



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**Análisis del comportamiento mecánico y térmico de un disco de frenos del vehículo
Chevrolet Grand Vitara SZ a diferentes espesores de trabajo**

Torres Tobar, Francisco Fernando

Departamento de las Ciencias de Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Automotriz

Trabajo de Titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero Automotriz

Ing. Cruz Arcos, Guillermo Mauricio Msc.

12 de agosto del 2021



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y TÉRMICO DE UN DISCO DE FRENOS DEL VEHÍCULO CHEVROLET GRAND VITARA SZ A DIFERENTES ESPEORES DE TRABAJO”** fue realizado por el señor **FRANCISCO FERNANDO TORRES TOBAR** el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 12 de agosto del 2021



Firmado electrónicamente por:
**GUILLERMO
MAURICIO CRUZ
ARCOS**

.....
ING. CRUZ ARCOS, GUILLERMO MAURICIO

C.C.: 0503010555



Document Information

Analyzed document	ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y TÉRMICO DE UN DISCO DE FRENOS.pdf (D111146850)
Submitted	8/10/2021 6:45:00 PM
Submitted by	Cruz Arcos Guillermo Mauricio
Submitter email	gmcruz@espe.edu.ec
Similarity	5%
Analysis address	gmcruz.espe@analysis.arkund.com



Formado digitalmente por
**GUILLERMO
 MAURICIO CRUZ
 ARCOS**

Sources included in the report

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / ANÁLISIS EFICIENCIA, DESGASTE Y RENDIMIENTO DE FRENOS.pdf		
SA	Document ANÁLISIS EFICIENCIA, DESGASTE Y RENDIMIENTO DE FRENOS.pdf (D59125898) Submitted by: gmcruz@espe.edu.ec Receiver: gmcruz.espe@analysis.arkund.com	19
W	URL: https://xdoc.es/sistema-de-frenospdf-pdf-free.html Fetched: 1/19/2021 11:17:59 AM	1
W	URL: https://www.researchgate.net/profile/Ricardo_Garcia-Leon/publication/341175124_CONSTRUCCION_DE_UN_BANCO_DE_PRUEBAS_PARA_EL_ANALISIS_DEL_COMPORTAMIENTO_AL_DESGASTE_DE_LOS_SISTEMAS_DE_FRENOS_DE_DISCOS_AUTOMOTRICES/links/5eb21ccca6fdcc7050ad6328/CONSTRUCCION-DE-UN-BANCO-DE-PRUEBAS-PARA-EL-ANALISIS-DEL-COMPORTAMIENTO-AL-DESGASTE-DE-LOS-SISTEMAS-DE-FRENOS-DE-DISCOS-AUTOMOTRICES.pdf Fetched: 1/7/2021 6:06:11 PM	2
W	URL: https://docplayer.es/78457527-Gracias-a-dios-por-haberme-permitido-llegar-hasta-este-dia.html Fetched: 12/6/2019 12:16:08 AM	1
SA	tesis final pa revisar 2.docx Document tesis final pa revisar 2.docx (D10124191)	1
W	URL: https://docplayer.es/81622331-Escuela-politecnica-nacional.html Fetched: 11/18/2019 6:29:11 PM	1
W	URL: https://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/31290/1/TFG-P-827.pdf Fetched: 5/21/2020 1:36:59 AM	1
W	URL: https://docplayer.es/74407372-Departamento-de-ciencias-de-la-energia-y-mecanica.html Fetched: 6/26/2021 4:51:43 PM	1
W	URL: http://repositorio.ufpso.edu.co:8080/dspaceufpso/bitstream/123456789/1886/1/30896.pdf Fetched: 12/20/2020 11:01:35 AM	2
W	URL: https://www.plm.automation.siemens.com/global/es/our-story/glossary/computer-aided-design-cad/12507	2



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, Torres Tobar, Francisco Fernando, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y TÉRMICO DE UN DISCO DE FRENOS DEL VEHÍCULO CHEVROLET GRAND VITARA SZ A DIFERENTES ESPESORES DE TRABAJO”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas. Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Latacunga, 12 de agosto del 2021

Una firma manuscrita en tinta azul, que parece ser la de Francisco Fernando Torres Tobar, escrita sobre una línea punteada.

Torres Tobar, Francisco Fernando

C.C.: 1723907984



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

AUTORIZACIÓN

Yo, Torres Tobar, Francisco Fernando, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y TÉRMICO DE UN DISCO DE FRENOS DEL VEHÍCULO CHEVROLET GRAND VITARA SZ A DIFERENTES ESPESORES DE TRABAJO”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Latacunga, 10 de agosto del 2021

Una firma manuscrita en tinta azul, que parece ser la de Francisco Fernando Torres Tobar, escrita sobre una línea punteada.

Torres Tobar, Francisco Fernando

C.C.: 1723907984

Dedicatoria

Dedico este trabajo de investigación, a todas esas personas, que han estado y están presentes, como conjuntos de un mecanismo, con el único objetivo de verme crecer como persona y profesional.

A mi mamá Patricia, quien, con su fuerza emocional e integral, ha sido el camino y la luz, haciendo que la sumatoria de cada consejo y apoyo moral, defina el camino de mi vida, en una trayectoria recta y permanente, en cada uno de mis logros y fracasos.

A mi padrastro Fredy, quien se convirtió en el referente de rectitud y orden en mi vida, brindando ejemplo en cómo ser y actuar frente a la sociedad que se presentará en mi futuro.

A mi hermana Paula, quien es mi vínculo emocional con la vida, brindando armonía y tranquilidad con cada una de sus palabras, dentro de mi formación humana.

A mi hermano Javier, quien fue el primero en dar el salto de fe, y ahora, con sus éxitos, me mostró que las estrellas se alcanzan, si sueñas con lograrlo.

Y finalmente, a Cynthia, quien, en mis momentos más oscuros, presentó una nota positiva, para enderezar mi camino hasta la consecución de mis sueños y anhelos.

Francisco Fernando Torres Tobar

Agradecimiento

Agradezco a todas las personas que me apoyaron durante este largo y complejo camino de estudios, quienes, con sus actos y buenas intenciones, han hecho que el día de mi grado, llegue con éxito, a mi vida.

Agradezco a mi familia, porque me brindó el pilar más fuerte sobre el que me asenté en mi diario crecer, brindándome todas las herramientas necesarias, para usarlas con ética y moral, en un camino, donde yo fui el autor de cada uno de los acontecimientos pasados y presentes en esta parte de mi vida.

Agradezco, también, a aquellas personas que no tenían obligación de estar, pero estuvieron, dándome su granito de arena con el afán de verme el profesional que me convierto ahora, y el futuro integrante, de una sociedad que gustosamente, me abrirá las manos, para darme una oportunidad de demostrar los frutos de los esfuerzos míos y de ellos.

Finalmente agradezco a mi director de tesis, el Ing. Mauricio Cruz, quien, con su guía, experiencia y conocimientos, ha brindado claridad y orden, a las ideas y conceptos que desarrolle en este trabajo investigativo.

Francisco Fernando Torres Tobar

Tabla de contenidos

Carátula.....	1
Certificación.....	2
Urkund.....	3
Autoría de responsabilidad	4
Autorización.....	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento	7
Tabla de contenidos.....	8
Índice de tablas	12
Índice de figuras.....	14
Índice de ecuaciones	18
Resumen	19
Abstract.....	20
Marco metodológico de la investigación.....	21
Antecedentes	21
Planteamiento del Problema	22
Árbol del planteamiento del problema	22
Descripción resumida del proyecto.....	22
Justificación e importancia	23
Objetivos	24
<i>Objetivo General</i>	24
<i>Objetivos Específicos</i>	24
Metas.....	25
Hipótesis.....	25
Variables de investigación	25
Marco teórico.....	26
Sistema de frenos	26
Tipos de sistema de frenos	26

<i>Frenos con asistencia hidráulica</i>	27
<i>Frenos de tambor – zapata</i>	28
<i>Sistema de frenado con asistencia hidráulica antibloqueo ABS</i>	29
<i>Sistema de frenos de pastilla - disco</i>	30
Parámetros geométricos, dinámicos y térmicos del disco de freno	36
<i>Espesor del disco de freno</i>	36
<i>Distancia de frenado</i>	37
<i>Tiempo de frenado</i>	38
<i>Desaceleración de frenado</i>	38
<i>Eficiencia de frenado</i>	39
<i>Presión de frenado</i>	39
<i>Fuerza de contacto</i>	40
<i>Fuerza de rozamiento</i>	40
<i>Temperatura del disco de freno</i>	41
<i>Energía de disipación del disco de freno</i>	43
<i>Calor distribuido en el disco de freno</i>	43
Norma ECE R90	43
<i>Pruebas de temperatura según ECE R90</i>	46
<i>Pruebas de distancia y tiempo de frenado según ECE R90</i>	48
Ensayos metalúrgicos y químicos	51
<i>Procedimiento SEM - EDS</i>	51
<i>Norma NTE ISO 6506-1:2005</i>	53
<i>Norma ISO 6892:1998</i>	55
Software CAD – CAE	58
<i>Sistema CAD</i>	58
<i>Estudio CAE</i>	59
Vehículo Grand Vitara SZ	65
<i>Características Grand Vitara SZ 5 puertas 2.0L</i>	66
<i>Especificaciones técnicas del vehículo Grand Vitara SZ 5 puertas</i>	66

<i>Distribución de cargas en los ejes</i>	67
<i>Sistema de freno Grand Vitara SZ 2.0 L de 5 puertas</i>	67
<i>Características del disco de freno del Grand Vitara SZ</i>	68
Pruebas y ensayos	70
Caracterización de los materiales de prueba	70
Prueba de tracción en el disco de freno	70
<i>Resistencia a la tracción de las probetas</i>	73
Pruebas de dureza en el disco de freno	76
<i>Resultados de dureza de la probeta</i>	86
Prueba de análisis químico en el disco de freno	86
<i>Probeta uno</i>	92
<i>Probeta dos</i>	94
Pruebas de frenado al 100% de espesor	96
Prueba de frenado del 95% al 100% de espesor	105
Pruebas de frenado del 90% al 95% de espesor	109
Medición y simulación	114
Modelado del disco de freno	114
Cálculo de fuerzas que actúa sobre el disco de freno	116
Simulación del disco de freno	117
Selección del material utilizado en el disco de freno	121
Resultados de la simulación a diferentes espesores de trabajo	124
<i>Resultados de tiempo de frenado</i>	124
<i>Distancia de frenado del disco</i>	126
<i>Resultado de desaceleración de frenado</i>	128
<i>Resultado de esfuerzo de Von Misses del disco</i>	131
<i>Resultado de deformación del disco</i>	133
<i>Resultado de factor de seguridad del disco de freno</i>	135
<i>Resultado de temperatura del disco de freno</i>	136
Análisis de resultados	142

Análisis de rendimientos.....	142
Análisis de trabajo	147
Análisis de desgaste.....	152
Análisis de eficiencia.....	156
Conclusiones	157
Recomendaciones	158
Bibliografía	160
Anexos.....	164

Índice de tablas

Tabla 1. Frecuencia de frenado de un sistema ABS.....	30
Tabla 2. Códigos y coeficientes de fricción de las pastillas de freno.....	32
Tabla 3. Requisitos metalúrgicos de los discos de freno	36
Tabla 4. Selección del momento en función al área del pistón	40
Tabla 5. Propiedades termo físicas del disco de freno	42
Tabla 6. Categorías M y N según la organización de transporte de la UE	44
Tabla 7. Velocidades de pruebas de los vehículos en función a su categoría	46
Tabla 8. Tabla de resultados de las pruebas después de cada frenado	47
Tabla 9. Tabla resultante del ensayo de distancia y tiempo de frenado.....	49
Tabla 10. Variables utilizadas en el ensayo de dureza	53
Tabla 11. Concepto, símbolo y unidades del ensayo de tracción	56
Tabla 12. Tipología de los elementos en un ambiente CAE	61
Tabla 13. Ficha técnica del vehículo Grand Vitara SZ 2.0 de 5 puertas	67
Tabla 14. Distribución de carga de la masa de Grand Vitara SZ	67
Tabla 15. Dureza de Brinell de los discos de freno	68
Tabla 16. Coeficientes de fricción de las pastillas	69
Tabla 17. Límites de fluencia de los discos de frenos	69
Tabla 18. Resultados medidos del ancho y alto del núcleo de la probeta	71
Tabla 19. Áreas transversales de los núcleos de las probetas	72
Tabla 20. Resumen de los resultados de los ensayos de tracción	76
Tabla 21. Diámetro de bola en función del ancho de la probeta	78
Tabla 22. Constante de trabajo de la probeta, en función al material	80
Tabla 23. Tiempo de aplicación de la bola sobre la superficie de la probeta	81
Tabla 24. Valores de los diámetros axiales y transversales	85
Tabla 25. Resumen de resultados de los ensayos de dureza de Brinell.....	86
Tabla 26. Resultados de los análisis químicos de la probeta 1.....	93
Tabla 27. Resultados de los análisis químicos de la probeta 2	95
Tabla 28. Pesos de las cargas dentro del vehículo	97
Tabla 29. Temperaturas resultantes al 100% de espesor.....	101
Tabla 30. Resultados de distancia y tiempo al 100% de espesor	103
Tabla 31. Tiempo y distancia de frenado real al 100% de espesor.....	104
Tabla 32. Temperaturas resultantes al 96% de espesor	108
Tabla 33. Distancia y tiempo de frenado al 96% de espesor	108
Tabla 34. Tiempo y distancia de frenado real al 96% de espesor.....	109
Tabla 35. Temperaturas resultantes al 92% de espesor	111

Tabla 36. Resultados de distancia y tiempo al 96% de espesor	112
Tabla 37. Tiempo y distancia de frenado real al 96% de espesor	113
Tabla 38. Disco de freno a diferentes espesores de trabajo	115
Tabla 39. Resultados de la composición química del disco de freno	122
Tabla 40. Concentradores de esfuerzo y magnitudes al 100% de espesor	131
Tabla 41. Concentradores de esfuerzo y magnitudes al 96% de espesor	132
Tabla 42. Concentradores de esfuerzo y magnitudes al 92% de espesor	133
Tabla 43. Deformación total al 100% de espesor	134
Tabla 44. Deformación total al 96% de espesor	134
Tabla 45. Deformación total al 92% de espesor	135
Tabla 46. Vistas de las regiones térmicas en el disco al 100% de espesor	137
Tabla 47. Vistas de las regiones térmicas en el disco al 96% de espesor	138
Tabla 48. Vistas de las regiones térmicas en el disco al 100% de espesor	140

Índice de figuras

Figura 1. Árbol del planteamiento del problema.....	22
Figura 2. Sistema de freno convencional.....	26
Figura 3. Sistema de frenos más comunes.....	27
Figura 4. Estructura básica de un sistema de freno hidráulico.....	28
Figura 5. Componentes de un sistema de freno de tambor.....	28
Figura 6. Sistema de freno de tambor accionado.....	29
Figura 7. Sistema ABS de frenado.....	30
Figura 8. Sistema de freno de disco y pastilla.....	31
Figura 9. Composición de las pastillas de freno.....	32
Figura 10. Partes del disco de freno.....	33
Figura 11. Tipos de disco de freno.....	34
Figura 12. Disco de freno ventilado.....	34
Figura 13. Disco de freno no ventilado o macizo.....	35
Figura 14. Espesores axiales (a) disco solido (b) disco ventilado.....	37
Figura 15. Disposición de las fuerzas pastilla – disco.....	41
Figura 16. Termómetro laser.....	47
Figura 17. Sistema de posicionamiento global o GPS.....	48
Figura 18. Cronómetro de precisión.....	49
Figura 19. Disposición del SEM.....	52
Figura 20. Proceso electrónico mediante SEM-EDS.....	53
Figura 21. Figura de una probeta plana del ensayo.....	57
Figura 22. Elemento en 3D, dibujado en un ambiente CAD.....	59
Figura 23. Disco de freno sometido a un análisis térmico.....	60
Figura 24. Elemento mecánico sometido a mallado.....	61
Figura 25. Biblioteca de materiales.....	62
Figura 26. Resultados de un análisis mecánico sobre un brazo de motor.....	63
Figura 27. Límites de trabajo del teorema de Von – Mises.....	64
Figura 28. Vehículo Grand Vitara SZ.....	66
Figura 29. Medidas disco Grand Vitara SZ 2.0 4x2.....	68
Figura 30. Probetas numeradas para los ensayos de tracción.....	70
Figura 31. Medidas de las 3 probetas, en mm.....	70
Figura 32. Probeta colocada con las mordazas a presión.....	72
Figura 33. Probeta después de haber llegado a su dislocación.....	72
Figura 34. Gráfica de fuerza de tracción vs. elongación (Probeta 1).....	73
Figura 35. Gráfica de fuerza de tracción vs. elongación de la probeta dos.....	74

Figura 36. Gráfica de fuerza de tracción vs. elongación de la probeta tres	75
Figura 37. Medidas y forma que tiene la probeta en mm	77
Figura 38. Superficie de la probeta lijada	77
Figura 39. Máquina de ensayo de dureza de Brinell AMSLER 2200	78
Figura 40. Bola de 10mm, colocada en la máquina de prueba de dureza	79
Figura 41. Puesta a punto de la máquina de ensayo de dureza de Brinell	79
Figura 42. Descripción de los ejes de aplicación	80
Figura 43. Fuerza establecida a 1500 Kgf	81
Figura 44. Aplicación de la fuerza sobre la probeta	82
Figura 45. Indentaciones resultantes, en orden de aplicación	82
Figura 46. Microscopio de medición digital CARL ZEISS	83
Figura 47. Observación de la circunferencia en el lente	83
Figura 48. Micrómetro anexo del microscopio digital	84
Figura 49. Medidas de la probeta normalizada para la prueba SEM-EDS	86
Figura 50. Probetas de trabajo para el ensayo de tracción	87
Figura 51. Probetas de ensayo químico listas para ingresar en el SEM	87
Figura 52. Microscopio electrónico de barrido Bruker X-Flash 6 30	88
Figura 53. Cámara de contención de probetas	98
Figura 54. Interfaz de control de la cámara de barrido	89
Figura 55. Probeta sometida a un aumento de 10000x	90
Figura 56. Área seleccionada donde se va a hacer el análisis químico	90
Figura 57. Número atómico Z del carbono	91
Figura 58. Primer aumento de alta resolución de la probeta 1	91
Figura 59. Segundo aumento de alta resolución de la probeta 1	92
Figura 60. Imagenografía de la muestra 1	92
Figura 61. Gráfica de la de la probeta 1 (excluyendo al Hierro)	93
Figura 62. Primer aumento de alta resolución de la probeta 2	93
Figura 63. Segundo aumento de alta resolución de la probeta 2	94
Figura 64. Gráfica de la probeta 2 (excluyendo al Hierro)	94
Figura 65. Imagenografía de la muestra 2	95
Figura 66. Trayectoria de precalentamiento del disco de freno	95
Figura 67. Suzuki Grand Vitara SZ, 5 puertas, con carga de 280Kg	96
Figura 68. Disco de freno del Suzuki Grand Vitara SZ	97
Figura 69. Ancho del disco de freno de 25,36mm, al 100% de espesor	97
Figura 70. Disco y pastillas montadas en el sistema de freno	98
Figura 71. Kilometraje inicial de la prueba, al 100% de espesor	98
Figura 72. Kilometraje final al 100% de espesor	99

Figura 73. Velocidad del vehículo al 100% de espesor	99
Figura 74. Toma de temperatura del disco de freno.....	100
Figura 75. Distancia de frenado en la prueba inicial con TH=25mm.	101
Figura 76. Tiempo de frenado con TH=25mm.....	102
Figura 77. Toma de medida del disco de freno al 96% de espesor	104
Figura 78. Kilometraje inicial del precalentamiento, al 96% de espesor	105
Figura 79. Kilometraje final del precalentamiento, al 96% de espesor	105
Figura 80. Toma de medida del disco de freno al 92% de espesor	108
Figura 81. Kilometraje inicial del precalentamiento al 92% de espesor	109
Figura 82. Kilometraje final del precalentamiento al 92% de espesor	109
Figura 83. Cotas más representativas del disco de freno de forma nominal	112
Figura 84. Ensamble de las pastillas con el disco y el neumático.	114
Figura 85. Medida del diámetro del pistón gobernador de la pastilla.....	114
Figura 86. Herramienta “Motion” del ambiente CAE.....	116
Figura 87. Escala de tiempo en la simulación	116
Figura 88. Velocidad de movimiento del disco de freno en la simulación.	117
Figura 89. Magnitud, ubicación y dirección de la fuerza de asiento	118
Figura 90. Medidas de la malla de cada una de las simulaciones.....	118
Figura 91. Mallado aplicado al ensamble del disco de freno	118
Figura 92. Selección del material del disco de freno	120
Figura 93. Especificaciones de la pastilla de frenos utilizada	120
Figura 94. Coeficiente de fricción en el ambiente CAE	121
Figura 95. Gráfica velocidad angular freno vs tiempo con TH=25mm	122
Figura 96. Gráfica velocidad angular vs tiempo con TH=24mm	123
Figura 97. Gráfica velocidad angular vs tiempo con TH=23mm	123
Figura 98. Gráfica distancia versus tiempo de frenado con TH=25mm	124
Figura 99. Gráfica distancia versus tiempo de frenado con TH=24mm	125
Figura 100. Gráfica distancia versus tiempo de frenado con TH=23mm	125
Figura 101. Desaceleración función al tiempo con TH=25mm	126
Figura 102. Desaceleración en función al tiempo con TH=24mm	130
Figura 103. Desaceleración en función al tiempo con TH=23mm	130
Figura 104. Distribución del factor de seguridad en el disco de freno	136
Figura 105. Gráfica temperatura vs. tiempo al 100% de espesor de trabajo	137
Figura 106. Gráfica temperatura vs. tiempo al 96% de espesor.....	139
Figura 107. Gráfica temperatura vs. tiempo al 92% de espesor.....	140
Figura 108. Gráfico de barras comparativo del tiempo de frenado	142
Figura 109. Diferencia relativa a la norma ECE R90.....	143

Figura 110. Gráfico de barras comparativo de la distancia de frenado.....	144
Figura 111. Diferencia relativa a la norma ECE R90	145
Figura 112. Comparativa entre los resultados de distancia de frenado	146
Figura 113. Comparativa entre los resultados de tiempo de frenado	146
Figura 114. Gráfico comparativo entre Von Misses y límite de tracción	148
Figura 115. Gráfico comparativo factor de seguridad.....	149
Figura 116. Gráfico de barras comparativo de la temperatura	150
Figura 117. Gráfico de barras comparativo de la temperatura	151
Figura 118. Gráfica comparativa entre resultados de temperatura.....	152
Figura 119. Desgaste en función al kilometraje del vehículo (IZQUIERDO).....	153
Figura 120. Desgaste en función al kilometraje del vehículo (DERECHO).....	154
Figura 121. Porcentaje comparativo de la vida útil (IZQUIERDO).....	154
Figura 122. Porcentaje comparativo de la vida útil (DERECHO).....	155
Figura 123. Comparativa de eficiencias de frenado	156

Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Relación entre espesores de discos de freno.....	37
Ecuación 2. Distancia de frenado	38
Ecuación 3. Determinación del tiempo de frenado.....	38
Ecuación 4. Desaceleración ocasionada por el sistema de frenado	38
Ecuación 5. Eficiencia de frenado	39
Ecuación 6. Determinación de la presión del émbolo sobre la pastilla.....	39
Ecuación 7. Valor del área del pistón controlador de la pastilla	40
Ecuación 8. Determinación de magnitud de la fuerza de contacto.....	40
Ecuación 9. Fuerza de rozamiento en función a la fuerza de corte.....	41
Ecuación 10. Temperatura del disco de freno	42
Ecuación 11. Energía de disipación del disco de freno.....	43
Ecuación 12. Calor de disipación del disco de freno.....	43
Ecuación 13. Distancia de frenado experimental según ECE R90.....	50
Ecuación 14. Tiempo de frenado experimental según ECE R90	51
Ecuación 15. Cálculo de la fuerza sobre la superficie de la probeta	54
Ecuación 16. Definición del diámetro aplicando promedio.....	55
Ecuación 17. Definición de dureza de Brinell.....	55
Ecuación 18. Determinación de σ_1 , σ_2 , σ_3 , según Von – Mises.....	64
Ecuación 19. Determinación del esfuerzo efectivo de Von – Misses	64
Ecuación 20. Factor de seguridad.....	65
Ecuación 21. Área transversal del núcleo de la probeta	71
Ecuación 22. Resistencia a la tracción	73
Ecuación 23. Definición de radio dinámico del neumático	118
Ecuación 24. Ecuación para definición de las RPM del disco de freno	119

Resumen

El proyecto de investigación, se basa, en el análisis mecánico y térmico del disco de freno de un vehículo Grand Vitara SZ, partiendo desde los estímulos tanto físicos como térmicos que influyen el funcionamiento del sistema de frenos conformados tanto por la pastilla como por el disco. Las características de estos dos componentes de estudio en cuestión, son tomadas, en función a manuales de la marca y modelo del vehículo, además de la definición mecánica del material del disco de freno en función a las pruebas de tracción NTE ISO 6506-1:2005 y de dureza de Brinell ISO 6892:1998. Para poder mejorar los resultados esperados en el estudio, se utiliza los ambientes, tanto CAD como CAE, con el objeto de analizar tanto la seguridad del disco de freno en condiciones de trabajo, como la temperatura, cuando el disco de freno se encuentra en 3 diferentes etapas de su vida: nuevo, semi usado, y en desgaste crítico. Finalmente se genera un estudio experimental con el vehículo a carga total, siguiendo una ruta de precalentamiento en la laguna de Yahuarcocha, y posteriores pruebas de frenado, con las 3 mismas condiciones de vida del disco de freno, utilizando como guía la normativa ECE R90.

Palabras clave:

- **VEHÍCULOS – SISTEMA DE FRENOS**
- **VEHÍCULOS – SEGURIDAD**
- **SISTEMA DE FRENOS – DISCO DE FRENO**
- **SISTEMA DE FRENOS – TEMPERATURA**

Abstract

The research project is based on the mechanical and thermal analysis of the brake disc of a Grand Vitara SZ vehicle, starting from both physical and thermal stimuli that influence the operation of the brake system made up of both the pad and the disc. The characteristics of these two components of the study in question are taken, based on manuals and studies previously carried out by them, in addition to the mechanical definition of the material of the brake disc based on the NTE ISO 6506-1 traction tests: 2005 and Brinell hardness ISO 6892: 1998. In order to improve the expected results in the study, the environments, both CAD and CAE, are used in order to analyze both the safety of the brake disc in working conditions, as well as the temperature, when the brake disc is at 3 different stages of its life: new, semi-used, and in critical wear. Finally, an experimental study is generated with the vehicle fully loaded, following a preheating route in the Yahuarcocha lagoon, and subsequent braking tests, with the same 3 life conditions of the brake disc, previously specified, using as a guide, the ECE R90 standard.

Keywords:

- **VEHICLES - BRAKING SYSTEM**
- **VEHICLES - SAFETY**
- **BRAKE SYSTEM - BRAKE DISC**
- **BRAKE SYSTEM - TEMPERATURE**

Capítulo I

1. Marco metodológico de la investigación

1.1. Antecedentes

La industria automotriz, en constante mejora, busca componentes de una alta durabilidad y vida útil, una de estos componentes son los discos de freno que forman parte de la gran variedad de automotores actuales ya sea que se apliquen en un solo par de ruedas o en las cuatro ruedas del automotor.

(Di Rado, Presta, & Divicenzi, 2016) manifiestan que “El frenado por fricción es sin duda, el elemento más importante en la consideración de las fuerzas necesarias para la detención de vehículos cuyo sistema de desplazamiento es a través de ruedas con neumáticos de caucho en contacto con la superficie de rodamiento, y que forman lo que se denomina interface rueda – carretera”. El efecto de fricción se da primordialmente frenando los ejes del vehículo por accionamiento del dispositivo correspondiente por parte del conductor, en concordancia con el sistema de frenos en función, a disco o tambor, y por intermedio de él a las ruedas y carretera.

(Luque, Álvarez, & Vera, 2004) aseguran que “En el estudio del comportamiento dinámico del neumático se van a analizar las diferentes fuerzas que actúan sobre éste y cómo va a ser su respuesta en función de diferentes factores operativos y de diseño. Las fuerzas que se analizan, aparecen en la interacción neumático-calzada como respuesta a las sollicitaciones del vehículo, son la fuerza longitudinal, transversal, vertical y el momento auto alineante”.

En el caso del sistema de frenado (García, Flores, & Espinel, 2020) afirman que “El sistema de frenado de un automóvil debe trabajar de forma segura y predecible en cualquier circunstancia, lo cual implica disponer de un nivel estable de fricción en cualquier condición de temperatura, humedad y salinidad del medio ambiente. Para un correcto diseño y operación de los discos de freno, es necesario considerar diferentes aspectos, tales como: la geometría, el tipo de material, la resistencia mecánica, la temperatura máxima, la deformación térmica, la resistencia al agrietamiento, entre otros”.

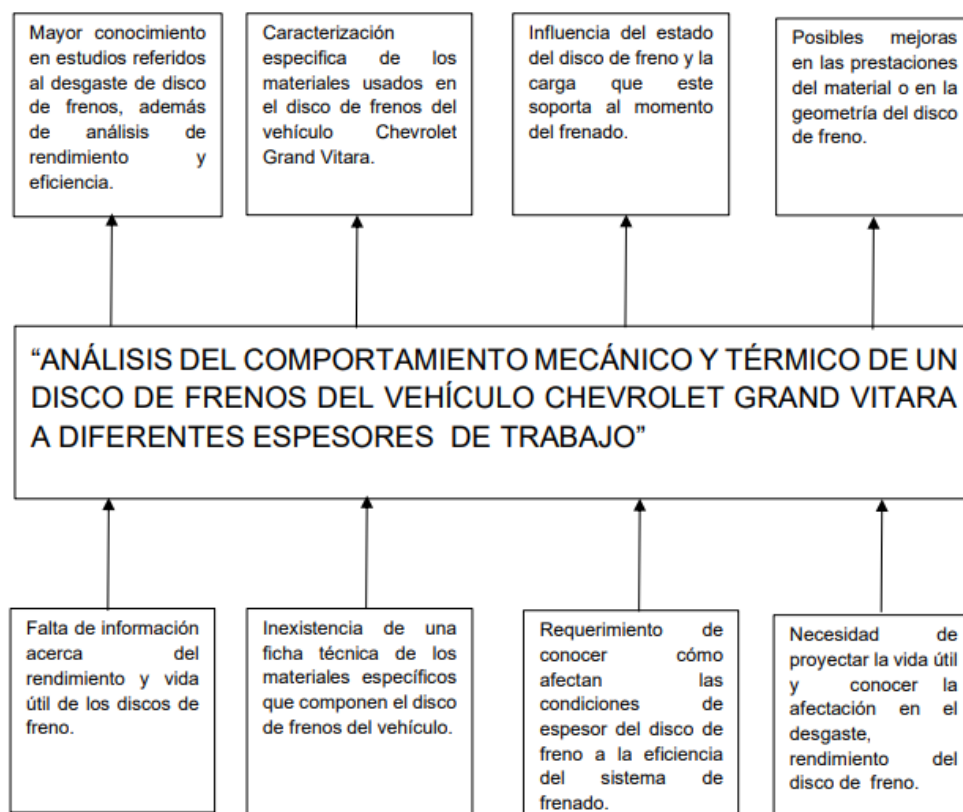
1.2. Planteamiento del Problema

El tema propuesto se realiza por la falta de estudios sobre el comportamiento, desgaste y eficiencia de discos de frenos en diferentes condiciones de espesor en el Ecuador, y con este estudio se pretende adquirir conocimientos respecto al tema de espesor y vida útil del disco de freno.

1.3. Árbol del planteamiento del problema

Figura 1

Árbol del planteamiento del problema



1.4. Descripción resumida del proyecto

El presente estudio se lo desarrolló, para determinar el comportamiento de un disco de frenos de acero modelo 08-17 294MM VENTILADO en el vehículo Chevrolet Grand Vitara a un estado de fábrica, a un desgaste del 5% y del 10% realizando ensayos destructivos, pruebas de medición y cuantificación de datos de la eficiencia del disco de frenos.

Bajo la circunstancia de que no existe una normativa ecuatoriana el análisis está fundamentado en la normativa europea (ECE R90), que determinan los

parámetros de pruebas, ensayos y requisitos en el Anexo 11 de la norma de acuerdo al tipo de disco y vehículo que se utilice.

Para demostrar la eficiencia de frenado se tomó de la ECE R90, el Anexo 11 de referente a ensayos de frenado y eficacia de los sistemas de frenado, la cual establece medición de tiempos de frenado partiendo de una velocidad inicial hasta una velocidad establecida.

Se realizó pruebas destructivas según lo especificado en el Anexo 11 de la normativa ECE R90 para determinar las propiedades mecánicas de los discos de freno según o especificado en la norma ISO 6892:1998; sobre resistencia a la tracción, la cual se aplicó en freno de disco, y tiene el principio de una fuerza para dar una tensión por unidad de área, expresada en mega pascales.

Otra de las pruebas en ensayos de disco de freno que se utilizó fue la ISO 6506-1:2005 sobre el método de ensayo para determinar la dureza Brinell medida con arreglo, la cual es aplicable en freno de disco y tiene como finalidad determinar la dureza del disco de freno.

