masa equivalente a 1579 Kg, además el factor (M_b) fue calculado anteriormente, dando como resultado para un 80% de adherencia y en condiciones de una calzada seca, un factor de 0,93, con estos datos se sustituyen en la ecuación 13, dando como resultado:

$$F_r = 0,93 \cdot 1592 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$F_r = 14524,2936 \text{ N}$$

5.2.18.3. Cálculo de la longitud de frenado.

La longitud de frenado es un dato fundamental para este cálculo, ya que de acuerdo a esta longitud es posible determinar la desaceleración y tiempo de frenado empleado. La ecuación 14, resuelve la incógnita del desplazamiento necesario para detener por completo al automóvil.

$$l = \frac{1}{2} \frac{1592 \text{ kg}}{14524,29 \text{ kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} (55,55^2 - 0) \text{ m/s}^2$$

$$l = 169,116 \text{ m}$$

5.2.18.4. Aceleración del disco de freno.

Conocida la distancia o longitud de frenado, se procede al cálculo de la aceleración. En el caso estudia el disco está desacelerando esto conlleva que la velocidad inicial será igual a 55,55 m/s. Según la ecuación 15 se determina dicha aceleración:

$$a = \frac{(0 - 55,55^2) \text{ m}^2/\text{s}^2}{2(169,116\text{m})}$$

$$a = -9,123 \text{ m/s}^2$$

5.2.18.5. Tiempo de detención del vehículo.

La ecuación 16 determina el tiempo que se demora en detener el automóvil.

$$t = \frac{2(169,116 \text{ m} - 0)}{(55,55 \text{ m/s} - 0)}$$

$$t = 6,088 \text{ s}$$

5.2.18.6. Cálculo de calor generado en el proceso de frenado.

Al calcularse la energía que debe disipar cada freno con la ecuación 4. Por razones de cálculo, es necesario transformar esta energía cinética, en “Potencia por unidad de área”, para hacer esto es necesario saber el área de la superficie de freno, además del tiempo que se demora en detenerse el vehículo. Esta energía al dividirla por el área (m^2) de contacto de la pastilla y el tiempo que se demora en detener (segundos), nos entrega la cantidad de potencia a disipar por unidad de área.

La pastilla de freno posee un área que es de difícil cálculo, es por eso que se utilizó el software (Solidworks) que posibilita el cálculo de áreas para mayor exactitud (ver figura 83), es importante resaltar que la pastilla fue diseñada según los planos ofrecidos por Brembo, para un modelo de pastilla P.15.002, dicho planos se observa en el anexo 2.

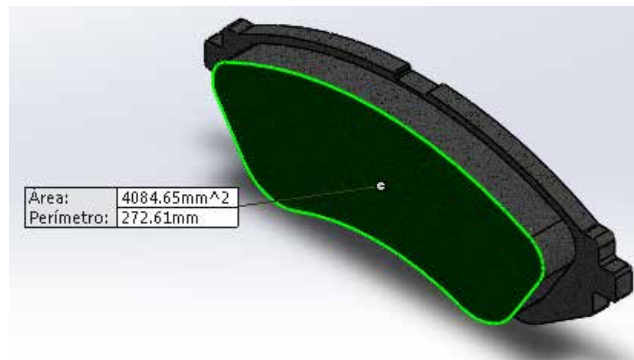


Figura 83. Área de contacto de la pastilla.

Fuente: Herrera F. y Duarte D. (2019).

El área de contacto de la pastilla de freno resulto ser de 4084.65 (mm^2), y el tiempo que se demoró el vehículo en detenerse a una velocidad de 200 Km/h, es de 6.088 segundos.

Por tanto la potencia por unidad de área a disipar se calcula según la ecuación 17:

$$q_{total} = \frac{1034386.45 \text{ joules}}{0.00408m^2 \cdot 6.088s}$$
$$q_{total} = 41713123,77 \frac{W}{m^2}$$

$$q_{total} = 170189,545 \text{ W}$$

5.2.18.7. Cálculo de la difusividad térmica.

La difusividad térmica es una propiedad de los materiales que caracteriza los procesos de transferencia de calor de estado inestable. Durante el frenado, el perfil de la temperatura a través del disco de freno es transitorio, y por consiguiente, el flujo de calor está asociado a la difusividad térmica la define la ecuación 18 y representa la razón del calor conducido a través del material por unidad de área. La difusividad térmica está en función de la conducción térmica; la densidad y el calor específico.

- Conductividad térmica (k) = 45 W m K
- Calor específico (Cp) = 510 J Kg K
- Kg/m^3

$$\alpha = \frac{45 \text{ W}/(\text{m K})}{7200 \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot 510 \text{ J}/(\text{Kg K})}$$

$$\alpha = 1.22 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

5.2.18.8. Análisis térmico del disco de Freno.

Para estos análisis se deben conocer las propiedades físicas y térmicas de la fundición gris, el cual tiene una composición de silicio y manganeso, estas fueron obtenidas del software Solidworks, como se puede apreciar en la figura 84.

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	66178.1	N/mm ²
Coficiente de Poisson	0.27	N/D
Módulo cortante	50000	N/mm ²
Densidad de masa	7200	kg/m ³
Límite de tracción	151.658	N/mm ²
Límite de compresión	572.165	N/mm ²
Límite elástico		N/mm ²
Coficiente de expansión térmica	1.2e-005	/K
Conductividad térmica	45	W/(m·K)
Calor específico	510	J/(kg·K)
Cociente de amortiguamiento del material		N/D

Figura 84. Propiedades de la fundición gris.

Fuente: Herrera F. y Duarte D. (2019).

Para conocer el aumento de temperatura del conjunto de un freno se evalúa por la ecuación 19:

$$T = \frac{E_{disco}}{m \cdot Cp} = \frac{1036251,052 J}{3,9 Kg \times 510 \frac{J}{Kg.K}}$$

Donde m se refiere a la masa del disco, para el caso estudiado se trata de un disco de freno para vehículos tipo Chevrolet Aveo de la marca Brembo, modelo 09.3090.20, con un peso de 3.9 Kg; C_p se denota como el calor específico del material del disco. Ahora bien, conociendo estos valores, se calcula el aumento de temperatura:

$$T = 520,991 K = 247,841 \text{ } ^\circ C$$

Para calcular la temperatura en la superficie del disco se utiliza la siguiente ecuación 20:

$$T = T_1 - T_\infty$$

Donde T_1 se refiere a la temperatura de la superficie del disco de freno y T_∞ es la temperatura ambiente, para nuestro efecto se tomo como $25 \text{ } ^\circ C$. De la ecuación 16 se despeja T_1 :

$$T_1 = 247,841 \text{ } ^\circ C + 25 \text{ } ^\circ C$$

$$T_1 = 272,841 \text{ } ^\circ C$$

Ø Enfriamiento de Newton

Todo objeto sometido a cierta temperatura (T_1) se enfriara si se deja a temperatura ambiente, de acuerdo a la ecuación 21:

$$\frac{T - T_\infty}{T_1 - T_\infty} = e^{\left(-\frac{A U}{m C_p} t\right)}$$

Si se despeja T de la ecuación 17, se obtiene la temperatura para cada determinado momento:

$$T = \left[(T_1 - T_\infty) e^{\left(-\frac{A U}{m C_p} t\right)} \right] + T_\infty$$

Para efectos de cálculo, se debe conocer el área de contacto entre las pastillas y el disco, el anexo 1 especifica las características técnicas del disco en estudio, como las medidas (en milímetros) de los diámetros externas e internas, teniendo en cuenta

estos datos se calcula el área de contacto con la siguiente expresión:

$$A_{contacto} = 2 \pi \left[\left(\frac{D_{ext}}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_{int}}{2} \right)^2 \right] \quad (\text{Ec. 26})$$

Debido a que el disco tiene contacto con dos pastillas, por eso se toma en cuenta ambas caras para el cálculo del área.

$$A_{contacto} = 2 \pi \left[\left(\frac{0,236 \text{ m}}{2} \right)^2 - \left(\frac{0,142 \text{ m}}{2} \right)^2 \right] = 0,0558 \text{ m}^2$$

Al conocer todos los datos de la ecuación 17 y despejado T , se procedió a evaluar la formula con una variedad de tiempos, obteniendo como resultados la cantidad de tiempo que le tomará al disco volver a la temperatura ambiente.

En la tabla 7 se observa la relación directa entre el tiempo y la temperatura al instante, debido a los cálculos se aprecia que el disco retorna a la temperatura ambiente a los 9000 segundos aproximadamente, llega a la temperatura ambiente en su totalidad a los 25000 segundos. En el grafico 1 se puede apreciar la curva característica del enfriamiento de Newton.

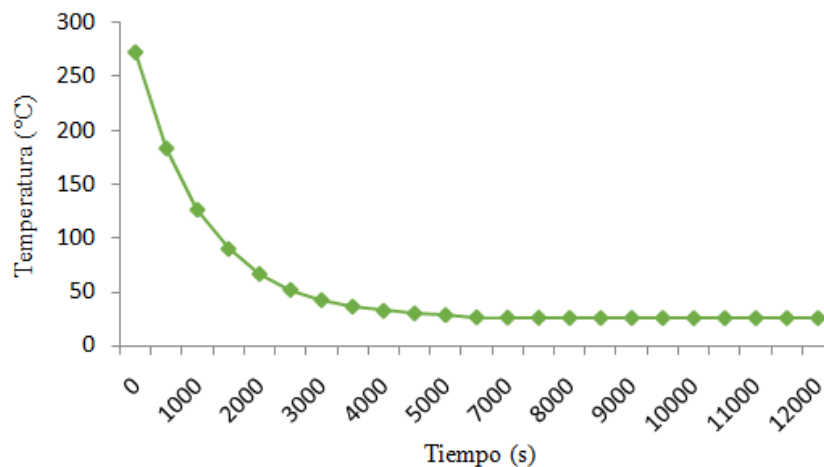


Gráfico 1. Temperatura de Enfriamiento de Newton.

Fuente: Herrera F. y Duarte D. (2019).

Ø Convección frontal en el disco

Convección frontal en el disco. Este tipo de convección afecta la periferia del disco de freno. El flujo de aire sobre un cilindro exhibe patrones complejos, el fluido que se aproxima al cilindro se ramifica y lo rodea, formando una capa límite que lo

envuelve (figura 85). Las partículas de fluido sobre el plano medio chocan contra el cilindro en el punto de estancamiento y la consecuencia de esto es la elevación de presión en ese punto.

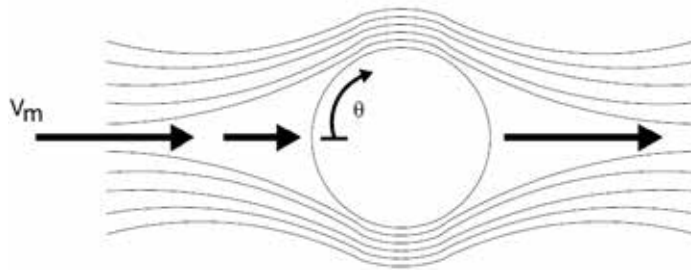


Figura 85. Flujo alrededor de un cilindro.

Fuente: García R., Echavez R. y Flores E. (2018).

Para el desarrollo de este tipo de transferencia de calor se utilizaron los datos del vehículo que está a una velocidad de 200 Km/h, una temperatura ambiente de 25°C y una temperatura superficial de los discos de 272,84 °C, aproximadamente, obtenida en el cálculo de la temperatura superficial al momento del frenado.

- **Convección periférica**

Los cálculos de convección periférica se realizaron con los valores de las propiedades del aire a una temperatura promedio entre el ambiente y la superficie de fricción del disco, en este caso la temperatura superficial, como se muestra en la figura 86.



Figura 86. Convección periférica.

Fuente: García R. y Flores E. (2016).

La temperatura periférica se haya mediante la siguiente expresión:

$$T_f = \frac{T_\infty + T_1}{2} \quad (\text{Ec. 27})$$

$$T_f = \frac{25 \text{ }^\circ\text{C} + 272,84 \text{ }^\circ\text{C}}{2}$$

$$T_f = 148,92 \text{ }^\circ\text{C} = 300,05 \text{ }^\circ\text{F}$$

Teniendo la temperatura periférica del aire, se buscarán las propiedades en el anexo 3.

	Conductividad térmica k	Viscosidad cinemática	Número de Prandtl (Pr)
Sistema Ingles	0,0203 (BTU/ r ft °F)	3,06E-04 (ft ² /s)	0,686
Sistema Internacional	0,035132 (W/m °C)	2,843E-05 (m ² /s)	

Tabla 1. Propiedades del aire a 300,05 °F.

Fuente: Herrera F. y Duarte D. (2019).

Para el cálculo de calor disipado por efecto de la convección en la parte de mayor diámetro del disco se debe conocer el número de Reynolds, número de Nusselt y el coeficiente de convección, además de las propiedades del fluido que entra en contacto con el disco, en este caso aire.

Para calcular el número de Reynolds, se tiene la siguiente ecuación 23, que es la de diámetros externos para discos, para este cálculo se tiene una velocidad del aire de 200 km/h y equivale a 55,55 m/s; el diámetro exterior del disco es 0,236 m. Así que se tiene lo siguiente:

$$Re = \frac{55,55 \text{ m s} \cdot 0,236 \text{ m}}{2,843 \times 10^{-5}}$$

$$Re = 461156,494$$

Una vez conocido el número de Reynolds y tomando en cuenta el Número de Prandtl, se procede a determinar el número de Nusselt mediante la ecuación 24, obteniendo lo siguiente:

$$Nu = 0,027 (461156,494)^{0,805} (0,686)^{1/3}$$

$$Nu = 863,382$$

Con este valor del Nusselt se puede encontrar el coeficiente de convección aplicando la ecuación 22:

$$\frac{k}{c} = \frac{Nu}{D} \quad Nu = \frac{0,035132}{0,236} \cdot 863,382$$

$$\frac{k}{c} = 74,265 \text{ W m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Ahora se debe calcular el área superficial de la periferia del disco, la cual viene dada por la ecuación 28:

$$A_s = \pi D e \quad (\text{Ec. 28})$$

Según la anexo 1 tenemos que el espesor del disco es de 0,020 m, dando como resultado:

$$A_s = \pi (0,236) (0,02)$$

$$A_s = 0,0148 \text{ m}^2$$

Conociendo los valores anteriormente calculados, se puede encontrar el calor disipado por convección en la periferia mediante la ecuación de calor disipado debido a la convección, que viene dada por la siguiente expresión:

$$q = \overline{h}_c A_s T \quad (\text{Ec. 29})$$

$$q_p = (74,265 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}) (0,0148 \text{ m}^2) (247,841 \text{ } ^\circ\text{C})$$

$$q_p = 272,93 \text{ W}$$

• **Convección en la campana**

Para calcular el calor disipado en la campana (ver figura 87) se tienen los mismos datos, solo que varía el diámetro y el espesor, según el anexo 1 el espesor de la campana es 0,021 m y el diámetro es 0,1335 m.



Figura 87. Convección en la campana del disco.

Fuente: García R. y Flores E. (2016).

El número de Reynolds viene dado por la ecuación 23:

$$Re = \frac{55,55 \text{ m s}^{-1} \cdot 0,1335 \text{ m}}{2,843 \times 10^{-5}}$$

$$Re = 260572,959$$

El número de Nusselt según la ecuación 24 es:

$$Nu = 0,027 (260572,959)^{0,805} (0,686)^{1/3}$$

$$Nu = 545,29$$

El coeficiente de convección mediante la ecuación 22 será:

$$\overline{h}_c = \frac{0,035132}{0,1335} 545,29$$

$$\overline{h}_c = 82,992 \text{ W m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}$$

El área superficial según la ecuación 28 es:

$$A_s = \pi (0,1335) (0,021)$$

$$A_s = 0,0088 \text{ m}^2$$

El calor disipado por convección en la periferia de la campana mediante la ecuación 29 es:

$$q_{campana} = (82,992 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}) (0,0088 \text{ m}^2) (247,841 \text{ } ^\circ\text{C})$$

$$q_{campana} = 181,159 \text{ W}$$

Por lo tanto, el calor total disipado en la periferia del disco es:

$$q_{total} = q_p + q_{campana} \quad (\text{Ec. 30})$$

$$q_{total} = 272,93 \text{ W} + 181,159 \text{ W}$$

$$q_{total} = 454,089 \text{ W}$$

• Convección lateral en el disco

No solo en la parte frontal del disco ocurre una transferencia de calor por convección. También en la parte lateral de éste (ver figura 88), por lo tanto, se desarrollará el análisis de la pérdida de calor.

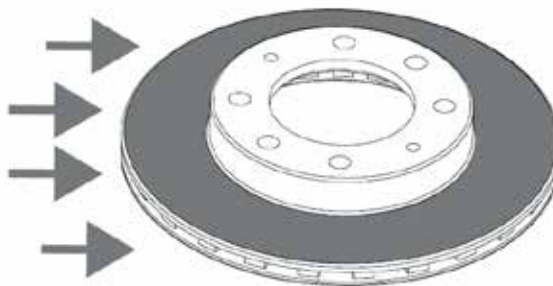


Figura 88. Convección lateral en el disco.

Fuente: García R. y Flores E. (2016).

Se trabajará como un flujo paralelo en placas planas para los cálculos. Si se supone una placa plana sobre la que fluye una corriente fluida, lo primero que sucede

es que la velocidad del fluido disminuye a medida que nos aproximamos hacia la superficie de la misma como consecuencia de las fuerzas de viscosidad. La transmisión de flujo laminar hacia el turbulento depende de la configuración geométrica de la superficie, de su aspereza, de la velocidad de la corriente arriba, de la temperatura superficial y del tipo de fluido, y se caracteriza por el número de Reynolds. El número de Reynolds varía para una placa plana a lo largo del flujo hasta que llegara al final de la placa.

Para el flujo de una capa, suele considerarse que la transmisión de flujo laminar a turbulento ocurre en el número crítico de Reynolds.

Primero, se debe calcular el número de Reynolds para determinar si es un flujo laminar o turbulento según el número de Reynolds crítico, que es $Re_{cr} = 5 \cdot 10^5$. Si el número de Reynolds sobrepasa el valor anterior es turbulento, y si no lo hace, es laminar. Para realizar este cálculo, se supone que el disco es una placa plana cuadrada de longitud 0,236 m, la temperatura del medio ambiente es de 25 °C, la temperatura superficial del disco de 272,82 °C, y con una velocidad del aire de 55,55 m/s.

La ecuación para el número de Reynolds laminar está dada por:

$$Re_L = \frac{V \cdot L}{\nu} \quad (\text{Ec. 31})$$

$$Re_L = \frac{55,55 \text{ m/s} \cdot 0,236 \text{ m}}{2,843 \times 10^{-5}}$$

$$Re_L = 461156,494$$

Esto quiere decir que el flujo es laminar y se usa la ecuación 25 para determinar el número de Nusselt:

$$Nu = 0,664 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3}$$

$$Nu = 0,664 \cdot (461156,494)^{1/2} \cdot (0,686)^{1/3}$$

$$Nu = 385,702$$

Con el valor del número de Nusselt, se calcula el coeficiente de convección para placas planas con el diámetro mayor del disco, que en este caso será la longitud, según la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \overline{h}_c &= \frac{k}{L} Nu & (\text{Ec. 32}) \\ \overline{h}_c &= \frac{0,035132}{0,236} 385,702 \\ \overline{h}_c &= 33,177 \text{ W m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Ya se calculó el área superficial de las dos caras del disco, teniendo en cuenta la ecuación 26, que fue:

$$A_{\text{contacto}} = 0,0558 \text{ m}^2$$

Así que el calor disipado del disco en las partes laterales del disco está dado por la ecuación 29:

$$\begin{aligned} q_{\text{lateral}} &= \left(33,177 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C} \right) (0,0558 \text{ m}^2) (247,841 \text{ } ^\circ\text{C}) \\ q_{\text{lateral}} &= 458,932 \text{ W} \end{aligned}$$

5.2.18.9. Cálculo de la velocidad periférica.

La ecuación 32, establece la relación que hay entre la velocidad lineal del vehículo y la velocidad periférica del neumático, debe existir esta diferencia ya que de esta manera se produce la frenada de los vehículos.

$$X = \frac{(V_I - V_P) 100}{V_P} \quad (\text{Ec. 32})$$

Esta ecuación grafica la porción de adherencia sobre el derrape del neumático. Se supuso una adherencia de un 80%, por tanto se despejando la velocidad periférica (V_P) de la ecuación 32 se obtiene:

$$\begin{aligned} V_P &= \frac{V_1 100}{(100 + X)} & (\text{Ec. 33}) \\ V_P &= \frac{55,55 \text{ m/s} 100}{(100 + 80)} \\ V_P &= 30,861 \text{ m/s} \end{aligned}$$

5.2.18.10. Cálculo de fuerza de presión ejercida sobre el disco de freno y el pedal de freno.

Para que el vehículo se detenga es necesario ejercer una determinada fuerza sobre el disco de freno, esta fuerza se puede determinar a partir de la ecuación 34

despejando el factor “p”. El factor “μ” representa el coeficiente de roce promedio entre el disco y la pastilla de freno, este valor varia con la temperatura de los elementos en contacto, es por esto que se estima un valor promedio que equivale a 0,4.

$$q_{total} = \mu \cdot p \cdot V_p \quad (\text{Ec. 34})$$

Despejando p la ecuación 34, obtenemos:

$$p = \frac{q_{total}}{\mu \cdot V_p} \quad (\text{Ec. 35})$$

$$p = \frac{41713123,77 \text{ W/m}^2}{0,4 \cdot 30,861 \text{ m/s}}$$

$$p = 3379113,1 \text{ Pa} = 3379,113 \text{ kPa}$$

Al multiplicar el área de la pastilla por la presión obtenida, podemos obtener la fuerza resultante del sistema de freno (F_p), como lo define la ecuación 3:

$$F_p = p \cdot A_{pastilla}$$

$$F_p = 3379113,1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot 0,00408 \text{ m}^2$$

$$F_p = 13786,7814 \text{ N} = 13,787 \text{ kN}$$

La fuerza total del sistema es la resultante de la multiplicación de los elementos del sistema de freno, tales como el torque del pedal del freno, el servofreno y el cilindro maestro.

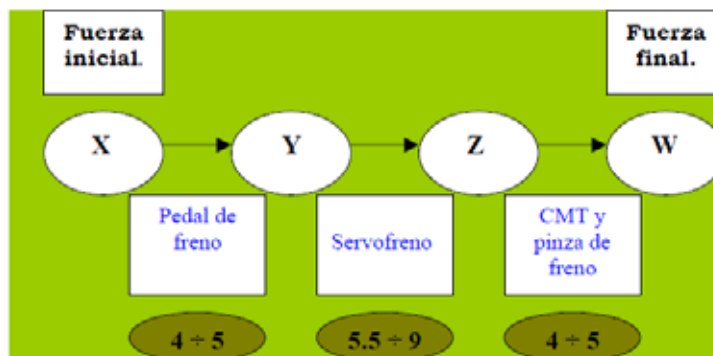


Figura 89. Aumento de la fuerza en cada elemento del sistema de freno.

Fuente: Lillo Sebastián (2006).

Haciendo una estimación del aumento de potencia que genera cada uno de estos

elementos, en base a la figura 89 es posible obtener la fuerza que se ejerce sobre el pedal de freno (F_{pedal}). El torque del pedal aumenta la fuerza ejercida sobre el pedal en 4.5 veces la fuerza inicial aplicada al pedal de freno, el servo freno aumenta 8.5 veces la fuerza que sale del torque del pedal y el cilindro maestro aumenta 5 veces la fuerza del servo freno, por tanto obtenemos la ecuación 36:

$$F_{pedal} = \frac{F_{sistema}}{4.5 \cdot 8.5 \cdot 5 \cdot g} \quad (\text{Ec. 36})$$

$$F_{pedal} = \frac{13786,7814 \text{ N}}{4.5 \cdot 8.5 \cdot 5}$$

$$F_{pedal} = 72,088 \text{ N} = 7,356 \text{ Kg}$$

5.2.18.11. Calculo del Torque total de Frenado.

Este será el momento que se ejerce sobre el eje de transmisión de potencia o en este caso el buje, conexión entre el disco y el eje de transmisión de potencia. Para su cálculo se utilizó la ecuación 8.a, para un ángulo de sector circular específico del diseño de la pastilla de freno.

$$T_{total} = \mu p_a \theta (r_e^2 - r_i^2) \left(\frac{r_e + r_i}{2} \right)$$

$$T_{total} = 0,4 \cdot 3379113,1 \cdot \left(65 \cdot \frac{\pi}{180} \right)^\circ [(0,118)^2 - (0,071)^2] \left(\frac{0,118 + 0,071}{2} \right)$$

$$T_{total} = 1286,67 \text{ N.m}$$

5.2.19. Comportamiento del material del disco de freno.

Durante el proceso de frenado, el calor producido por la fricción entre las pastillas de freno y el disco no es disipado rápidamente, esto depende de la geometría y del material de fabricación. Por consiguiente, en el freno de disco cuando se provoca un frenado muy fuerte, se pueden acumular grandes cantidades de calor en un corto tiempo, produciéndose altos gradientes de temperatura. Bajo estas condiciones, la funcionalidad y la seguridad del sistema de freno pueden estar comprometidas.

Entre el disco y la pastilla, el coeficiente de fricción debe ser relativamente alto, pero lo más importante que sea estable. Se debe mantener un nivel constante con

independencia de la temperatura, la humedad, el tiempo, el grado de desgaste y corrosión, la presencia de polvo y chorros de agua desde la carretera, etc. Además de estos requisitos de seguridad, vienen los requisitos para una larga vida y un alto confort, es decir, ausencia de vibración, ruido y chirrido. La importancia técnica del sistema de fricción y sus desviaciones significativas de la mayoría de situaciones de tribología, son situaciones de contacto que motiva a un estudio sobre la naturaleza del contacto tribológico en frenos de automóviles.

Durante frenadas normales, relativamente suaves la fuerza de presión la almohadilla contra el disco es de aproximadamente 5 kN, lo que resulta en un valor nominal presión en la superficie de la almohadilla justo por encima de 1,2 MPa. En situaciones extremas, la presión podría ser cerca de 10 MPa. Durante frenadas duras, la disipación de potencia en una pastilla de freno fácilmente excede de 30 kW. Estas altas densidades de energía como resultado de altas temperaturas de la superficie y por lo tanto ponen exigencias especiales en los materiales de fricción.

La alta temperatura en la superficie de fricción, junto con el contacto deslizante directo de la guarnición de freno con el rotor son responsables de las reacciones Mecano-Químicas, además de las reacciones triboquímicas que se producen durante el frenado. Debido a la compleja composición de las pastillas de freno, es difícil de describir todas estas reacciones que se producen. Un fenómeno típico que ocurre a menores temperaturas es una degradación de la resina fenólica. La temperatura de inicio de degradación de la resina fenólica es dependiente de su naturaleza, modificación, y la presencia de metales que actúan como catalizadores para su la degradación. Otras reacciones reportadas como triboquímicas, comprenden la oxidación de los componentes metálicos, por ejemplo hierro o cobra cantidad de transferencia de calor que experimenta un sistema de un estado a otro se llama termodinámica y la transferencia de calor se interesa por saber la velocidad con la que se da esta transmisión.

Por lo anterior, se establecen los mecanismos de transferencia de calor, en donde la transferencia de energía que se manifiesta como calor se produce desde un

medio de temperatura más elevada hacia otro con temperatura más baja, y dicha transferencia cesa cuando los dos medios igualan su temperatura. Existen tres maneras de transferir el calor: conducción, convección y radiación, siempre que haya una diferencia de temperatura entre dos cuerpos o medios, a continuación se describe cada uno de ellos.

5.3. Evaluar los distintos avances tecnológicos que se han creado para contrarrestar específicamente el fenómeno del alabeo en los sistemas de frenos de disco.

5.3.1. Importancia de los sistemas de frenos.

Mediante la fricción de las pastillas con el disco, se transforma la energía cinética en calor, lo que permite detener el coche. A más fricción, más calor generado y mayor eficacia de frenada, hasta un límite. Este límite lo pone el propio material de fricción (pastillas y discos), así que cuanto mayor sea la capacidad de generar (y evacuar) calor por éstos, mejor frenada resultante se obtendrá. Si se sobrepasa este límite ocurren dos efectos: el fadding (hierve el líquido de frenos) y la cristalización (se pierde la capacidad de fricción), y como resultado el automóvil se queda sin frenos, el alabeo (vibración) causada por la deformación resultante del disco al ser sometido a una gradiente extrema de calor.