Se obtuvo también la composición química del disco de freno que se van a ocupar bajo diferentes espesores, el análisis de la microestructura se caracterizará con arreglo a la norma ISO 945-1:2006 que abarca descripción de la composición de la matriz.

Con los datos obtenidos en los ensayos que determinan las propiedades químicas y mecánicas del disco se desarrolló la simulación del sistema de frenos, para realizar un análisis ingenieril más detallado de las zonas de trabajo críticas, durabilidad, rendimiento y vida útil del disco respecto a su espesor.

1.5. Justificación e importancia

En la mayoría de talleres en lo que respecta a discos de freno, no se tiene un conocimiento exacto acerca de cada cuanto tiempo se debe realizar un cambio de discos de freno, suelen hacerlo por kilometraje, aspecto opaco del disco, o por la formación de una cejilla en el borde, lo cual es erróneo ya que depende mucho del tipo de conducción que se efectúe en el vehículo, el tipo de forro que presenten las pastillas de frenado y la calidad de frenado que el usuario aplique al momento de desacelerar; las condiciones bajo las cuales se recomienda realizar el cambio de

discos de freno es cuando estos presentan algún tipo de grieta, rotura, deformación, llegan al límite de espesor establecido por el fabricante o han sufrido un daño térmico y se tornan de un color azulado.

De igual manera el realizar las pruebas de laboratorio, para determinar sus propiedades químicas y mecánicas, y las pruebas establecidas en la norma se podrá también evaluar la calidad del disco de freno utilizado, y así confirmar si el disco trabajará a la misma eficiencia que un disco en condición de fábrica.

De esta manera con este proyecto se busca determinar la eficiencia y vida útil del disco de freno a diferentes espesores para evidenciar si existe una variedad mayor en la eficacia al momento de frenar el vehículo, debido a la inexistencia de una norma y la falta de información existente en el Ecuador referente a esta temática, con los resultados obtenidos se levantará información necesaria para evitar el desecho anticipado de discos de freno que aporta a la contaminación ambiental que se vive actualmente en el planeta.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo General

Analizar la eficiencia, desgaste y rendimiento de los discos de frenos bajo diferentes espesores de trabajo del vehículo Chevrolet Grand Vitara, mediante pruebas, ensayos destructivos y no destructivos para determinar aspectos que determinen el rendimiento y la vida útil que puede tolerar el disco.

1.6.2. Objetivos Específicos

- Recopilar información técnica y teórica mediante Tomando de fuentes confiables como libros, bases digitales, normativas, manuales de procedimientos, manuales de mantenimiento para llevar a cabo el desarrollo de la investigación
- Realizar cálculos, mediciones y pruebas a ensayar al disco de frenos del vehículo Chevrolet Grand Vitara, tomando en cuenta el ambiente en donde se encuentran ubicados y las condiciones de trabajo a las que será sometido.
- Realizar ensayos de tracción y de dureza para determinar las propiedades mecánicas del disco. Desarrollar simulaciones dinámicas del disco de frenos

del vehículo Chevrolet Grand Vitara, mediante software CAE que permita observar y analizar las mayores concentraciones de esfuerzos, bajo condiciones de trabajo.

- Analizar los datos obtenidos en cuanto a las pruebas y caracterización de los discos de frenos y de esta manera determinar su desgaste, rendimiento, vida útil y eficiencia en cuanto a su funcionamiento.

1.7. Metas

- Determinación de eficiencia del disco de freno del vehículo Chevrolet Grand Vitara SZ en sus diferentes espesores ensayados a un ambiente y condiciones de trabajo específicas a las que será sometido para poder establecer su vida útil.
- Identificación de las propiedades específicas del material que se ocupa para la fabricación del disco, además de las propiedades 13 mecánicas que este posea, mediante pruebas de laboratorio.
- Determinar las mayores concentraciones de esfuerzos, bajo las condiciones de trabajo que puedan presentarse en el disco de frenos mediante simulación digital en software CAE.

1.8. Hipótesis

Las condiciones de espesor del disco de freno del vehículo Chevrolet Grand Vitara influyen directamente en el rendimiento, eficiencia y vida útil del sistema de freno.

1.9. Variables de investigación

En el presente Proyecto de investigación se han aplicado las variables dependientes como independientes.

- **Variables Independientes:**
Discos de freno del vehículo Chevrolet Grand Vitara
- **Variables Dependientes:**
Condiciones de espesores de trabajo que varían en el análisis de desgaste, rendimiento, eficiencia del disco de freno

Capítulo II

2. Marco teórico

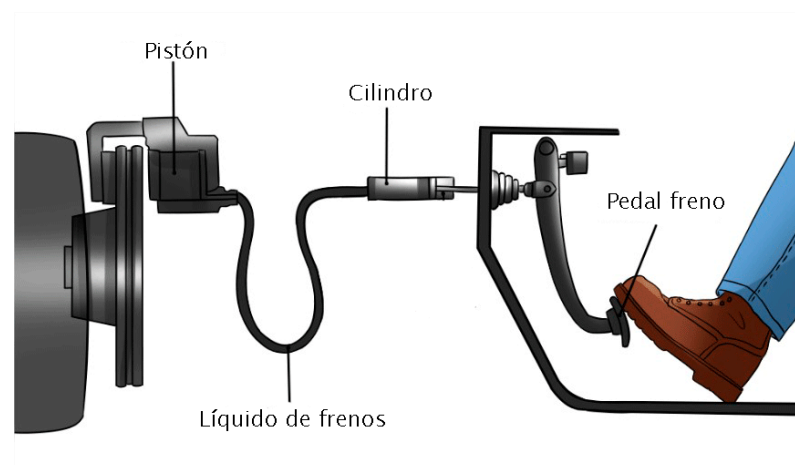
2.1. Sistema de frenos

“Es un dispositivo utilizado para detener o disminuir el movimiento de algún cuerpo, generalmente un eje, árbol o tambor. Los frenos son transformadores de energía, por lo cual pueden ser entendidos como una máquina, ya que transforman la energía cinética de un cuerpo en calor o trabajo y en este sentido pueden visualizarse como “extractores” de energía.” (Chiluisa & Pulluquitín, 2009).

“El sistema de frenado de un automóvil debe satisfacer un complejo conjunto de requerimientos, entre los cuales la seguridad es lo más importante.” (García, Acosta, & Solano, 2015)

Figura 2

Sistema de freno convencional



Nota: Sistema de frenos de manera resumida. Tomado de: (GETAUTO, 2017)

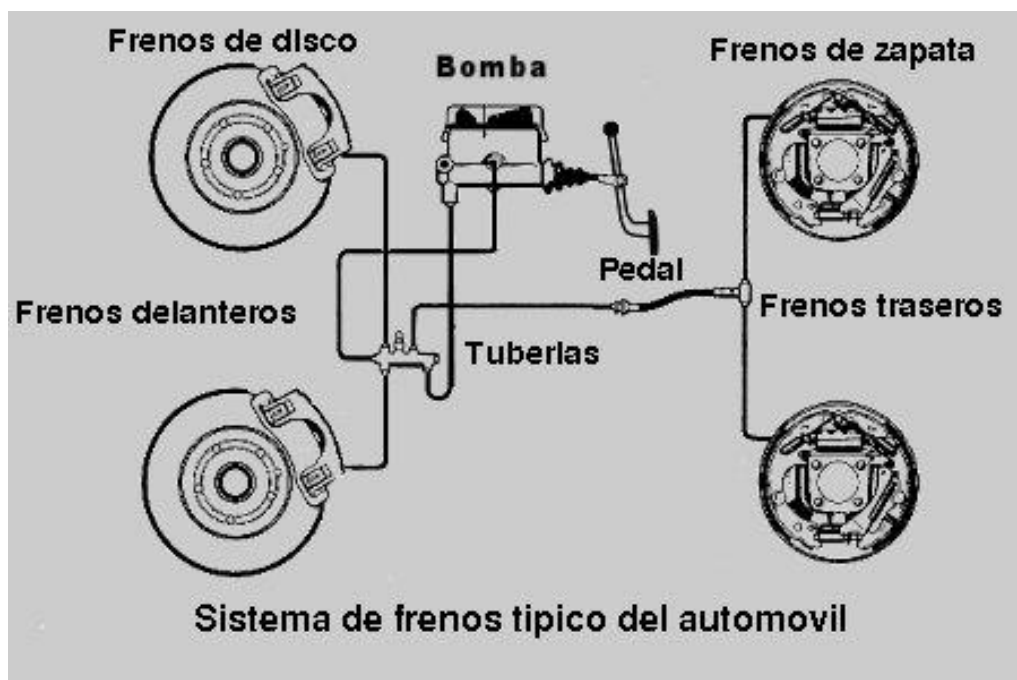
2.2. Tipos de sistema de frenos

Menciona (Landa, 2015) que “En la actualidad, los dos grandes sistemas que se utilizan en los conjuntos de sistemas de frenado son: frenos de disco (contracción externa) y frenos de tambor (contracción interna).”

Los sistemas de frenos que se utilizan en un vehículo, son mayoritariamente de accionamiento hidráulico, que, en resumen, funcionan de manera que, según (Molero, 2009) “la presión comunicada por el émbolo de un cilindro de mando se transmite, a través de un circuito, a los cilindros o bombines que controlan los órganos activos de los frenos.”

Figura 3

Sistema de frenos más comunes



Nota. Tomado de: (toyocostanoticia, 2014)

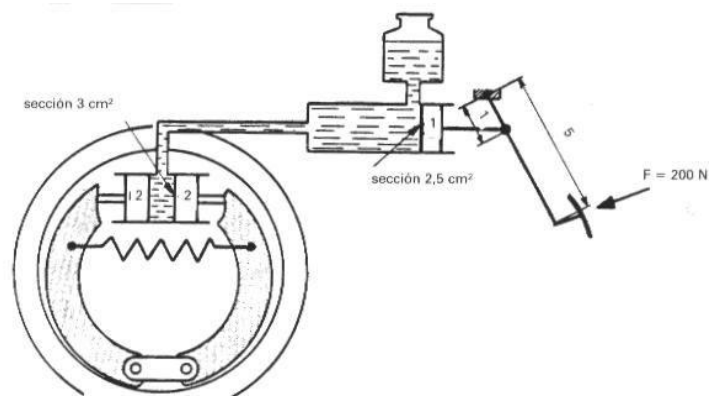
2.2.1. Frenos con asistencia hidráulica

Según (Tapia, Cabrera, & Lemus, 2019) “Los frenos hidráulicos aprovecha la acción multiplicadora del esfuerzo ejercido sobre un líquido, con esto la presión que se ejerce sobre un pistón que actúa sobre el líquido, es transmitida a otros pistones que accionan los frenos, con lo cual se logra la misma presión de frenado en los distintos elementos de fricción.”

Estos elementos de fricción o bien pastillas son comandadas por un pistón solidario al líquido hidráulico, que hace que exista rozamiento entre pastillas y el disco; o en un sistema de tambor, en el que, las piezas controladas, son las bases de las zapatas, expandiéndose para así generar rozamiento con el tambor.

Figura 4

Estructura básica de un sistema de freno hidráulico



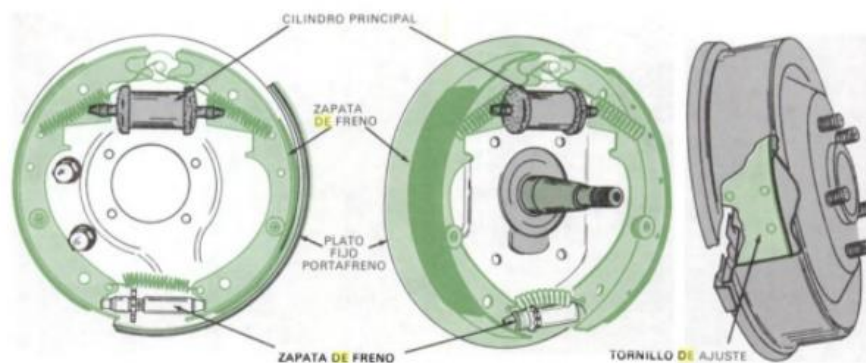
Nota. Tomado de: (TodoMecánica, 2005)

2.2.2. Frenos de tambor – zapata

Los frenos de tambor, son sistemas de freno en el que se fundamenta la expansión de un pistón hacia los elementos denominados como zapatas, con el objetivo de que según (Arroyo, 1996) “las mordazas quedan obligadas a expansionarse hasta el punto que llegan a tocar las paredes del tambor produciendo de esta forma un roce que hace que la rueda disminuya su velocidad”.

Figura 5

Componentes de un sistema de freno de tambor



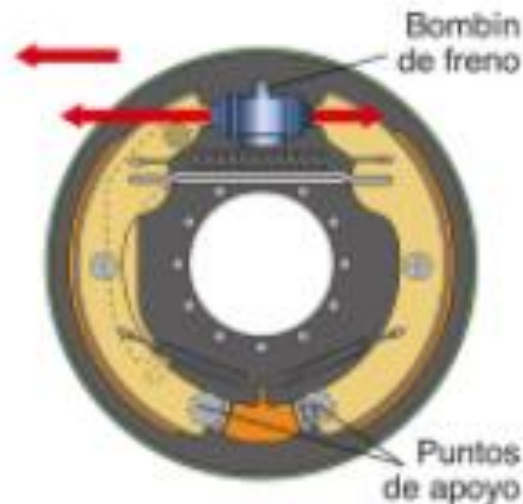
Nota. Tomado de: (Crouse, 1993)

De acuerdo con (Dominguez & Ruiz, 2018) “el tambor de freno se monta sobre el buje de la rueda y gira con la rueda. Cuando se activa el dispositivo de tensado, bombín de freno, se aprieta fuertemente las zapatas contra el tambor de

freno. A través de la fricción entre ambas superficies se frena el tambor y a su vez la rueda.”

Figura 6

Sistema de freno de tambor accionado



Nota. Tomado de: (Dominguez & Ruiz, 2018)

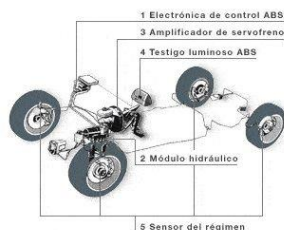
2.2.3. Sistema de frenado con asistencia hidráulica antibloqueo ABS

El sistema de frenado ABS, existe con el objeto de, según (Parera, 1993) “evitar el bloqueo de las ruedas al frenar y salvar así las peligrosas consecuencias de la pérdida de control sobre la dirección vehicular”, mediante la creación de dispositivos antibloqueo de ruedas. Estos dispositivos pueden controlar tanto a las mordazas de las pastillas, como al pistón de empuje de las zapatas, por medios mecánicos, hidráulicos o electrónicos.

El freno antibloqueo, según (Cartagena & Salvador, 2005) “está integrado y controlado por un módulo electrónico de control de frenos (Electronic Brake Control Module = EBCM) o también llamado ECU “unidad de control electrónico””.

Este módulo de control, también denominado centralita, básicamente, gobierna las electro válvulas de paso de presión del líquido hidráulico hacia los pistones comandados, de las mordazas del disco o las mordazas del tambor, de tal forma que, en una frecuencia de frenado, procedan a bloquear y liberar sucesivamente, la presión del líquido hidráulico, evitando así el descontrol del vehículo.

Figura 7
Sistema ABS de frenado



Nota. Tomado de: (AreaTecnología, 2021)

La frecuencia de frenado, en función a la velocidad que se moviliza el vehículo, según (Vazquez, y otros, 2012), se puede visualizar en la siguiente tabla:

Tabla 1
Frecuencia de frenado de un sistema ABS

Velocidad longitudinal del vehículo (Km/h)	Frecuencia de procesamiento (Hz)
1 – 19	4
20 – 49	8
50 – 79	16
80 – 119	32
120 o más	62

Nota. Tomado de: (Vazquez, y otros, 2012)

2.2.4. Sistema de frenos de pastilla - disco

Los sistemas de disco de freno, dentro de la industria automotriz, son bastante aceptados, debido a que, según (García, Flores, & Espinel, 2020) “en comparación con los frenos de tambor, pueden absorber más energía cinética al accionar el mecanismo de frenado, lo cual se convierte en una reducción de tiempo para la detención del vehículo.” (p.76), razón por la que es más utilizado dentro de la mayoría de vehículos en la actualidad.

Las pastillas son accionadas por un pistón propulsado por fuerza hidráulica que genera que el rozamiento entre pastilla y disco aumente o disminuya en función a la necesidad del usuario, generando calor.

“Dicho calor o energía térmica, es ocasionado cuando los elementos del freno de disco (pastillas y disco) en contacto para transformar la energía mecánica producida por el motor y transferida mediante los diversos mecanismos que componen el automóvil.” (García, Flores, & Espinel, 2020)

El calor que produce el sistema de disco de freno, es más eficientemente expulsado, debido a que se encuentra expuesto al ambiente, haciendo que la disipación de calor sea compartida con el aire frío exterior.

Figura 8
Sistema de freno de disco y pastilla



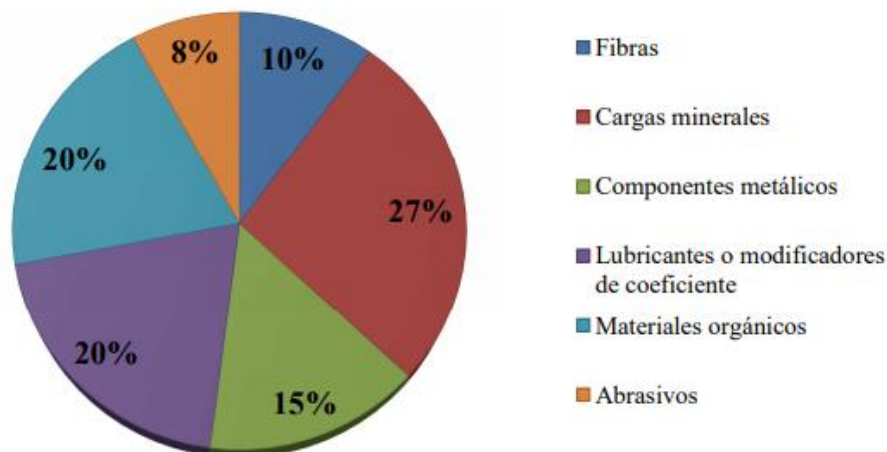
Nota. Tomado de: (Pascual, 2012)

El otro elemento importante de este sistema de freno, son las pastillas, que según (Borja, Fenoll, & Seco de Herrera, 2009) “son forros de fricción de una composición muy similar a la de los forros de un disco de embrague.

Poseen unas virutas de un componente metálico que tiene como misión proporcionar a la pastilla una mayor rigidez mecánica”.

Para lograr este objetivo, se los diseña con metales que genera fricción entre este elemento, y el disco, ocasionando el rozamiento necesario para que el sistema se detenga, adjuntamente con el neumático. Los materiales más usados son latón, cobre, bronce entre otros. (Vaca, 2014)

Figura 9
Composición de las pastillas de freno



Nota. Tomado de: (Velastegui, 2015)

Los códigos que permiten definir el coeficiente de rozamiento de una pastilla, vienen detallados, por la SAE (Society of Automotive Engineers), en la Tabla 2, definidos, cuando el vehículo va entre 30Km/h (mínimo) a 70km/h (máximo).

Tabla 2
Códigos y coeficientes de fricción de las pastillas de freno

Código	Coefficiente de fricción
Código CC	0.00 – 0.15
Código DD	0.15 – 0.25
Código EE	0.25 – 0.35
Código FF	0.35 – 0.45
Código GG	0.45 – 0.55
Código HH	0.55 y mayor
Código ZZ	Sin Calificación

Nota. Tomado de: (SAE, 2019)

El código de la pastilla, puede ser encontrado en la parte trasera del mismo, de manera que el código se presenta de manera genérica como: UN XXX-XX.

A. Partes del disco de freno

a.1. Superficie de fricción: “Es la superficie en la cual tiene lugar la acción de fricción entre las pastillas y el disco.” (Mecánica de autos, 2014)

Esta superficie es la que se encarga de receptor la energía calorífica resultante, que es transformada de la energía cinemática por acción de frenado.

a.2. Canal de enfriamiento: Es el espacio vacío que existe entre discos de freno, (en el caso de los ventilados), que permite el paso del aire, con el objetivo de retirar calor del sistema de freno, por convección.

a.3. Ranura Térmica: Es una superficie que separa, la superficie de fricción, con la superficie de adaptación, con el objeto de no transferir calor al neumático.

a.4. Superficie de adaptación: Parte del disco de freno que acopla la rueda del vehículo con el disco de freno. “Torneado con tolerancias de tipo OE; característica decisiva para el montaje preciso” (Textar Brake Technology, 2016)

Figura 10

Partes del disco de freno



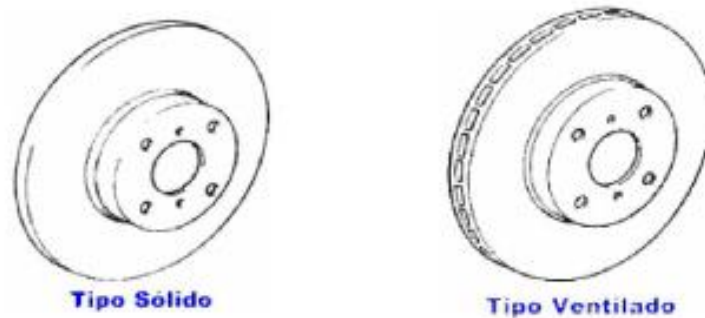
Nota. Tomado de: (Textar Brake Technology, 2016)

B. Tipos de disco de freno

Los tipos de disco de freno, son divididos, en función a su geometría y su número de superficies de fricción unitarios, cambiando, así su forma de disipación de calor.

Según (Medina, 2020) “Existen dos tipos básicos de discos de freno:

- Discos no ventilados, que son macizos.
- Discos ventilados, que tienen orificios en su interior para disipar el calor”

Figura 11*Tipos de disco de freno**Nota.* Tomado de: (Chiluisa & Pulluquitín, 2009)**b.1. Discos de freno ventilados**

El disco ventilado es la composición de dos pistas separadas por aletas en su interior. Estas aletas garantizan la cohesión del disco permitiendo el paso de aire por su interior. Gracias a estas aletas, el enfriamiento del disco no solo se produce en la superficie exterior del disco (como sucede en los discos sólidos) sino que además se produce su enfriamiento por el interior. (Vaca, 2014)

Figura 12*Disco de freno ventilado**Nota.* Tomado de: (Arroyo, 1996)**b.2. Disco de freno no ventilados**

Los discos de freno no ventilados o denominados macizos, son, de acuerdo a (Gusmán, Quimbíta, & Quishpe, 2018) “una pieza sólida de metal, mediante la fricción de las pastillas es capaz de detener el vehículo”.

La diferencia entre el disco de freno no ventilado, con el ventilado es que estos últimos, llevan ventilación interna que permite una disipación del calor de manera más efectiva y una respuesta de frenado mejor. (Gusmán, Quimbita, & Quishpe, 2018)

Figura 13

Disco de freno no ventilado o macizo



Nota. Tomado de: (Sánchez S. , 2018)

C. Materiales del disco de freno

Según (Sánchez S. , 2018) “existen 3 grupos principales para clasificar los discos de freno que se encuentran actualmente en el mercado. Estos son:

- **Carbocerámicos:** compuestos de carburo de silicio, obtenido a partir de fibras de Poliacrilonitrilo y resinas fenólicas, pirolizadas y tratadas con vapor de silicio. Con una durabilidad de hasta 300.000 km, tienen un peso alrededor de 5-6Kg.
- **Co-moldeados y bimateriales:** compuestos de aluminio en la campana y fundición de hierro en el cuerpo del rotor, su peso está en torno a los 10kg. Su duración, en un uso normal, es similar a los discos fabricados completamente de fundición, pero con un peso inferior.
- Y los fabricados en su totalidad de fundición de hierro, cuyo peso oscila entre los 12-14 kg y su vida útil está en torno a los 60.000-80.000 km.”

Los discos de que son utilizados mayormente en el mercado, están formados por un 93,75% de hierro, y según (CEPE, 2012) estos elementos deben cumplir las siguientes condiciones de aleación para poder ser considerados aptos para su uso:

Tabla 3
Requisitos metalúrgicos de los discos de freno

	Norma para el ensayo	Subgrupo 1 Fundición gris DIN EN 1561 EN-GJL-200	Subgrupo 2 Fundición gris de alto contenido en carbono EN-GJL-150	Subgrupo 3 Fundición aleada de alto contenido en carbono	Subgrupo 4 Fundición no aleada de alto contenido en carbono
Contenido en carbono (%)		3,20-3,60	3,60-3,90	3,55-3,90	3,60-3,90
Contenido en silicio (%)		1,70-2,30	1,60-2,20	1,60-2,20	1,60-2,20
Contenido en manganeso (%)		Mín. 0,40	Mín. 0,40	Mín. 0,40	Mín. 0,40
Contenido en cromo (%)		Máx. 0,35	Máx. 0,35	0,30-0,60	Máx. 0,25
Contenido en cobre (%)		---	0,30-0,70	0,30-0,70	Máx. 0,40
Dureza Brinell	ISO 6506-1:2005	190-248	160-210	180-230	160-200
Resistencia a la tracción (N/mm ²)	ISO 6892:1998	Mín. 220	Mín. 160	Mín. 170	Mín. 150

Nota. Tomado de: (CEPE, 2012)

En la tabla se puede visualizar los materiales presentes en un disco de freno (sin incluir al Hierro), en porcentajes masa/masa divididos en 4 subgrupos de fundiciones, además de definir los rangos de dureza de Brinell, y resistencia a la tracción, aceptables para un disco de freno.

Para poder determinar los parámetros metalúrgicos, de forma experimental, en dureza de Brinell, es necesario ejecutar el ensayo según ISO 6506-1:2005, y en el caso de la resistencia a la tracción, se desarrolla el ensayo según ISO 6892:1998.

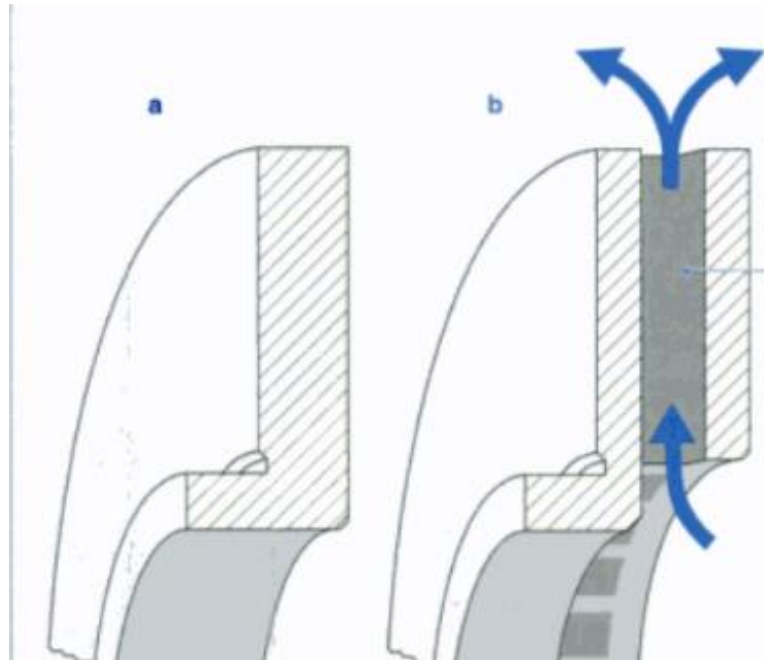
2.3. Parámetros geométricos, dinámicos y térmicos del disco de freno

2.3.1. Espesor del disco de freno

Es la medida axial que se mide desde un extremo de un disco de freno a otro (en el caso de los discos de freno ventilados), y para los discos sólidos es el espesor del elemento sólido, entre zonas de rozamiento.

Figura 14

Espesores axiales (a) disco solido (b) disco ventilado



Nota. Tomado de: (Robert Bosch GmbH, 2003)

Este valor es necesario dentro de las especificaciones técnicas, debido a que determina la vida de un disco de freno. La medida toma el nombre (TH), el espesor nominal, que es el espesor con el que sale de fábrica, y se lo nombra (TH_{nom}), y el valor mínimo del ancho del disco de freno se lo denomina (TH_{min}).

Para que un disco de freno tenga una utilidad de trabajo, su espesor siempre debe ser mayor al (TH_{min}). La relación entre anchos, viene definido en la siguiente fórmula.

Ecuación 1

Relación entre espesores de discos de freno

$$\%útil = \frac{TH}{TH_{nom}}$$

2.3.2. Distancia de frenado

La distancia del frenado es la distancia necesaria para que un vehículo que se mueve con velocidad inicial se detenga por completo por acción de una aceleración constante o variable. Como la aceleración durante el frenado produce

una disminución de la velocidad suele denominarse también desaceleración. (Arredondo, Bermúdez, & Prado, 2019)

Según (Chico & Terán, 2019) “para encontrar este valor es necesario saber la masa del vehículo (m), la fuerza de factor de roce sobre las pastillas (Fr), la velocidad a la que se comienza a frenar el vehículo (Vi), y la velocidad final que llega el vehículo al final del frenado (Vf).”

Ecuación 2

Distancia de frenado

$$l = \frac{1}{2} * \frac{m}{g * Fr} * (Vi^2 - Vf^2)$$

2.3.3. Tiempo de frenado

Es un valor que determina el tiempo que el vehículo demora en detenerse, desde que el sistema de frenos es activado, para establecer este valor es obligatorio saber la velocidad en la que comienza la acción de frenado (Vi), y la desaceleración producida por el mismo (a).

Ecuación 3

Determinación del tiempo de frenado

$$t_{fren} = 0,28 * \frac{Vi}{a}$$

2.3.4. Desaceleración de frenado

La desaceleración del vehículo se produce cuando se acciona el mando del freno y este a su vez comienza el proceso de accionamiento de las pastillas o zapatas. (Chico & Terán, 2019)

Para determinar este valor es necesario conocer la velocidad a la que empieza el vehículo a frenar (Vi) y el tiempo de frenado (t_{fren}).

Ecuación 4

Desaceleración ocasionada por el sistema de frenado

$$a = \frac{Vi}{t_{fren}}$$

2.3.5. Eficiencia de frenado

La eficiencia de frenado, es el valor que determina, el porcentaje de desaceleración que genera el sistema, en relación a la aceleración de la gravedad. Para poder determinarla, es necesario aplicar la siguiente ecuación:

Ecuación 5.

Eficiencia de frenado

$$\eta = \frac{a}{g} * 100$$

Donde:

η : Es la eficiencia de frenado (%)

a : La desaceleración generada por el sistema de frenado (m/s²)

g : Valor de la aceleración de la gravedad (m/s²)

2.3.6. Presión de frenado

Es la cantidad de presión que ejecuta, el sistema de frenado, sobre el émbolo gobernador de la pastilla, de tal manera que este ejerce una fuerza de asiento sobre el disco de freno.

Según la normativa (CEPE, 2012) la presión del émbolo sobre la pastilla de freno viene determinado por la siguiente formula:

Ecuación 6

Determinación de la presión del émbolo sobre la pastilla

$$P_c = \frac{M_d}{0,57 * R_{disco} * A_k}$$

Donde:

P_c : Es la presión entre el émbolo del disco con la pastilla (Pa)

M_d : Valor del momento en función del área del émbolo (Nm)

A_k : Área del pistón (cm²)

R_{disco} : Radio del disco de freno (cm)

Como el émbolo controlador de la pastilla es de forma circular, el área que este cubre, es determinado por la siguiente fórmula:

Ecuación 7

Valor del área del pistón controlador de la pastilla

$$A_k = \pi * \frac{D_k^2}{4}$$

Donde (D_k) es el diámetro del pistón del sistema de freno pastilla, disco de freno.

El momento (M_d), es el par que genera el contacto del émbolo sobre la pastilla, y por secuencia, es transferido al disco de freno. Para definir este valor, se debe conocer el área de contacto entre la pastilla y el pistón hidráulico de control (A_k).

Tabla 4

Selección del momento en función al área del pistón

Condición	Valor seleccionado del momento del disco (M_d)
$A_k \leq 18,1cm^2$	150 Nm
$A_k > 18,1cm^2$	300 Nm

Nota. Tomado de: (CEPE, 2012)

2.3.7. Fuerza de contacto

La fuerza de contacto, es la magnitud normal que se genera, debido al asentamiento de la superficie de la pastilla, que ejerce sobre el disco de freno. Para determinar este valor, es requerido determinar la presión de frenado (P_c) y el área de contacto entre la pastilla y el émbolo (A_k).

Ecuación 8

Determinación de magnitud de la fuerza de contacto

$$F_c = A_k * P_c$$

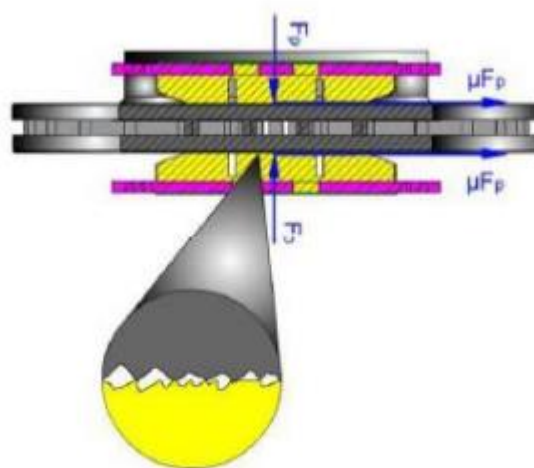
2.3.8. Fuerza de rozamiento

Según (Velastegui, 2015) la fricción es el “efecto que proviene de la existencia de fueras tangenciales que aparecen entre dos superficies sólidas en

contacto cuando permanecen unidas por la existencia de esfuerzos normales al mismo.”

En el caso del sistema de la pastilla y el disco de freno, la fuerza tangencial es el movimiento propio del disco de freno, y los esfuerzos normales del mismo, son las fuerzas de contacto generadas por el asiento de la superficie de la pastilla sobre el disco.

Figura 15
Disposición de las fuerzas pastilla – disco



Nota. Tomado de: (Venegas, 2012)

Para poder dar una magnitud a esta fuerza, es necesario saber el valor de la fuerza de contacto (F_c), y el coeficiente de rozamiento generado entre la pastilla y el disco de freno (μ_D), este valor se lo puede encontrar en la Tabla 2.

Ecuación 9
Fuerza de rozamiento en función a la fuerza de corte

$$Fr = \mu_D * F_c$$

2.3.9. Temperatura del disco de freno

La temperatura de equilibrio del freno depende de la entrada de calor (proporcional al peso del vehículo, velocidad inicial y frecuencia de parada) y la magnitud de la disipación térmica del freno. El calor se pierde por la conducción del disco y pastillas, más convección y radiación de los alrededores. Haciendo un

balance energético para el flujo de calor total se obtiene la temperatura en el disco de freno. (Chico & Terán, 2019)

Ecuación 10

Temperatura del disco de freno

$$T = \frac{M_d * \omega * t_{fren} + m_D * c_d * T_0 + h * A_C * T_{amb}}{m_D * c_d + h * A_C}$$

Donde:

M_d: momento generado por la pastilla sobre el disco

ω: velocidad angular del disco de freno

t_{fren}: tiempo de frenado

m_d: masa del disco de freno

c_d: capacidad calorífica del disco de freno

T₀: temperatura inicial del disco de freno

h: coeficiente de convección del disco de freno

A_c: área de la pastilla

T_{amb}: Temperatura ambiente sobre el que se desarrolla el frenado

Según (Venegas, 2012), las propiedades termo físicas del disco de freno vienen detalladas en la siguiente tabla, las que detallan la interccion que existe entre un disco de freno que es sometido a un nivel de calor propio para su composición.

Tabla 5

Propiedades termo físicas del disco de freno

Propiedades	Valores mínimos	Valores máximos	Unidades
Punto de fusión	1.4e3	1.65e3	K
Temperatura máxima de servicio	623	723	K
Temperatura mínima de servicio	123	223	K
Conductividad térmica	42	48	W/m°C
Capacidad de calor específico	460	505	J/Kg°C
Coefficiente de expansión térmica	11	13	μstrain/°C
Calor latente de fusión	270	275	kJ/Kg

Nota. Tomado de: (Venegas, 2012)

2.3.10. Energía de disipación del disco de freno

El frenado se produce gracias al rozamiento entre las pastillas y los discos de freno, transformando la energía cinética del vehículo en calor. (García, Echavez, & Flórez, 2018)

Para poder calcular el calor receptado por el disco de freno, se debe conocer el factor de corrección para masas rodantes (i) el cual según (Limpert, 1999) es de 1,05, siempre y cuando el análisis sea hecho en un vehículo turismo convencional, además de la masa del vehículo (m_v), el porcentaje de distribución de masa que recibe el eje delantero ($\%M$), y la velocidad a la que comienza el frenado (V_i).

Ecuación 11

Energía de disipación del disco de freno

$$E_d = 0,9 * \%M * m_v * i * \frac{V_i^2 - V_f^2}{4}$$

2.3.11. Calor distribuido en el disco de freno

El calor generado por efecto del frenado, es distribuido en la superficie de fricción, y para determinarla, es necesario saber la energía de disipación desarrollada por el disco de freno (E_d), el área que cubre la pastilla (A_c), y el tiempo de frenado (t_{fren}).

Ecuación 12

Calor de disipación del disco de freno

$$q_{total} = \frac{E_d}{A_c * t_{fren}}$$

Según (García, Echavez, & Flórez, 2018) “Ésta es la potencia por unidad de área que se produce entre el disco y la pastilla en el freno.”

2.4. Norma ECE R90

Esta norma, fue diseñada por la Comisión Económica para Europa de la Naciones Unidas, con el objetivo de normalizar las pruebas para la homologación de

conjuntos de forros de freno (pastillas) de disco y de tambor para vehículos de motor de diferentes denominaciones.

La normativa se divide en Definiciones, Documentación legal, Descripción de Dimensiones tanto de pastillas, de discos de freno, como de tambores y zapatas.

La ventaja mayoritaria que tiene la normativa es que los procedimientos de aplicación son factibles para todas las personas que posean un vehículo, pero mientras más tecnificado sea el operario, la normativa asegura que las pruebas van a ser más exactas, dándose la opción de utilizar un dinamómetro aplicado (laboratorio).

Las pruebas se dividen en función a la categoría a la que pertenece cada vehículo, según la normativa de la Unión Europea en categorías M y N:

Tabla 6

Categorías M y N según la organización de la UE

Categoría por criterios de homologación	Descripción	Clasificación por criterios de construcción
Categoría M	Vehículos de motor concebidos y fabricados principalmente para el transporte de personas y equipaje (Reglamento UE 67 8/2011)	
Categoría M1	Vehículos que posean, como tope, ocho asientos incluyendo la del conductor. Notándose la ausencia del espacio de viajeros que vayan parados. El conductor solo poseerá un lugar de conducción.	10
Categoría M2	Vehículos que posean, más de ocho asientos incluyendo la del conductor y que su masa supere las 5 toneladas. Pudiendo poseer, además, espacio para ocupantes a pie.	11, 12, 13, 14
Categoría M3	Vehículos que posean, más de ocho asientos incluyendo la del conductor y que su masa supere las 5	12, 13, 14, 16

Categoría por criterios de homologación	Descripción	Clasificación por criterios de construcción
	toneladas. Pudiendo poseer, además, espacio para ocupantes a pie.	
Categoría N	Vehículos de motor concebidos y fabricados principalmente para el transporte de mercancías	
Categoría N1	Vehículos dentro de la categoría N, que su masa máxima no sea superior a la de 3,5 toneladas	20, 23, 24
Categoría N2	Vehículos de esta categoría que su masa sea superior a las 3,5 toneladas, pero no a las 12 toneladas	21, 23, 25
Categoría N3	Vehículos que su masa sea superior a las 12 toneladas	22, 23, 26

Nota. Tomado de: (Canós, 2015)

Como se puede observar, dentro de la Tabla 6. existen 3 columnas, que son definidas en valores preestablecidos, la primera columna es la categoría propuesta por la normativa ECE R90.

La segunda son las características que toman los vehículos en función de peso, los intervalos en los que estos están predispuestos, y finalmente, se entabla el número de incisos dentro de la normativa, que van a ser aplicados, para poder ejecutarla focalizado para discos de freno.

Primeramente, se procede a tomar la autorización por parte de los fabricantes, en este caso, los importadores, con el objeto de dar a conocer la necesidad de ejecutar las pruebas de manera legal sin que haya conflictos por cuestión de patentes.

Con la autorización firmada, por parte de los importadores de las autopartes, se procede a certificar que los elementos a utilizar, son óptimos para las pruebas descritas en la normativa, y una vez definido al vehículo, en su categoría, se procede a seguir de manera ordenada y sucesiva los procedimientos establecidos en esa sección.

Una acotación importante, es según dice (CEPE, 2012): “Los conjuntos de forro de freno de origen utilizados para los ensayos comparativos y ya instalados en el vehículo de ensayo pueden utilizarse a condición de que estén en buenas condiciones y no se hayan desgastado más de un 20 % con respecto al grosor inicial. No deben tener daños, grietas, corrosión excesiva o signos de recalentamiento.”, sobre todo con el objeto de precautelar la seguridad de los pasajeros.

Ya en las pruebas, se procede a recorrer 50 km de manera de conducción normal generando una sucesiva frenada, con el objetivo de dar la temperatura inicial de funcionamiento del sistema de frenado, que debe estar entre los rangos de 250°C a 500°C.

Una vez finalizado con el precalentamiento, se continua con el punto 1.1.2.3. del anexo 3, donde dice que se procederá a alcanzar una velocidad de 70 km/h y se generará el frenado progresivo hasta que el vehículo se detenga, con el motor desembragado, con la finalidad del estudio de uso en casos extremos, se requiere tener una carga total máxima de uso, de 5 personas en el vehículo o simular el peso de las mismas (500 lb mínimo o 226,79 Kg).

Las velocidades de inicio son tomadas en función a:

Tabla 7

Velocidades de pruebas de los vehículos en función a su categoría

Categoría de vehículo	Velocidad de ensayo en Km/h	
	Eje Delantero	Eje trasero
M1	70	45
M2	50	40
N1	65	50

Nota. Tomado de: (CEPE, 2012)

2.4.1. Pruebas de temperatura según ECE R90

Las pruebas, según la normativa, deben hacerse 10 veces sobre el sistema, de tal manera que el disco alcance el límite de temperatura aceptable, verificando si

este está en el rango o sobrepasa el mismo, es imperativo tomar las medidas con un termómetro laser digital, apuntando al disco, y anotando los valores que este defina.

Figura 16
Termómetro laser



Nota. Tomado de: (Amazon, 2020)

El último punto de la normativa es la de completar y verificar la siguiente tabla que especifica: (CEPE, 2012)

Tabla 8
Tabla de resultados de las pruebas después de cada frenado

Parámetro	Eje delantero		Eje trasero
	Eje delantero	Freno de disco	Freno de tambor
Número de paradas por ciclo	10	10	10
Velocidad al inicio del frenado (km/h)	70	70	45
Velocidad al final del frenado (km/h)	0	0	0
Nivel de desaceleración	0,4g	0,4g	0,4g
Presión máxima (kpa)	16000	16000	10000
Temperatura inicial 1 (°C)	<100	<100	<100
Temperatura inicial 2 (°C)	<215	<215	<151
Temperatura inicial 3 (°C)	<283	<283	<181
Temperatura inicial 4 (°C)	<330	<330	<202

Parámetro	Eje delantero	Freno de disco	Freno de tambor
Temperatura inicial 5 (°C)	<367	<367	<219
Temperatura inicial 6 (°C)	<398	<398	<232
Temperatura inicial 7 (°C)	<423	<423	<244
Temperatura inicial 8 (°C)	<446	<446	<254
Temperatura inicial 9 (°C)	<465	<465	<262
Temperatura inicial 10 (°C)	<483	<483	<270
Número de ciclos	1	1	1

Nota. Tomado de: (CEPE, 2012)

2.4.2. Pruebas de distancia y tiempo de frenado según ECE R90

La distancia de frenado, según la normativa ECE R90, es la longitud total que el vehículo desarrolla, cuando este no tiene tracción y se cumple cuando se acciona el sistema de frenado, hasta la detención total del vehículo.

Mientras que el tiempo de frenado es el valor de tiempo que se demora el vehículo en detenerse. Para definir la magnitud de la distancia de frenado, es necesario, tener un elemento que permita determinar distancias de manera exacta, recomendado la normativa, utilizar un sistema de posicionamiento global o GPS.

Figura 17

Sistema de posicionamiento global o GPS



Nota. Tomado de: (Amazon Inc., 2021)

La prueba empieza cuando el vehículo llega a la velocidad de prueba según la categoría del mismo, y el eje estudiado, visible en la Tabla 7. Una vez llegada a esa velocidad, el vehículo tiene que quedar desembragado, y únicamente comandado por el sistema de freno, generando desaceleraciones sucesivas hasta la detención total del vehículo. Mientras se hace lo anteriormente mencionado, con un cronómetro de precisión, se toma el tiempo en el que el automotor se detuvo.

Figura 18
Cronómetro de precisión



Posteriormente, la normativa ECE R90, define que se hacen 10 medidas del mismo, tomando en cuenta también el número total de pulsaciones que se hicieron al pedal de freno, finalmente llenando la siguiente tabla.

Tabla 9
Tabla resultante del ensayo de distancia y tiempo de frenado

Parámetro	Freno de disco	Eje delantero
Número de paradas por ciclo	10	10
Velocidad al inicio del frenado (km/h)	70	45
Velocidad al final del frenado (km/h)	0	0
Nivel de desaceleración	0,4g	0,4g
Número de pulsaciones	>10	>10
		Tiempo de frenado (s)
Distancia de frenado 1 (m)	<247,51	<25,5
Distancia de frenado 2(m)	<244,123	<25,1

Parámetro	Freno de disco	Tiempo de frenado (s)
Distancia de frenado 3 (m)	<243,112	<25
Distancia de frenado 4 (m)	<240,231	<24,9
Distancia de frenado 5 (m)	<239,02	<24,7
Distancia de frenado 6 (m)	<238,05	<24,5
Distancia de frenado 7 (m)	<237,806	<24,1
Distancia de frenado 8 (m)	<235,032	<24
Distancia de frenado 9 (m)	<234,16	<23,8
Distancia de frenado 10 (m)	<231,24	<23,5
Número de ciclos	1	1

Nota. Tomado de: (CEPE, 2012)

Una vez definida la distancia y el tiempo del experimento, la normativa establece que para definir el valor real de distancia y tiempo de frenado se aplican las siguientes formulas:

Ecuación 13

Distancia de frenado experimental según ECE R90

$$d_{frenado} = \frac{d_{experimental}}{\#pulsaciones}$$

Donde:

$d_{frenado}$: Es la distancia de frenado real (m)

$d_{experimental}$: Es la distancia de frenado experimental (m)

$\#pulsaciones$: Es el valor total de pulsaciones que se hicieron hasta que el vehiculo se detenga

Ecuación 14

Tiempo de frenado experimental según ECE R90

$$t_{frenado} = \frac{t_{experimental}}{\#pulsaciones}$$

Donde:

$t_{frenado}$: Es el tiempo de frenado real (m)

$t_{experimental}$: Es el tiempo de frenado experimental (m)

$\#pulsaciones$: Es el valor total de pulsaciones que se hicieron hasta que el vehículo se detenga

2.5. Ensayos metalúrgicos y químicos

Un ensayo se basa en la metodología de la experimentación para poder determinar características propias de un fenómeno, simulando un detonante en un ambiente controlado, para la recolección de datos y posterior análisis de la conformación de los mismos.

Dentro del ambiente controlado, el investigador, tiene como objetivo replicar los fenómenos que el objeto de estudio tiene interacción, bajo qué condiciones funciona, cuales son otros objetos con los que interacciona y a qué nivel surgen las mencionadas relaciones.

En resumen, generar los aspectos necesarios de un fenómeno exterior en un laboratorio.

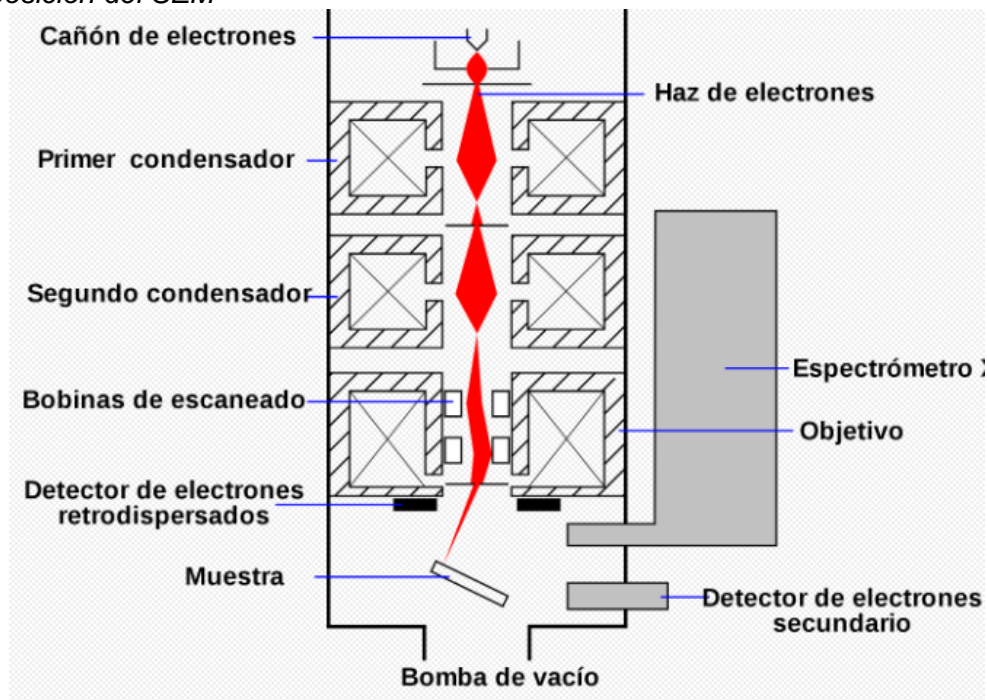
2.5.1. Procedimiento SEM - EDS

El proceso químico, es con el objetivo, de ver tanto la composición química, como la composición de la microestructura de un compuesto.

El Microscopio Electrónico de Barrido, o SEM, es un microscopio capaz de generar imágenes de altísima resolución, mediante el uso de excitación de electrones dentro del componente a estudiar.

Una vez predefinida la excitación, se procede a visualizar la longitud de onda que es proyectada sobre el cañón, de tal manera que se enfocan dentro de un lente condensador.

Figura 19
Disposición del SEM



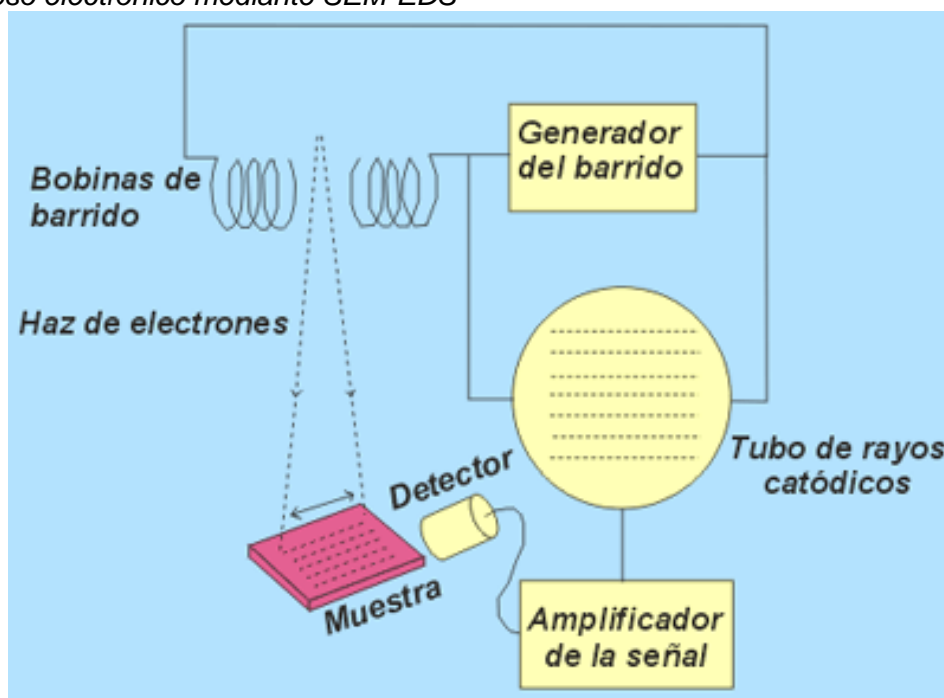
Nota. Tomado de: (Lorca, 2007)

Las muestras metálicas, son dadas una forma o bien cilíndrica, o bien cubica, de un diámetro de 1cm o lado de 1cm respectivamente; de tal manera que esta se pueda colocar en la porta probetas, a la que se coloca una capa de cinta de carbono de doble faz. Dentro de la cámara de interacción, se procede a retirar todo gas exterior que no tenga relación con el estudio, de tal manera que los resultados se enfoquen solamente en la muestra.

A la probeta metálica, se le tiene que someter a un voltaje capaz de generar un movimiento electrónico, mediante la introducción de un diferencial de voltaje, establecido de 25 kV a 30kV.

Una vez hecho este proceso, se utiliza un detector de electrones retro dispersados o EDS, con el objetivo de determinar, dentro de 16 puntos seleccionados por el usuario, la composición química del elemento, en función al número atómico, determinado por la cantidad de electrones en la superficie de cada componente.

Figura 20
Proceso electrónico mediante SEM-EDS



Nota. Tomado de: (Ubillus, 2003)

2.5.2. Norma NTE ISO 6506-1:2005

Según (INEN, 2014) “La dureza Brinell es proporcional al cociente obtenido de dividir la fuerza de ensayo para el área de la superficie curva de la indentación. Se supone que la indentación retiene la forma de la esfera y el área de su superficie se calcula a partir del diámetro medio de la indentación y del diámetro de la esfera.”

A. Objetivo de la norma

Esta normativa tiene el objetivo definir el método de ensayo para establecer la dureza de Brinell de cualquier elemento metálico.

B. Símbolos, unidades y conceptos

En la siguiente tabla, se puede visualizar las diferentes unidades, símbolos y conceptos que se utilizan en la norma 6506, de tal manera de mejorar la comprensión de la misma.

Tabla 10
Variables utilizadas en el ensayo de dureza

Concepto	Símbolo	Unidad
Distancia de presión	L	mm
Fuerza de presión	P	Kgf

Concepto	Símbolo	Unidad
Diámetro de bola	D	mm
Diámetro de marca	d	mm
Tiempo de aplicación	t	s

Nota. Tomado de: (INEN, 2014)

- **Distancia de presión**

Es la distancia previa que tiene que recorrer la bola, de forma axial antes de tocar la probeta y dejar la marca.

- **Fuerza de presión**

Es el valor de fuerza establecido sobre la probeta, para que deje una marca determinada.

- **Diámetro de bola**

Es el diámetro del elemento que va a dejar la marca sobre la probeta.

- **Diámetro de marca**

Es el valor del diámetro que deja la bola sobre la probeta.

- **Tiempo de aplicación**

Es la medida en segundos que la fuerza de aplicación ejerce sobre la probeta, cuando ya penetró sobre la superficie de la misma.

C. Determinación de la dureza de Brinell

Para calcular la carga que será sometido sobre la probeta es necesario utilizar la siguiente ecuación:

Ecuación 15

Cálculo de la fuerza sobre la superficie de la probeta

$$P = \frac{K}{2} * D^2$$

Donde:

K: Es la constante de trabajo de la probeta

D: Es el diámetro de la bola (mm)

Para definir el diámetro de indentación que se genera sobre una misma probeta, es necesario utilizar la siguiente fórmula:

Ecuación 16

Definición del diámetro aplicando promedio

$$d = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n}$$

Donde:

n : Número de mediciones

Para determinar la dureza de Brinell de un elemento cualquiera, se utiliza la siguiente fórmula:

Ecuación 17

Definición de dureza de Brinell

$$HB = \frac{4 * P}{\pi * D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Donde:

P : Carga sometida sobre la probeta (kgf)

D : Diámetro de la bola o marcador (mm)

d : Diámetro de la marca dejada por la bola (mm)

2.5.3. Norma ISO 6892:1998

Según (ISO, 2005) “La prueba implica tensar una pieza de prueba mediante fuerza de tracción con el fin de determinar uno o más propiedades mecánicas.”

Es de extrema importancia establecer, que las pruebas de tensión descritas en esta norma, son diseñadas para elementos metálicos que se encuentran a temperatura ambiente.

Las pruebas llevadas a cabo en la norma 6892, deben tener un rango de temperatura de entre 10°C a 35°C, a menos que haya otras especificaciones. Las pruebas ejecutadas bajo condiciones controladas deben ser hechas a temperaturas de 23 °C ± 5°C. (ISO, 2005)

Los puntos a continuación son una forma resumida de entender las partes más fundamentales de la normativa ISO 6892:1998, y bajo que conceptos se debe trabajar el documento y cada una de las actividades a desarrollar.

A. Objetivo de la norma

El objeto de la norma 6892, es de definir y detallar, la metodología que debe ser seguida, con el objetivo de definir la resistencia de tracción de un elemento metálico dúctil.

B. Símbolos, unidades y conceptos

En la siguiente tabla, se pueden apreciar los conceptos que serán aplicados en el ensayo de tracción.

Tabla 11

Concepto, símbolo y unidades del ensayo de tracción

Concepto	Símbolo	Unidades
Longitud de calibre original	L_o	mm
Longitud de calibre final	L_u	mm
Área de la sección transversal original de la longitud paralela	S_o	mm ²
Fuerza máxima	F_m	N
Resistencia a la tracción	R_m	N/mm ² (MPa)
Velocidad de expansión axial	v	mm/min

Nota. Tomado de: (ISO, 2005)

- **Longitud del calibre original**

Es la longitud establecida entre marcas de la probeta, previo a ser sometido a la prueba de tensión.

- **Longitud de calibre final**

Es la longitud entre marcas que tiene la probeta después de haber llegado a la rotura.

- **Área de la sección transversal original de la longitud paralela**

Es la superficie que tiene la probeta, tomando la medida del ancho y alto transversal de la misma.

- **Resistencia a la tracción**

Es la resistencia en la gráfica, en la que la probeta pasa de estar en un estado elástico a uno plástico.

- **Velocidad de expansión axial**

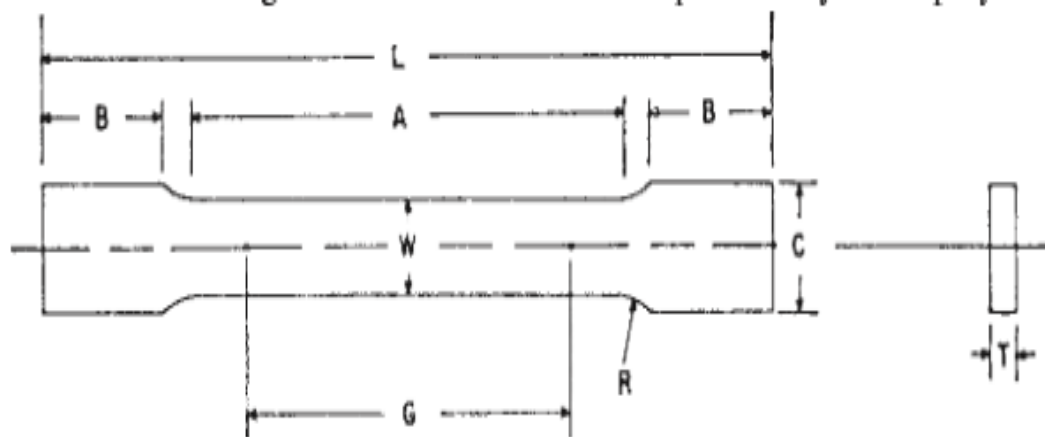
Es la razón de longitud a lo largo del tiempo, en el que las mordazas se expanden, detallando la curva de fuerza vs. tiempo.

C. Geometría de la probeta

La probeta, se guía bajo la siguiente geometría, con el objetivo de estandarizar las medidas en un valor más cómodo para el usuario, en función a la muestra de la que se puede extraer del elemento a estudiar.

Figura 21

Figura de una probeta plana del ensayo



Nota. Tomado de: (ASTM, 2020)

Las dimensiones de las probetas, son detalladas de manera que se puedan visualizar tanto en unidades correspondientes al sistema internacional e inglés, de medida, siendo equivalentes en todos los casos, haciendo posible que la construcción de los mismos tenga referenciado, cualquiera de las métricas anteriormente mencionadas.

Tabla 12*Valores de las cotas más representativas del ensayo de tracción*

	DIMENSIONES					
	Especímenes estándar				Tamaño secundario del espécimen	
	Tipo de placa, 1 ½ in. de ancho		Tipo hoja de ½ in. de ancho		¼ in. de ancho	
	in.	mm.	in.	mm.	in.	mm.
G-Longitud de calibre	8.00 a 0.01	200 a 0.25	2.000 a 0.005	50.0 a 0.10	1.000 a 0.003	25.0 a 0.08
W-Ancho	1 ½ + 1/8 - ¼	40 + 3 - 6	0.500 a 0.010	12.5 a 0.25	0.250 a 0.002	6.25 a 0.05
T-Grosor	Ancho del material					
R-Radio del filete	½	13	½	13	¼	6
L-Largo General	18	450	8	200	4	100
A-Longitud del núcleo de la probeta, mín.	9	225	2 ¼	60	1 ¼	32
B-Longitud mínima de la sección de agarre	3	75	2	50	1 ¼	32
C-Ancho de la sección de agarre	2	50	¾	20	3/8	10

Nota. Tomado de: (ASTM, 2020)

2.6. Software CAD – CAE

2.6.1. Sistema CAD

Según (SIEMENS, 2021) “El diseño asistido por ordenador (CAD) consiste en el uso de programas de ordenador para crear, modificar, analizar y documentar representaciones gráficas bidimensionales o tridimensionales (2D o 3D) de objetos físicos como una alternativa a los borradores manuales y a los prototipos de producto.”

Los programas que son destinados para el desarrollo de dibujados en ambientes informáticos, tienen la ventaja de que tienen, ya integrados, en su memoria y bibliotecas virtuales, un conjunto de parámetros, leyes y normas, que rigen sobre el dibujado en general, proponiendo una forma más efectiva de generar planos y elementos mecánicos en 3D.

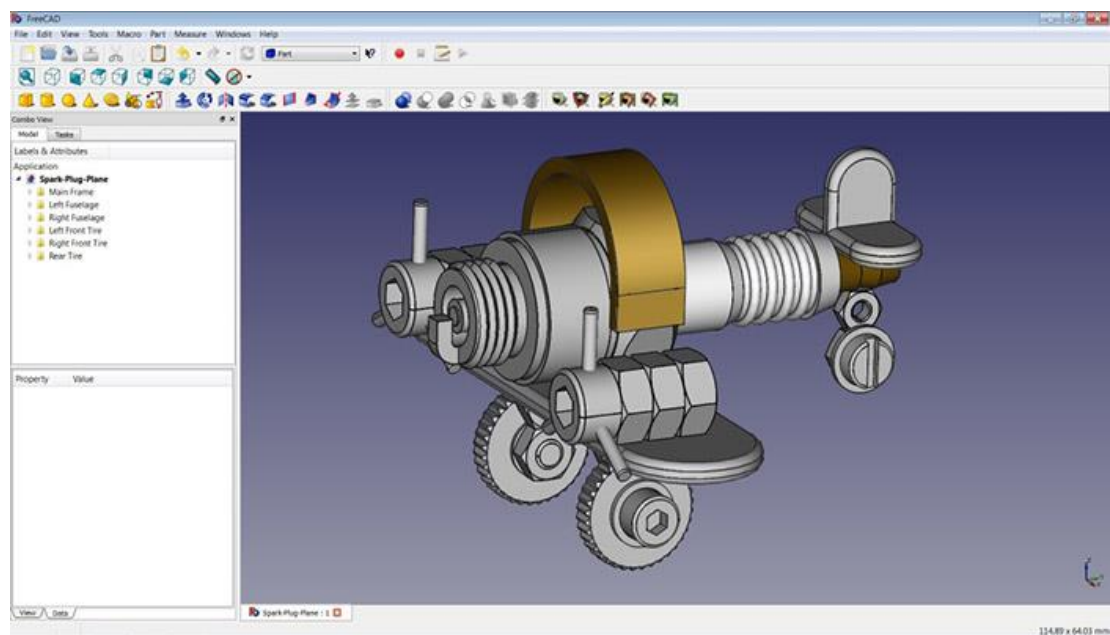
En definitiva, las ventajas de utilizar un ambiente CAD son:

- Agilizar el proceso de diseño, mejorar la visualización de los subensambles, de las piezas y del producto final. (SIEMENS, 2021)
- Obtener una documentación más sólida y sencilla del diseño, que incluye geometrías, dimensiones y listas de materiales. (SIEMENS, 2021)

Para poder utilizar un software de asistencia por computador, es necesario poseer los valores de las medidas o cotas más representativas, de un elemento o sistema mecánico, con el objeto de transportarlas al ambiente CAD, tomando en cuenta, también, las relaciones geométricas que existen en la figura dibujada (tangencia, paralelismo, horizontalidad, verticalidad, etc.).

Figura 22

Elemento en 3D, dibujado en un ambiente CAD



Nota. Tomado de: (Castro, 2019)

2.6.2. Estudio CAE

El estudio CAE, por sus siglas en ingles “Computer Asisted Engeneering”, como dice su nombre, es el método, por el cual, se puede generar estudios ingenieriles, con un sinfín de variables que interactúan, con un elemento tanto estático como dinámico, utilizando asistencia computacional.