Por tal motivo se ha avanzado en el desarrollo de nuevas tecnologías que hasta hace relativamente pocos años, la mayoría de los fabricantes a la hora de diseñar y desarrollar un sistema de frenado se centraban básicamente en obtener buenas prestaciones de frenado y un buen rendimiento térmico. Esto ha cambiado últimamente, pues otros conceptos como los ruidos o las vibraciones generadas por los frenos han ganado mucho peso y son de estudio imprescindible en dicho proceso de diseño. Es aquí donde se encuentran varios parámetros de especial interés para el fabricante: el alabeo, la variación de espesor de disco y el par residual.

El alabeo, conocido en inglés como Runout, se define como la ausencia de paralelismo entre las pastillas y el disco de freno, y provoca que ambas caras del

disco se alejen y acerquen reiteradamente de la pastilla de freno adyacente a ellas, provocando contactos intermitentes y un desgaste desigual a lo largo del disco.

Variación de Espesor de Disco Más conocida como DTV (del inglés, Disc Thickness Variation), la variación de espesor de disco es un parámetro derivado del alabeo relacionado con el confort. Consiste en el conjunto de espesores presentes en el disco a lo largo de sus 360°.

Este fenómeno puede causar vibraciones y ruido indeseado al ser accionado el sistema de frenos e incluso sin llegar a serlo, debido a las protuberancias y cavidades presentes en el disco que provocan que las pastillas ejerzan mayor o menor presión en los diferentes sectores del mismo.

5.3.2. Par Residual.

Otro parámetro de gran interés para los fabricantes tanto de frenos como de vehículos es el Par Residual (Drag Torque en inglés). Consiste en aquel par que, aun encontrándose sin accionar el sistema de frenos, actúa en dirección opuesta al sentido de giro de la rueda y hay que vencer para iniciar y mantener la rotación de ésta. Guarda relación con el DTV dado que en los sectores del disco que registran protuberancias (engordamientos) el par residual es superior al que existe en los sectores en los que se registren cavidades (adelgazamientos).

Por lo tanto el diseño de discos de frenos ha tenido gran evolución ya que las exigencias han aumentado a continuación algunos tipos de discos que se utilizan hoy en día

5.3.3. Diseños de disco de frenos.

En el mercado se encuentran distintas clases de discos, que varían de acuerdo a la forma que adopta la superficie. No hay regla que indique cuál es el mejor, sencillamente son sistemas distintos. Cada persona debe probar y deducir cuán se adapta más a su forma de conducir.

- Discos Sólidos: Son los tradicionales que se suelen colocar en la fábrica y la superficie es lisa. La única excepción es el caso de los autos deportivos y afines,

que traen discos perforados.

- **Discos Ventilados:** El fabricante de este tipo de disco coloca en el medio de las caras que hacen contacto una especie de curvaturas o álabes que permiten entrar el aire rápidamente y evacuar la temperatura alta que se crea por la fricción de las caras del disco con las pastillas.
- **Discos Perforados:** Estos traen una superficie perforada y pueden evacuar eficientemente el calor. Pero a diferencia de los ventilados, tienden a calentarse más debido a que tienen poca superficie de frenado.
- **Discos Rayados:** La función de estos discos es la de limpiar los restos acumulados entre la pastilla y el disco. Estas partículas pueden disminuir la eficacia del frenado. Aunque tienen esta ventaja, no pueden evacuar bien el calor como los perforados. Otro punto a favor de los discos rayados es que no sufrirán del fenómeno llamado “cracking”, que refiere a la formación de grietas pequeñas alrededor de los hoyos de los discos perforados.
- **Discos Mixtos:** Son los discos de frenos que incorporan diferentes sistemas de los antes mencionados. Combinan rayas con perforaciones y ventilados con el fin de lograr equilibrio entre las cualidades más destacadas de cada tipo.

5.3.3.1. Ventajas e inconvenientes de cada diseño.

Ø Discos de freno sólidos.

Este tipo de discos se componen de una sola pieza y, por lo general, suelen instalarse en las ruedas traseras, aunque hay vehículos que los equipan en las cuatro ruedas. Dado que disipan el calor lentamente, suelen montarse en vehículos pequeños, pues estos no cuentan con demasiado peso y, al frenar de manera violenta, no producirían tanto calor como para romperlos.

Hablamos de los discos de freno más simples que vas a encontrar en el mercado y, como tal, son los más baratos tanto de fabricar (generalmente están hechos de hierro) como de comprar. Si bien es cierto que no hay nada incorrecto en ellos, en determinados vehículos no son capaces de disipar el calor tan eficazmente como lo

hacen los siguientes tipos de discos de freno.

Ø **Discos de freno ventilados.**

Son discos de freno compuestos de dos discos separados mediante canales radiales, lo que permite su ventilación. Dichos discos se ubican a ambos lados de la fricción en la rueda de forma que, al girar el disco de freno, se produce un efecto ventilador que genera una corriente de aire constante a través del disco para evitar que se sobrecalienten y se agrieten.

Suelen montarse únicamente en el eje delantero, ya que es donde se ejerce la mayor fuerza de frenado, pero si el vehículo es muy pesado o muy potente, puede equipar discos ventilados en ambos ejes. Además, este tipo de discos de freno aumentan la vida útil de las pastillas. Sus diseños son múltiples, como puedes ver en la imagen (canales rectos, canales curvos, diseño por pilares).

Ø **Discos de freno perforados.**

Cuando utilizamos de manera intensa los frenos, la pastilla libera gases y partículas, formando una película sobre el disco que impide que la pastilla toque el disco de freno con la misma eficacia, es lo que se conoce como fundido de freno. El diseño de los discos de freno perforados responde a su capacidad para liberar los gases y, al mismo tiempo, reducir el peso de la pieza, pero ojo, porque el rotor se ve comprometido.

Hemos explicado que un disco de freno es mejor si actúa como un gran disipador de calor, por lo que meter cierta carga de agujeros en el mismo se traduce en una menor capacidad para disipar el calor. Además, estos agujeros pueden convertirse en puntos de tensión, lo que puede conducir a un agrietamiento durante una frenada fuerte.

Para solucionarlo, suelen fabricarse en hierro fundido con un alto contenido de carbono, que mejora las características de resistencia termomecánica. En cualquier caso, también hemos de tener en cuenta que las pastillas de freno modernas no sueltan tantos gases y partículas como sus predecesoras, por lo que la necesidad de perforación en los discos de freno se ha reducido.

Teniendo en cuenta que en un uso habitual del vehículo es poco probable encontrarse con los inconvenientes comentados, los discos de freno perforados son muy habituales en los coches de alto rendimiento modernos, donde el diseño juega un papel realmente importante. Adicionalmente, impiden que se forme una película de agua en caso de conducción sobre superficies mojadas.

Ø **Discos de freno rayados.**

El diseño de los discos de frenos ranurados responde esencialmente a las mismas necesidades que el caso anterior, aunque hay matices. Las ranuras de la superficie del disco permiten que los gases escapen, junto con el beneficio adicional de que la acción de “raspado” que estas producen también limpia las pastillas. Las ranuras mejoran el agarre de la pastilla y aumentan la fricción, pero ojo, porque lo hacen a costa del desgaste de estas.

Al igual que los discos de freno perforados, lucen un atractivo superior, contando con múltiples diseños. Uno de los más llamativos y prácticos son los de la imagen, con forma de gancho, pues además de gozar de las mismas propiedades que el resto, permiten reducir las vibraciones.

Si comparamos este diseño con el anterior:

- Los discos perforados ofrecen un agarre inicial de frenado mejor que los discos ranurados.
- Los discos perforados se desempeñan mejor con lluvia, debido al volumen de los agujeros frente a las ranuras.
- Los discos perforados son más propensos a agrietarse que los ranurados.
- La disipación de los gases es igual en ambos.
- Los discos perforados incrementan un poco el rendimiento en general debido a su menor peso.
- Los discos perforados tienen una mayor ventilación por lo que deben enfriarse más rápido, pero como tienen menos material son propensos a calentarse mucho más rápido que los ranurados. Los ranurados, por su efecto, generan más

temperatura.

- Los discos perforados tienen una superficie de fricción del 85% al 93%. Los ranurados, un 96%.

Ø **Discos de freno perforados y rayados.**

Podemos encontrar en el mercado una combinación de ambos diseños, es decir, discos de freno perforados y ranurados. En ellos, la superficie del disco sólo se perfora parcialmente, lo que deja intacta la integridad estructural de los discos y, al mismo tiempo, proporciona una escapatoria para los gases y la suciedad producida por las pastillas.

Estos discos de freno son la opción más liviana de entre las tres últimas y cuentan con una superficie de fricción de entre el 80 por ciento y el 91 por ciento.

Ø **Discos de freno ondulados (Wave).**

A pesar de que últimamente se han puesto de moda en los modelos de Audi más prestacionales, los discos de freno ondulados han existido en el mundo del motociclismo desde hace años (ver figura 90). Sin embargo, tras la adquisición de Ducati por parte de Audi, la firma de los cuatro aros empezó a integrarlos en sus automóviles, pues sobra decir que el atractivo es una de sus grandes bazas.

Entre las ventajas que ofrecen los discos de freno ondulados más conocidos en la marca como Wave, cabe mencionar una reducción notable en el peso (porque hay menos material) y una mayor disipación del calor cuando “torturamos” al equipo de frenado.



Figura 90. Discos de freno ondulados.

Fuente: Prieto A. Álvaro (2018).

Ø **Discos de freno carbocerámicos.**

Un disco de freno caliente significa pastillas calientes y, por consiguiente, una mayor liberación de gases y deshechos. Entonces, ¿por qué no elegir un material diferente al hierro fundido? Una de las mejores opciones a la hora de disipar el calor es abandonar el hierro fundido y optar por la cerámica de carbono para fabricar el disco de freno, pero claro, también es más costoso. Por ejemplo, en el Audi RS 4 Avant que probamos hace poco hablamos de 7.910 euros.

Si lo que buscamos es lograr una mayor capacidad de frenada del vehículo, la clave no es el diseño del disco de freno, sino los compuestos con los que está fabricado y la superficie de fricción que ofrece.

Los discos de cerámica de carbono (más conocidos como carbocerámicos) son mucho más resistentes al calor y también son menos propensos a deformarse durante un uso intensivo, lo que significa que, generalmente, durarán más que el resto. Como beneficio adicional, suelen ser mucho más ligeros que sus contrapartes de hierro, pero reemplazarlos es muy caro y requieren pastillas de freno de un compuesto específico (que tampoco son baratas).

5.3.4. Material del disco de frenos.

El material con el que se suele fabricar el disco de freno es la fundición gris modular en grafito laminar. Esta mezcla garantiza estabilidad durante todo el período de vida del disco. Esta composición contiene hierro en un porcentaje del 92% al 93%. Además de manganesos, silicio y otros materiales que le dan calidad a este elemento fundamental del frenado.

Hay discos de freno fabricados en matriz de carbono. Se usan en los carros de carreras y para los frenos de aviones. Debido al costo tan elevado de estos discos, no son usados en los autos comunes.

También se ha intentado desarrollar discos de frenos en aluminio con base de carburo de silicio. El peso ligero los hace bastante atractivo, pero tienen una disipación pobre del calor haciéndolos inviables por ahora.

5.3.5. Nuevas Tecnologías.

En la industria automovilística actual hay tres tipos sistemas de avance Brake-by-wire, que ayudan al crecimiento de los sistemas de frenos en nuestros días modernos; cada uno de ellos cumplen con el objetivo, a pesar de sus diferencias, siendo los más eficaces aquellos que se construyen en nuestros días.

5.3.5.1. Electrohidráulico.

El primero de ellos es el sistema electrohidráulico, el cual utiliza sensores y actuadores para medir la presión ejercida por el conductor al pedal, usando aceite hidráulico y cilindros receptores. La presión ejercida puede ser mayor que un sistema de frenos hidráulicos tradicional, es decir, 2000 psi frente a 800 psi. Esta tecnología la usaron algunos coches de marcas reconocidas, como el Mercedes-Benz, en el sistema de frenado selectivo Sensotronic SBC.

5.3.5.2. Sistema eléctrico.

El segundo modelo a mencionar, es el sistema eléctrico que sustituye todo lo hidráulico y mecánico. Las unidades de control y electrónicos se han colocado con pinzas de freno en cada rueda, la información es enviada desde la unidad de control central a través de buses de comunicación; otros sensores adicionales en cada pinza incluyen la temperatura, la fuerza de la pinza y la posición del actuador. En la actualidad, y gracias a los avances tecnológicos, la reacción de del sistema es de 90 ms frente a los 300 ms de los frenos hidráulicos tradicionales, y esto funciona para el estudio e investigación de coches semiautónomos y autónomos.

5.3.5.3. Brake-by-Were.

El tercer sistema, es una combinación del primero y el segundo, con componentes electrohidráulico en el eje delantero, y eléctricos en el eje trasero. Este sistema se utiliza en vehículos con frenos delanteros grandes, porque los componentes eléctricos no se pueden fijar en las pinzas del freno delantero. Aunque existen muchos conductores que prefieren frenos tradicionales, estos mantienen en su poder coches clásicos de las décadas pasadas, precisamente para poder sentirse seguros, no obstante, jamás se debe hacer a un lado ningún tipo de avance

tecnológico; recuerde, la evolución tecnológica siempre trae beneficios y ayuda a que nuestro vivir cotidiano sea mucho más placentero.

Para finalizar, se puede indicar que la tecnología "Brake-by-Wire" tiene mucho potencial, porque al parecer se puede garantizar como la más segura en comparación a los sistemas de frenos tradicionales; pero aún hay mucho camino por recorrer y obstáculos que vencer en cuanto a seguridad se refiere, porque las normas de regulación internacionales son muy estrictas, pero a su vez buenas, el tiempo pasa y todo avanza a un futuro mejor. Por todo lo investigado se recalca que, al menos hasta que salga al mercado un sistema más sofisticado, el mejor sistema de freno y futuro seguro tecnológico es el Brake-By-Wire.

5.4. Realizar una simulación del comportamiento del sistema de discos de frenos de un vehículo liviano con el fin de determinar las condiciones que producen el labeo en el automóvil.

Una vez revisado la información bibliográfica y además de analizar el funcionamiento del sistema de freno a disco, se puede proceder a realizar un análisis computacional. Para ejecutar dicho análisis primero se debe realizar el diseño 3D en el entorno de Solidworks, con ayuda de las medidas proporcionadas por el anexo 1, obtenemos las figuras 91, esta muestra las vistas del disco (frontal y posterior).

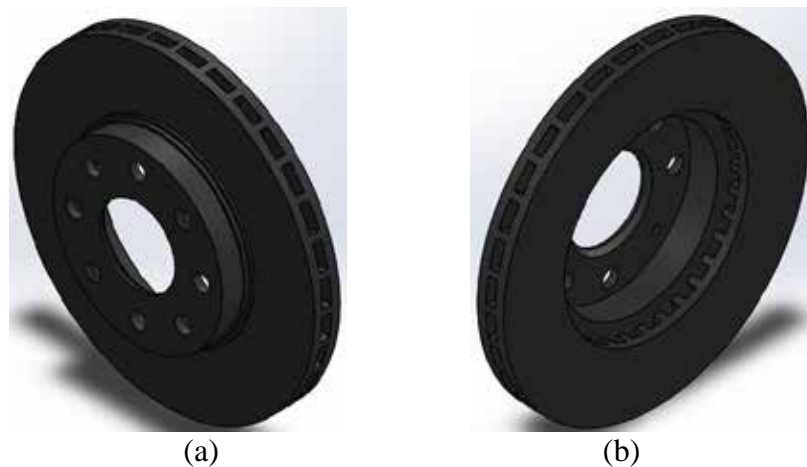


Figura 91. (a) Vista frontal del disco de freno en estudio. (b) Vista posterior del disco de freno en estudio.

Fuente: Herrera F. y Duarte D. (2019).

Al tener el modelo 3D de diseño del disco, se aplica el material para el estudio, en este caso fundición gris (las propiedades físicas para este material están descritas en la figura 84). El programa con estos parámetros automáticamente realiza los cálculos para así obtener las propiedades de masa del modelo (ver figura 92), esto permite comprobar que el diseño computarizado se hizo de manera correcta cuando estas se comparan con las especificaciones del fabricante.

Dichas propiedades será de gran utilidad al ejecutar cualquier estudio que proporcione el programa, para nuestro caso se realizó un análisis térmico y otro de frecuencia, ambos son necesarios para la comprobación de la existencia del alabeo al ocurrir una deformación o desgaste del disco de freno.

```

Propiedades de masa de disco 3.0
Configuración: Predeterminado
Sistema de coordenadas: -- predeterminado --

Densidad = 0.01 gramos por milímetro cúbico

Masa = 3890.24 gramos

Volumen = 540311.43 milímetros cúbicos

Área de superficie = 176569.33 milímetros cuadrados

Centro de masa: ( milímetros )
X = 0.00
Y = 0.00
Z = -5.34

Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: ( gramos * milímetros cuadrados )
Medido desde el centro de masa.
Ix = ( 0.71, 0.71, 0.00)   Px = 16167323.00
Iy = (-0.71, 0.71, 0.00)  Py = 16183226.02
Iz = ( 0.00, 0.00, 1.00)  Pz = 31385545.69

Momentos de inercia: ( gramos * milímetros cuadrados )
Obtenidos en el centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas de resultados.
Lxx = 16175274.51   Lxy = 7951.51   Lxz = 0.00
Lyx = 7951.51      Lyy = 16175274.51   Lyz = 0.00
Lzx = 0.00         Lzy = 0.00      Lzz = 31385545.69

Momentos de inercia: ( gramos * milímetros cuadrados )
Medido desde el sistema de coordenadas de salida.
Ixx = 16286119.61   Ixy = 7951.51   Ixz = 0.00
Iyx = 7951.51      Iyy = 16286119.61   Iyz = 0.00
Izx = 0.00         Izy = 0.00      Izz = 31385545.69

```

Figura 92. Propiedades de masa para el disco de freno.

Fuente: Herrera F. y Duarte D. (2019).

Con ayuda del anexo 2 se diseño un modelo 3D de la pastilla, esto para efectos de cálculos, como se ilustra en la figura 83 se puede apreciar el área total de contacto. Sin embargo, a este modelo no se le practico algún estudio debido a que el programa no posee en su base datos el material específico para la pastilla, solo se tomo de referencia el grafito para su aspecto.



Figura 93. Modelo 3D de la pastilla.

Fuente: Herrera F. y Duarte D. (2019).

En la figura 93 se observa el modelo de la pastilla al biselar los bordes y hacerla parecer salida de fábrica. No se tomó en cuenta el área de contacto cuando esta nueva, ya que para efectos de estudio cuando la pastilla llega a su área de contacto máxima produce más fricción.

5.4.1. Análisis térmico.

Ejecutando un análisis térmico no permitirá observar la distribución de temperaturas en el disco y así identificar que zonas de este tiene mayor impacto calórico. El primer paso para ejecutar este análisis es configurar las propiedades del mismo (ver figura 94), para el caso estudiado se selecciono un régimen transitorio, ya que la acción de frenado sucede en un tiempo específico (calculado

anteriormente), este viene dado por 6,088 segundos, además el incremento de tiempo se fija en 0,1 segundos para que la solución de la simulación fuera más exacta.

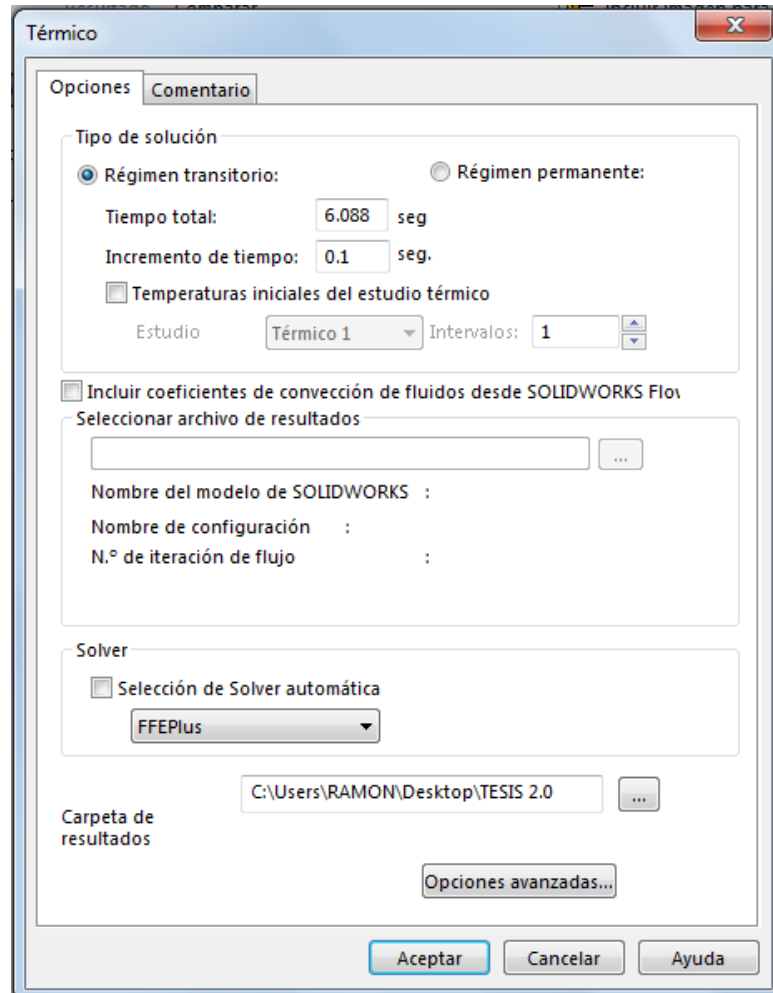


Figura 94. Propiedades del análisis térmico.

Fuente: Herrera F. y Duarte D. (2019).

Ahora bien, Solidworks permite aplicar ciertas características de carácter térmico como lo son conexiones entre componentes y cargas térmicas. Entre las cargas térmicas se encuentran: temperatura, convección, flujo de calor, potencia calórica o energía térmica, y radiación. Para el caso estudiado se le aplico, en primera instancia, una carga de temperatura, la cual representa la temperatura inicial del cuerpo, esta esta temperatura es de 25 °C suponiendo que el disco se encuentra a la temperatura ambiente, observar la figura 95.

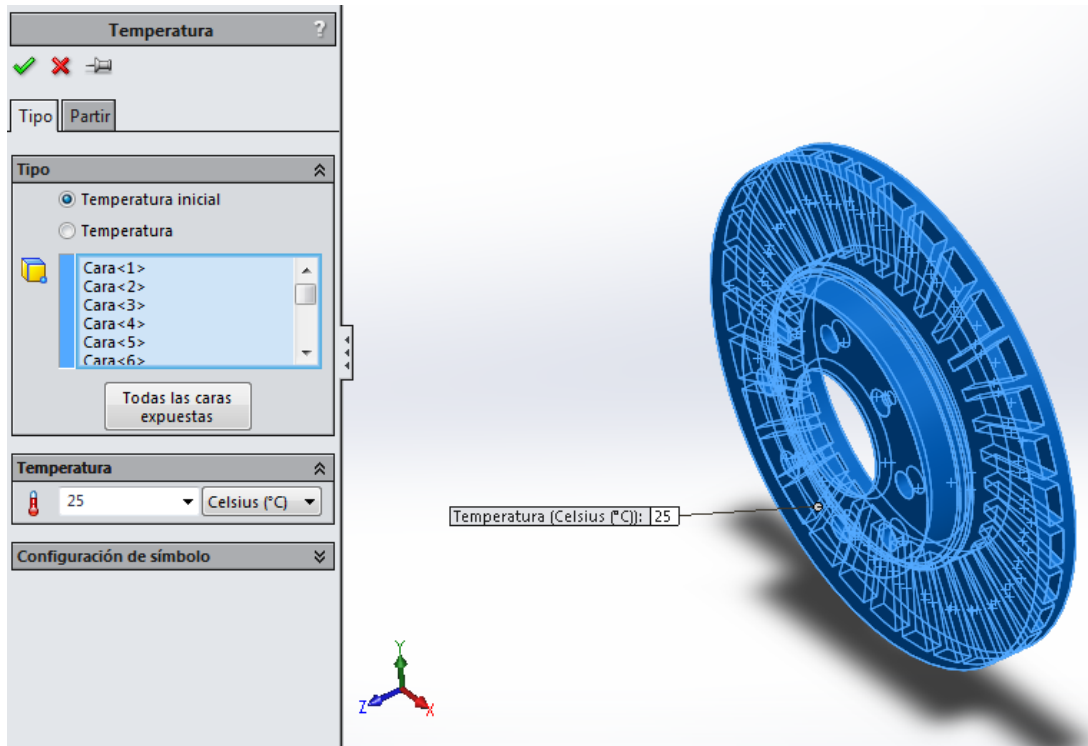


Figura 95. Carga de temperatura.

Fuente: Herrera F. y Duarte D. (2019).

La segunda carga térmica que se le aplicó al modelo en estudio fue de convección, ya que el disco interactuó directamente con el aire para su refrigeración y además transmite energía a través de él. El disco, como antes se calculó, tiene tres tipos de convección distribuidas en el diseño, como lo son la convección periférica, en la campana y lateral. Para los efectos de estudio, se calculó un coeficiente de convección global para todo el disco, para esto se tomó en cuenta el calor total absorbido por el disco, el área por donde penetra el calor debido a la fricción y el diferencial de temperaturas, según la ecuación 29 se puede obtener el coeficiente de convección, al despejarlo:

$$\bar{c} = \frac{q}{A_s T} \quad (\text{Ec. 37})$$

Al evaluar los datos antes mencionados, obtenemos:

$$\bar{c} = \frac{170189,545 \text{ W}}{0,0558 \text{ m}^2 \cdot 247,84 \text{ }^\circ\text{C}} = 12306,2938 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

Una vez obtenido este coeficiente de convección global, se le aplica a todas las cara del modelo, además en la configuración de la carga exige una temperatura ambiente, con ya se había mencionado es de 25 °C, esto equivale a 298,15 K. La figura 96 nos ilustra la configuración de la carga.

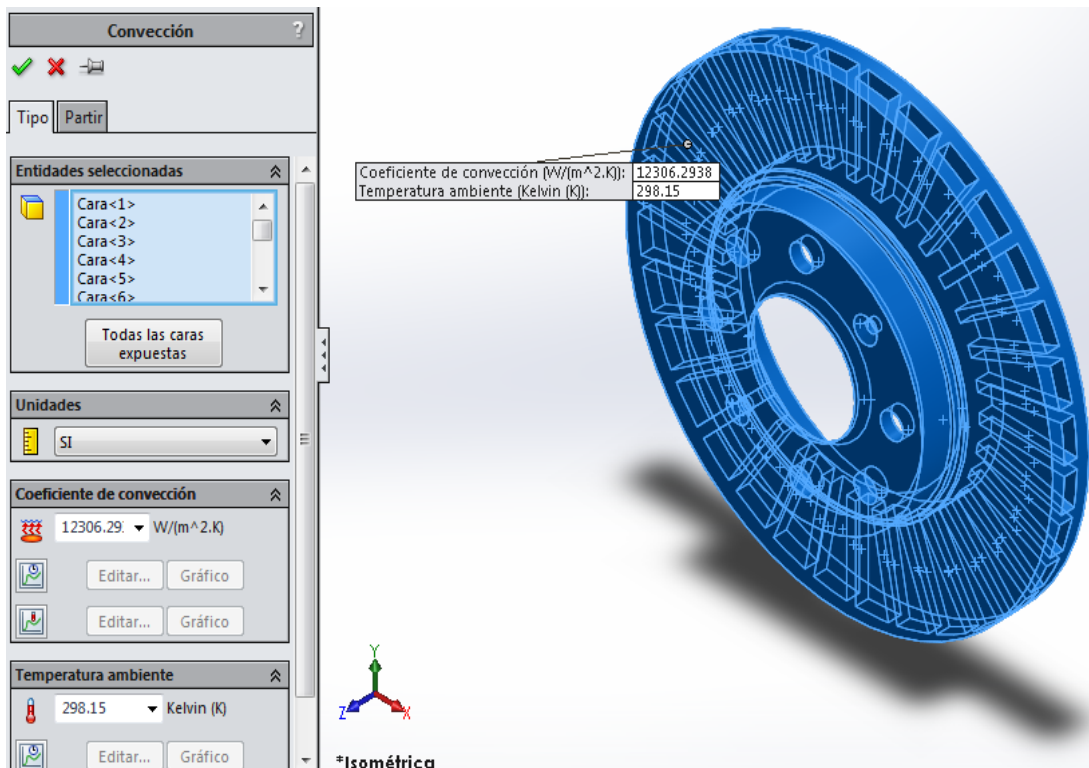


Figura 96. Carga de convección.