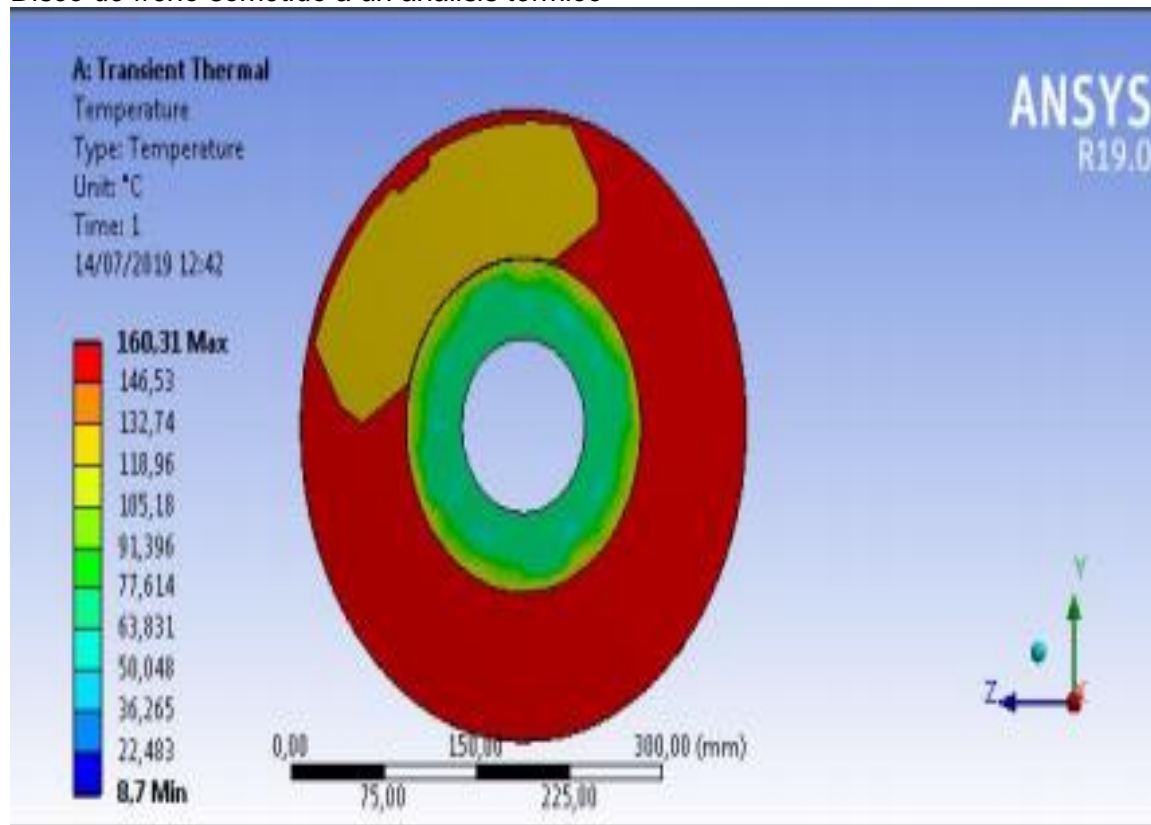
Dentro de un sistema ingenieril asistido por computadora, se puede encontrar varios tipos de análisis, desde estudios por flujo de líquidos o gases, hasta la interacción de temperaturas de elementos que se encuentran sometidos a distintas

variantes energéticas con las que tienen que interaccionar, pasando por la simulación de resistencia de materiales de un elemento, que interactúa con otros más.

Por ende, para que la computadora, entienda como proceder a hacer los cálculos pertinentes para la correcta determinación de resultados, esta parte del mallado.

Figura 23

Disco de freno sometido a un análisis térmico



Nota. Tomado de: (Chico & Terán, 2019)

A. Mallado

El mallado, es la manera, que se procede a hacer un estudio de elementos finitos a cualquier material, resultando así, en un sistema más sostenible para el nivel de memoria de la computadora, para extraer resultados de un análisis mecánico, hidráulico o térmico.

El cálculo por mallado, divide a la integridad propia del elemento a ser estudiado, en formas geométricas definidas como establece (Carrillo & Castillo, 2011), en la siguiente tabla:

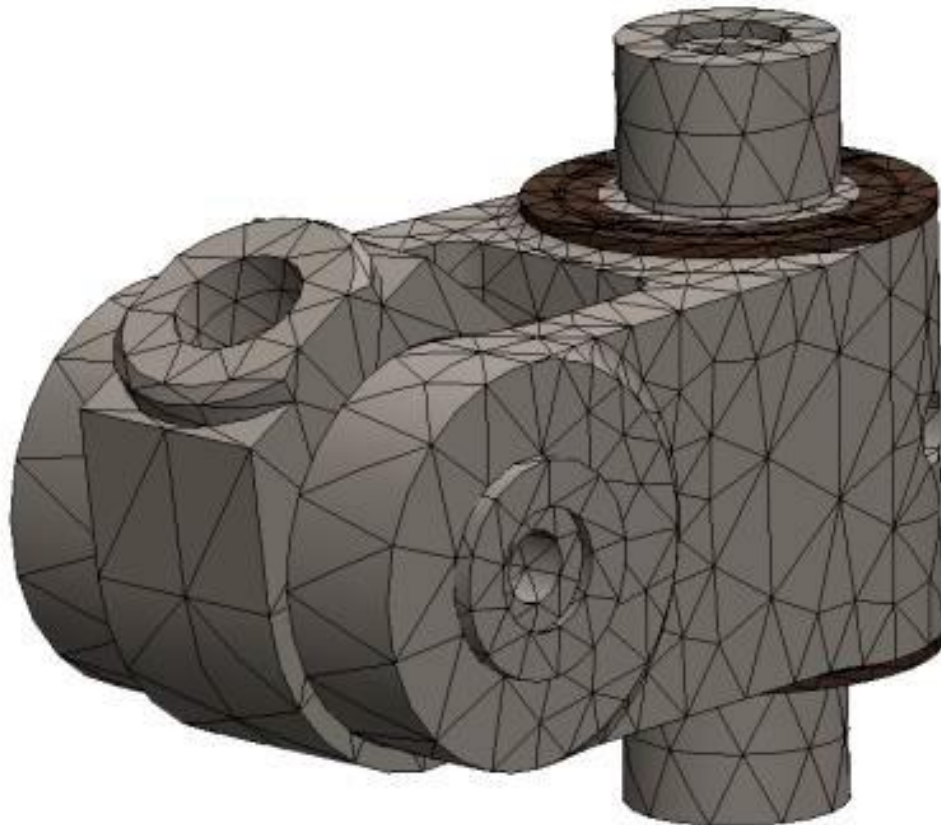
Tabla 13
Tipología de los elementos en un ambiente CAE

Forma del elemento	Nodo por volumen de control
Tetraedro	4
Pirámide	5
Cuña o Prisma	6
Hexaedro	8

Nota. Tomado de: (Carrillo & Castillo, 2011)

A mayor número de nodos por volumen de control, más precisa será la resolución interna (Carrillo & Castillo, 2011), pero este proceso tomará más tiempo, por parte de la computadora, además de consumir más memoria. Un ejemplo de la aplicación de un mallado en forma de pirámide puede ser visualizado en la imagen a continuación:

Figura 24
 Elemento mecánico sometido a mallado



Nota. Tomado de: (Andrés, 2018)

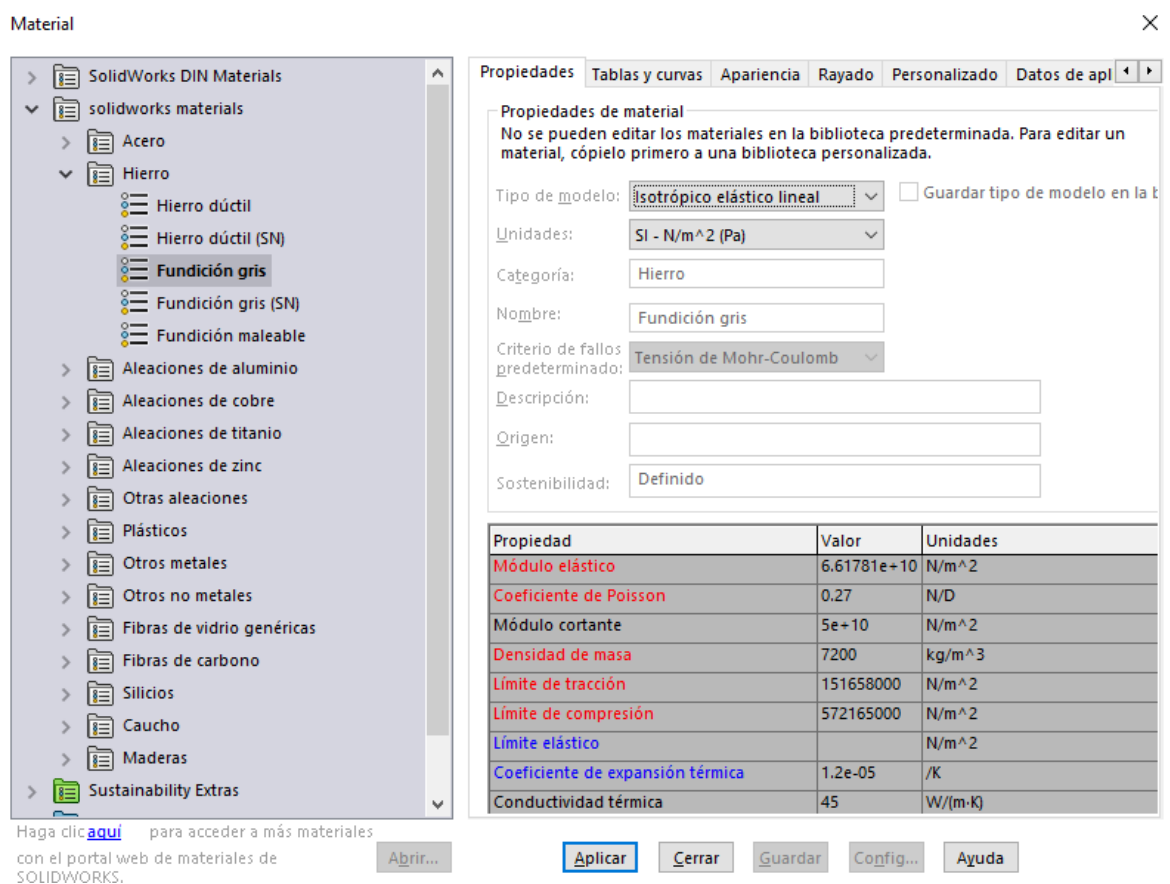
B. Selección del material

Dentro del estudio ingenieril computacional, la selección calcula con mayor precisión dentro del análisis estático o dinámico, estableciendo las propiedades

mecánicas a cada elemento del mecanismo, como es el coeficiente de Poisson, la resistencia a la tracción, módulo cortante, densidad de masa, etc., así como propiedades térmicas como: conductividad térmica, coeficiente de expansión térmica, etc.

Los materiales son seleccionados entre distintos tipos: acero, hierro, aleaciones de aluminio, aleaciones de cobre, aleaciones de titanio, etc, en función a la disponibilidad del programa seleccionado.

Figura 25
Biblioteca de materiales



Material

Propiedades Tablas y curvas Apariencia Rayado Personalizado Datos de apl

Propiedades de material
No se pueden editar los materiales en la biblioteca predeterminada. Para editar un material, cópielo primero a una biblioteca personalizada.

Tipo de modelo: **isotrópico elástico lineal** Guardar tipo de modelo en la b

Unidades: **SI - N/m² (Pa)**

Categoría: **Hierro**

Nombre: **Fundición gris**

Criterio de fallos predeterminado: **Tensión de Mohr-Coulomb**

Descripción:

Origen:

Sostenibilidad: **Definido**

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	6.61781e+10	N/m ²
Coeficiente de Poisson	0.27	N/D
Módulo cortante	5e+10	N/m ²
Densidad de masa	7200	kg/m ³
Límite de tracción	151658000	N/m ²
Límite de compresión	572165000	N/m ²
Límite elástico		N/m ²
Coeficiente de expansión térmica	1.2e-05	/K
Conductividad térmica	45	W/(m·K)

Haga clic [aquí](#) para acceder a más materiales con el portal web de materiales de SOLIDWORKS.

Abrir... Aplicar Cerrar Guardar Config... Ayuda

C. Análisis mecánico

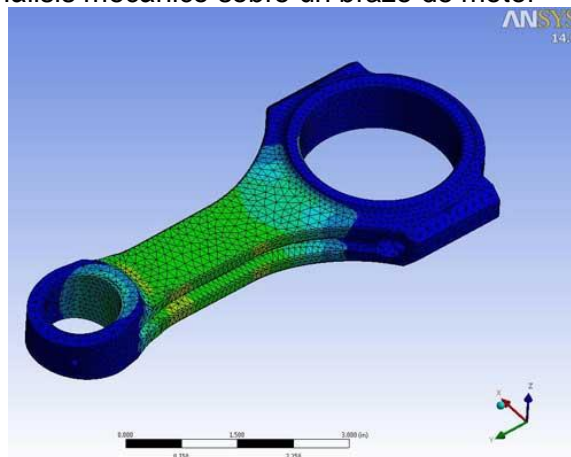
Una de las ventajas que tiene el software CAE, es la posibilidad de hacer estudios mecánicos, con el objeto de someter un elemento mecánico a diferentes tipos de esfuerzos dinámicos o estáticos, viendo así varios resultados, dividiéndose en: deformación, distribución de cargas, puntos o zonas críticas donde se presenta mayor índice de desgaste, penetración de material por rozamiento e inclusive, factores de seguridad.

Este tipo de análisis tiene la opción de desarrollar movimiento sobre los mecanismos y como estos interactúan entre sí, detallando sus resultados de manera precisa, en escala de colores, o como informes ya normados por instituciones ingenieriles certificadas.

Dentro del estudio mecánico, se tiene que definir las magnitudes, tanto de fuerzas, como la posición y distribución de las mismas, el movimiento (si lo tiene), del mecanismo, además de detallar el material que está hecho el elemento que será estudiado en cuestión, donde se establece las características dúctiles o frágiles, que pudiera poseer el mismo, para que el estudio CAE, saque los resultados pertinentes.

Figura 26

Resultados de un análisis mecánico sobre un brazo de motor



Nota. Tomado de: (3DCadPortal, 2021)

D. Esfuerzo efectivo de Von – Misses

Actualmente se sabe mucho más acerca de varios tipos de fallas, debido en gran medida a la mejora de las pruebas y las técnicas de medición. Las fallas dependen del material en cuestión de su resistencia a la compresión, a la tensión y al cortante. También dependen del tipo de carga ya sea estática o dinámica. (Cruz, y otros, 2018)

Como el disco de freno es un elemento mecánico, recibe el denominado esfuerzo efectivo de Von – Misses, como resultado de los efectos que generan tanto la fuerza de rozamiento, como la de contacto.

Para determinar el valor de este esfuerzo, es necesario saber los “esfuerzos principales”, detallados en la siguiente ecuación.

Ecuación 18

Determinación de σ_1 , σ_2 , σ_3 , según Von – Mises

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4 * \tau_{xy}^2}}{2} \\ \sigma_2 = 0 \\ \sigma_3 = \frac{\sigma_x + \sigma_y - \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4 * \tau_{xy}^2}}{2} \end{cases}$$

Una vez determinados los esfuerzos principales de Von – Mises, se aplica la siguiente ecuación, para definir el valor real del esfuerzo efectivo de Von – Mises.

Ecuación 19

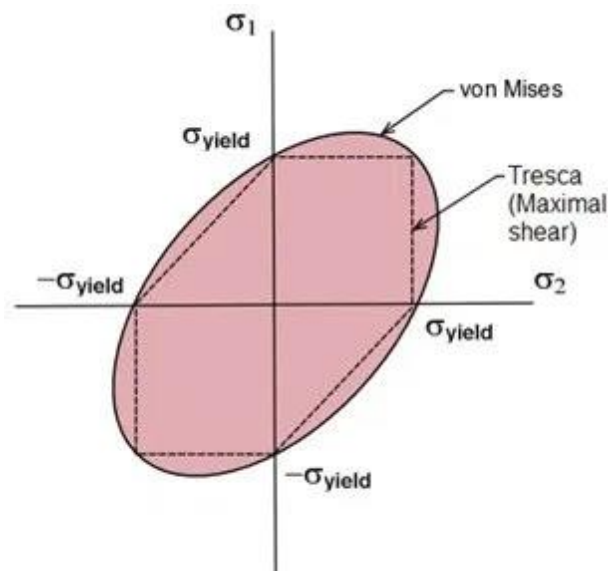
Determinación del esfuerzo efectivo de Von – Mises

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1 * \sigma_2 - \sigma_2 * \sigma_3 - \sigma_1 * \sigma_3}$$

Los esfuerzos principales de Von – Mises deben siempre ubicarse dentro de la elipse de seguridad detallada en la figura siguiente:

Figura 27

Límites de trabajo del teorema de Von – Mises



Nota. Tomado de: (Fitzgerald, 2012)

E. Factor de seguridad

Según (Macías, 2019) “todos los diseños mecánicos se conceptualizan para que funcionen dentro de la zona elástica del material, es decir una vez retiradas las condiciones a las que se encuentra sometido regresará a su forma original.”

Por ende, el disco de freno, tiene que funcionar de manera elástica, dentro de esta zona aplicable antes que se llegue al límite de fluencia, porque si llegara a deformarse hasta hacerse plástico, dejaría de ser un elemento útil.

Para asegurar esto, diseñadores del mundo acuñaron el termino de factor de seguridad que no es más que la división entre el esfuerzo de cedencia dado por la curva del material y el esfuerzo calculado y dado por las condiciones a las que está sometido nuestro diseño. (Macías, 2019)

Para calcular el factor de seguridad establecido para cualquier elemento mecánico, es necesario saber el límite de fluencia o esfuerzo de cedencia (σ_y) y el esfuerzo efectivo de Von – Misses (σ').

Ecuación 20

Factor de seguridad

$$FS = \frac{\sigma_y'}{\sigma'}$$

2.7. Vehículo Grand Vitara SZ

Los vehículos Grand Vitara SZ, es un automotor, que viene en prestaciones, tanto en 3 puertas, como en 5 puertas, tiene un motor de combustión interna, con una cilindrada de 1.6 litros con una potencia de 116 CV, en disposición lineal, como también en otras prestaciones de 2.0 litros a 138 CV, 2.4 litros con 166 CV, y en disposición en V de 2.7 litros y de 3.2 litros, con 185 y 231 CV respectivamente, teniendo un motor a Diesel.

Los modelos de esta clase, fueron desarrollados en 3 generaciones, la primera generación que se dio aproximadamente entre los años 1988 a 1998, la segunda generación que fue desarrollada entre 1998 y 2006, y la tercera y última

generación construida entre los años 2005 a 2015. Estos vehículos tienen un sistema de tracción o bien trasera o bien distribuida a sus 4 neumáticos.

Figura 28

Vehículo Grand Vitara SZ



Nota. Tomado de: (XPress, 2021)

2.7.1. Características Grand Vitara SZ 5 puertas 2.0L

El vehículo Grand Vitara SZ, de 5 puertas tiene las siguientes características (CHEVROLET, 2018):

- Sistema funcional de aire acondicionado
- Sistema de frenos antibloqueo o ABS
- Sistema de lubricación general de motor y transmisión
- Asientos ergonómicos
- Vehículo turismo convencional

2.7.2. Especificaciones técnicas del vehículo Grand Vitara SZ 5 puertas

El modelo Grand Vitara SZ, establece las especificaciones en su página web, donde se detalla la potencia del motor, el tipo de combustible, el tipo de tracción y el sistema de frenos que posee el mismo, además de otras características.

Tabla 14*Ficha técnica del vehículo Grand Vitara SZ 2.0 de 5 puertas*

Característica	Valor
Largo	4060 mm
Ancho	1540 mm
Alto	1695 mm
Peso	1608 kg
Capacidad de carga	596 kg
Frenos (del.- tras.)	Disco Ventilado - Tambor
Neumáticos	225/70/R16
Combustible	Gasolina
Motor	1995 cc (2.0 L) en línea
Potencia	138/6000 hp/rpm
Torque	183/4000 N·m/rpm
Tipo de sistema de freno	Antibloqueo (ABS)
Número de puertas	5

Nota. Tomado de: (CHEVROLET, 2018)

2.7.3. Distribución de cargas en los ejes

La distribución de cargas por eje, es la cantidad de masa que se genera sobre los 2 ejes correspondientes a este vehículo, y según CHEVROLET, vienen establecidos en la siguiente tabla:

Tabla 15*Distribución de carga de la masa de Grand Vitara SZ*

Ubicación del eje	Distribución de carga (%M)
Delantero	0,75
Trasero	0,25

Nota. Tomado de: (CHEVROLET, 2012)

2.7.4. Sistema de freno Grand Vitara SZ 2.0 L de 5 puertas

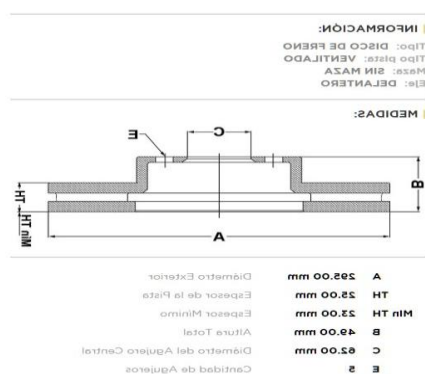
El sistema de freno de este tipo de vehículos, es un sistema hidráulico anti-blocante, o ABS, en sus 2 ejes de movimiento.

Este sistema antibloqueo permite que el conductor, durante el proceso de frenado, maniobre libremente la dirección, con el objeto de que el carro, no pierda el control ante situaciones extremas. Los frenos delanteros, presentan un sistema de frenado de pastilla y disco, y los posteriores son de tambor con zapatas.

2.7.5. Características del disco de freno del Grand Vitara SZ

Las medidas, tanto el diámetro del disco de freno (A), como el diámetro de acople (B), como el diámetro de rosca de los pernos pasadores (E), y tanto el ancho nominal (TH) y el ancho mínimo (Mín. TH), se pueden visualizar en la siguiente figura:

Figura 29
Medidas disco Grand Vitara SZ 2.0 4x2



Nota. Tomado de: (SUZUKI, 2011)

La dureza de Brinell que posee un disco de freno en HBW, determinados por estudios previamente realizados por la marca CHEVROLET, fueron divididos en relación a cada una de los modelos de los vehículos Suzuki Grand Vitara SZ los mismos que son detallados de mejor manera en la tabla a continuación:

Tabla 16
Dureza de Brinell de los discos de freno

Versión Grand Vitara SZ	Dureza del disco de freno (HBW)
Motor 1.6, 3 puertas	150
Motor 2.0, 3 puertas	160
Motor 2.0, 5 puertas	190
Motor 2.4, 5 puertas	230
Motor V6 2.0, 5 puertas	240

Nota. Tomado de: (CHEVROLET, 2012)

El coeficiente de fricción generada entre la pastilla y el disco de freno se pueden definir en la siguiente tabla, categorizados por el modelo del Grand Vitara SZ:

Tabla 17
Coeficientes de fricción de las pastillas

Versión Grand Vitara SZ	Coeficiente de fricción de las pastillas de freno (0 a 70Km/h)
Motor 1.6, 3 puertas	0,3 a 0,4
Motor 2.0, 3 puertas	0,4 a 0,5
Motor 2.0, 5 puertas	0,3 a 0,5
Motor 2.4, 5 puertas	0,4 a 0,5
Motor V6 2.0, 5 puertas	0,5 a 0,55

Nota. Tomado de: (CHEVROLET, 2012)

Las características propias de la resistencia a la tracción del disco de freno están detalladas en la siguiente tabla:

Tabla 18
Límites de fluencia de los discos de frenos

Versión Grand Vitara SZ	Esfuerzo de tracción (MPa)
Motor 1.6, 3 puertas	230
Motor 2.0, 3 puertas	235
Motor 2.0, 5 puertas	240
Motor 2.4, 5 puertas	240
Motor V6 2.0, 5 puertas	250

Nota. Tomado de: (CHEVROLET, 2012)

Capítulo III

3. Pruebas y ensayos

3.1. Caracterización de los materiales de prueba

Los materiales de prueba, son todos aquellos elementos que son extraídos del disco de freno, con el fin de someterles a las pruebas de tracción, dureza, y de frenado (con el espesor al 92%, 96% y 100%), para poder definir la eficiencia de frenado tanto en una simulación en un ambiente CAE, como en el caso del estudio experimental.

En los siguientes puntos se establecen las medidas, formas, equipos, procedimientos y resultados determinados por las siguientes pruebas.

3.2. Prueba de tracción en el disco de freno

En este proceso, para mayor precisión, se procede a ejecutar los ensayos con 3 probetas. El objeto de este ensayo es determinar el límite de fluencia del material, con la finalidad de definir el metal utilizado en la fabricación del disco de freno, utilizando de guía la normativa ISO 6892:1998. Las pruebas se hicieron en el laboratorio de mecánica de materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE – Sede Matriz (Sangolquí).

Las probetas son fabricadas mediante el corte directo de chorro de agua, de un disco de freno usado de un vehículo Grand Vitara SZ 2.0 de 5 puertas, tomando la siguiente geometría:

Figura 30

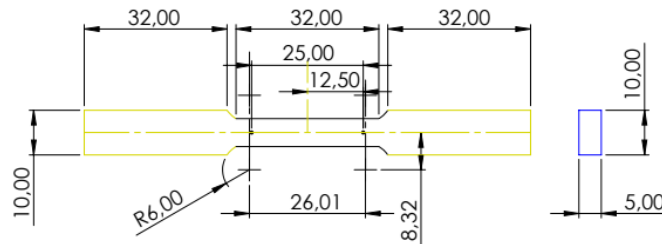
Probetas numeradas para los ensayos de tracción



La forma que toma la probeta en este tipo de ensayo, es en función a la Figura 21, tomando las medidas de una probeta de ancho de 5mm, en la sección de una probeta con sub tamaño de ¼ de pulgada, sirviendo de guía la Tabla 12 de tal manera que la probeta es de la siguiente forma:

Figura 31

Medidas de las 3 probetas, en mm



Para este proceso experimental, se utiliza la máquina denominada INSTRON 8800, en el que se establecen los valores iniciales a 0 (tanto elongación como carga sometida). Posteriormente, se seleccionó el método a utilizar, en este caso, “procedimiento de tracción”. Posteriormente se coloca la velocidad axial a la que va extenderse las mordazas que sostienen la probeta, tomando el valor de 1mm/min.

Después de programar los valores iniciales, se continúa tomando las medidas del ancho y del largo del área transversal del núcleo de la probeta, utilizando un pie de rey.

Tabla 19

Resultados medidos del ancho y alto del núcleo de la probeta

Numeración	Ancho (mm)	Alto (mm)
Probeta 1	4,72	5,02
Probeta 2	4,52	4,98
Probeta 3	4,43	4,98

Posteriormente se calcula el área de cada uno de estas probetas aplicando la siguiente ecuación.

Ecuación 21

Área transversal del núcleo de la probeta

$$A = b * h$$

Donde:

b: Es el ancho del núcleo de la probeta (mm)

h: Es el alto del núcleo de la probeta (mm)

Probeta 1:

$$A = (4,72mm) * (5,02mm) = 23,6944mm^2$$

Tabla 20

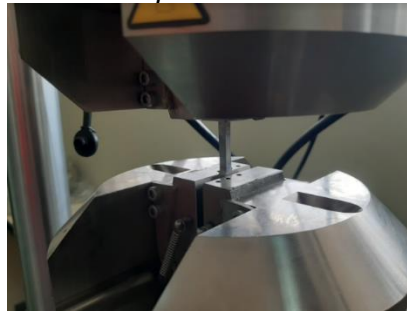
Áreas transversales de los núcleos de las probetas

Numeración	Área (mm ²)
Probeta 1	23,6944
Probeta 2	23,5096
Probeta 3	23,0614

Una vez determinados las áreas de cada probeta, se procede a colocar las mismas en las mordazas de la máquina de ensayos INSTRON 8800.

Figura 32

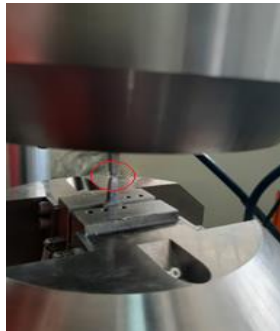
Probeta colocada con las mordazas a presión



Después de ejecutada la acción, la máquina empieza la extensión de sus mordazas, para que esta genere un esfuerzo de tracción sobre cada una de las 3 probetas:

Figura 33

Probeta después de haber llegado a su dislocación



Posteriormente, cuando ya la prueba ha finalizado, el instrumento de control de la INSTRON 8800 saca los resultados, tanto en una imagen que define la curva

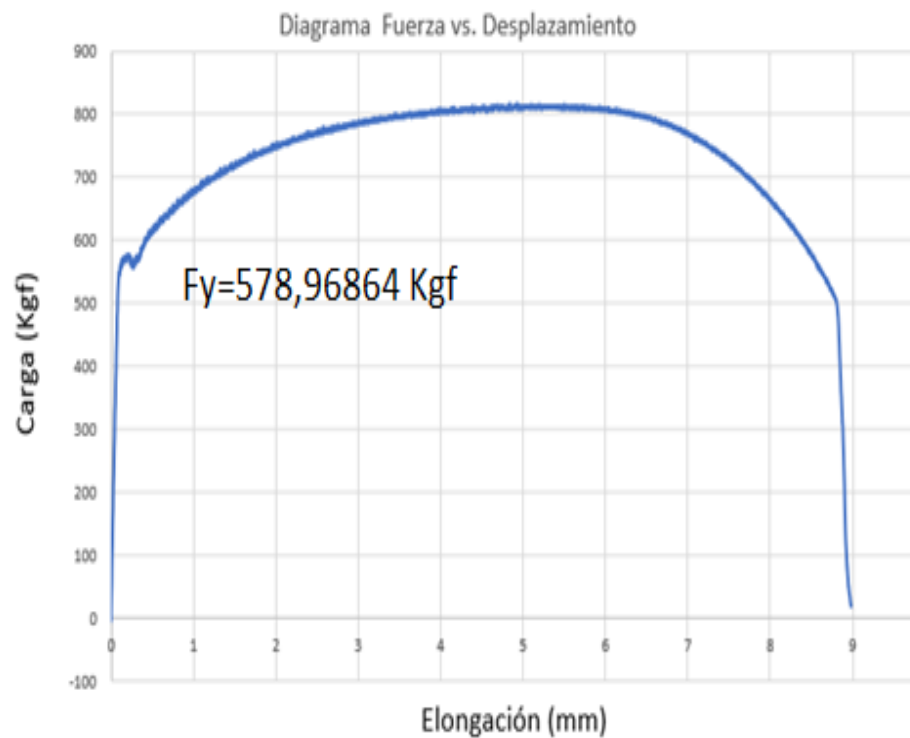
de elongación vs. fuerza axial, de manera más nítida, y también define una tabla en Excel, que establece los valores de la misma, de manera que se pueda determinar la fuerza aplicada al inicio de la fase de fluencia, determinando así la resistencia a la tracción.