Fuente: Herrera F. y Duarte D. (2019).

Por último, se aplicó las la carga de potencia calórica. Esta viene definida por el calor total absorbido por el disco, equivalente a 170189,545 W, esta carga solo fue aplicada en las caras que se encuentran en contacto con las pastillas, ya que por allí en donde se genera la energía térmica debido a la fricción. Además, el programa permite dos opciones de aplicación de la carga, por elemento o total, para el caso estudiado se trabajo con la carga total, ya que se está trabajando con el calor total absorbido por el disco, esto quiere decir que se divide en las dos caras, como se observa en la figura 97.

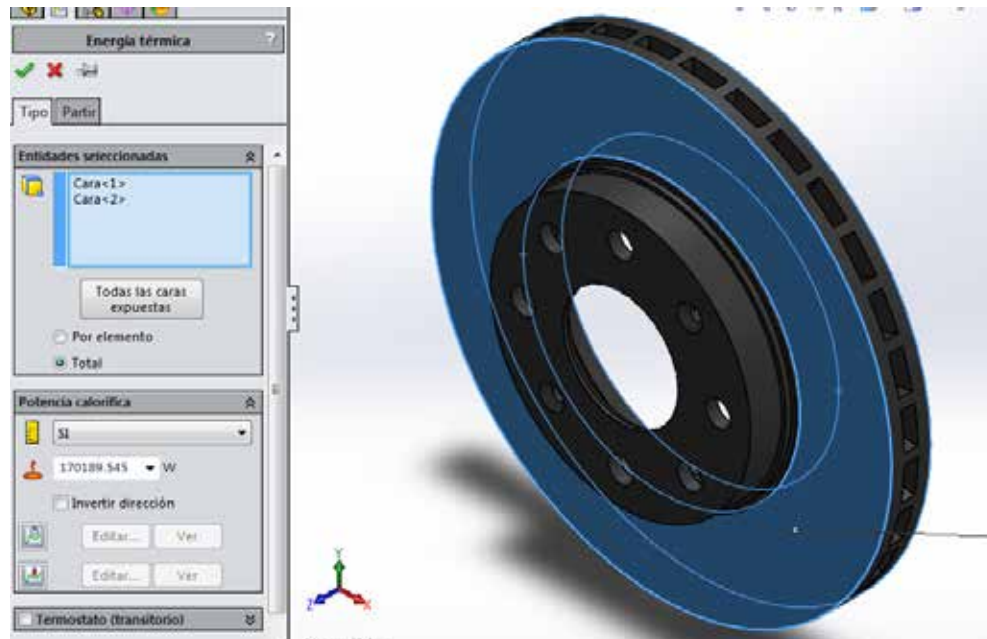


Figura 97. Carga de energía térmica o potencia calórica.
Fuente: Herrera F. y Duarte D. (2019).

Con estas tres cargas es suficiente para la ejecución del análisis térmico y así nos muestre la distribución de temperaturas. Antes de que el programas proceda con la ejecución, este debe crear un mallado al modelo, que se basa en una subdivisión del modelo por nodos, esto permitirá identifica los valores, en este caso, de temperatura en cualquier punto del modelo. La descripción de dicho mallado se ilustra en la tabla 2, y los detalles del mismo en la tabla 3.

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla estándar
Transición automática:	Desactivar
Incluir bucles automáticos de malla:	Desactivar
Puntos jacobianos	4 Puntos
Tamaño de elementos	8.40403 mm
Tolerancia	0.420202 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden

Tabla 2. Descripción del mallado para el análisis térmico.
Fuente: Herrera F. y Duarte D. (2019).

Número total de nodos	20243
Número total de elementos	10380
Cociente máximo de aspecto	20.89
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	89.7
% de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	0.0578
% de elementos distorsionados (Jacobiana)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:06
Nombre de computadora:	RAMON-PC

Tabla 3. Detalles del mallado para el análisis térmico.

Fuente: Herrera F. y Duarte D. (2019).

Observando la figura 98 se detalla el mallado aplicado en el modelo tridimensional. Una vez procesado el mallado, el programa está listo para la ejecución de la simulación.



Figura 98. Apariencia del mallado para el análisis térmico.

Fuente: Herrera F. y Duarte D. (2019).

Los resultados de la simulación se ilustran en la figura 99. Observamos que el valor máximo de temperatura se encuentra en la parte donde entran en contacto la pastilla y el disco, como también que el valor mínimo se encuentra en la campana. Hay que tener en cuenta que los valores de temperatura no dan igual a los antes determinados, pero son bastantes cercanos, esto se debe a que no hay una definición para el coeficiente de convección global para un disco de freno, sino que distintos coeficientes de convección afectan diferentes zonas del mismo. Esto quiere decir, que es una suposición el coeficiente global de convección, para poder demostrar cómo se distribuye la temperatura en el disco.

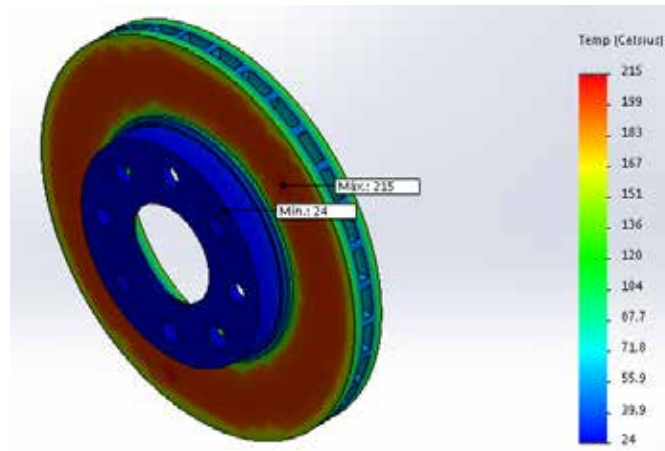


Figura 99. Resultados del análisis térmico.

Fuente: Herrera F. y Duarte D. (2019).

En la figura 100 se aplico un corte transversal, para así observar desde una mejor vista la penetración de calor entre las paredes del disco. Se nota que la máxima temperatura penetra casi hasta la mitad del espesor de la zona de contacto con la pastilla. Además se observa que la distribución de temperatura en las aletas es mucho menor que la zona de contacto, ya que a través de esta el disco se ventila y genera que en las paredes internas de la zona de contacto tenga una temperatura bastante baja para acelerar el proceso de enfriado, siendo esta su principal función.

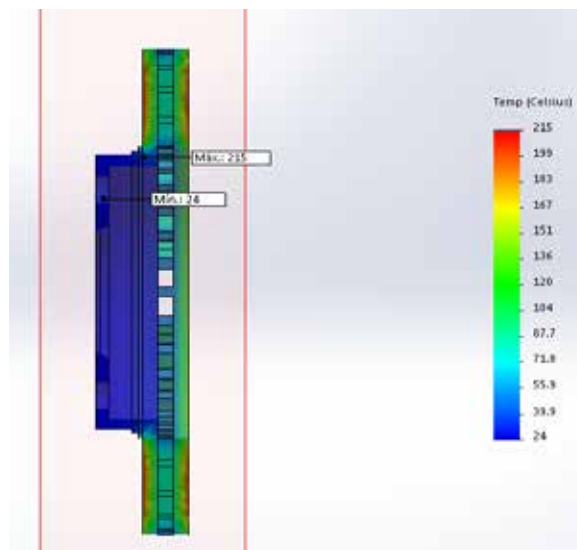


Figura 100. Resultados del análisis térmico (corte transversal).

Fuente: Herrera F. y Duarte D. (2019).

Analizando los resultados de la simulación y comparándolos con los datos teóricos determinados anteriormente, es evidente que para la magnitud del valor de temperatura puede ocurrir una deformación por sobrecarga térmica, debido a las dimensiones del disco, donde los espesores son tan diminutos, es posible que no soporte al interactuar con las cargas de compresión de las pastillas o si este sufre un choque térmico. Si el disco se encuentra a esta temperatura y pasa por un charco de agua, sufrirá un choque térmico, muy parecido a lo que sucede en un templado, debido a que se acelera el proceso de enfriamiento, es posible que el disco modifique su estructura.

Otra posibilidad de que ocurra la deformación del disco es aumentando el tiempo de frenado, así el calor absorbido por el disco sea menor, el tiempo definirá la temperatura máxima a la que puede llegar el disco. Lo antes explicado ocurre mucho cuando los vehículos se encuentran en pendiente muy inclinadas o simplemente cuando baja o sube por caminos montañosos, en estos casos actúa significativamente el sistema antibloqueo de las ruedas (A.B.S), ya que ayuda al proceso de manejo pero perjudica al disco, ya que este sistema hace que la presión en las pastillas sea variable para que las ruedas no se traben y el conductor pueda mantener la manejabilidad del vehículo; esto por lo general, produce quemaduras en el disco (marcas azuladas) como se observa en la figura 41.

5.4.2. Análisis de frecuencia.

Un sólido alterado de su posición de descanso tiende a vibrar a ciertas frecuencias denominadas naturales o resonantes cuando éste es excitado. Para cada frecuencia natural, el sólido adquiere una determinada forma denominada forma modal. El análisis de frecuencia calcula las frecuencias naturales y las formas modales asociadas.

Este análisis es de gran ayuda para evaluar la vibración que se genera en el disco cuando este se deforma. Al igual que el análisis térmico, también se debe configurar las propiedades del estudio, este caso se asignó un número de frecuencias de 5 y otro detalle importante es el tipo de “solver”, procedimiento por el cual el

programa realiza la simulación, se selecciono el “Direct Sparse Solver”, ver figura 101.

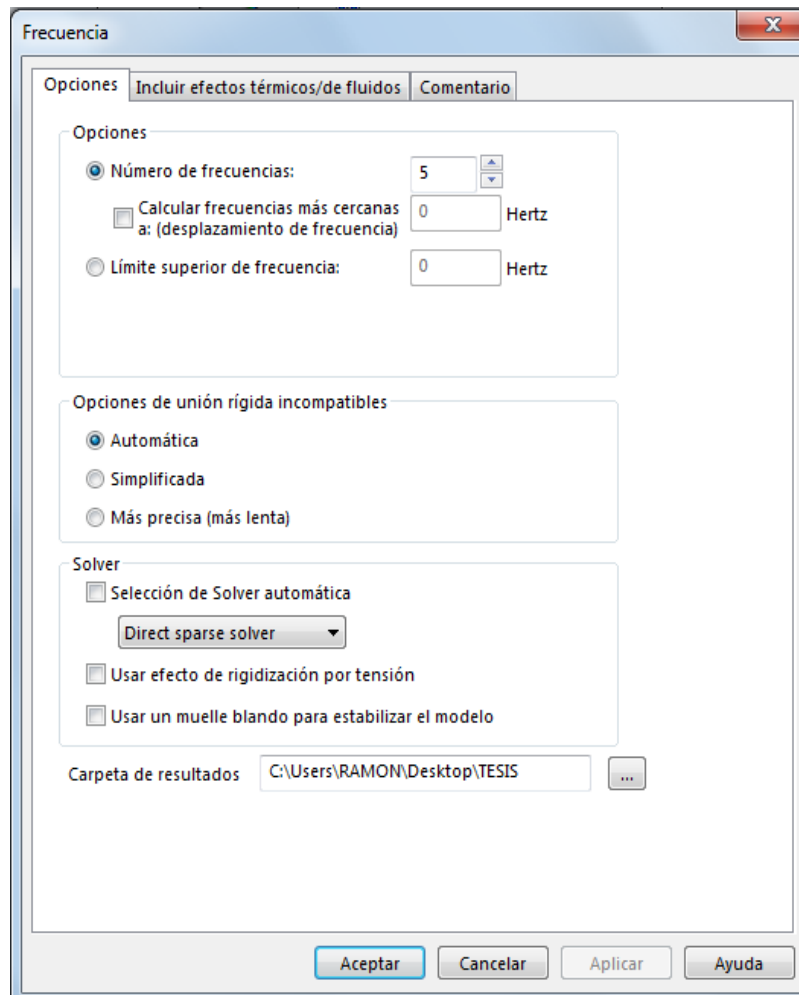


Figura 101. Propiedades del análisis de frecuencia.

Fuente: Herrera F. y Duarte D. (2019).

Para este análisis se tomo el mismo diseño para el disco, proporcionado por Brembo, pero se modifico el área de contacto de las pastillas, originando un desgaste desigual (ver figura 102), se supuso de 2 mm el desgaste por ambas caras. Esto producirá que las pastillas al frenar tambaleen por la acción de compresión, pero además el disco vibrará por acción de la inercia. Este análisis determinará las variaciones de frecuencia con la que el disco vibra al rotar a cierta velocidad sobre el eje de la rueda.

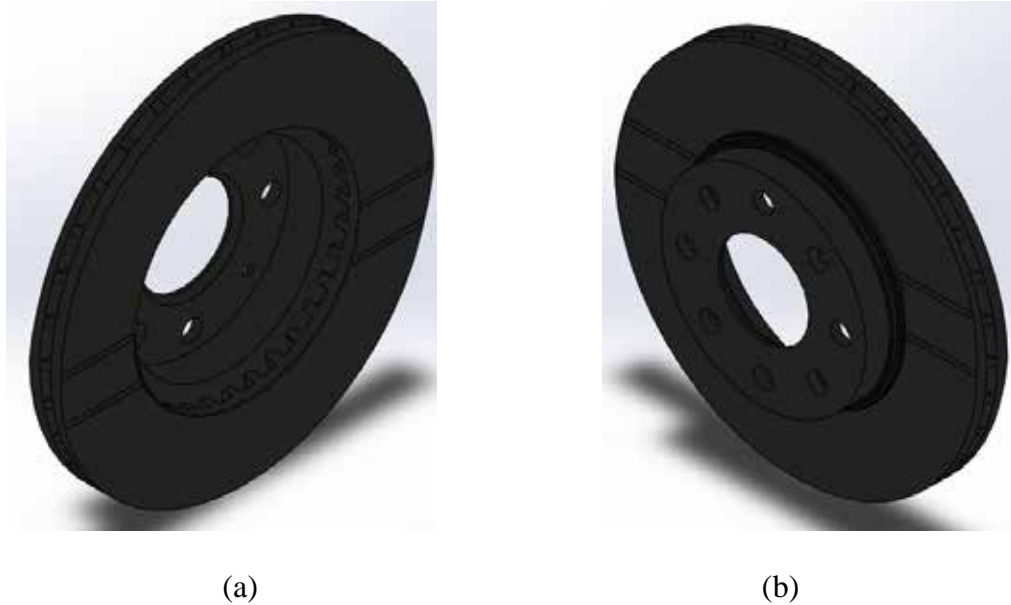


Figura 102. (a) Vista posterior del disco con desgaste desigual. (b) Vista frontal del disco con desgaste desigual.

Fuente: Herrera F. y Duarte D. (2019).

La modalidad de estudio de frecuencia posee una gran variedad de cargas para el estudio, como se observa en la figura 103, para nuestro caso solo utilizaremos una carga centrífuga, ya que solo se desea poner a girar el disco sobre su propio eje central.

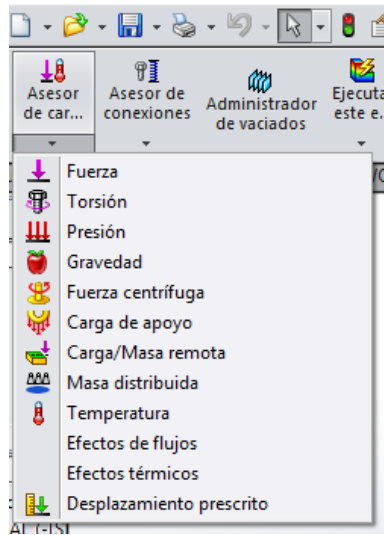


Figura 103. Cargas aplicables en el análisis de frecuencia.

Fuente: Herrera F. y Duarte D. (2019).

En la figura 104 observamos la configuración de de la carga centrifuga, aquí se le asigno un valor para velocidad y aceleración angular, como ya se sabe que el disco tiene una velocidad lineal de 55,55 m/s, este valor se debe llevar a velocidad angular, mediante la siguiente expresión:

$$\omega = \frac{V_L}{r} \quad (\text{Ec. 38})$$

Donde:

ω = Velocidad angular (rad/s).

V_L = Velocidad lineal (m/s).

r = Radio externo del disco (m).

Al sustituir los datos en la ecuación 38, obtenemos:

$$\omega = \frac{55,55 \text{ m/s}}{0,236 \text{ m}} = 235,281 \text{ rad/s}$$

Conociendo la velocidad angular, se procede a calcular la aceleración angular mediante la ecuación 39:

$$\alpha = \frac{\omega_f - \omega_0}{t_f - t_0} \quad (\text{Ec. 39})$$

Donde:

α = Aceleración angular (rad/s²)

ω_f = Velocidad angular final (rad/s).

ω_0 = Velocidad angular inicial (rad/s).

t_f = Tiempo final (s).

t_0 = Tiempo inicial (s).

La acción de frenado sucede en 6,088 segundos y la velocidad angular inicial es 235,281 rad/s, sustituimos estos valores en la ecuación 39 y obtenemos:

$$\alpha = \frac{0 - 235,281 \text{ rad/s}}{6,088 \text{ s} - 0} = -38,663 \text{ rad/s}^2$$

Con los valores de velocidad y aceleración angular ya determinado, se asignan en la configuración de la carga, como se muestra en la figura 106.

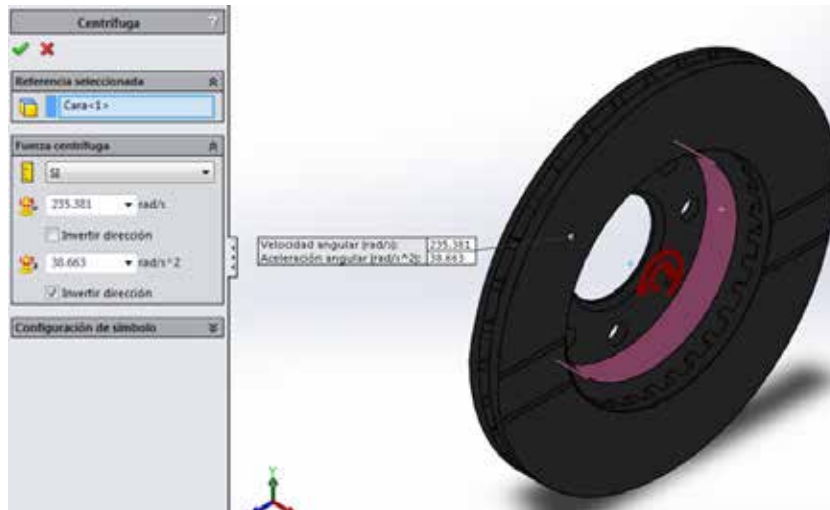


Figura 104. Cargas centrífuga.

Fuente: Herrera F. y Duarte D. (2019).

Al igual que el análisis térmico, el análisis de frecuencia necesita de un mallado para realizar la simulación, en la tabla 4 se observan la descripción del mallado y la tabla 5 los detalles. En comparación con el mallado del análisis térmico, este es mucho más fino, con una cantidad de nodos superior.

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla basada en curvatura
Puntos jacobianos	4 Puntos
Tamaño máximo de elemento	0 mm
Tamaño mínimo del elemento	0 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden

Tabla 4. Descripción del mallado para el análisis de frecuencia.

Fuente: Herrera F. y Duarte D. (2019).

Número total de nodos	23688
Número total de elementos	12114
Cociente máximo de aspecto	101.01
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	76.6
% de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	6.61
% de elementos distorsionados (Jacobiana)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:17
Nombre de computadora:	RAMON-PC

Tabal 5. Detalles del mallado para el análisis de frecuencia.

Fuente: Herrera F. y Duarte D. (2019).

En la figura 105 se observa la apariencia del mallado.



Figura 105. Apariencia del mallado para el análisis de frecuencia.

Fuente: Herrera F. y Duarte D. (2019).

Los resultados del análisis de frecuencia se expresan en amplitud, esto define el tamaño de la onda, como también determina los valores de deformación, esto sería el desplazamiento que tiene el disco de su posición original hasta donde alcanza al momento de vibrar. La figura 106 nos muestra los resultados del análisis, mientras que la tabla 8 nos muestra el resumen del análisis para una frecuencia de 36,8336 Hz.

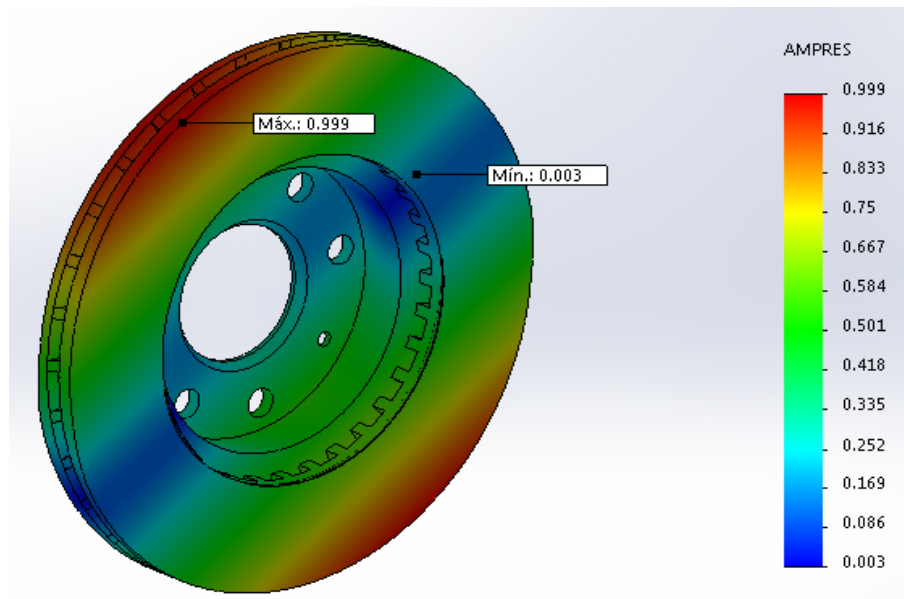


Figura 106. Resultado del análisis para una frecuencia de 36,8336 Hz.

Fuente: Herrera F. y Duarte D. (2019).

La figura 107 nos muestra los resultados del análisis, mientras que la tabla 9 nos muestra el resumen del análisis para una frecuencia de 36,8659 Hz.

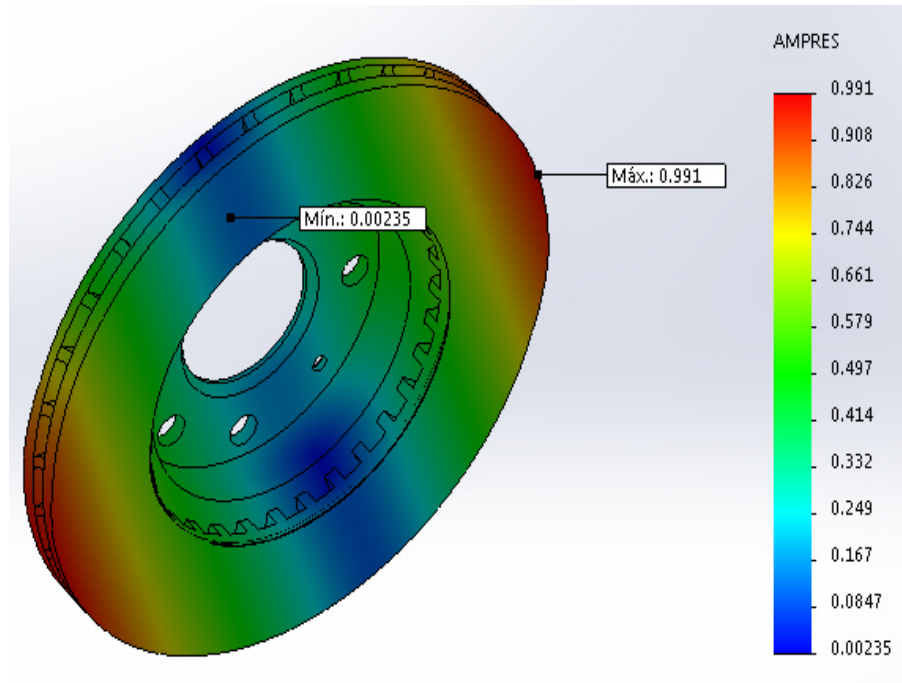


Figura 107. Resultado del análisis para una frecuencia de 36,8659 Hz.

Fuente: Herrera F. y Duarte D. (2019).

A continuación, la tabla 6 muestra resultados de modos frecuenciales obtenidos por el software.

Frecuencia n°.	Rad/seg	Hertz	Segundos
1	0.0055768	0.00088757	1126.7
2	0.0062115	0.00098859	1011.5
3	0.0070669	0.0011247	889.1
4	231.43	36.834	0.027149
5	231.64	36.866	0.027125

Tabla 6. Lista de modos frecuenciales.

Fuente: Herrera F. y Duarte D. (2019).

Para concluir con el análisis de frecuencia, al comparar los resultados se observo que para los tres primeros modos de frecuencia no se produce una vibración en el disco, su deformación esta diminuta que no se toman en cuenta. Las vibraciones son apreciables en los modos frecuenciales 4 y 5, ya que las deformaciones son

bastante notables. Estos resultados son comparables con lo que sucede en la cotidianidad cuando un disco se deforma o desgasta, produciendo esa vibración que a través del control de manejo se transmite al volante del conductor, siendo bastante engorroso para el conductor y pudiendo ocasionar hasta un accidente si no se atiende el problema con prisa.

Con ayuda de ambos análisis, térmico y de frecuencia, se logró comprobar el comportamiento del disco de freno a la hora de sufrir de alabeo (por deformación o desgaste). Sin embargo, por las limitaciones del programa Solidworks la deformación o desgastes de disco no se generaba a través de un estudio, por esto se basó el estudio en un antes y después de que se produzca el alabeo. Es importante tener en cuenta que el disco se encuentra sometido a un estado crítico, ya que la simulación se basa en la frenada de un vehículo que posee una velocidad de 200 Km/hr. Ambos análisis pueden ser comprobados por un banco de prueba especializado para frenos de disco, visualizando así las zonas con mayor impacto térmico y la vibración que el disco, ya deformado, pueda generar.

5.5. Proponer el uso y selección adecuado del sistema de frenos del automóvil para reducir el riesgo de producir el alabeo, alargando la vida útil de los discos de freno.

El manejo de automóvil tiene una gran importancia siendo una de las principales causas por las que se generan fallas en el sistema de frenos, cabe destacar que no implica que la falla se genere si el individuo utiliza una vez de manera incorrecta los frenos, es una acumulación de malas acciones las que tienen como consecuencia que solo cuando la falla de síntomas esta sea detectada.

Como punto importante sabemos que la principal causa del alabeo en los frenos se debe a una deformación por choque térmico del disco de freno, lo aconsejable es procurar no llegar a los niveles de temperatura que nos dio la simulación del capítulo anterior de manera recurrente.

Las condiciones a las que fue sometido el disco en la simulación, fueron condiciones críticas llevando al máximo la integridad del disco para así demostrar

luego de la deformación y la presencia de alabeo, como se generan las vibraciones típicas de esta problemática.

El disco se trata de un elemento metálico donde se apoyan las pastillas. La fricción hace que las pastillas alcanzan altas temperaturas por lo que son diseñados con materiales que soportan el calor. Si accionamos el freno durante un tiempo prolongado, los discos se sobrecalientan y perderán bastante eficacia. Debemos cambiar de marcha para ayudarnos del freno motor.

Las pastillas se componen de metal y ferodo. Rozan contra el disco cuando accionamos el pedal de freno. Cuando el ferodo de las pastillas se va desgastando, nos avisará de que están llegando a su fin para evitar que el metal roce directamente contra el disco. Un ruido chirriante indica la necesidad de cambiar las pastillas de freno y es aconsejable acudir a tu taller de coches de confianza.

La pinza se ocupa de empujar las pastillas contra el disco cuando accionamos el pedal mediante pistones hidráulicos. Tener controlado el nivel del líquido de freno es muy importante, ya que conseguiremos que el desgaste no se acelere y evitaremos accidentes.

El alabeo de los discos define la deformación del freno en una zona en concreto. Para evitar esto, tenemos que minimizar las frenadas bruscas.

5.5.1. ¿Cómo frenar correctamente?