3.2.1. Resistencia a la tracción de las probetas

La gráfica característica de la probeta número uno, se puede visualizar en la siguiente imagen:

Figura 34

Gráfica de fuerza de tracción vs. elongación (Probeta 1)



Para determinar el valor de la fuerza en la que el elemento llega su límite de fluencia, fue necesario visualizar el punto de la gráfica, donde el elemento deja de ser elástico, para pasar a ser plástico, de tal manera que tomó un valor de:

$$F_{y1} = 578,96864 \text{ Kg}f = 5845,5941 \text{ N}$$

Para establecer la resistencia a la tracción, se utilizó la siguiente ecuación:

Ecuación 22

Resistencia a la tracción

$$\sigma_y = \frac{F_y}{A}$$

Donde:

F_y : Es la fuerza en la que se genera la resistencia de fluencia (N)

A : Es el área transversal de la probeta (mm^2)

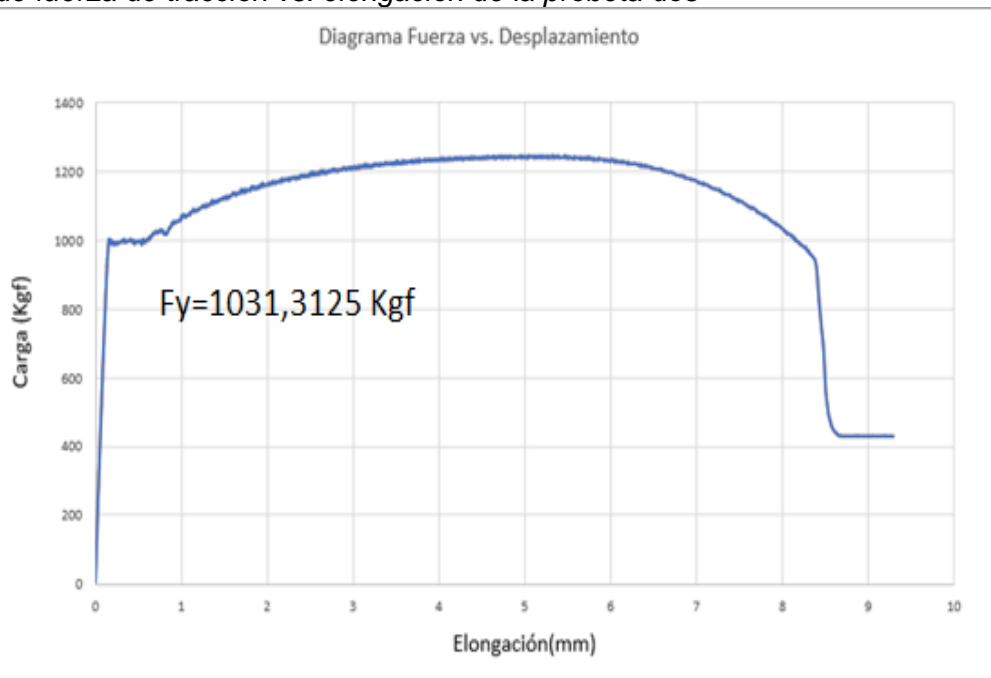
Quedando de la siguiente manera:

$$\sigma_{y1} = \frac{5845,5941N}{23,6944\text{mm}^2} = 246,2751\text{MPa}$$

Para la probeta número 2, la fuerza de tracción en función a la elongación, es la siguiente:

Figura 35

Gráfica de fuerza de tracción vs. elongación de la probeta dos



Como se puede visualizar la fuerza de fluencia, según la gráfica es:

$$F_{y1} = 1031,3125 \text{ Kgf} = 6048,5941N$$

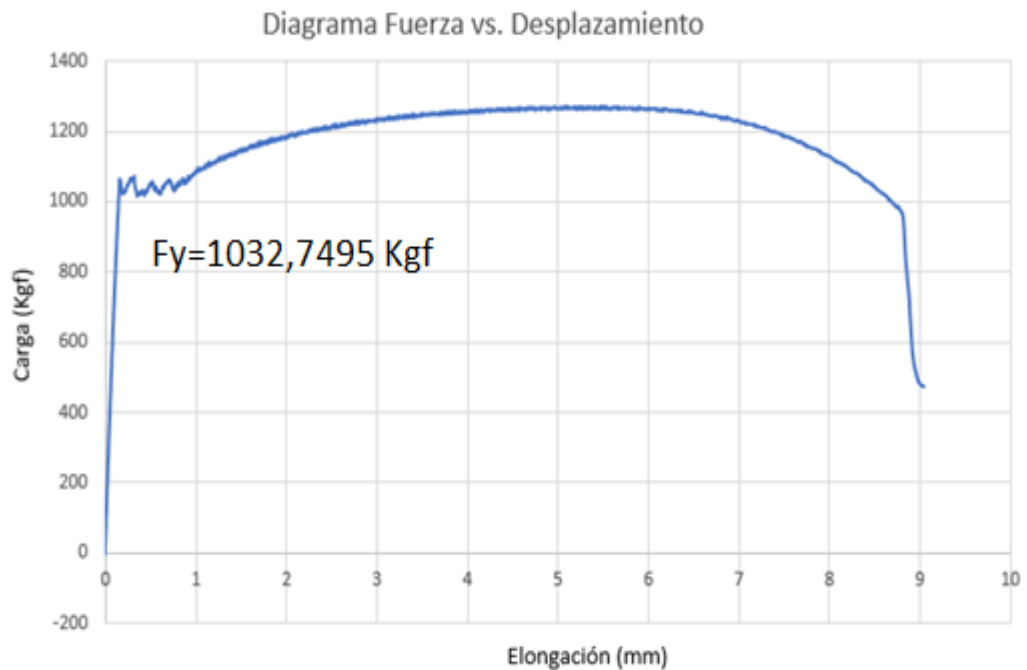
El límite de fluencia respectivo para esta probeta, al igual que la anterior, es la siguiente:

$$\sigma_{y2} = \frac{6048,594N}{23,5096mm^2} = 257,2818MPa$$

Finalmente, en el caso de la probeta 3, la gráfica desarrollada por la maquina INSTROM 8800, al finalizar la extensión hasta el quiebre del mismo, se lo puede visualizar en la figura a continuación:

Figura 36

Gráfica de fuerza de tracción vs. elongación de la probeta tres



Como se puede visualizar la fuerza de fluencia, según la gráfica es:

$$F_{y3} = 1032,7495 \text{ Kgf} = 6049,2851N$$

El límite de fluencia perteneciente al tercer ensayo de tracción, fue el siguiente:

$$\sigma_{y3} = \frac{6049,2851N}{23,0614mm^2} = 262,3121MPa$$

Tabla 21
Resultados de los ensayos de tracción

Orden de Ensayo	Esfuerzo de fluencia resultante (MPa)
Primer ensayo	246,2751
Segundo ensayo	257,2818
Tercer ensayo	262,3121

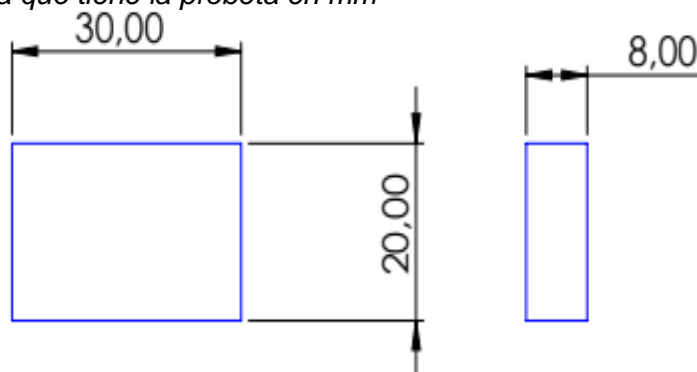
3.3. Pruebas de dureza en el disco de freno

Las pruebas de dureza en el disco de freno del vehículo Grand Vitara SZ, se llevarán a cabo, con el objetivo, de dar mayor precisión a los resultados de la simulación, debido a que la dureza de los metales, es una propiedad mecánica que afecta el desempeño de un elemento sometido a rozamiento, como es el sistema disco – pastilla, del freno del automotor.

Se utilizó la metodología establecida en la norma NTE ISO 6506-1:2005 y el procedimiento se lo ejecutó en el laboratorio de mecánica de materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE – Sede Matriz (Sangolquí).

Para poder ejecutar el proceso, en el disco de freno, primeramente, hay que obtener una muestra, que según la normativa ASTM, debe tomar una forma, cúbica o prismática rectangular, tomando las siguientes medidas:

Figura 37
Medidas y forma que tiene la probeta en mm



El elemento, debe ser pulido, hasta el punto en que su superficie se encuentre libre de cualquier rugosidad, o elemento externo que no sea el propio del metal, para esto se utilizó una lija de medida de 120, y otra, para dar mayor detalle de 220.

Una vez aplicado la lija en la superficie a la que se le va a someter a las pruebas, esta tomó la característica brillantez de una superficie metálica, como se ve en la figura a continuación.

Figura 38

Superficie de la probeta lijada



La máquina que se utilizó para ejecutar el ensayo, es la de AMSLER 2200, descrita en la siguiente ilustración:

Figura 39

Máquina de ensayo de dureza de Brinell AMSLER 2200



El diámetro de la bola con la que se hizo las pruebas de dureza, fue seleccionado en función al espesor de la probeta, donde el valor del mismo, varía en función al espesor de la probeta.

Para poder obtener la medida del espesor, se observó la Figura 37, la medida transversal, sobre la que la fuerza de la bola fue ejercida, en cada una de las indentaciones. La tabla a continuación detalla las medidas del diámetro de bola disponibles para estas pruebas:

Tabla 22

Diámetro de bola en función del ancho de la probeta

Espesor de la probeta (mm)	Diámetro de la bola, D (mm)
Mayor de 6 mm	10
Entre 3 y 6 mm	5
Menor de 3 mm	2,5
	1,25
	0,625

Nota. Tomado de: (Denos, 2020)

Como el espesor es de 8 mm, se llega a la conclusión que es mayor de 6 mm, entonces se selecciona una bola de diámetro de 10 mm, y se la coloca como se observa en la posterior imagen:

Figura 40

Bola de 10mm, colocada en la máquina de prueba de dureza



Una vez ubicada la bola en el soporte, se colocó los valores de la AMSLER 2200, en valores iniciales de 0, como se puede apreciar en la ilustración siguiente:

Figura 41

Puesta a punto de la máquina de ensayo de dureza de Brinell

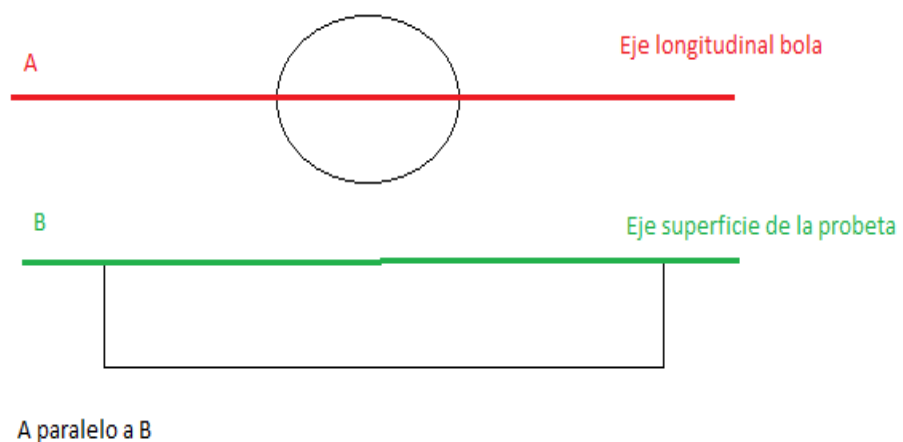


Para poner en 0 a la máquina, fue necesario que el testigo rojo se alinee con el testigo negro, debido a que este, es quien marca la fuerza que está sometiendo la máquina, y el negro marca el 0 absoluto.

Se hizo las indentaciones, en la superficie de la probeta, para esto se coloca la misma en la base, de tal manera que se encuentre paralelo con respecto al eje longitudinal de la bola de la máquina, como se puede apreciar mejor en la siguiente figura:

Figura 42

Descripción de los ejes de aplicación



La longitud de aplicación de la fuerza, fue de 5 mm, distancia desplazada por parte del soporte, de manera axial antes de tocar a la superficie de aplicación. A

continuación, se definió la magnitud de la fuerza aplicada sobre la probeta, en función a la constante K según el material, de la siguiente tabla:

Tabla 23

Constante de trabajo de la probeta, en función al material

Material	Constante K
Hierros y aceros	30
Cobre, bronce y latón	10
Aleaciones ligeras	5
Estaño y plomo	2,5
Metales muy blandos	1,25-0,5

Nota. Tomado de: (López, Maldonado, Mendoza, & Merino, 2020)

Según la

Tabla 3, los metales que se utilizan en el disco de freno son mayoritariamente de Hierro aleado, por lo que se selecciona el valor de 30. Entonces la fuerza aplicada fue definida por la Ecuación 15.

Reemplazando los valores, tanto de la constante K y el valor del diámetro, queda la siguiente expresión:

$$P = \frac{30}{2} * 10^2 = 1500Kgf$$

La fuerza puede ser definida o bien en kilogramos o en newtons, acorde a las necesidades del usuario. En el caso de las maquinas AMSLER 2200, su fabricación es ejecutada en Michigan, por ende, se utiliza el sistema inglés de medida para definir el mismo.

La máquina AMSLER, consta con un elevador metálico sólida anexado a la base del sistema, generando dos fuerzas contrarias al mismo, desarrollando de manera homogénea, la fuerza sobre cada indentación.

Para poder aumentar o disminuir la magnitud de la carga, fue necesario que el sistema se movilizado en su mando de manera antihoraria

Esta fuerza programó en el reloj de la máquina AMSLER 2200, como se ve en la siguiente ilustración.:

Figura 43

Fuerza establecida a 1500 Kgf



Para mayor precisión en el cálculo, se hace 3 marcas, con el objetivo de poder tener más datos, cada indentación debe tomar un tiempo establecido, en función a su material, según la siguiente tabla.:

Tabla 24

Tiempo de aplicación de la bola sobre la superficie de la probeta

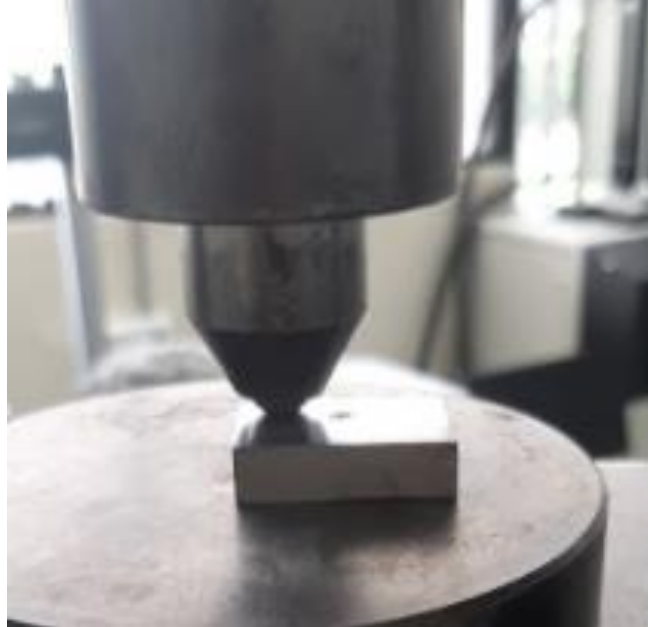
Material	Tiempo, t
Hierros y aceros	10 a 30 segundos
Cobre, bronce y latón	30 segundos
Aleaciones ligeras	60 a 120 segundos
Estaño y plomo	120 segundos
Metales muy blandos	120 segundos

Nota. Tomado de: (López, Maldonado, Mendoza, & Merino, 2020)

Como el material es mayoritariamente de hierro, se seleccionó un tiempo intermedio entre 10 a 30 segundos, aplicando cada procedimiento un total de 15 segundos, estos tiempos son establecidos para que la figura de la indentación sea una circunferencia lo más perfecta posible.

Figura 44

Aplicación de la fuerza sobre la probeta



Las formas de las marcas dejadas por la máquina, se puede en la siguiente figura, numeradas en el orden de su realización :

Figura 45

Indentaciones resultantes, en orden de aplicación



Posteriormente, se define el valor exacto del diámetro de cada aplicación, para esto es necesario utilizar un microscopio de medición digital, de marca CARL ZEISS Modelo JENA, como se puede apreciar en la figura a continuación.:

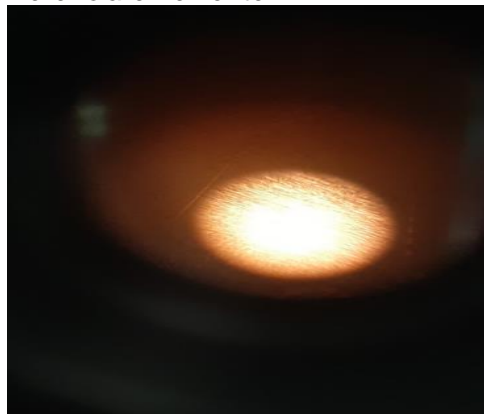
Figura 46
Microscopio de medición digital CARL ZEISS



Se colocó la probeta en el microscopio y alineó la forma de la circunferencia con el lente del mismo, como se observa en la posterior imagen:

Figura 47

Observación de la circunferencia en el lente



Se movió la lente de forma axial y transversal, desde que no se ve el área, hasta que se pierde de vista otra vez, de tal manera que determine el valor del diámetro, de manera más exacta, en el micrómetro anexo al microscopio, viendo en la escala cuantas divisiones se ha movido.

Figura 48
Micrómetro anexo del microscopio digital



El micrómetro, viene definido en escala de milésimas de milímetro, de tal forma que cada división que se movió la regleta, corresponda a un total de 10^{-3} milímetros, en escala decimal, haciendo que los valores resultados del diámetro de la forma superficial de la semi esfera, formada por la bola sobre la probeta, tenga como apreciación hasta 3 decimales en cada medición.

Los resultados son descritos en la posterior tabla, en relación a las indentaciones numeradas en la Figura 45.

Tabla 25
Valores de los diámetros axiales y transversales

Identificación ensayo	Diámetro axial (mm)	Diámetro transversal (mm)
Indentación 1	4,136	4,100

Indentación 2	4,160	4,114
Indentación 3	4,134	4,138

3.3.1. Resultados de dureza de la probeta

Para definir el diámetro, que será utilizado para el cálculo del área de las 3 marcas resultantes, se aplicó un promedio, tanto entre el diámetro axial y transversal, utilizando la Ecuación 16, quedando en la siguiente expresión, para el caso de la primera marca:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{4,136mm + 4,100mm}{2} = 4,118mm$$

Una vez definido este resultado, se determina el valor de la dureza de Brinell. Reemplazando los datos de la indentación 1 y la fuerza de carga de aplicación en la ecuación anteriormente mencionada, da el siguiente resultado:

$$HB_1 = \frac{4 * 1500}{\pi * (10) * \left(10 - \sqrt{10^2 - 4,118^2}\right)} = 215,363HB$$

Para la segunda y tercera marca, se realiza el mismo procedimiento, dando como resultados:

Tabla 26
Resultados de los ensayos de dureza de Brinell

Ensayo	Dureza de Brinell (HB)
Primer ensayo	215,363
Segundo ensayo	213,293
Tercer ensayo	213,14

Cada resultado, tuvo el objeto de dar la mayor cantidad de información posible en la prueba de dureza, los que fueron, más adelante, útiles en la selección del material que la probeta, pueda ser.

3.4. Prueba de análisis químico en el disco de freno

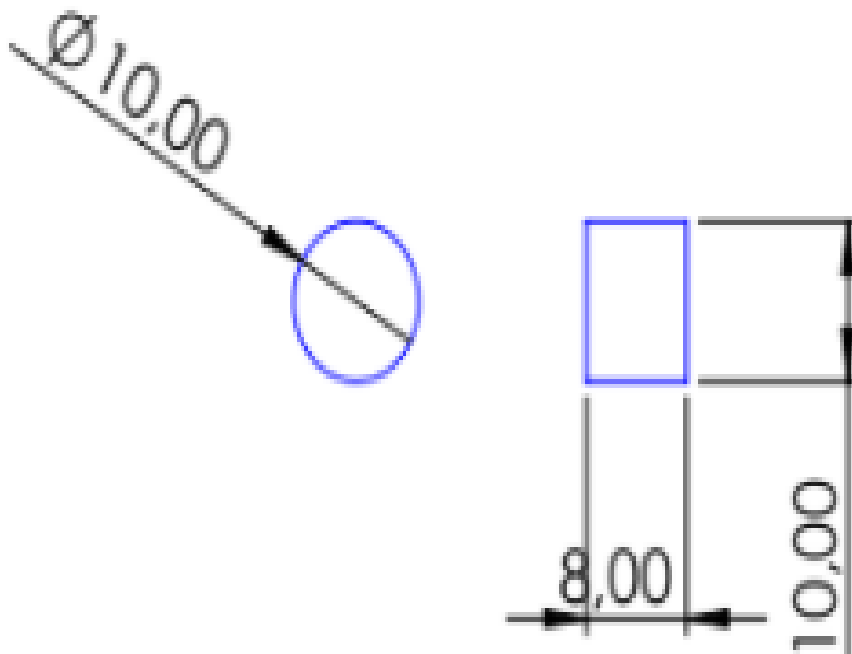
La prueba de análisis químico del disco de freno, es realizado, con el objetivo de determinar la composición química exacta en %M/M, estableciendo, el nivel de carbono que fue ingresado al compuesto de aleación en el mismo, por pirólisis.

Los ensayos fueron hechos en los laboratorios de nanomateriales de la subdivisión ESPE – Innovativa, entidad regulada por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE – Sede Matriz (Sangolquí).

Primeramente, para ejecutar el proceso de análisis químico definido como SEM-EDS, es necesario extraer probetas normalizadas según el manual de uso establecido por la Universidad Andrés Bello, pudiendo ser de forma cúbica de lado de 1cm, o un cilindro de 1cm de diámetro, con un espesor de 0,8cm. Por facilidad del estudio, la forma fue definida como cilíndrica, con las medidas siguientes:

Figura 49

Medidas de la probeta normalizada para la prueba SEM-EDS



El proceso se lo consiguió mediante el uso de una máquina de corte a chorro de agua, comandado por un sistema CNC. Para mayor precisión de trabajo, se ejecuta el ensayo, con 2 probetas de las mismas características, como se puede ver en la figura siguiente.

Figura 50

Probetas de trabajo para el ensayo de tracción



Después de obtenidas las muestras, se las colocó en una base de microscopia electrónica de barrido, fijándolas con una cinta de carbono de doble faz, y a continuación fueron limpiadas con gas de nitrógeno, como se puede apreciar más adelante.:

Figura 51

Probetas de ensayo químico listas para ingresar en el SEM



Consiguientemente, se lleva las muestras al microscopio electrónico de barrido como se observa en la siguiente imagen.:

Figura 52

Microscopio electrónico de barrido Bruker X-Flash 6|30



El microscopio de barrido, es una máquina compuesta por una cámara de altísima resolución, y con la capacidad de generar voltaje, para probetas de carácter metálico, de tal forma que con la excitación proveniente por parte de los electrones de la capa de energía mas superficial, se pudo determinar el número atómico de cada elemento, y su porcentaje de masa sobre el total de la composición. Las muestras con el porta muestras, son colocadas dentro de la cámara de contención de probetas:

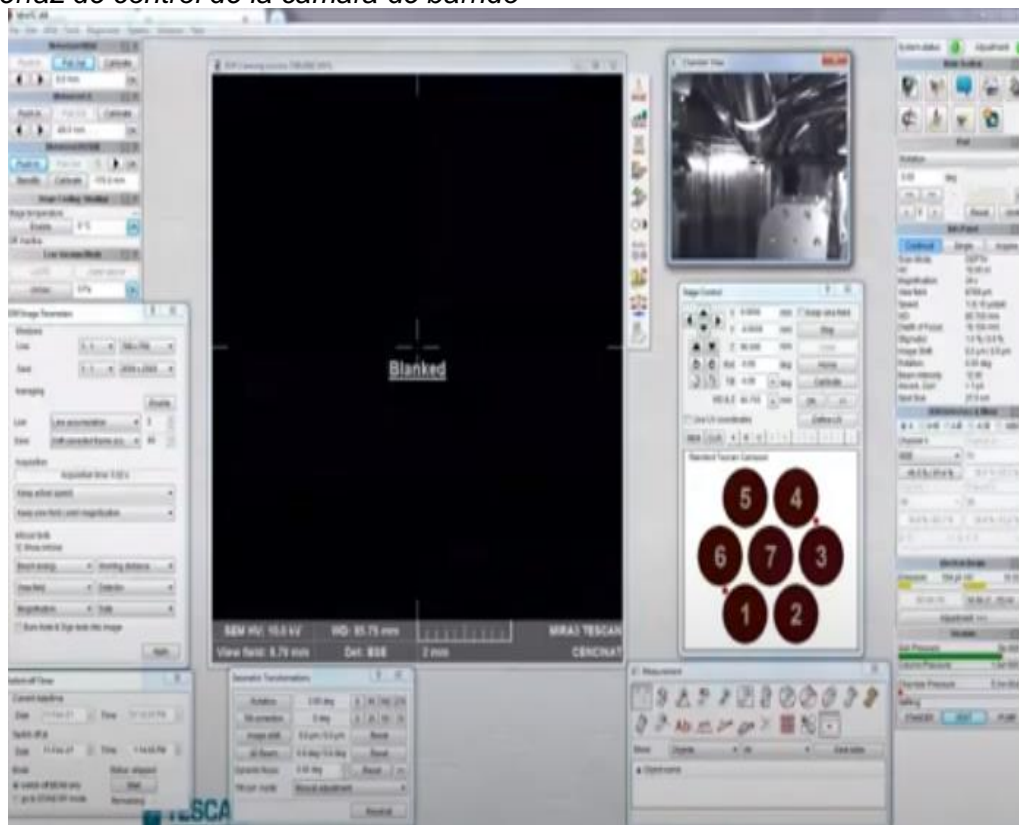
Figura 53

Cámara de contención de probetas



Una vez colocadas las probetas, se procede a comandar la máquina en el panel de control ejemplificado a continuación.:

Figura 54
Interfaz de control de la cámara de barrido

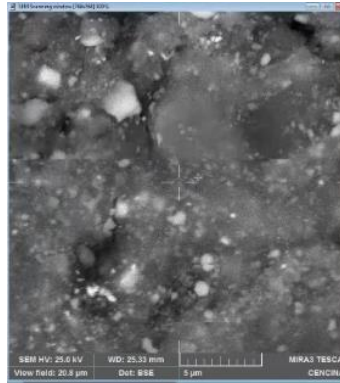


En el control de barrido, se inyectó gas nitrógeno, con el objeto de que la cámara de contención de probetas, vacíe su espacio, retirando toda muestra de oxígeno, evitando así una contaminación por oxidación. El vacío se obtiene cuando en el panel de control de la cámara de muestras, marca alto vacío como se aprecia en la siguiente tabla, este proceso se demora aproximadamente 5 a 6 minutos.

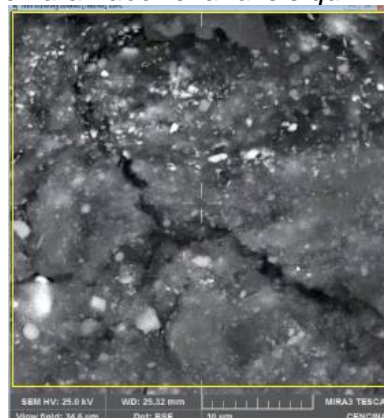
Tabla 27
Presiones y valores dentro de la cámara de contención de muestras

Tipo de presión	Valor (Pa)
Presión de salida	0e-009
Presión de la muestra	2.0e-003
Presión de la cámara	2.3e-002

Fue necesario determinar el área de trabajo para el análisis químico, por ende, se generó un aumento de imagen 10000x, como se puede apreciar en la siguiente ilustración.:

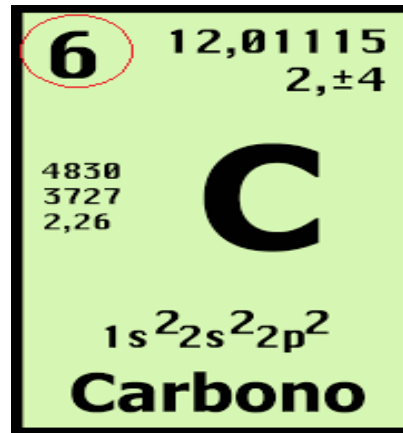
Figura 55*Probeta sometida a un aumento de 10000x*

Ya generado el aumento, el sistema estructura la imagen en alta resolución, de un archivo de salida de tipo .tif, este procedimiento se demora aproximadamente 15 minutos. En la zona definida, la máquina, determinó la composición química, debido a que no es una superficie homogénea. El área seleccionada para este proceso, se lo puede visualizar en la siguiente imagen, la que fue seleccionada por estar en el lugar más representativo de la probeta, en la sección céntrica.

Figura 56*Área seleccionada donde se va a hacer el análisis químico*

Posteriormente, se ejerce un voltaje de 25kV, con el objetivo de generar excitación en los electrones de cada uno de los componentes, que son receptados por un sensor de frecuencia, de tal manera que determina el número atómico Z, indicando así, el tipo de material, por número de electrones y la cantidad que este representa en la aleación, como se puede apreciar en la Figura 57.

Figura 57
Número atómico Z del carbono



Nota. Tomado de: (Eugene, 2019)

El control determina 3 archivos, las imágenes de la probeta con el aumento de 10000x, una tabla de Excel donde se determina el porcentaje en peso de los componentes químicos y la imagenografía de los elementos, detallados en la siguiente sección.

3.4.1. Probeta uno

La imagen que se generó a 10000x aumentos, se puede visualizar en las dos siguientes ilustraciones:

Figura 58

Primer aumento de alta resolución de la probeta 1

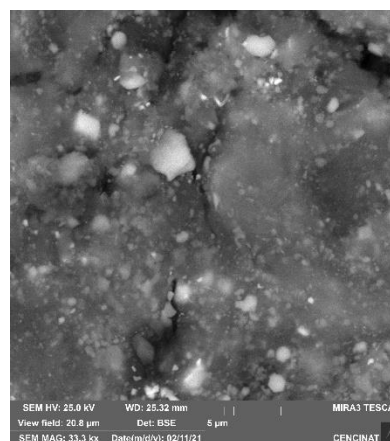
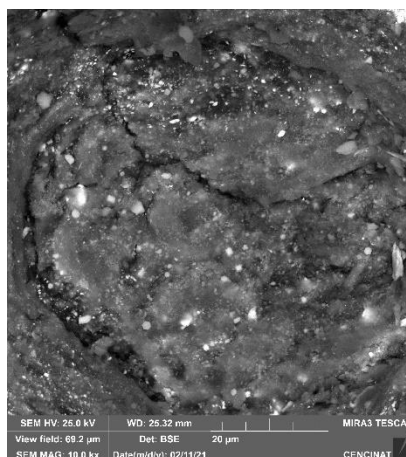


Figura 59

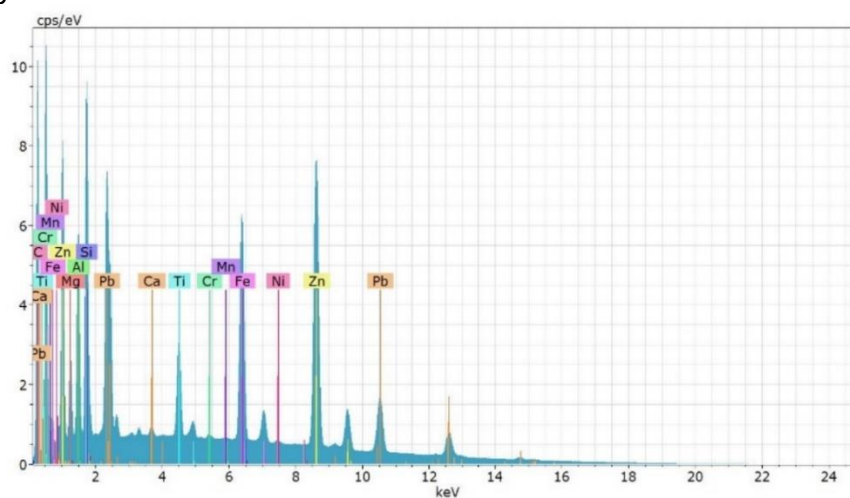
Segundo aumento de alta resolución de la probeta 1



La imagenografía, se puede apreciar en la imagen a continuación:

Figura 60

Imagenografía de la muestra 1



Finalmente, la maquina obtuvo las composiciones químicas de los metales resultado, correspondiente a la probeta 1.

Tabla 28

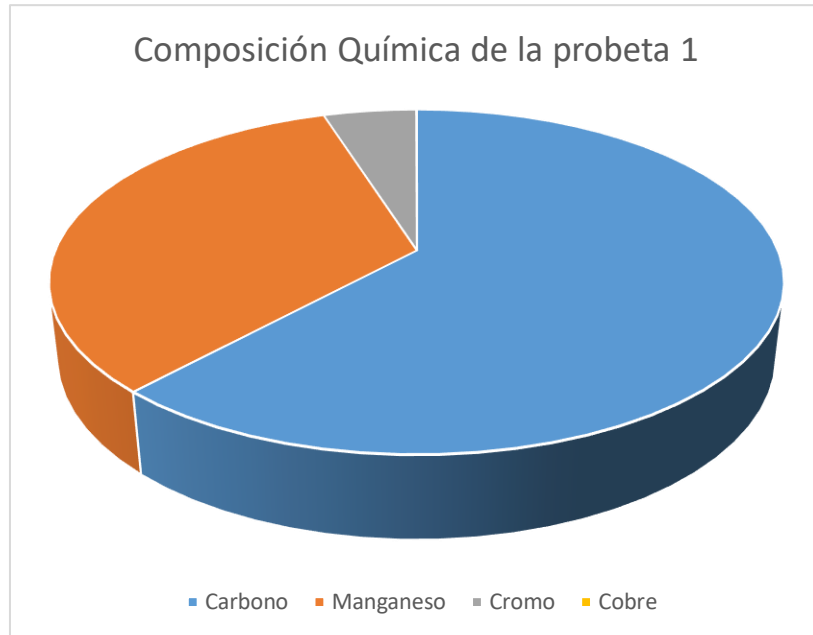
Resultados de los análisis químicos de la probeta 1

Elemento	Número atómico (Z)	Serie EDS	Porcentaje de masa (%M/M)
Hierro	26	K-series	94,6962
Carbono	6	K-series	3,2674
Manganeso	25	K-series	1,7562
Cromo	24	K-series	0,2562
Cobre	29	K-series	0,0023
		Sum:	100

Se representó los porcentajes de composición en la gráfica estadística a continuación:

Figura 61

Gráfica de la de la probeta 1 (excluyendo al Hierro)



3.4.2. Probeta dos

Los resultados de esta probeta, son obtenidos de manera igual a la probeta uno, dando como resultados las 2 imágenes aumentadas siguientes:

Figura 62

Primer aumento de alta resolución de la probeta 2.

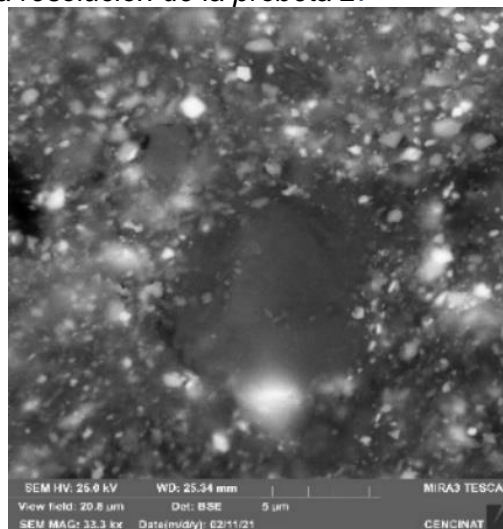
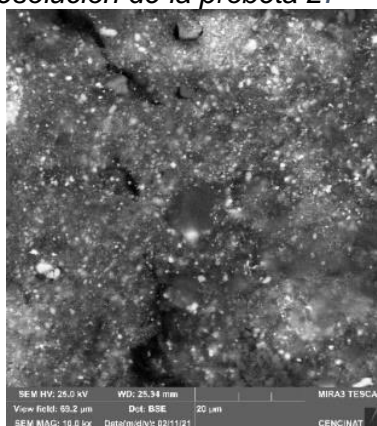


Figura 63

Segundo aumento de alta resolución de la probeta 2.



Los resultados de la composición en la segunda probeta fueron las siguientes:

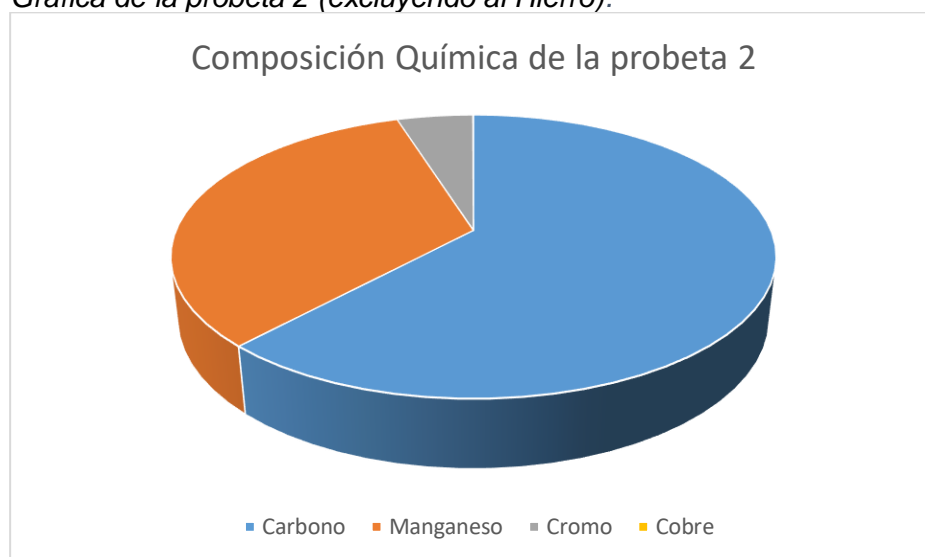
Tabla 29

Resultados de los análisis químicos de la probeta 2

Elemento	Número atómico (Z)	Serie EDS	Porcentaje de masa (%M/M)
Hierro	26	K-series	94,7400
Carbono	6	K-series	3,2578
Manganeso	25	K-series	1,7456
Cromo	24	K-series	0,2545
Cobre	29	K-series	0,0021
Sum:			100

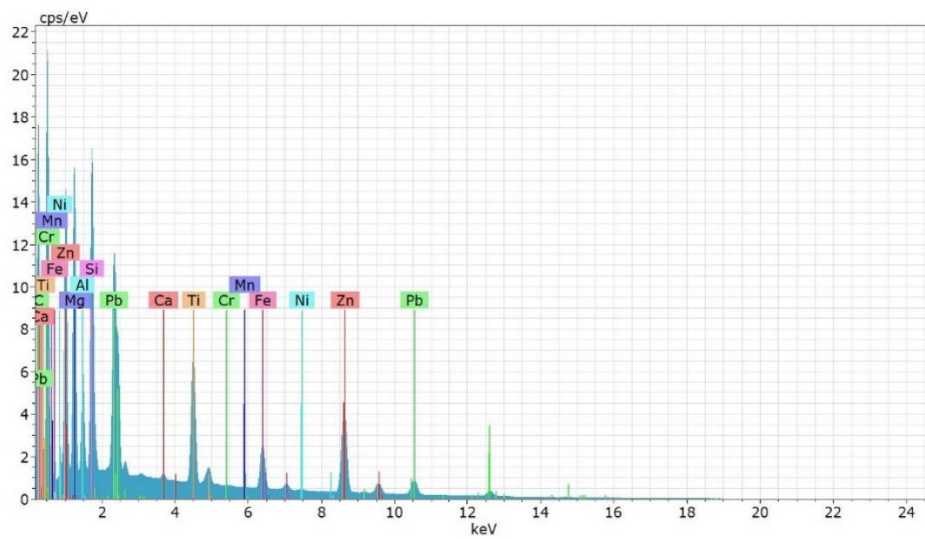
Figura 64

Gráfica de la probeta 2 (excluyendo al Hierro).



La imagenografía, para este caso se puede apreciar en la imagen a continuación:

Figura 65
Imagenografía de la muestra 2



3.5. Pruebas de frenado al 100% de espesor

Para las pruebas de frenado, se utilizó un disco de freno nuevo, con un espesor nominal de 25mm para este modelo. El vehículo se encontraba con un kilometraje de 176355Km, por lo que se transita la ruta establecida en la figura 69, debido a que, de acuerdo a la norma ECE R90, antes de la prueba de frenado, se debe recorrer 50km.

La ruta de precalentamiento fue desarrollada en el perímetro que bordea a la laguna de Yahuarcocha, cuya trayectoria por vuelta es de 10km, aproximadamente, haciéndose un total de 5 vueltas, para finalizar con el precalentamiento.

Figura 66
Trayectoria de precalentamiento del disco de freno



Después de este proceso, se definió el peso de la carga total que debe contener el vehículo, tomando de referencia la que establece la normativa ECE R90, de mínimo 500lb o 226,59Kg.

Tabla 30

Pesos de las cargas dentro del vehículo

Definición	Peso
Conductor	110Kg
Acompañante	110Kg
Costal de papas	50Kg
Paquete de discos de freno	28Kg
Total	298Kg

El peso, fue con el objetivo, de hacer los ensayos con una carga útil total; en el caso del vehículo, un Suzuki Grand Vitara SZ, 5 puertas con motor 2.0, con la capacidad de albergar 5 pasajeros.

Figura 67

Suzuki Grand Vitara SZ, 5 puertas, con carga de 280Kg



Se definió la clase que se cumple en el vehículo según la Tabla 6, entrando en la “Categoría M1: Vehículos que posean, como tope, ocho asientos incluyendo la del conductor. Notándose la ausencia del espacio de viajeros que vayan parados. El conductor solo poseerá un lugar de conducción.” (CEPE, 2012)

Una vez definida la categoría del vehículo, se verificó, que los discos de freno se encuentren en óptimas condiciones, sin agrietamientos ni oxidación, como se puede visualizar en la posterior ilustración.

Figura 68

Disco de freno del Suzuki Grand Vitara SZ



El disco de freno tiene un valor de medida de espesor de 25,36mm, dando una condición totalmente admisible de uso, debido a que su nivel de desgaste es inferior que el 20%, con respecto al valor nominal que establece CHEVROLET, en la Figura 29.

Figura 69

Ancho del disco de freno de 25,36mm, al 100% de espesor



Después de haber constatado que el disco de freno este en óptimas condiciones de trabajo, se montó el mismo, adjuntamente con las pastillas, en el vehículo.

Figura 70

Disco y pastillas montadas en el sistema de freno



Posteriormente se ensamblaron los neumáticos y se determinó el valor del kilometraje inicial, de 176355Km, como se puede observar en la figura a continuación:

Figura 71

Kilometraje inicial de la prueba, al 100% de espesor



El proceso de precalentamiento del disco, se cumplió cuando se recorrió un total de 50Km, llegando el kilometraje a marcar 176404Km.

Figura 72

Kilometraje final al 100% de espesor



Después de finalizada esta parte de las pruebas, se detiene el vehículo, con el objeto de que las pastillas y discos se adapten otra vez a su geometría inicial, previo a las mediciones térmicas, esta parte del ensayo, demoró 6 minutos.

Una vez pasado el tiempo, el automotor fue acelerado hasta alcanzar una velocidad de 70km/h, debido a que el estudio solamente se centra en el eje delantero, lugar donde el vehículo de prueba tiene un sistema de frenado, pastilla disco, además de ser de categoría M1, según la normativa ECE R90, determinando este criterio, en función a la Tabla 7.

La velocidad de prueba fue verificada en el velocímetro del automotor, donde en el momento de que el testigo marcaba 70Km/h, la prueba comenzó.

Figura 73

Velocidad del vehículo al 100% de espesor



Posteriormente, se detuvo el carro, con pulsaciones rítmicas del pedal de frenado, hasta que el vehículo llegue a una velocidad de 0km/h. Después de esto, se mide la temperatura del disco de freno, ayudados por la pistola térmica.

Figura 74

Toma de temperatura del disco de freno



Para alcanzar la temperatura de trabajo del disco de freno, es necesario, realizar 10 ensayos, llenando la Tabla 8, con las temperaturas que toman los discos en cada ensayo.

Tabla 31

Temperaturas resultantes al 100% de espesor

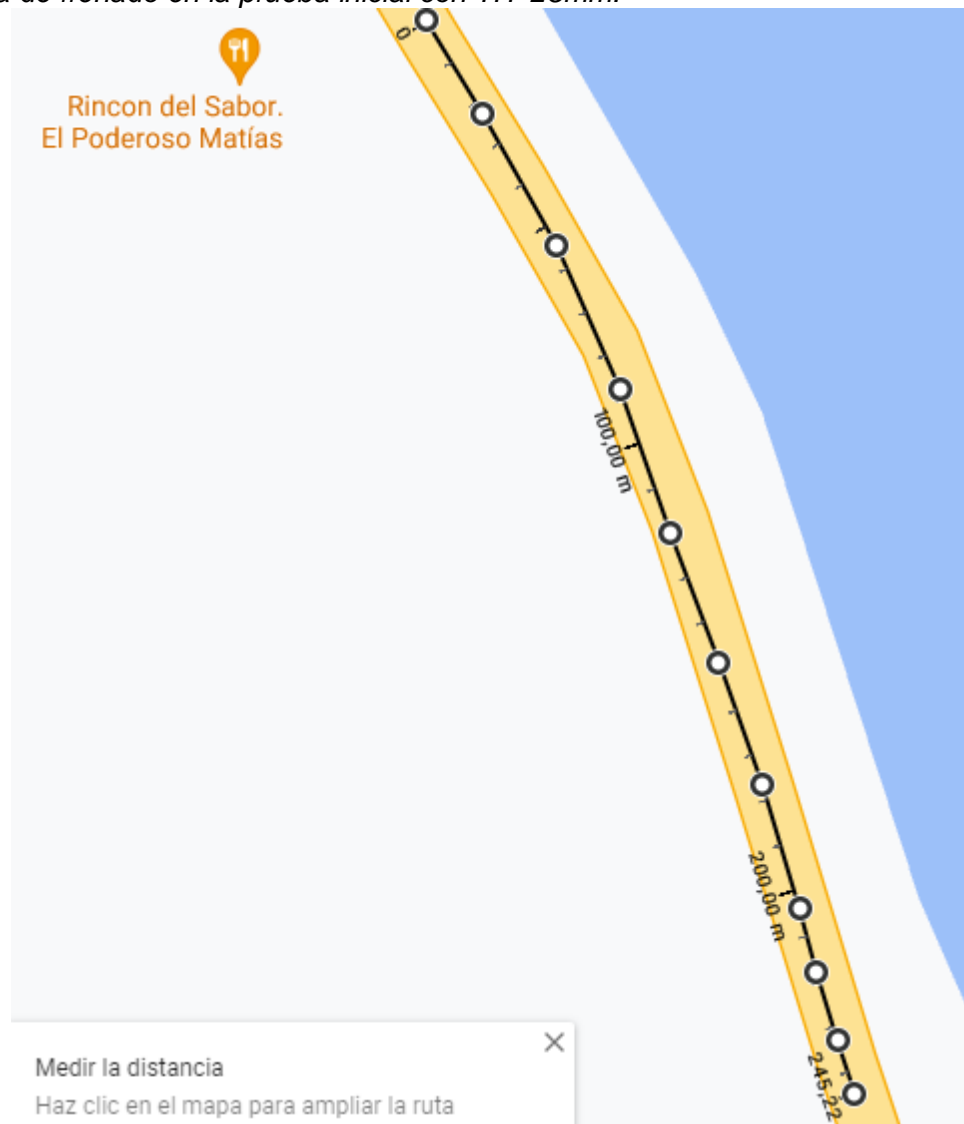
Tipo de Eje	Eje delantero	
Parámetro	Freno de disco	
Número de paradas por ciclo	10	
Velocidad al inicio del frenado (km/h)	70	
Velocidad al final del frenado (km/h)	0	
Nivel de desaceleración	0,4g	
Presión máxima (kPa)	16000	
Disposición disco de freno	Izquierdo	Derecho
Temperatura inicial 1 (°C)	95,32	95,24
Temperatura inicial 2 (°C)	201,23	204,45
Temperatura inicial 3 (°C)	265,31	267,89
Temperatura inicial 4 (°C)	315,62	312,45
Temperatura inicial 5 (°C)	355,23	357,43
Temperatura inicial 6 (°C)	389,34	388,23
Temperatura inicial 7 (°C)	412,31	411,44

Disposición disco de freno	Izquierdo	Derecho
Temperatura inicial 8 (°C)	432,23	431,21
Temperatura inicial 9 (°C)	455,12	457,24
Temperatura inicial 10 (°C)	471,23	468,92
Número de ciclos	1	1

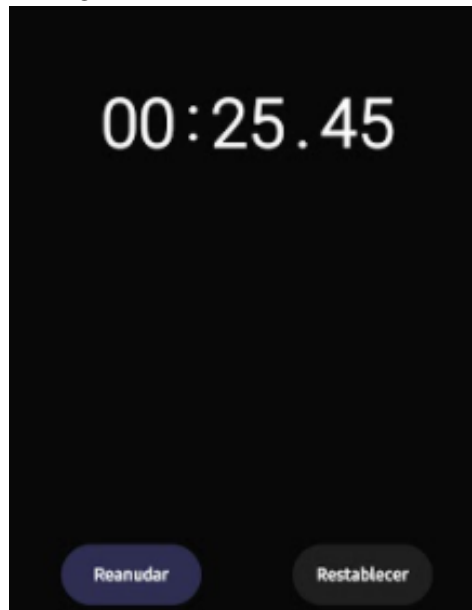
La distancia recorrida en la primera prueba fue de 147,26 metros determinada en la siguiente fotografía:

Figura 75

Distancia de frenado en la prueba inicial con TH=25mm.



Esta distancia de frenado fue completada en un tiempo, según el cronometro del celular que marcó un valor de 25,45 segundos, en la primera prueba.

Figura 76*Tiempo de frenado con TH=25mm*

Se repitió la misma acción durante 10 instancias, con el objetivo de definir los resultados que son necesarios según la normativa ECE R90, en la Tabla 9, donde consta tanto el número de pulsaciones, como las distancias recorridas desde que el vehículo llegó a 70 km/h, hasta su completa detención por acción del sistema de frenos, incluidos los tiempos en los que el proceso se llevó a cabo. Como la normativa establece, se debe generar más de 10 pulsaciones en el experimento, siendo seleccionadas 11.

Tabla 32*Resultados de distancia y tiempo al 100% de espesor*

Parámetro	Freno de disco	Eje delantero
Número de paradas por ciclo	10	10
Velocidad al inicio del frenado (km/h)	70	70
Velocidad al final del frenado (km/h)	0	0
Nivel de desaceleración	0,4g	0,4g
Número de pulsaciones	11	11
		Tiempo de frenado (s)
Distancia de frenado 1 (m)	245,234	25,45
Distancia de frenado 2(m)	243,205	25,05

Distancia de frenado 3 (m)	242,093	24,95
Parámetro	Freno de disco	Tiempo de frenado (s)
Distancia de frenado 4 (m)	239,221	24,87
Distancia de frenado 5 (m)	238,23	24,63
Distancia de frenado 6 (m)	237,02	24,45
Distancia de frenado 7 (m)	236,902	24,09
Distancia de frenado 8 (m)	234,22	23,93
Distancia de frenado 9 (m)	233,123	23,64
Distancia de frenado 10 (m)	230,456	23,33
Número de ciclos	1	1

Estos valores son experimentales, entonces, para determinar los valores reales de frenado establecidos por la normativa ECE – R90, se aplicó la Ecuación 13, para la distancia de frenado, y la Ecuación 14, para el tiempo de frenado, utilizando los valores de la tabla anterior.

$$d_{frenado} = \frac{245,234m}{11} = 22,294m$$

$$t_{frenado} = \frac{25,45s}{11} = 2,31s$$

Tabla 33

Tiempo y distancia de frenado real al 100% de espesor

Distancia de frenado real (m)	Tiempo de frenado real (s)
22,294	2,31
22,110	2,28
22,008	2,27
21,747	2,26
21,657	2,24
21,547	2,22
21,537	2,19
21,293	2,18
21,193	2,15

Como el disco de freno se encuentra al 100%, es necesario hacer el desgaste pertinente para poder comparar los resultados térmicos y mecánicos, generando ciclos progresivos de trabajo del sistema de freno hasta que el espesor, sea de un valor entre el 100% al 95%, para la posterior aplicación de pruebas.

3.6. Prueba de frenado del 95% al 100% de espesor

Una vez alcanzado el espesor del disco de freno a un valor de 24mm, que representa el 96% de espesor, representando, la mitad de la vida del disco de freno, se inició otra vez las pruebas de la normativa ECE-R90, como se puede verificar en la siguiente ilustración.

El punto medio de vida útil de un disco de freno, por lo general es el valor medio que se encuentra entre el valor nominal del fabricante (25mm) y el valor mínimo recomendado por el mismo (23mm).

En este punto del espesor del disco de freno, se puede notar un leve deterioro del frenado, debido a que comienza la fase de desgaste progresivo acrecentado, perdiendo de manera más visible propiedades mecánicas, mecánicas y térmicas, con respecto a la evolución del disco desde que fue montado con un espesor nominal.

Figura 77

Toma de medida del disco de freno al 96% de espesor



De manera igual a la prueba anterior, en este proceso, se recorrió nuevamente los 50Km de precalentamiento, con el mismo peso.

El kilometraje inicial en el que se encontró el vehículo con los discos de freno colocados al inicio de la prueba fue de 176448Km, como describe en la siguiente figura.

Figura 78

Kilometraje inicial del precalentamiento, al 96% de espesor



Una vez desarrollada la fase de precalentamiento de los discos, se llegó a un kilometraje total de 176508Km, que se observa en la siguiente figura.

Figura 79

Kilometraje final del precalentamiento, al 96% de espesor



Se sigue la misma trayectoria establecida en la Figura 75 con las mismas cargas establecidas en la Tabla 30. Repitiéndose las mismas pruebas establecidas en la normativa ECE - R90, llegando a acelerar el vehículo a 70km/h, y por acción del sistema de frenos, detener el mismo hasta velocidad de 0km/h, como se observa en la Figura 73.

Posteriormente, se procedió a tomar las medidas de temperatura similar a la Figura 74 y se plasmó los resultados en la Tabla 8, con los resultados térmicos pertinentes.

Tabla 34

Temperaturas resultantes, después de cada prueba con el disco de freno al 96% de espesor

Tipo de Eje	Eje delantero	
Parámetro	Freno de disco	
Número de paradas por ciclo	10	
Velocidad al inicio del frenado (km/h)	70	
Velocidad al final del frenado (km/h)	0	
Nivel de desaceleración	0,4g	
Presión máxima (kPa)	16000	
Ubicación disco de freno	Izquierdo	Derecho
Temperatura inicial 1 (°C)	96,43	98,81
Temperatura inicial 2 (°C)	208,31	209,42
Temperatura inicial 3 (°C)	271,09	273,23
Temperatura inicial 4 (°C)	324,21	323,34
Temperatura inicial 5 (°C)	361,52	367,26
Temperatura inicial 6 (°C)	395,22	396,12
Temperatura inicial 7 (°C)	419,61	420,44
Temperatura inicial 8 (°C)	444,12	443,43
Temperatura inicial 9 (°C)	460,12	462,17
Temperatura inicial 10 (°C)	475,45	470,92
Número de ciclos	1	1

Durante las pruebas de temperatura, al igual que el anterior punto, se determinó la distancia y el tiempo de frenado experimental, para este caso:

Tabla 35

Distancia y tiempo de frenado al 96% de espesor

Parámetro	Freno de disco	Eje delantero
Número de paradas por ciclo	10	10
Velocidad al inicio del frenado (km/h)	70	70

Velocidad al final del frenado (km/h)	0	0
Nivel de desaceleración	0,4g	0,4g
Número de pulsaciones	11	11
		Tiempo de frenado (s)
Distancia de frenado 1 (m)	244,795	25,41
Distancia de frenado 2(m)	243,903	25,09
Distancia de frenado 3 (m)	242,234	24,81
Distancia de frenado 4 (m)	239,94	24,88
Distancia de frenado 5 (m)	238,89	24,69
Distancia de frenado 6 (m)	238,23	24,43
Distancia de frenado 7 (m)	237,234	23,99
Distancia de frenado 8 (m)	235,213	23,95
Distancia de frenado 9 (m)	234,092	23,72
Distancia de frenado 10 (m)	230,256	23,12
Número de ciclos	1	1

Con los valores de tiempo y distancia experimental, se procede a ejecutar los mismos cálculos hechos en el anterior punto, usando la Ecuación 13 y Ecuación 14, dando como resultado, la siguiente tabla:

Tabla 36

Tiempo y distancia de frenado al 96% de espesor

Distancia de frenado real (m)	Tiempo de frenado real (s)
22,254	2,31
22,173	2,28
22,021	2,26
21,813	2,26
21,717	2,24
21,657	2,22
21,567	2,18
21,383	2,18
21,281	2,16

3.7. Pruebas de frenado del 90% al 95% de espesor

Para este ensayo, al igual que los 2 anteriores casos, se procedió a desgastar el disco de freno hasta el límite total de su grosor, de 23,5mm, este valor es el espesor límite recomendado por (CHEVROLET, 2018), igualmente siguiendo circuitos de conducción cerrados, en la trayectoria establecida por la Figura 75, con los pesos establecidos en la Tabla 30, repitiendo los casos de estudio en 10

ensayos, que una vez recorridos los 50 km de precalentamiento, se llevaron a cabo, las pruebas.

Figura 80

Toma de medida del disco de freno al 92% de espesor



El kilometraje inicial de la prueba de precalentamiento fue de 176524Km, como se puede visualizar en la figura siguiente.

Figura 81

Kilometraje inicial del precalentamiento al 92% de espesor



Llegando hasta un kilometraje total de 176574Km, como se puede observar en la ilustración a continuación:

Figura 82

Kilometraje final del precalentamiento al 92% de espesor



Se verificó la integridad de la superficie del disco de freno, y se montó en el vehículo, como en la Figura 70, y posteriormente se llenó la Tabla 8, dando los siguientes resultados, visibles en la Tabla 37.

Tabla 37

Temperaturas resultantes al 92% de espesor

Tipo de Eje	Eje delantero	
Parámetro	Freno de disco	
Número de paradas por ciclo	10	
Velocidad al inicio del frenado (km/h)	70	
Velocidad al final del frenado (km/h)	0	
Nivel de desaceleración	0,4g	
Presión máxima (kPa)	16000	
Disposición disco de freno	Izquierdo	Derecho

Temperatura inicial 1 (°C)	116,10	115,32
Temperatura inicial 2 (°C)	217,23	217,45
Temperatura inicial 3 (°C)	287,98	286,23
Temperatura inicial 4 (°C)	335,02	335,24
Temperatura inicial 5 (°C)	369,23	368,43
Temperatura inicial 6 (°C)	401,67	401,24
Temperatura inicial 7 (°C)	433,09	432,68
Temperatura inicial 8 (°C)	450,12	450,45
Temperatura inicial 9 (°C)	467,21	467,34
Temperatura inicial 10 (°C)	488,22	489,32
Número de ciclos	1	1

Al igual que en los anteriores casos, se determina, también, tanto la distancia de frenado, como el tiempo:

Tabla 38

Resultados experimentales de distancia y al 92% de espesor

Parámetro	Freno de disco	Eje delantero
Número de paradas por ciclo	10	10
Velocidad al inicio del frenado (km/h)	70	70
Velocidad al final del frenado (km/h)	0	0
Nivel de desaceleración	0,4g	0,4g
Número de pulsaciones	11	11
		Tiempo de frenado (s)
Distancia de frenado 1 (m)	249,234	26,12
Distancia de frenado 2(m)	246,578	25,22
Distancia de frenado 3 (m)	245,456	25,12
Distancia de frenado 4 (m)	243,45	25,00
Distancia de frenado 5 (m)	241,234	24,54
Distancia de frenado 6 (m)	240,216	24,66
Distancia de frenado 7 (m)	239,803	24,45
Distancia de frenado 8 (m)	237,345	24,22
Distancia de frenado 9 (m)	235,781	24,02

Parámetro	Freno de disco	Eje delantero
Distancia de frenado 10 (m)	232,785	23,88
Número de ciclos	1	1

De manera similar a los anteriores casos, se utiliza tanto la Ecuación 13 y Ecuación 14 para llenar la siguiente tabla:

Tabla 39

Tiempo y distancia de frenado real al 92% de espesor

Distancia de frenado real (m)	Tiempo de frenado real (s)
22,658	2,37
22,416	2,29
22,314	2,28
22,132	2,27
21,930	2,23
21,838	2,24
21,800	2,22
21,577	2,20
21,435	2,18

Capítulo IV

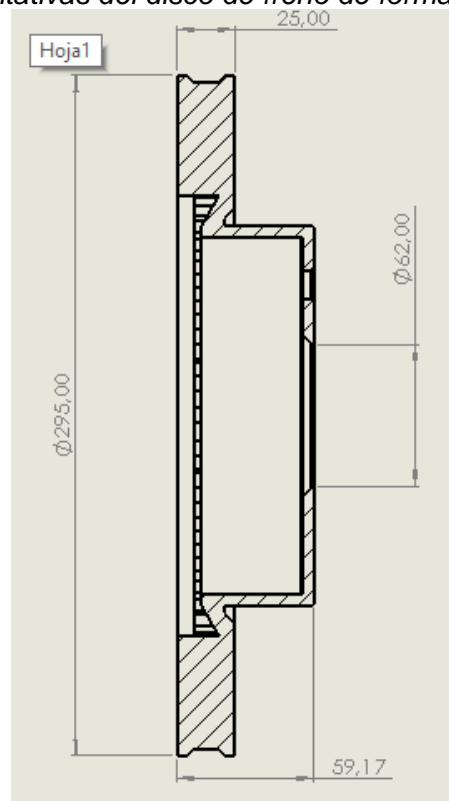
4. Medición y simulación

4.1. Modelado del disco de freno

Dentro del modelado del sistema de frenos, la medida del disco se lo hizo en referencia a la Figura 29, en la que constan las medidas más representativas de un disco de freno de un Grand Vitara SZ 2.0L 5 puertas, transportando las medidas dentro del ambiente CAD.

Figura 83

Cotas más representativas del disco de freno de forma nominal



Para cada una de las simulaciones, se calculó el ancho en función a la Ecuación 1, en relación al ancho nominal del disco de freno, el ancho de media vida del disco de freno, y el espesor mínimo de trabajo, de manera ideal, especificada en por la CHEVROLET. Quedando para la simulación 1:

$$TH = (0,92) * 25mm = 23mm$$

Para la simulación 2:

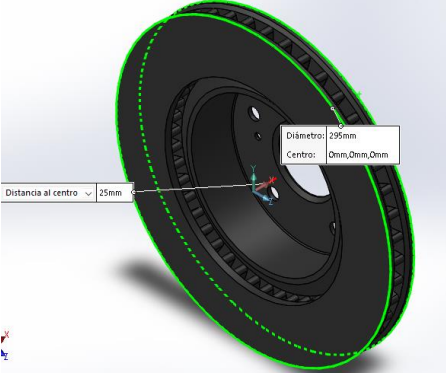
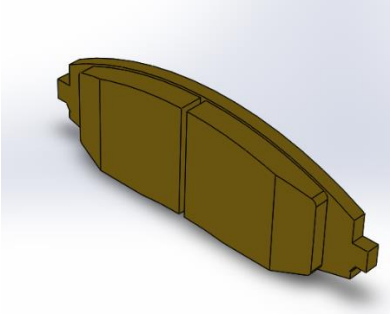
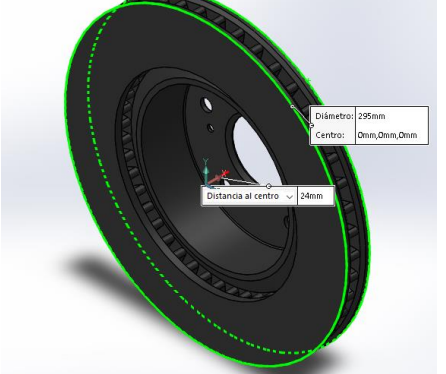

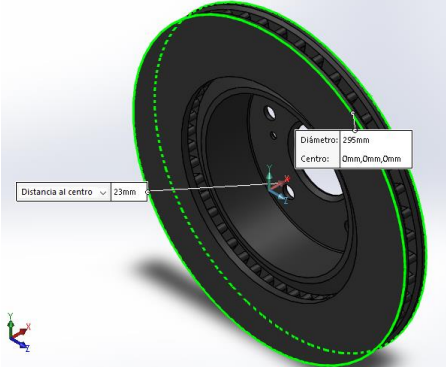
$$TH = (0,96) * 25mm = 24mm$$

Y para la simulación 3:

$$TH = (1,00) * 25mm = 25mm$$

Con su respectivo modelado en 3D, adjuntamente con la geometría de la pastilla y el neumático, se dibujó, según las especificaciones 225/70/R16, consultados en la Tabla 14.

Tabla 40
Disco de freno a diferentes espesores de trabajo

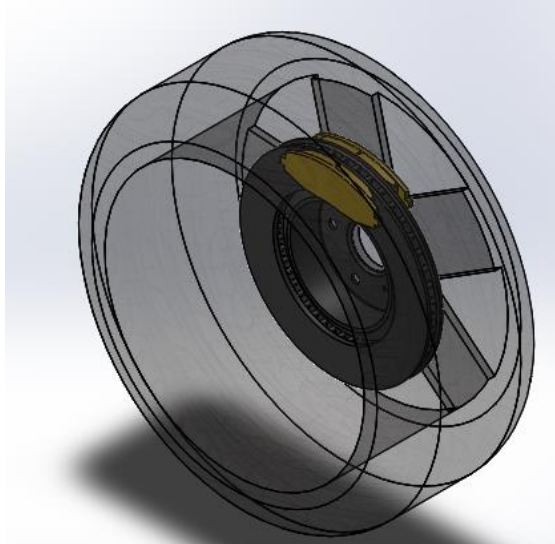
%útil	TH (mm)	Gráfico disco	Gráfico pastilla y neumático
100	25		
96	24		
92	23		

Una vez definidas las piezas por separado, es necesario generar el ensamble correspondiente, con el objeto de ejecutar la simulación y el análisis mecánico y térmico, en condiciones que simulan la realidad del ambiente de trabajo de los mismos. Como el neumático es un elemento que no va a tener relevancia mayor en

el estudio, se lo colocó con un tono transparente, para que la evolución del funcionamiento disco – pastilla, fuera apreciable de mejor manera.

Figura 84

Ensamble de las pastillas con el disco y el neumático.



4.2. Cálculo de fuerzas que actúa sobre el disco de freno

La fuerza presente que recibe el disco de freno, es de tipo de contacto normal al plano del intercambiador térmico, como se puede apreciar en la Figura 15, el cual, es ocasionado por la presión hidráulica por parte del pistón gobernador de la pastilla, quien a su vez genera el esfuerzo sobre la superficie de fricción como se describe en las partes del disco de freno da la Figura 10.

Para calcular la fuerza de asiento, es necesario determinar, la magnitud de la presión hidráulica, por ende, se tomó la medida del diámetro del pistón, como se observa en la Figura 85, que tiene un valor de 48,82mm o 4,882cm.

Figura 85

Medida del diámetro del pistón gobernador de la pastilla



Una vez definido el diámetro del émbolo, se utilizó la

Ecuación 7, para determinar el valor de la superficie de contacto entre el pistón y la pastilla de freno (A_k), quedando la siguiente expresión:

$$A_k = \pi * \frac{(4,882cm)^2}{4} = 18,718cm^2$$

Con la medida del área definida, se determinó el momento generado, por parte de la pastilla, al disco de freno (Md), y se los comparó con los condicionantes presentes en la Tabla 4. Como el área es de $18,718cm^2$, y este valor es mayor de $18,1cm^2$, entonces el valor de Md es de 300Nm.

Una vez definido tanto el momento, como el área de contacto, se midió el diámetro del disco de freno, el cual es de 295mm, según las especificaciones del modelo del disco en la Figura 83.

Se definió el valor de la presión que ejerce el pistón sobre la pastilla, dando el siguiente resultado:

$$P_c = \frac{300Nm}{0,57 * (0,295m) * (1,8718m^2)} = 935,15Pa$$

Finalmente, se utilizó la Ecuación 8, para establecer el valor de la fuerza de contacto entre la pastilla y el disco de freno, el que toma el siguiente valor:

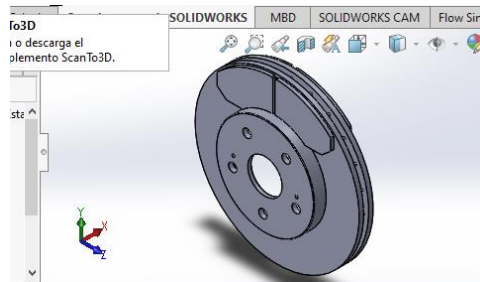
$$F_c = (1,8718m^2) * (935,15Pa) = 1,750kN$$

Este valor de fuerza, debe ser seteado dentro de la simulación, presente en el siguiente punto.