Cuando pisemos el freno, debemos respetar dos principios básicos: hacerlo en línea recta y sin miedo. En línea recta quiere decir que pisemos cuando el coche esté recto, nunca cuando se encuentre dentro de una curva, dado que, frenando en ese instante, el vehículo tendería a la desestabilización. Nunca se debe frenar por frenar, sino cuando tengamos claro que hay que hacerlo. Entonces, lo que procede es no dudar. Al conducir, debemos orientarlo todo a la seguridad y fiabilidad del sistema de frenos de nuestro vehículo. Porque, cuando más a gusto circulamos es cuando tenemos la certeza de que lo hacemos con la máxima seguridad posible.

Las empresas fabricantes de discos y pastillas de freno para todo tipo de vehículos, realizan un "Decálogo para una conducción segura" en el que se ofrecen

diez consejos para un manejo ideal y alargando la vida útil de los discos de freno.

Ø **Cada coche y cada conductor son diferentes. Según el tipo de conducción, tu coche estará expuesto a más o menos desgaste de sus componentes.**

En el sistema de frenos las piezas que sufren más desgaste son las pastillas y los discos de freno y este desgaste depende, además de los kilómetros recorridos, del estilo de conducción de cada persona.

Los conductores que suelen exponer al coche a un mayor esfuerzo de frenado (trayectos montañosos, conducción con el coche a plena carga, sobrecalentamiento ocasional del sistema de frenos, deben revisar los frenos con más frecuencia.

Lo ideal durante la subida por una carretera de montaña es no tocar el pedal del freno. En su lugar, debes aprovechar la pendiente ascendente y la retención del motor para permitir que el coche decelere naturalmente durante la aproximación a cada curva.

Por otra parte, conducir realizando una fuerte aceleración te obligará a pisar el freno con frecuencia y disparará el consumo de combustible. Además, la reducción del tiempo empleado en el desplazamiento suele ser bastante escasa.

Finalmente, y sólo en el caso de ser necesario, debes reducir de marcha para trazar determinadas curvas especialmente cerradas o de pendiente pronunciada, donde se requiera disponer de una mayor potencia.

Mantener una velocidad constante te ayudará a reducir el consumo de combustible, evitar un innecesario desgaste de los frenos y afrontar la entrada y salida de las curvas con mayor seguridad.

Ø **No abuses de los frenos y procura utilizar el cambio de marcha. De esta manera podrás evitar que los frenos se calienten y durarán más tiempo en buen estado.**

Una de las formas de disminuir la velocidad del vehículo es hacer uso de la caja de cambios. Esta maniobra puede resultar de gran utilidad en descensos prolongados como pueden ser los puertos de montaña.

El descenso por una carretera de montaña es el momento más peligroso de todo

el trayecto pero también puede ser un excelente momento para incorporar técnicas de conducción eficiente, siempre y cuando las condiciones de la calzada y el tráfico lo permitan.

En este caso, la clave va a consistir en pisar el pedal del acelerador lo menos posible.

Someter al motor a unas revoluciones por debajo del mínimo recomendado puede conducir a que éste se gripe debido a la falta de potencia.

Pisar el acelerador con una marcha larga pero una reducida velocidad tan sólo conducirá a un exceso de consumo de combustible totalmente desaprovechado.

Hoy en día, es muy improbable quedarse sin frenos como consecuencia del sobrecalentamiento de los mismos. Sin embargo, no conviene abusar de los mismos, pues podrías desgastarlos prematuramente.

Ø **Haz caso a las señales que emite tu coche y aprende a interpretarlas.**

Hoy en día la mayoría de los coches cuenta con sistemas de aviso de desgaste de frenos por lo que un piloto en el panel de instrumentos nos advertirá con suficiente antelación. Pero si por ejemplo sientes que el pedal de freno está esponjoso o se va al fondo cuando lo pisas, es posible que haya burbujas de aire en el circuito hidráulico por lo que debes llevar el coche al taller para asegurarte de que todo está correctamente.

Ø **Si vas conduciendo y al pisar el freno notas que hay una pequeña vibración, deberás cerciorarte de que las pastillas y discos de freno están en buen estado.**

En frenadas de alta velocidad, una vibración en el volante puede ser indicio de que alguna pieza del sistema de frenos está en mal estado, de un desequilibrio entre las cuatro ruedas o de que los discos de freno están alabeados. Si pisas el freno y tu coche vibra acude lo antes posible al taller.

Ø **Si sientes que tienes que pisar el freno demasiado fuerte para frenar, lo más probable es que las pastillas de freno o los discos estén dañados.**

En ocasiones es necesario pisar el pedal de freno demasiado fuerte y aun así

sentimos que el coche no frena como debería. Las causas de esto pueden ser muy diversas pero es posible que las pastillas de freno de nuestro coche o los discos de freno estén dañados. También es posible que esto suceda por otras causas: grasa o líquido de frenos en las pastillas, poca cantidad de líquido de frenos. El profesional del taller será el que nos indique la causa y el que aporte una solución.

Ø **Si el pedal de freno se hunde cuando lo pisas, puede haber una fuga en el circuito de frenos o que las pastillas de freno estén excesivamente desgastadas.**

Fugas en el circuito de frenos, aire en el sistema, líquido de freno escaso, inadecuado o contaminado o pastillas de freno muy desgastadas, pueden hacer que el pedal de freno se hunda al pisarlo. En este caso será necesario revisar todo el circuito de frenos, cerciorarnos de que el depósito de líquido de frenos está en buenas condiciones y, probablemente, sustituir las pastillas de freno.

Ø **Un ruido chirriante en los frenos puede ser síntoma de que las pastillas de freno son nuevas pero también son síntoma de alarma en algunos casos.**

Cuando acabamos de cambiar las pastillas de freno, sin haber cambiado los discos, podemos escuchar chirridos. Pero hay que estar alerta ya que en muchos casos estos ruidos pueden ser síntoma de que algo no está bien en nuestro sistema de freno: partículas metálicas u óxido en las pastillas, discos de freno en mal estado, pastillas de freno muy desgastadas o de baja calidad, son algunas de las causas que pueden provocar un chirrido desagradable.

Ø **Estar pendiente de la revisión si los frenos de tu auto están desgastados la distancia de frenado aumenta considerablemente.**

El sistema de freno debe revisarse cada vez que el coche pase por el taller para cualquier tarea de mantenimiento: cambio de aceite, filtros, etc. En cualquier caso nunca deberían dejarse pasar más de 20.000 kilómetros sin revisar el sistema de frenos (lo cual no quiere decir que haya que cambiar algún elemento).

5.5.2. ¿Qué hacer si fallan los frenos?

Si los frenos fallan debes mantener la calma y estar muy atento a tu entorno. No

apagues el motor ya que, si bien es verdad que la velocidad disminuirá, será más difícil maniobrar y tener control sobre la conducción para evitar una posible coalición.

Tampoco se debe activar el freno de mano ya puedes perder el control del coche. La mejor opción es reducir las marchas e ir disminuyendo la velocidad hasta la detención total del vehículo. No olvides activar las luces de emergencia para que los demás conductores sepan que se está teniendo un problema

5.5.3. Cómo seleccionar los mejores discos de freno.

Todas aquellas personas que tienen un coche saben lo vital que son los discos de freno para su correcto funcionamiento. Sin embargo, es importante también tener en cuenta que para lograr una excelente frenada estos componentes tienen que estar asociados con unas pastillas de frenos acorde al modelo del coche.

5.5.4. Discos de freno según su uso.

Los frenos de disco son parte del sistema principal donde se aplica la fuerza del accionador de todo el mecanismo inhibitorio del coche y donde se produce una energía cinética que se convierte en calor.

Dicho esto, es de suma importancia conocer la composición y el método de fabricación ya que de esto depende que mejoren de manera considerable las características térmicas y mecánicas del disco. Con este fin, algunas marcas aplican procesos criogénicos a la micro estructura metálica con la intención de acercar la temperatura de enfriamiento al cero absoluto, lo que sería igual a unos 273°C bajo cero. Sin importar el caso, es bueno que se elijan en función del uso que se le va a dar al coche.

Hay que elegir marcas reconocidas, independientemente de que existan otros productos a costes más baratos. No se trata únicamente de la apariencia, ya que es en el interior es donde se mide la calidad.

Esto no quiere decir que no existen marcas que aunque sean menos conocidas por los conductores no ofrezcan productos de calidad y a buenos costes. Sin embargo, lo “bueno, bonito y barato” casi siempre es un engaño.

5.5.5. ¿Cuánto cuesta sustituir los discos de freno?

Los precios para el cambio de los discos de freno varían mucho y dependen esencialmente de la calidad deseada y del vehículo. En general, se puede decir que los costes aumentan con el tamaño del sistema de frenos. Los discos de freno baratos sin ventilación, por ejemplo para coches pequeños como el Opel Corsa, están disponibles por unos 15 € cada uno. Por su parte, los discos de freno de alta calidad para coches deportivos, como el Porsche 911 con discos de freno cerámico, pueden costar varios cientos de euros cada uno.

Es importante tener en consideración que los discos de freno sólo se puedan cambiar por parejas, es decir, siempre por eje. Es por eso que, por lo general, solo están disponibles como un conjunto. Asimismo, durante el montaje es inevitable que se coloquen nuevos forros de freno, ya que los forros se adaptan al disco y no se consigue un rendimiento de frenado óptimo cuando se reutilizan los forros de freno viejos.

5.5.6. Mantenimiento de sistema de frenos.

El mantenimiento de todo el sistema de frenos de un vehículo es fundamental. En primer lugar hay que tener presente que los discos de freno no son infinitamente rígidos sino que como cualquier pieza de un vehículo se deforma.

Para evitar lo máximo posible esta deformación, hay que tener en cuenta muchos parámetros, ya que incluso el valor de apriete de las ruedas es uno de los factores que afectan a la deformación del disco. Es necesario que en el montaje de los neumáticos se lleve a cabo bajo el par de apriete que recomienda el fabricante.

Para un buen mantenimiento de los discos de freno conviene revisarlos cada 20000 km. como norma general. Este control no debe de ser solo visual, ya que existe una cota mínima tras la cual el disco debe de ser sustituido. Esta medida llamada minimum thickness (mínimo espesor) viene grabada en los cantos de los discos. Más adelante veremos que sucede cuando este espesor no es respetado. Los controles que se deben realizar, no son solo la medida del espesor con ayuda de un micrómetro de exteriores, sino que además debe de comprobar el alabeo del disco con ayuda de una

base magnética y un reloj comparador unido a ella. El proceso de verificación del alabeo se lleva a cabo, pegando la base magnética en la mangueta del vehículo y la punta del reloj comparador debe estar en contacto con la pista frenante del disco. En esta posición se debe poner a cero el reloj. Una vez colocado todo el sistema debemos de hacer girar el disco fijándonos en la desviación que el reloj comparador nos va a ir dando. Si esta variación es mayor a 0,125 mm. Debe de ser sustituido el disco por estar alabeado.

Esto se hará patente en el freno ya que al frenar nos producirá vibraciones en el volante, incluso si el alabeo es muy grave se producirán pulsaciones en el pedal. La planitud del disco es una característica crítica para una frenada progresiva y libre de vibraciones no solo en frío sino en caliente. Si esta planitud no se encuentra dentro de los valores requeridos, pueden aparecer puntos calientes “judder” que producen vibraciones muy desagradables al frenar. Como se verá más adelante el “judder” puede aparecer como vibraciones acústicas, vibraciones estructurales en la dirección del vehículo o como pulsaciones en el pedal del freno.

CONCLUSIONES

Una vez culminaba la búsqueda de información acerca de las variables que causan el fenómeno en estudio en los sistemas de discos de freno, resalta que generalmente el 70% de la energía cinética producida en el movimiento del auto es absorbida por los frenos de disco delanteros y el restante por el freno trasero, que suele ser de tambor, de igual manera el resultado de esta información bibliográfica dio como aporte que el alabeo se produce por un sobrecalentamiento de la superficie del disco de freno lo que provoca una deformación en el disco. Esto provoca vibraciones en la frenada y una disminución en la potencia de frenado. Sin embargo el alabeo del disco puede deberse a su propia deformación o a un defecto en el buje de la rueda, por sobrecalentamiento o par de apriete de las ruedas excesivo o desigual.

Con el análisis del funcionamiento del sistema de discos de freno de vehículos ligeros cuando el pedal del freno es accionado, la presión del pedal de freno mueve el pistón dentro del cilindro maestro, forzando el fluido del freno desde el cilindro maestro por medio del tubo y la manguera flexible del cilindro de las llantas. El sistema ABS es muy importante en la seguridad este sistema hace posible un frenado equilibrado y sin bloquear las llantas evitando la pérdida de control direccional del vehículo.

Para lograr una mayor eficacia de frenada del vehículo, la clave no es el diseño del disco de freno, sino los compuestos con los que está fabricado y la superficie de fricción que ofrece, en la industria automovilística actual hay tres tipos sistemas de avance Brake-By-Wire, que ayudan al crecimiento de los sistemas de frenos en nuestros días modernos; cada uno de ellos cumplen con el objetivo, a pesar de sus diferencias, siendo los más eficaces aquellos que se construyen en nuestros días.

Los resultados arrojados por la simulación concluyen que las vibraciones son apreciables en los modos frecuenciales 4 y 5, ya que las deformaciones son bastante

notables a mayor deformación o desgaste mayor vibración generada. Estos resultados son comparables con lo que sucede en la cotidianidad cuando un disco se deforma o desgasta, produciendo en el conductor la sensación de turbulencia y de falta de eficacia en la frenada aumentando la distancia de frenado, esto implica un agravio en la seguridad del vehículo al igual que una disminución del confort de los pasajeros. Los conductores suelen exponer al coche a un mayor esfuerzo de frenado en trayectos montañosos, conducción con el coche a plena carga, esto genera sobrecalentamiento ocasional del sistema de frenos, por eso se deben revisar los frenos con más frecuencia.

Hay que elegir marcas reconocidas, independientemente de que existan otros productos a costes más baratos. No se trata únicamente de la apariencia, ya que es en el interior es donde se mide la calidad. Esto no quiere decir que no existen marcas que aunque sean menos conocidas por los conductores no ofrezcan productos de calidad y a buenos costes. Sin embargo, lo “bueno, bonito y barato” casi siempre es un engaño y se trata de la seguridad de vidas humanas, por lo tanto el buen uso, mantenimiento y en algunos casos recambio de los sistemas de frenos debe ser puesto en manos de profesionales.