4.3. Simulación del disco de freno

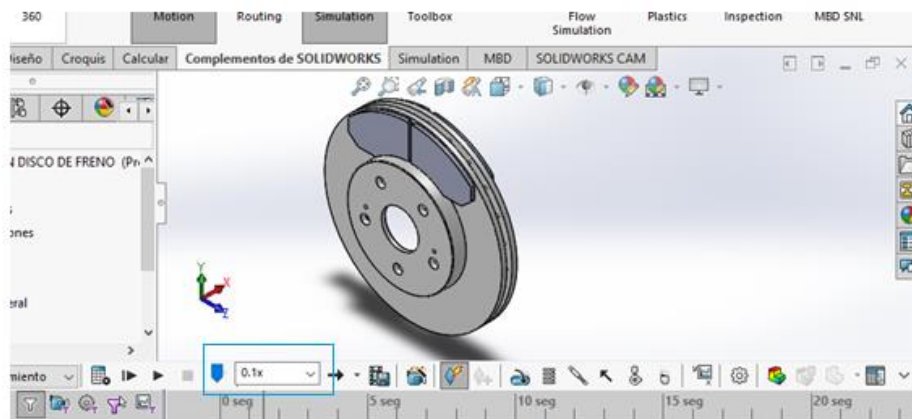
Para el análisis mecánico y térmico, se utilizó la herramienta "Motion" cuyo objetivo es de analizar el sistema móvil de frenos, desarrollando la velocidad anteriormente mencionada de 70 Km/h, y, además dando las gráficas de resultados de movimiento para su posterior análisis, dentro del ambiente virtual CAE, como se puede observar en la siguiente imagen.

Figura 86
Herramienta "Motion" del ambiente CAE



Como los tiempos de frenado están en rangos de segundos, se trabajó dentro de una escala necesaria para que la evolución de la simulación sea apreciable, esta tomó un valor de 0,1x, programado en la herramienta "Motion".

Figura 87
Escala de tiempo en la simulación



Se da movilidad a la simulación, para esto es necesario determinar el valor del diámetro dinámico, sobre el que el disco de freno se mueve, además, este valor es útil, para definir la distancia de frenado en la simulación. Utilizando la siguiente fórmula:

Ecuación 23

Definición de radio dinámico del neumático

$$R_{din} = \frac{Dl}{2} + An * Ran$$

Donde:

R_{din} : Es el radio dinámico (mm)

Dl : Es el diámetro de la llanta en (in)

An : Es el ancho del neumático en (mm)

Ran : Es la relación entre la altura y el ancho del neumático

Para definir el valor exacto del radio del neumático, fue necesario ver en la tabla 14, las especificaciones del neumático que utiliza el Grand Vitara SZ, con parámetros, 225/70/R16, reemplazando los datos, en la Ecuación 23

Definición de radio dinámico del neumático, de acuerdo a las variables que pertenecen a cada especificación, dando como resultado la siguiente expresión matemática:

$$R_{din} = \frac{16in * 25,4mm}{2} + 225 * 0,7 = 360,7mm$$

Una vez determinado el valor del neumático, es necesario aplicar la siguiente fórmula, con la finalidad, de determinar la velocidad en RPM, en la que la simulación va a empezar el frenado.

Ecuación 24

Ecuación para definición de las RPM del disco de freno

$$\omega_{simulacion}(RPM) = 2,653 * \frac{v_0}{R_{din}}$$

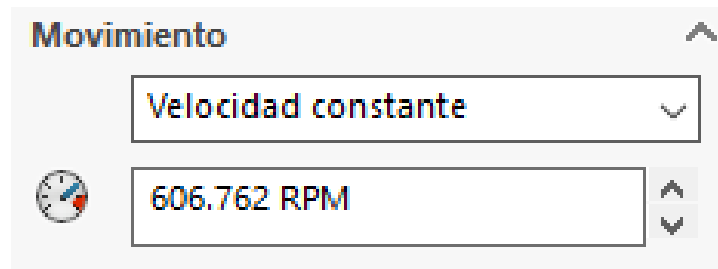
Reemplazando queda:

$$\omega_{simulacion}(RPM) = 3,126 * \frac{\left(\frac{70km}{h}\right)}{(0,3607m)} = 606.762RPM$$

Y se ingresa este valor en el movimiento del disco, como se visualiza en la figura a continuación:

Figura 88

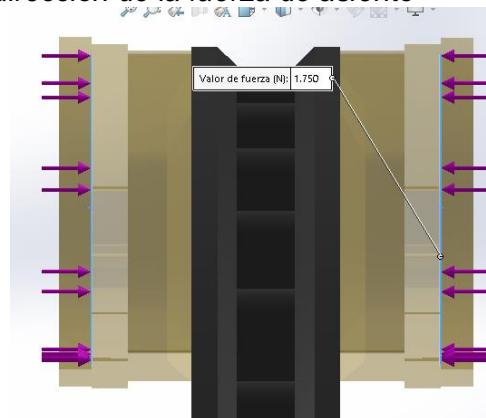
Velocidad de movimiento del disco de freno en la simulación.



Una vez establecido la velocidad de giro del disco de freno, se definió, dentro del ambiente CAE, la magnitud, ubicación y dirección de la fuerza de asiento, además, el área sobre el que esta se distribuye, dando como resultado:

Figura 89

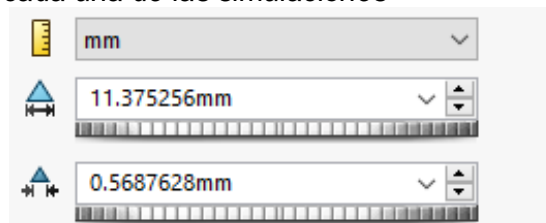
Magnitud, ubicación y dirección de la fuerza de asiento



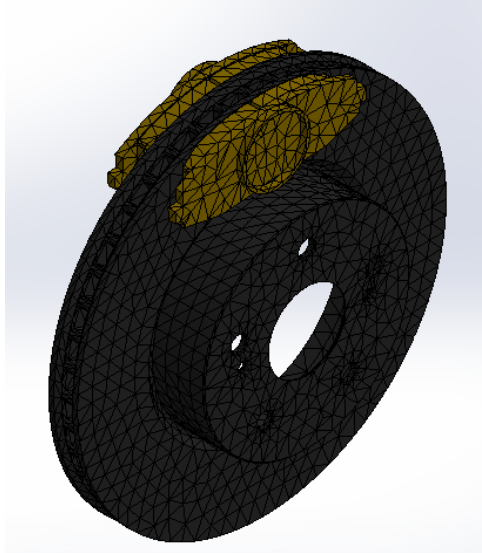
Las medidas del mallado seleccionadas para la simulación del sistema pastilla – disco de freno, fueron las siguientes:

Figura 90

Medidas de la malla de cada una de las simulaciones

**Figura 91**

Mallado aplicado al ensamble del disco de freno



4.4. Selección del material utilizado en el disco de freno

Para seleccionar el material utilizado en el disco de freno, se utilizó los valores de los resultados de los ensayos de tracción, dureza y de composición química del disco en cuestión, comparándolos con los rangos de materiales de la normativa ECE R90, los cuales se puede obtener viendo la

Tabla 3, eligiendo entre los 4 subgrupos en función a quien cumple los requisitos determinados por las pruebas previamente mencionadas.

Los resultados de tracción, visibles en la Tabla 21, son 246,2751MPa, 247,281 MPa y de 262,3121MPa, mientras que según la

Tabla 3, quien cumple estas condiciones serían los 4 subgrupos, debido a que los mínimos establecidos por cada uno, son de Mín. 220MPa, 170MPa, 160MPa y 150MPa, respectivamente, y los resultados de los ensayos, se encuentran dentro de estos rangos.

Los resultados de dureza, establecieron los valores de 215,363 HBW, 213,293HBW, y 213,14HBW, donde según la

Tabla 3, se requiere un valor para cada categoría de 190 - 240 HBW, 160 – 210 HBW, 180 – 230 HBW y 160 – 200 HBW. Los resultados descartan tanto al Subgrupo 2, como al Subgrupo 4, por conclusión se analiza finalmente los resultados de composición química.

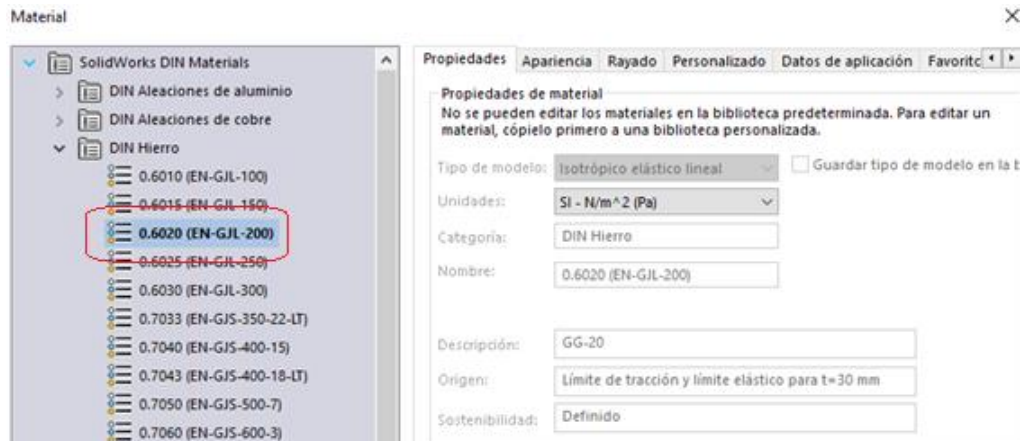
Tabla 41*Resultados de la composición química del disco de freno*

Resultados Ensayo Químico 1			
Elemento	Número atómico (Z)	Serie EDS	Porcentaje de masa (%M/M)
Hierro	26	K-series	94,6962
Carbono	6	K-series	3,2674
Manganeso	25	K-series	1,7562
Cromo	24	K-series	0,2562
Cobre	29	K-series	0,0023
Sum:			100
Resultados Ensayo Químico 2			
Elemento	Número atómico (Z)	Serie EDS	Porcentaje de masa (%M/M)
Hierro	26	K-series	94,7400
Carbono	6	K-series	3,2578
Manganeso	25	K-series	1,7456
Cromo	24	K-series	0,2545
Cobre	29	K-series	0,0021
Sum:			100

Como se puede visualizar, los resultados químicos, descartan al subgrupo 3, debido a que sus valores de carbono se encuentran fuera del rango definido por la normativa en la misma, en un rango de 3,60 – 3,90%, por conclusión, se definió al subgrupo 1, con numeración EN – GJL 200, como el elemento a utilizar en el disco de freno.

Dando como satisfactorias las pruebas, debido a que, según la teoría, los discos de freno son de una manera superior, conformada de Hierro y otras aleaciones metálicas.

Figura 92*Selección del material del disco de freno*



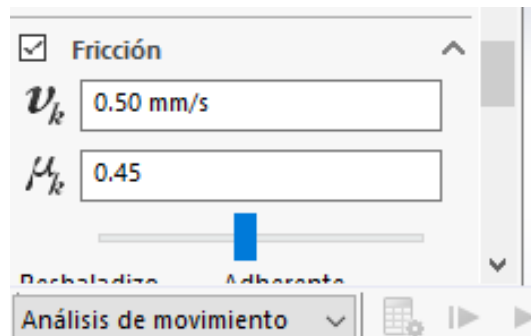
Finalmente, se seleccionó el índice de fricción que existe entre el disco de freno y la pastilla, con el objetivo, de hacer el análisis térmico por rozamiento. El valor es elegido, en función al código con el que fue fabricado el disco, definido como UN S06-2 FF, como se puede observar en la siguiente figura.

Figura 93
Especificaciones de la pastilla de frenos utilizada



Con el código obtenido, se buscó en la Tabla 2, el coeficiente de fricción para una pastilla con código FF, tomando un valor de 0,45, a una velocidad de 70Km/h. Se estableció, este valor, dentro del ambiente CAE, como se puede visualizar en la figura posterior.

Figura 94
Coefficiente de fricción en el ambiente CAE



4.5. Resultados de la simulación a diferentes espesores de trabajo

Los resultados, después de haber ejecutado la simulación del disco de freno, con distintos espesores de trabajo (23mm, 24mm y 25mm), fueron de índole, mecánica y térmica, donde se evaluó la cantidad de deformación, concentradores de esfuerzo, tiempo y distancia de frenado, desaceleración de frenado, esfuerzo efectivo de Von Misses, factor de seguridad, temperatura de funcionamiento del disco de freno, entre otros parámetros de interés dentro del estudio.

4.5.1. Resultados de tiempo de frenado

Estos resultados de la simulación determinaron el tiempo de frenado cuando el disco de freno del Grand Vitara SZ, 2.0 5 puertas, del eje delantero se encuentra con los anchos de trabajo en función a su estado de vida útil.

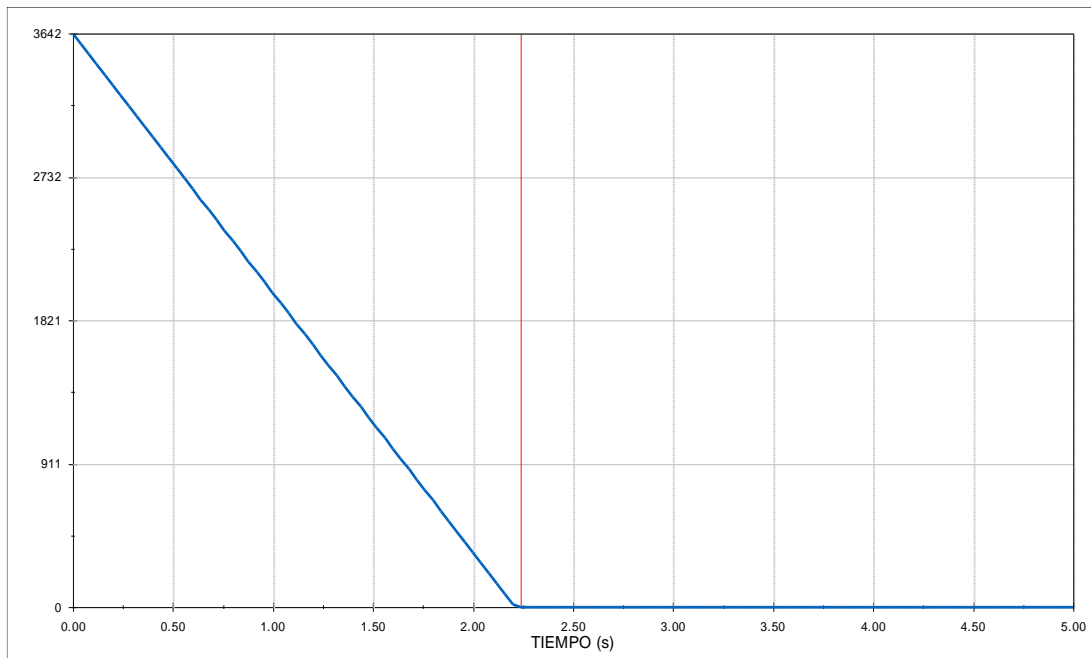
Como se establece en la Figura 88

Velocidad de movimiento del disco de freno en la simulación., la velocidad angular inicial es de 606,762RPM, representando el tiempo de frenado, desde que el disco empieza con esta velocidad hasta su detención total, por acción de la fricción.

En el caso del disco de freno al 100% de espesor útil de trabajo, la imagen resultante se puede visualizar posteriormente:

Figura 95

Gráfica velocidad angular freno vs tiempo con TH=25mm

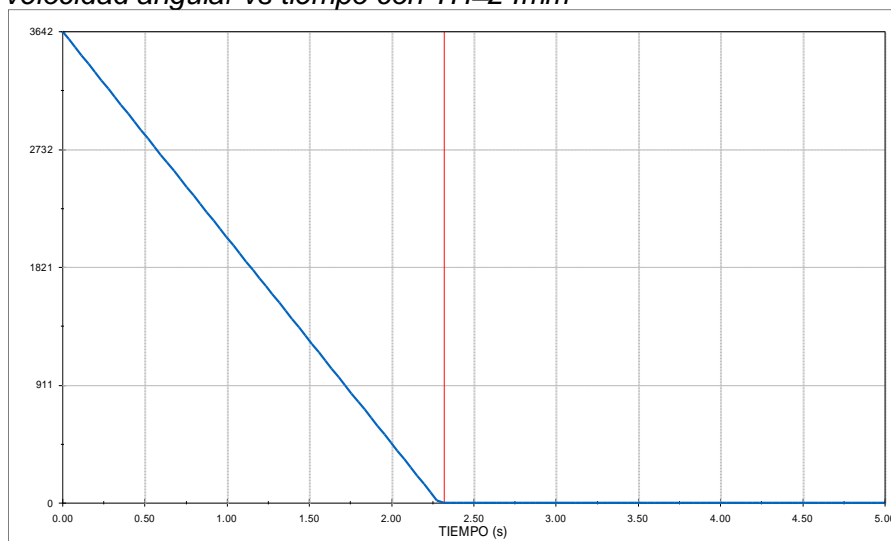


El disco de freno tenía una velocidad angular inicial de $3642^{\circ}/s$ o $606,762RPM$, representando esto, una velocidad lineal de $70Km/h$, ha demorado en detenerse un total de $2,21$ segundos, representando, este el tiempo de frenado, para un disco con un espesor de $25mm$ (100%).

La gráfica para el caso de un disco de freno al 96% de espesor ($TH=24mm$), esta detallada a continuación:

Figura 96

Gráfica velocidad angular vs tiempo con $TH=24mm$

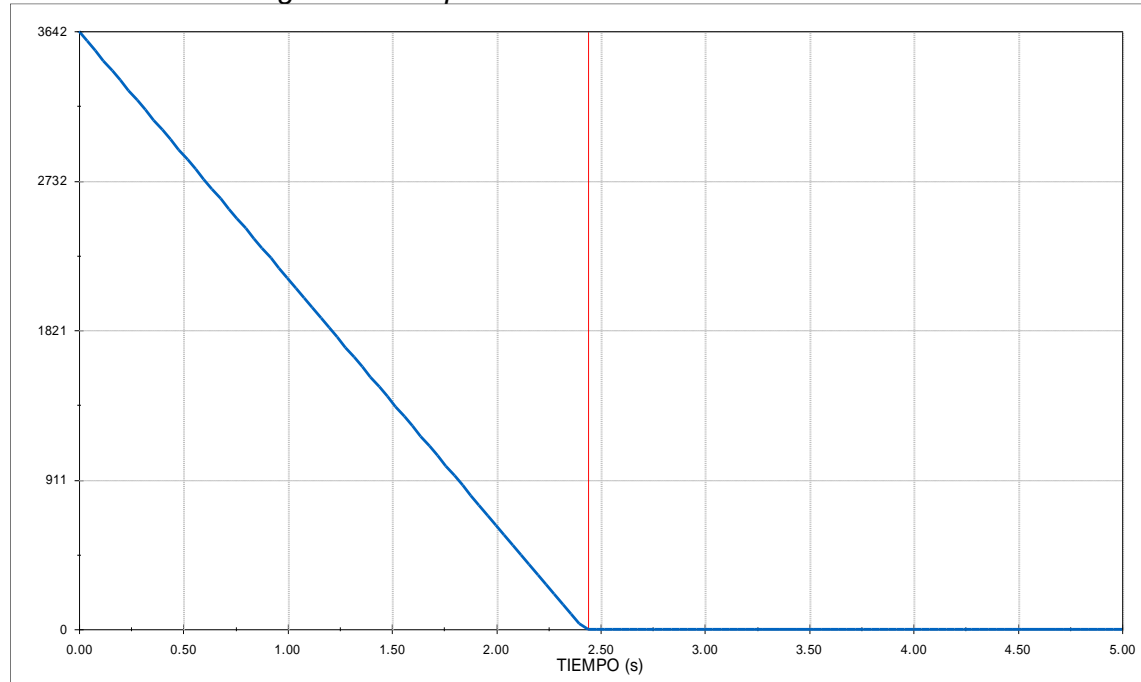


En este caso, el disco ha demorado en detenerse un total de 2,29 segundos, resultando en el tiempo de frenado, para este espesor.

Finalmente, para el disco de freno al 92% de espesor, la gráfica resultante:

Figura 97

Gráfica velocidad angular vs tiempo con TH=23mm



El tiempo total de detención fue de un total de 2,42 segundos, cuando el disco de freno se encuentra en esta etapa crítica de vida.

4.5.2. Distancia de frenado del disco

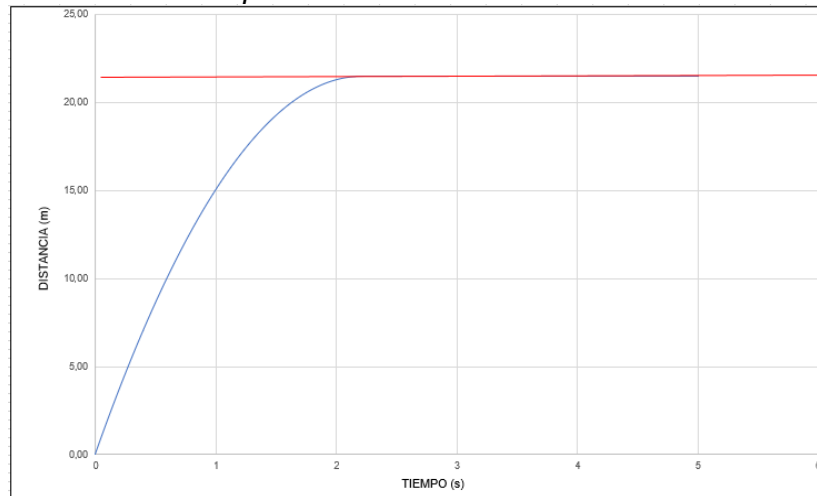
La distancia de frenado, es la longitud lineal que sigue el vehículo hasta detenerse completamente, para determinar este valor, es necesario colocar el medidor de distancias, en la superficie del neumático dibujado, para los 3 casos.

Los análisis de la herramienta motion, fueron desarrollados en 3 simulaciones diferentes, con los respectivos anchos del disco de freno, visualizando la diferencia entre los mismos.

La gráfica resultante, de un disco de freno al 100%, se puede observar en la siguiente figura:

Figura 98

Gráfica distancia versus tiempo de frenado con TH=25mm

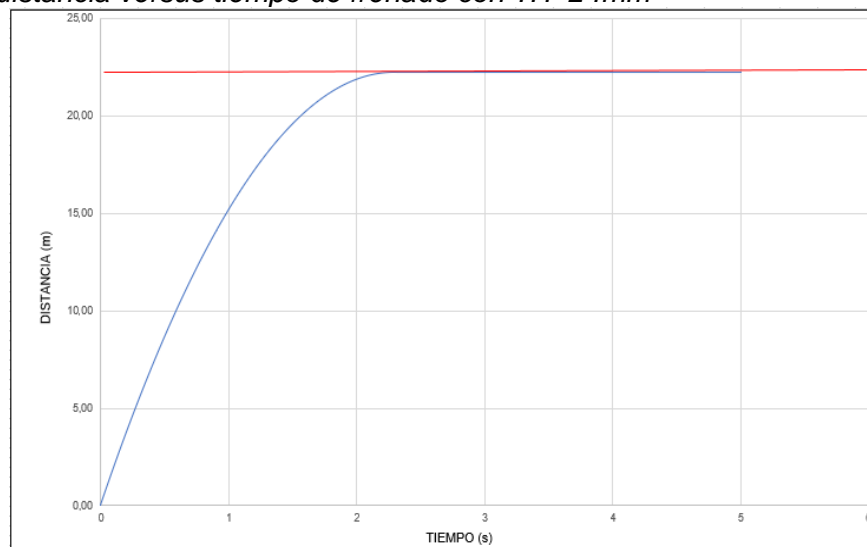


El sistema simulado, desarrolla una distancia de manera ascendente, hasta el punto en que deja de aumentar, pudiéndose ver que la velocidad, que corresponde a la recta tangente a cada punto de la curva, va en decrecimiento, hasta que llega a un valor constante equivalente a 0, lo que determinó la detención de la rotación del disco por acción de la pastilla.

En este caso, el vehículo deja de ganar distancia en el momento que llega a recorrer 21,49 metros, desarrollando esta longitud, en 2,21 segundos. En la siguiente figura, se encuentra la distancia de frenado, para el disco de freno al 96% de espesor:

Figura 99

Gráfica distancia versus tiempo de frenado con TH=24mm

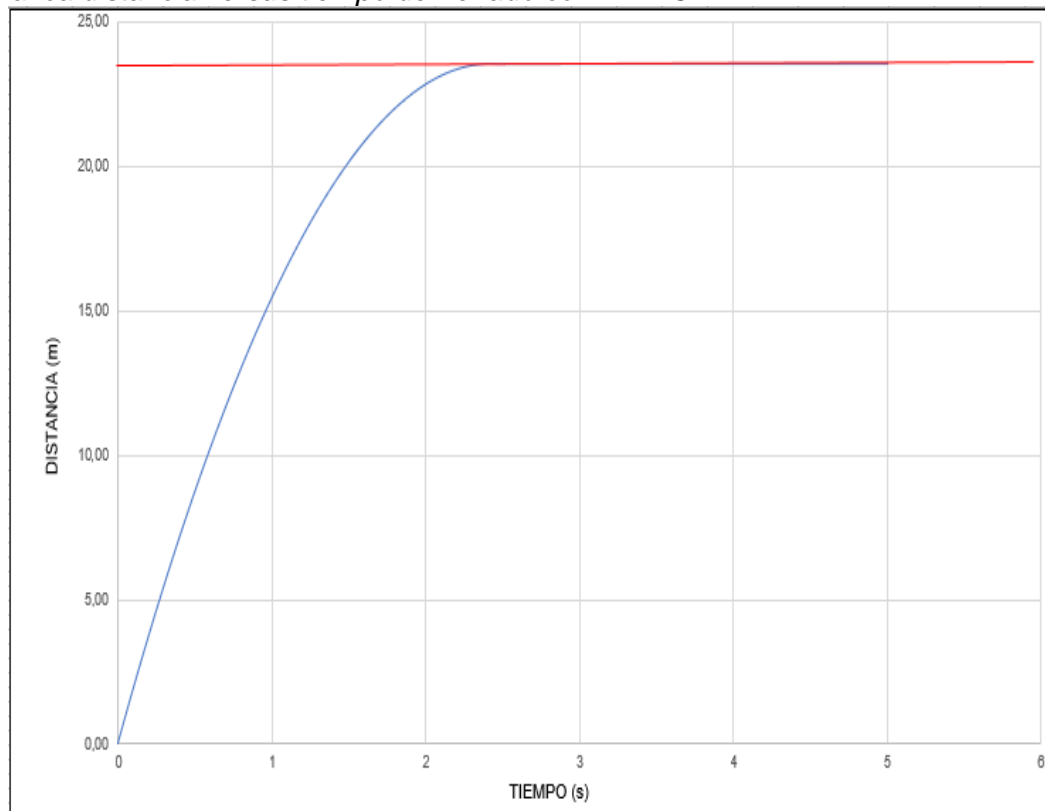


La imagen anterior, establece que el disco de freno, deja de ganar distancia, cuando llega a los 22,26 metros desde que se accionó el sistema de freno, en un tiempo determinado de 2,29 segundos.

Para el caso del disco de freno, 92% de espesor, la distancia de frenado resultante se encuentra detallada en la gráfica:

Figura 100

Gráfica distancia versus tiempo de frenado con TH=23mm



En el caso del ensamblaje, con un disco de freno al 92% de espesor, cuando es sometido a la acción de la pastilla, acumula una distancia de frenado de 23,52 metros, desde que llega a una velocidad de 70km/h, hasta su detención total, demorando este proceso, un total de 2,42 segundos.

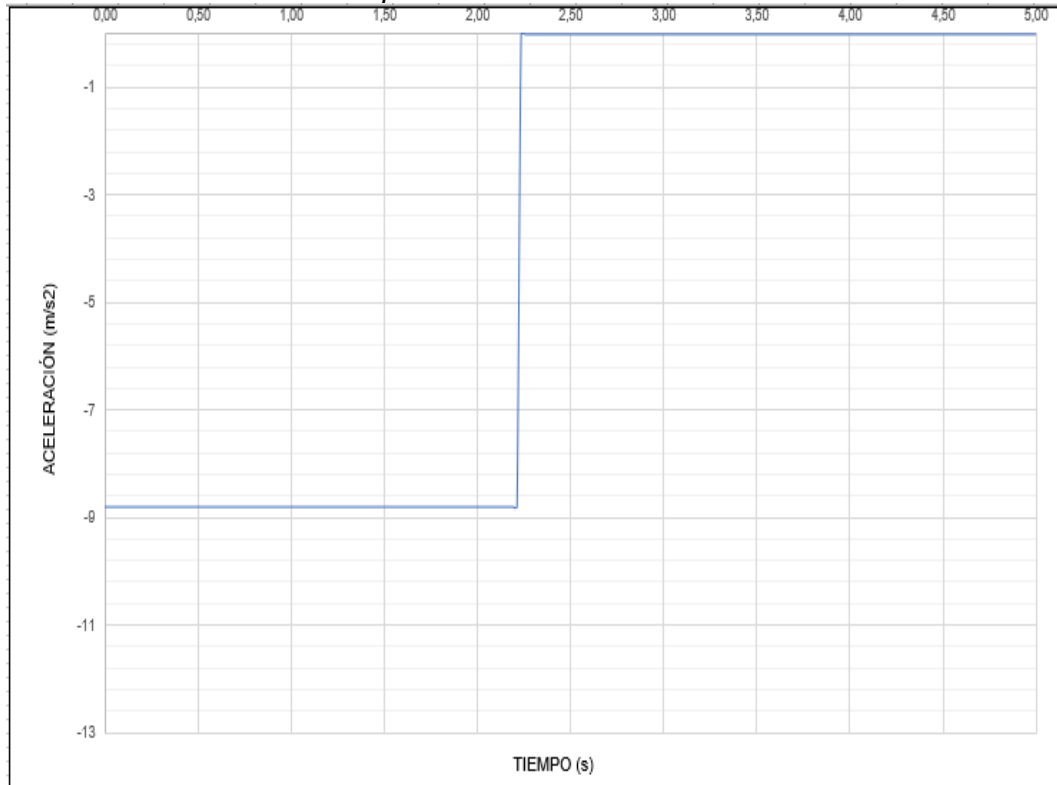
4.5.3. Resultado de desaceleración de frenado

Para definir la desaceleración en este caso, se procedió a colocar un medidor de aceleración en la superficie del neumático, definiendo así la evolución del valor, a

lo largo del tiempo. En el caso del disco de freno con TH=25mm, se obtuvo el siguiente resultado:

Figura 101

Desaceleración función al tiempo con TH=25mm



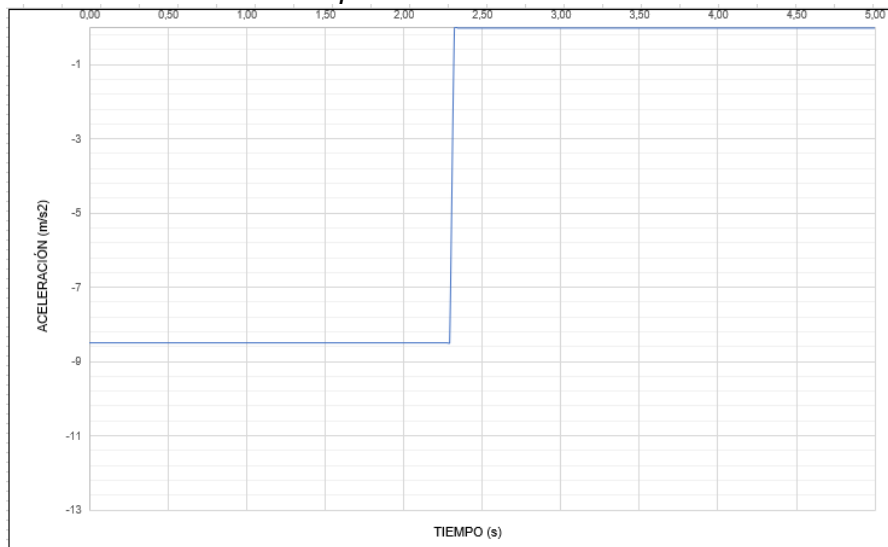
Como se puede observar en la ilustración anterior, la aceleración es de un valor constante total de $-8,798 \text{ m/s}^2$, como un valor imperturbable, a lo largo del tiempo, mientras se desarrolla el movimiento.

La idea de la desaceleración, es de, más adelante, definir cual es la eficiencia de frenado acorde al porcentaje de vida útil del disco de freno, además, que este factor es crucial dentro del ambiente de frenado, tratando de aplicar la mayor magnitud posible, para que la pérdida de velocidad sea más rápida y constante.