RECOMENDACIONES

Realizar un estudio de comportamiento del disco de freno en un banco de pruebas especializado para este tipo de producto, y así poder comparar los resultados de la realidad con los virtuales. Además, poder analizar la estructura granular del material del disco una vez realizado el estudio con el banco de prueba. Teniendo en cuenta que se debe contar con una muestra física de un disco de freno.

Para mayor exactitud, o en dado caso comparativos, en las simulaciones es posible utilizar programas que presenten características mejores comparados a Solidworks, como lo pueden ser Ansys o Inventor Nastran, ya que son programas que permiten la simulación por elementos finitos y estudian varios factores relacionados a las causas que generan el alabeo en los discos de frenos.

Al igual que el disco de freno, realizarle un estudio de comportamiento a las pastillas y como afectan directamente en el alabeo, para lograr estos se necesitaría el banco de pruebas y además un software que posea el material o la combinación de materiales con los que está constituida las pastillas de freno, para su análisis computarizado.

Contar con la ayuda de equipos de investigación de los fabricantes de disco y pastillas de frenos, para ampliar la base teórica desde su fabricación hasta el desecho del mismo por fallas.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Arias F. (2012). **El proyecto de Investigación. Introducción a la metodología científica.** 6° Edición. Caracas. Episteme C. A
- Balestrini, M. (2002). **Como se elabora el proyecto de Investigación.** 6° edición. Caracas. BL Consultores Asociados. Servicio Editorial
- García R., Echavez R. y Flores E. (2018). **Análisis termodinámico de un disco de freno automotriz con pilares de ventilación tipo NACA 66-209.** Barranquilla. Universidad de la Costa.
- García R. y Estremera V. (2014). **Análisis y diseño de un disco de freno.** Pamplona. Universidad Pública de Navarra.
- Gil. G y Trujillo R. (2010). **Diseño del sistema de freno para el prototipo formula SAE UCV.** Caracas. Universidad Central de Venezuela.
- Hernández R., Fernández C. y Baptista M. (2010). **Metodología de la Investigación.** 5° Edición. México. The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Hurtado, J. (2006). **El proyecto de Investigación.** Bogotá. Sypal.
- Kashima University (2019). **Frenos a Disco.** Disponible en el sitio web: www.kashima.campuseina.com/mod/book/view.php?id=7614&chapterid=9453
- Kreith F., Manglik R. y Bohn M. (2003). **Principios de transferencia de calor.** 3° Edición. México D.F. Cengage Learning Editores, S.A.
- Lillo S. (2006). **Comportamiento termodinámico de un disco de freno macizo y uno auto-ventilado.** Valdivia. Universidad Austral de Chile.
- Loayza W. (2017). **Análisis comparativo de un disco de freno original frente a un alternativo para un vehículo chevrolet aveo mediante simulación y pruebas experimentales.** Riobamba. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
- Mena E. (2011). **Análisis de falla de discos de freno automotrices derivado del proyecto de investigación SIP-20090785.** México D.F. Instituto Politécnico Nacional.

- Prieto A. Álvaro (2018). **Tipos de discos de frenos: Ventajas e inconvenientes de cada uno.** Disponible en el sitio web: <https://www.autonocion.com/tipos-discos-de-freno-pros-contras/>
- Sabino, C. (2002). **El proceso de Investigación.** Caracas. Editorial Panapo De Venezuela.
- Sanchez S. (2018). **Propuesta de Diseño Para Disco De Freno Ventilado.** Valladolid. Universidad de Valladolid.
- Tamayo y Tamayo, M. (2004). **El Proceso de Investigación Científica.** México. Limusa.
- Tassoni D. (2006). **Elementos de Maquinas.** Carabobo. Universidad de Carabobo.
- Universidad Pedagógica Experimental Libertador UPEL (2006) **Manual de trabajos de grado, de especialización, maestría y tesis doctorales.** 4º edición. Caracas. Fedeupel.
- Venegas W. (2012). **Análisis por el método de los elementos finitos de un disco de freno con sistema de mordaza.** Quito. Escuela Politécnica Nacional.

APENDICES

Tiempo (s)	Temperatura al instante (°C)
0	272,8409764
500	183,1920274
1000	125,9708641
1500	89,44771938
2000	66,13571347
2500	51,25611797
3000	41,75876441
3500	35,69679016
4000	31,82755107
4500	29,35789175
5000	27,78155671
6500	25,72330649
7000	25,46167233
7500	25,29467638
8000	25,18808614
8500	25,12005169
9000	25,07662664
9500	25,04890928
10000	25,00314898
10500	25,00200993
11000	25,0012829
11500	25,00081885
12000	25,00052266

Tabla 7. Temperatura de Enfriamiento de Newton.

Fuente: Herrera F. y Duarte D. (2019).

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Amplitud4	AMPRES: Amplitud resultante Plot para forma modal: 4(Valor = 36.8336 Hz)	0.00299804 Nodo: 12005 Deformación: X (mm)= 4.69463 Y (mm)= 29.5885 Z (mm)= -77.3887 AMPRES= 5.33776e-001	0.999472 Nodo: 15400 Deformación: X (mm)= 20.5 Y (mm)= 109.883 Z (mm)= 43.0089 AMPRES= 5.33776e-001

Tabla 8. Resultado del análisis para una frecuencia de 36,8336 Hz (resumen).

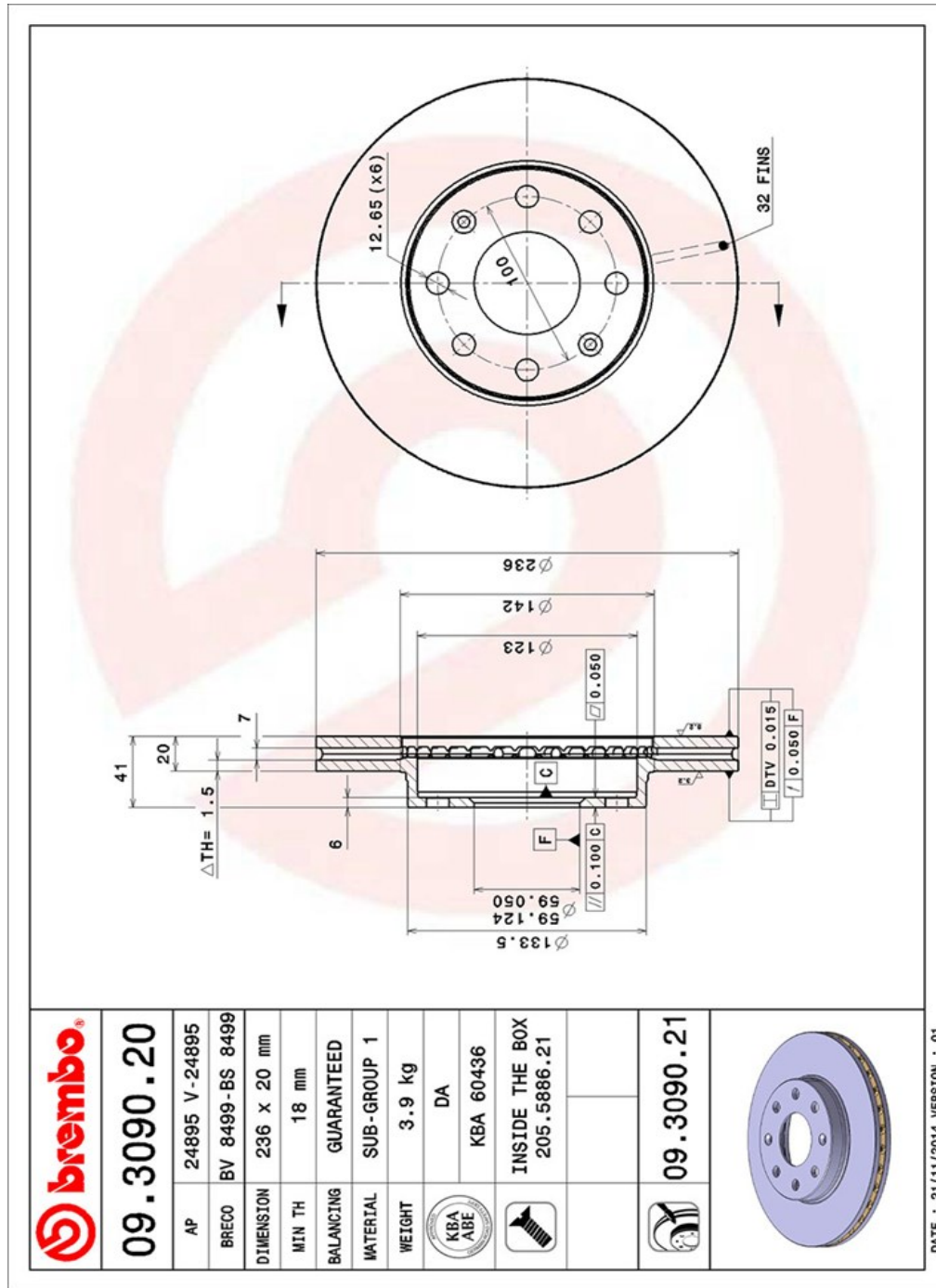
Fuente: Herrera F. y Duarte D. (2019).

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Amplitud5	AMPRES: Amplitud resultante Plot para forma modal: 5(Valor = 36.8659 Hz)	0.00235046 Nodo: 7767 Deformación: X (mm)= 4.75 Y (mm)= 69.6745 Z (mm)= 27.5135 AMPRES= 5.33776e-001	0.990719 Nodo: 1331 Deformación: X (mm)= 20.5 Y (mm)= 41.3996 Z (mm)= -110.499 AMPRES= 5.33776e-001

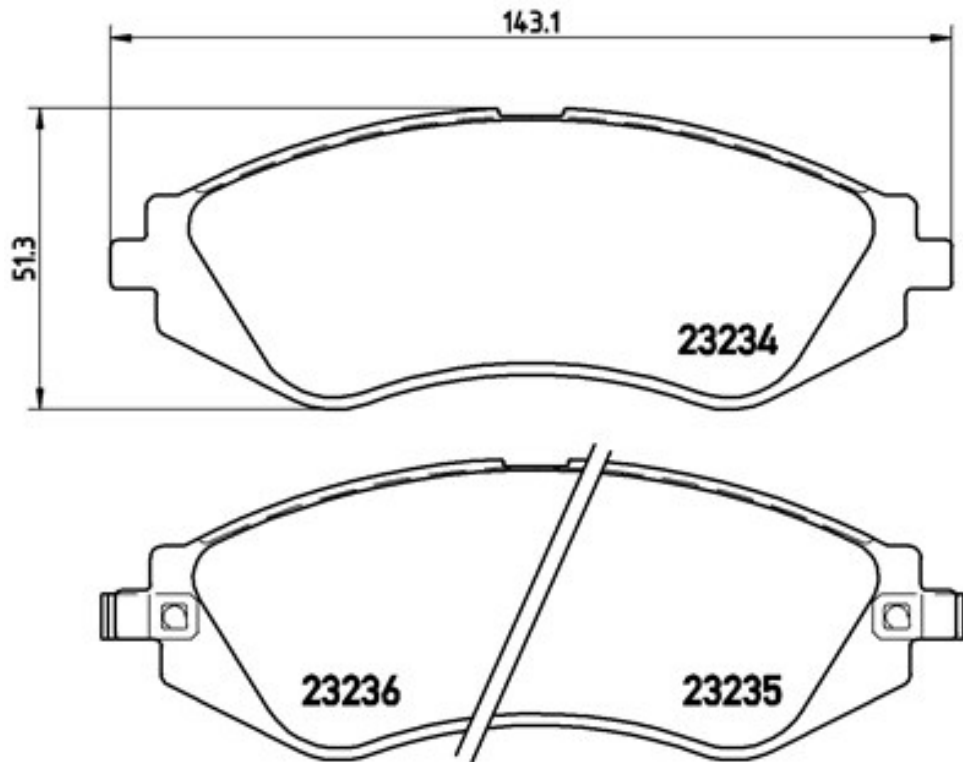
Tabla 9. Resultado del análisis para una frecuencia de 36,8659 Hz (resumen).

Fuente: Herrera F. y Duarte D. (2019).

ANEXOS



Anexo 1. Planos de diseño del disco de freno.
Fuente: Brembo (2019).



Anexo 2. Planos de diseño de la pastilla de freno.
Fuente: Brembo (2019).

867

A-3 Propiedades físicas de los gases

T (°F)	ρ (lb _m /ft ³)	c_p (Btu/lb _m -°F)	$\mu \times 10^6$ (lb _m /ft-sec)	$\nu \times 10^5$ (ft ² /seg)	k (Btu/hr-ft-°F)	α (ft ² /hr)	Pr	$\beta \times 10^6$ (1/°F)	$g\beta^2/\rho^3$ (1/°F-ft ³)
<i>Aire</i>									
0	0.0862	0.240	1.09	0.126	0.0132	0.639	0.721	2.18	4.39×10^4
30	0.0810	0.240	1.15	0.142	0.0139	0.714	0.716	2.04	3.28
60	0.0764	0.240	1.21	0.159	0.0146	0.798	0.711	1.92	2.48
80	0.0735	0.240	1.24	0.169	0.0152	0.855	0.708	1.85	2.09
100	0.0710	0.240	1.28	0.181	0.0156	0.919	0.703	1.79	1.76
150	0.0651	0.241	1.36	0.209	0.0167	1.06	0.698	1.64	1.22
200	0.0602	0.241	1.45	0.241	0.0179	1.24	0.694	1.52	0.840
250	0.0559	0.242	1.53	0.274	0.0191	1.42	0.690	1.41	0.607
300	0.0523	0.243	1.60	0.306	0.0203	1.60	0.686	1.32	0.454
400	0.0462	0.245	1.74	0.377	0.0225	2.00	0.681	1.16	0.264
500	0.0413	0.247	1.87	0.453	0.0246	2.41	0.680	1.04	0.163
600	0.0374	0.251	2.00	0.535	0.0270	2.88	0.680	0.944	79.4×10^3
800	0.0315	0.257	2.24	0.711	0.0303	3.75	0.684	0.794	50.6
1000	0.0272	0.263	2.46	0.906	0.0337	4.72	0.689	0.685	27.0
1500	0.0203	0.277	2.92	1.44	0.0408	7.27	0.705	0.510	7.96

Nota: Todas las propiedades de los gases son para presión atmosférica.

(continúa en la pág. 868)

Anexo 3. Propiedades físicas del aire.
Fuente: Kreith, Manglik y Bohn (2003).