El hecho que se dé una recta horizontal, demuestra que el sistema de frenado funciona de manera óptima, deteniendo al disco de freno sin generar picos o ausencia de detención, a lo largo del movimiento del mismo.

Para el caso del sistema simulado, cuando TH=24mm:

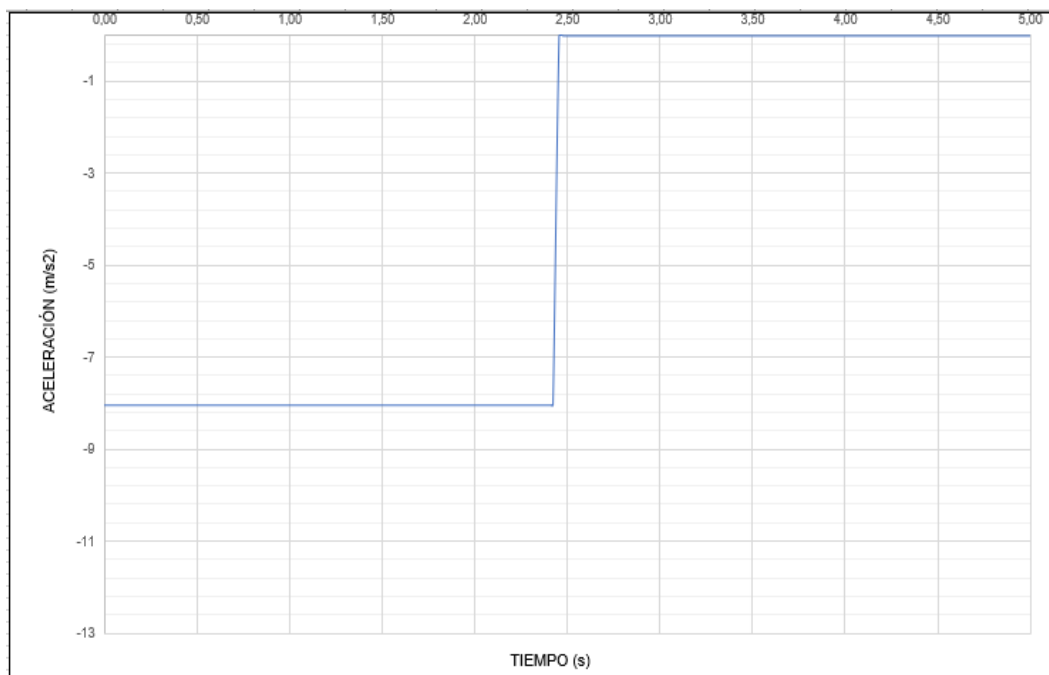
Figura 102
Desaceleración en función al tiempo con TH=24mm



En la figura anteriormente mostrada, se puede visualizar, que el disco de freno, genera una desaceleración total de $-8,491\text{m/s}^2$, producto del rozamiento disco – pastilla.

Para el último caso, con el disco a un espesor crítico de trabajo, se desarrolló la siguiente figura:

Figura 103
Desaceleración en función al tiempo con TH=23mm



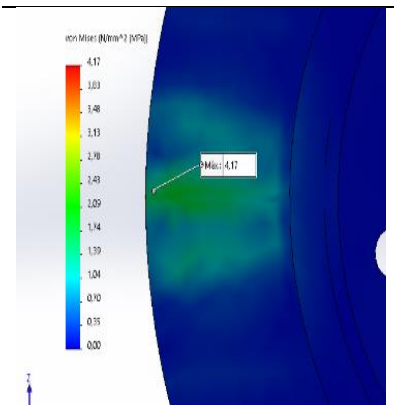
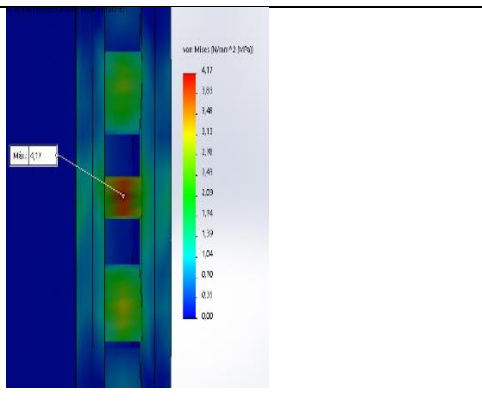
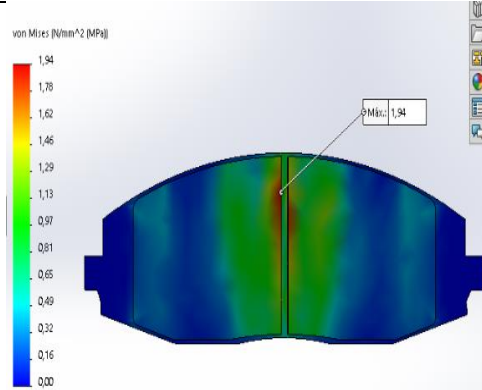
El sistema, cuando se encuentra en movimiento, desarrolla una desaceleración total de $-8,035 \text{ m/s}^2$, durante el tiempo de frenado, de 2,42 segundos.

4.5.4. Resultado de esfuerzo de Von Misses del disco

El objetivo de estos resultados, es determinar la región y la magnitud del esfuerzo máximo combinado de Von Misses, en el modelo del disco de freno y de la pastilla, una vez ejecutada la simulación, cuando el disco se encuentra al 92%, 96% y 100%, de vida útil, resultando en las siguientes tablas, ubicando según la escala de colores, el concentrador de esfuerzo máximo.

Tabla 42

Concentradores de esfuerzo y magnitudes al 100% de espesor

Vista frontal disco	Vista lateral disco	Magnitud esfuerzo máximo 41,7MPa
		
Vista frontal pastilla		19,4MPa

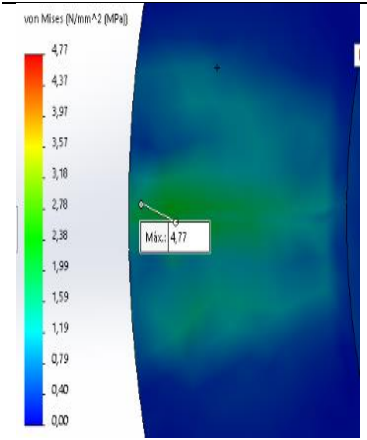
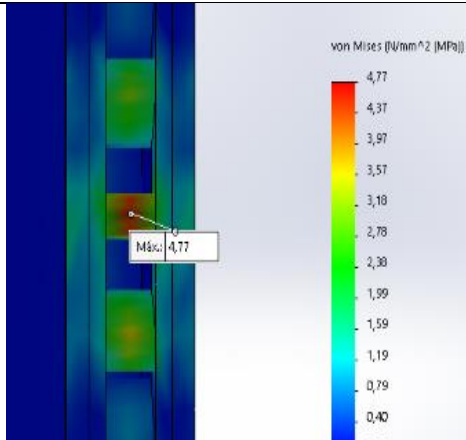
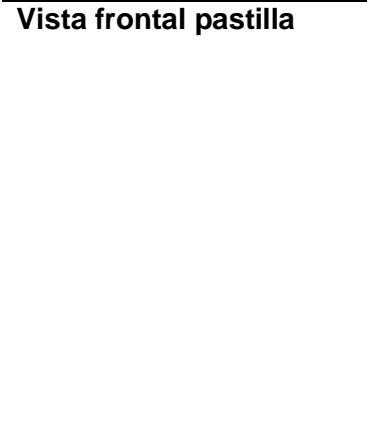
El concentrador de esfuerzo máximo se encuentra en la aleta perteneciente al canal de enfriamiento, en el momento en que la pastilla se asienta por encima del

mismo, generando un esfuerzo efectivo de Von Misses máximo de 41,7MPa, y como reacción, la pastilla recibe un esfuerzo efectivo máximo de Von Misses de 19,4MPa.

Esta reacción es debido a la acción de asiento que generó la pastilla sobre el disco, de manera mecánica, como resultado de la aplicación de la fuerza de asiento del pistón gobernador, sobre el sistema de frenado.

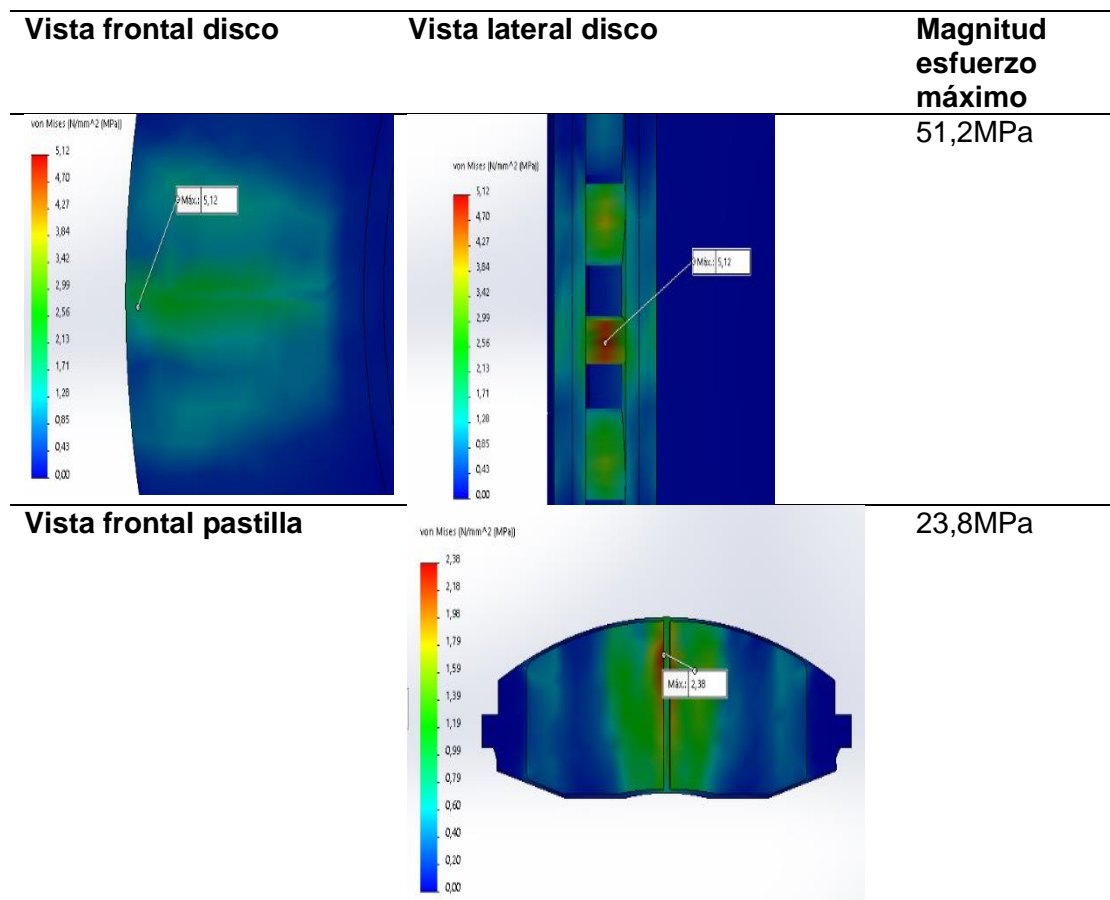
Tabla 43

Concentradores de esfuerzo y magnitudes al 96% de espesor

Vista frontal disco	Vista lateral disco	Magnitud esfuerzo máximo 47,7MPa
		
Vista frontal disco	Vista lateral disco	Magnitud esfuerzo máximo 22,2MPa
		

En la tabla anterior, se puede visualizar, que el disco de freno recibe el esfuerzo máximo de Von Misses, en la aleta, en el momento en que el disco de freno se posa sobre el mismo, generando un valor máximo de 47,7MPa y recibiendo la pastilla, un esfuerzo máximo de 22,2MPa, entendiéndose como la escala de colores, indicativo necesario para definir el nivel de esfuerzo y la posición donde se genera

Tabla 44
Concentradores de esfuerzo y magnitudes al 92% de espesor



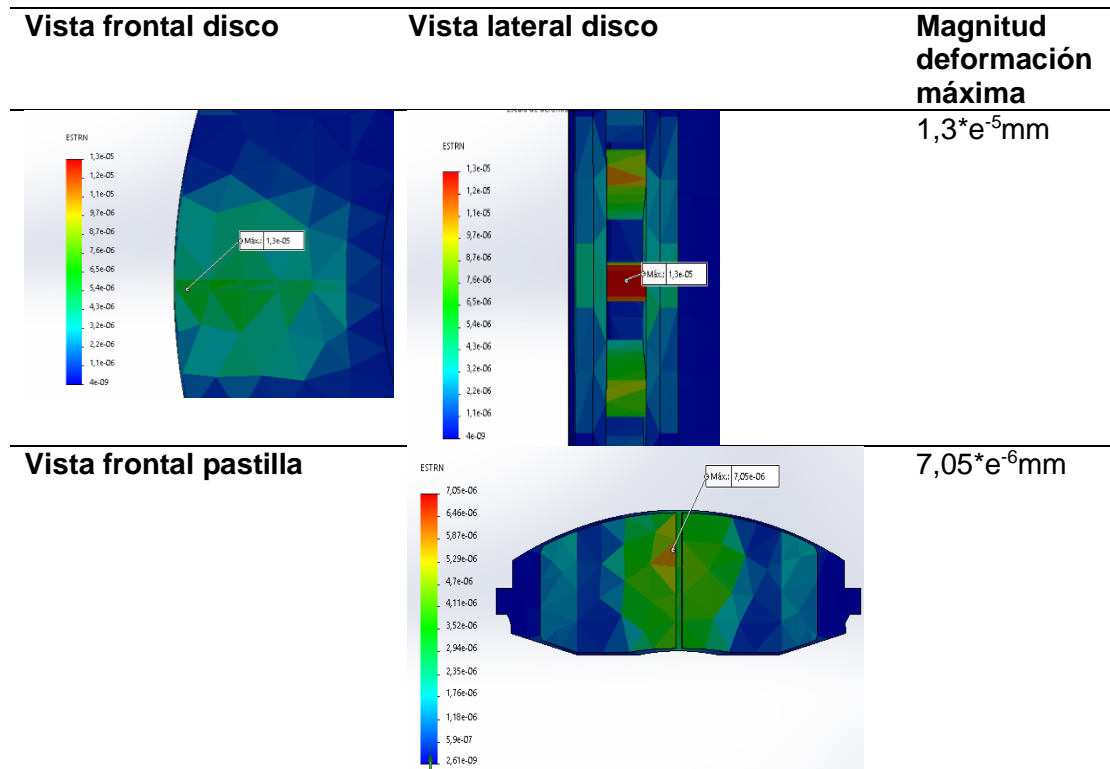
El concentrador de esfuerzo máximo, que se encuentra en el disco de freno, está localizado en la aleta, donde recibe el asiento de la pastilla, generando un esfuerzo efectivo de Von Misses de 51,2MPa, y la pastilla, a su vez recibe un esfuerzo efectivo máximo de Von Misses de 23,8MPa.

4.5.5. Resultado de deformación del disco

Los resultados de la deformación del disco de freno, fueron establecidos, con el objetivo de determinar la región donde, en forma longitudinal, sufre mayor alteración, según las características mecánicas del material, como efecto de la aplicación del esfuerzo efectivo de Von Misses,

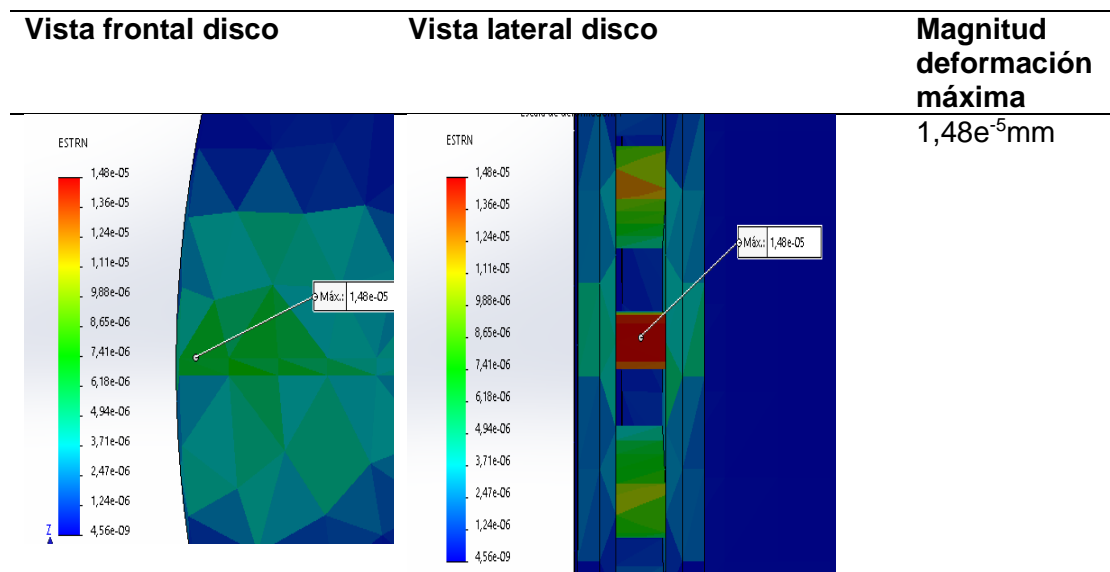
Se le generó la fuerza establecida de 1,75 kN y mediante una escala de colores, se diferenció los variados niveles de deformación mecánica presente en el disco de freno. Este esfuerzo, es el que el disco genera sobre la pastilla en el momento que el usuario aplica el esfuerzo. Resultando en las siguientes tablas.

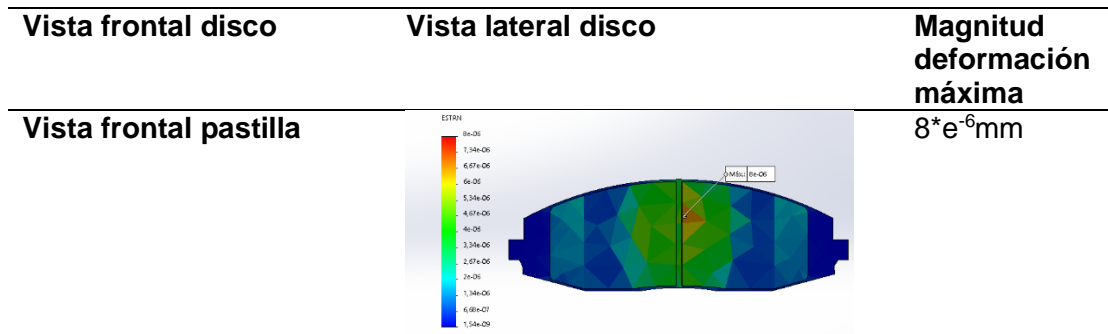
Tabla 45
Deformación total al 100% de espesor



La ubicación de la deformación máxima del disco de freno, es en la aleta en el momento en el que la pastilla ejerce la fuerza de asiento sobre el disco, de un total de $1,3 \cdot 10^{-5}$ mm, además de que la pastilla de freno, como resultado del esfuerzo de reacción, se deforma un total máximo de $7,05 \cdot 10^{-6}$ mm.

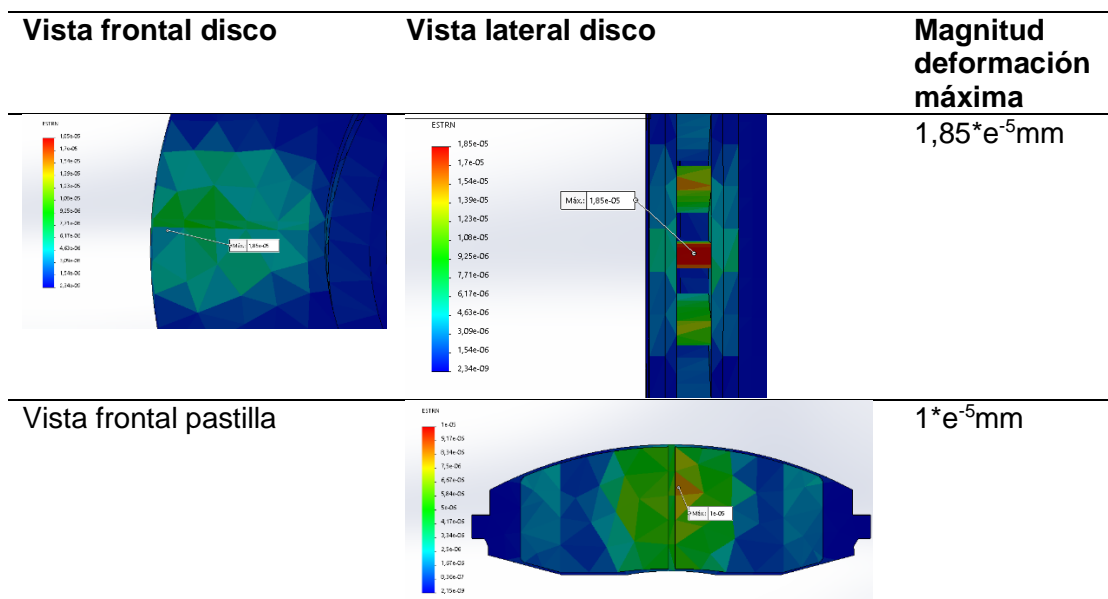
Tabla 46
Deformación total al 96% de espesor





La deformación máxima total generada sobre el disco de freno, fue de un valor total de $1,48 \cdot e^{-5} \text{mm}$, ubicado en la aleta donde la pastilla ejerce el asiento sobre el disco de freno, además de generar una deformación por reacción sobre la pastilla de $8 \cdot e^{-6} \text{mm}$.

Tabla 47
Deformación total al 92% de espesor



En este caso, la deformación máxima, al igual que en casos anteriores, se ubica en la aleta de ventilación donde se asienta el disco de freno sobre la superficie de fricción, y de forma normal, ejerce una fuerza equivalente a 1,75kN, desarrollando una deformación máxima del disco de freno $1,85 \cdot e^{-5} \text{mm}$, y en la pastilla, $1 \cdot e^{-5} \text{mm}$.

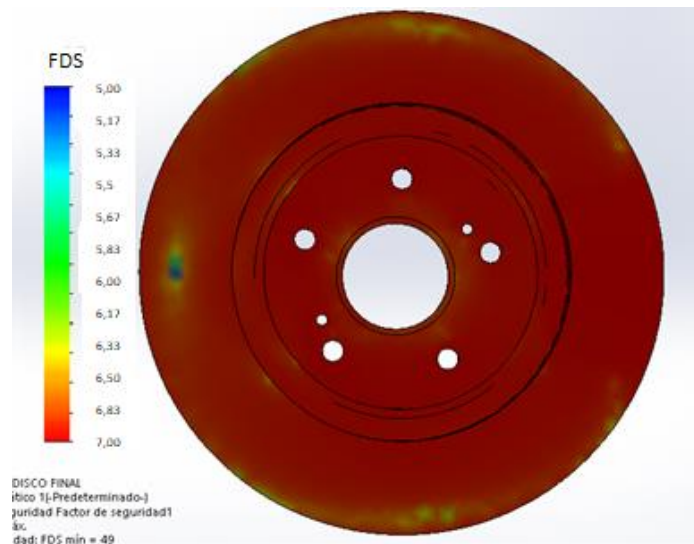
4.5.6. Resultado de factor de seguridad del disco de freno

En los últimos resultados mecánicos, se evaluó los niveles de seguridad que requiere el disco de manera mínima y máxima, cuando es sometido al esfuerzo efectivo de Von – Misses ocasionado por la fuerza del disco de freno de 1,75kN, en

el momento que la pastilla se asienta sobre la superficie de rozamiento, dando para el caso de un disco de freno al 100% de espesor, la siguiente imagen.

Figura 104

Distribución del factor de seguridad en el disco de freno



Como se puede observar en la anterior imagen, el factor de seguridad generado por el disco de freno oscila entre los valores de 5 a 7. El valor de 5, se encuentra ubicado en el extremo del disco de freno, y el valor de 7, en las partes céntricas del disco, como consecuencia, de que el esfuerzo efectivo de Von – Misses, se genera mayoritariamente donde hay contacto entre pastilla y disco, localizada en la zona de fricción.

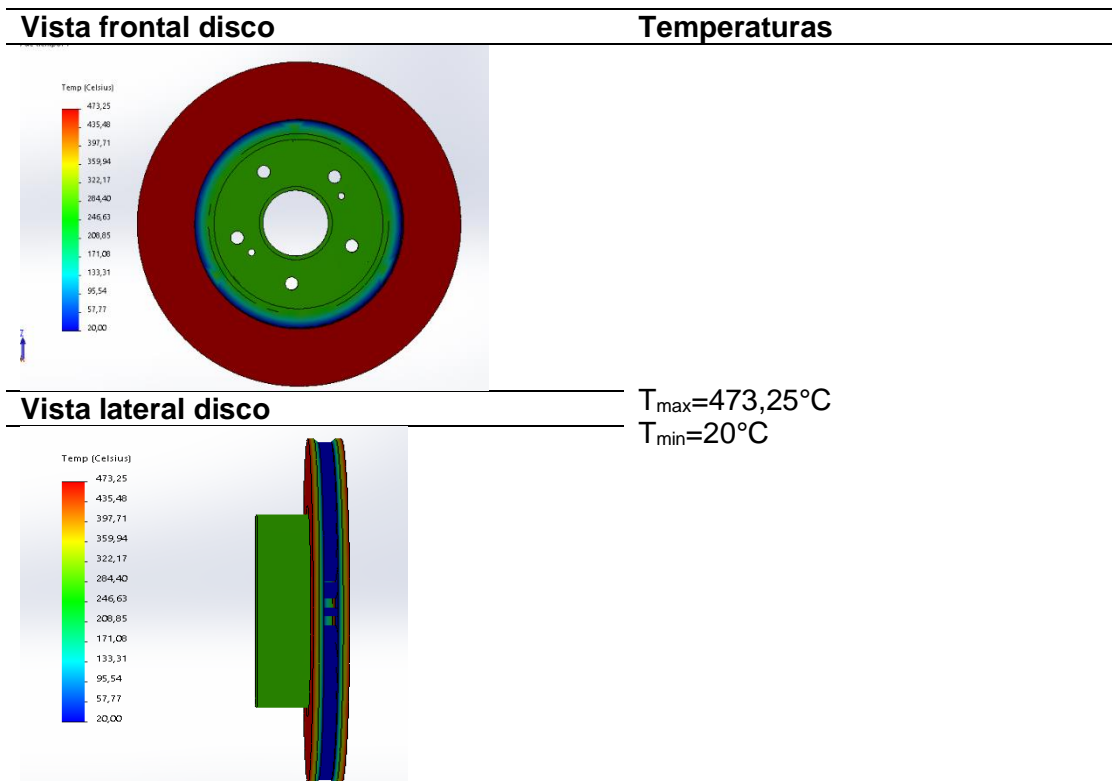
4.5.7. Resultado de temperatura del disco de freno

Para determinar los resultados de temperatura del disco de freno, se procedió a someter al contacto entre las dos caras con una presión de 1750N y un coeficiente de rozamiento de 0,45, a una velocidad inicial del disco de 70Km/h, emulando los ensayos experimentales establecidos en la normativa ECE R90 generando así rozamiento, que a su vez distribuyó el calor sobre el disco, estableciendo los lugares de mayor concentración de temperaturas, y generando la gráfica de la evolución de la temperatura a lo largo de la simulación. Las propiedades térmicas del disco de freno pueden ser visualizadas en la Tabla 5.

Para el disco al 100% de espesor, los resultados fueron los siguientes:

Tabla 48

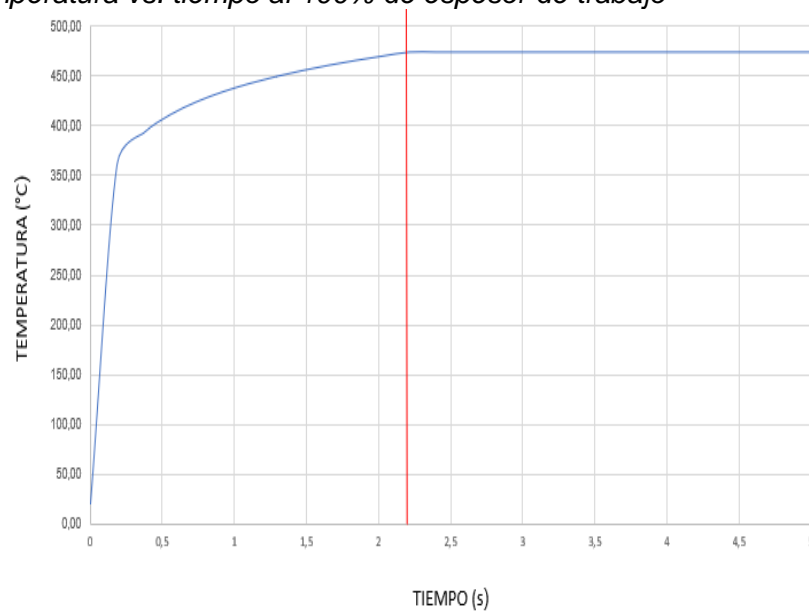
Vistas de las regiones térmicas en el disco al 100% de espesor



Y dando la siguiente gráfica de temperatura, desarrollada a lo largo de la simulación:

Figura 105

Gráfica temperatura vs. tiempo al 100% de espesor de trabajo



Como se puede visualizar en la Tabla 48, la mayor temperatura se genera sobre las zonas de rozamiento entre pastilla y disco de freno, de tal manera que

tiene un valor máximo de 473,25°C, contrarrestado por la temperatura ambiente del medio que es de 20°C, como medio de ventilación.

La temperatura de enfriamiento se distribuye de mejor manera a todo el disco, por medio de los canales de ventilación.

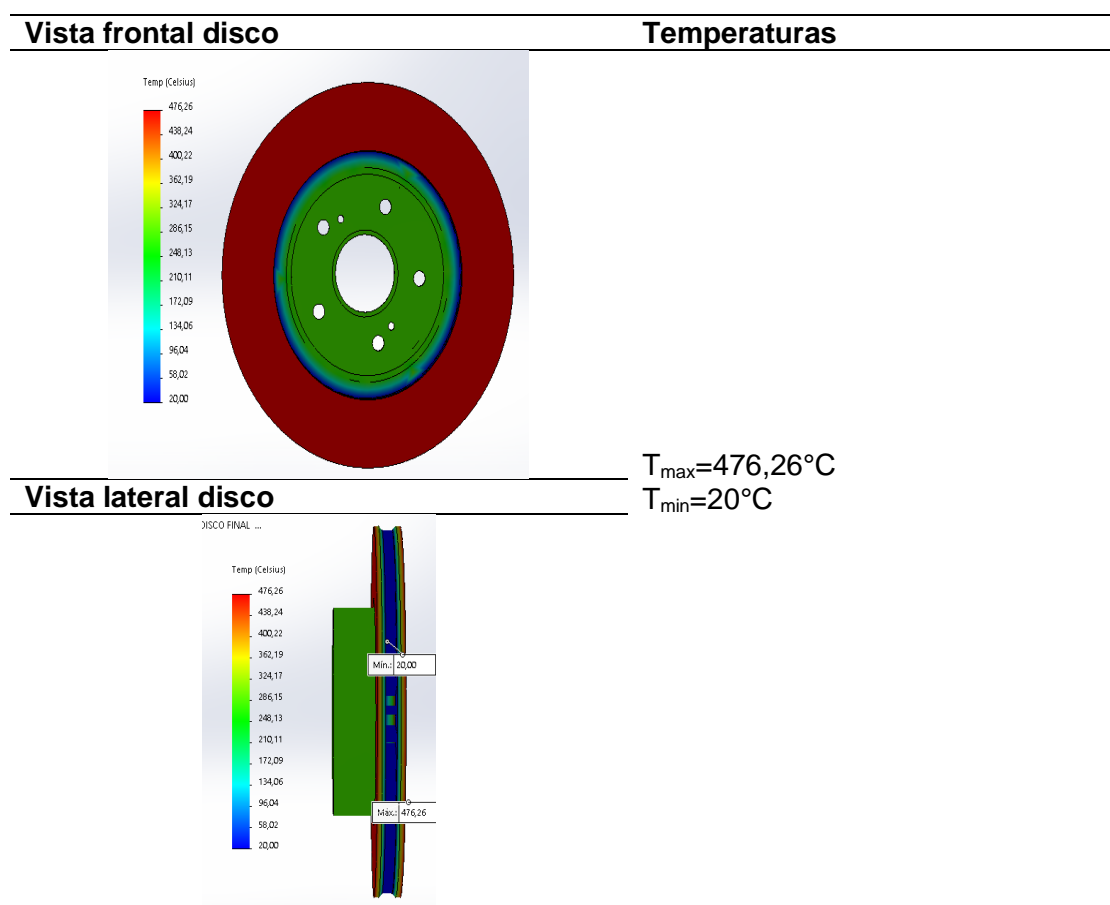
En el momento en que el disco de freno rota a 606,762RPM o una velocidad lineal de 70km/h, y posteriormente, en la Figura 105.

Se puede observar que el disco de freno alcanza la temperatura máxima en el tiempo de frenado, que es de 2,21 segundos, el cual se eleva de manera exponencial desde una temperatura inicial de 20°C, en el primer medio segundo.

En el caso del disco de freno al 96% de espesor, dio los siguientes resultados:

Tabla 49

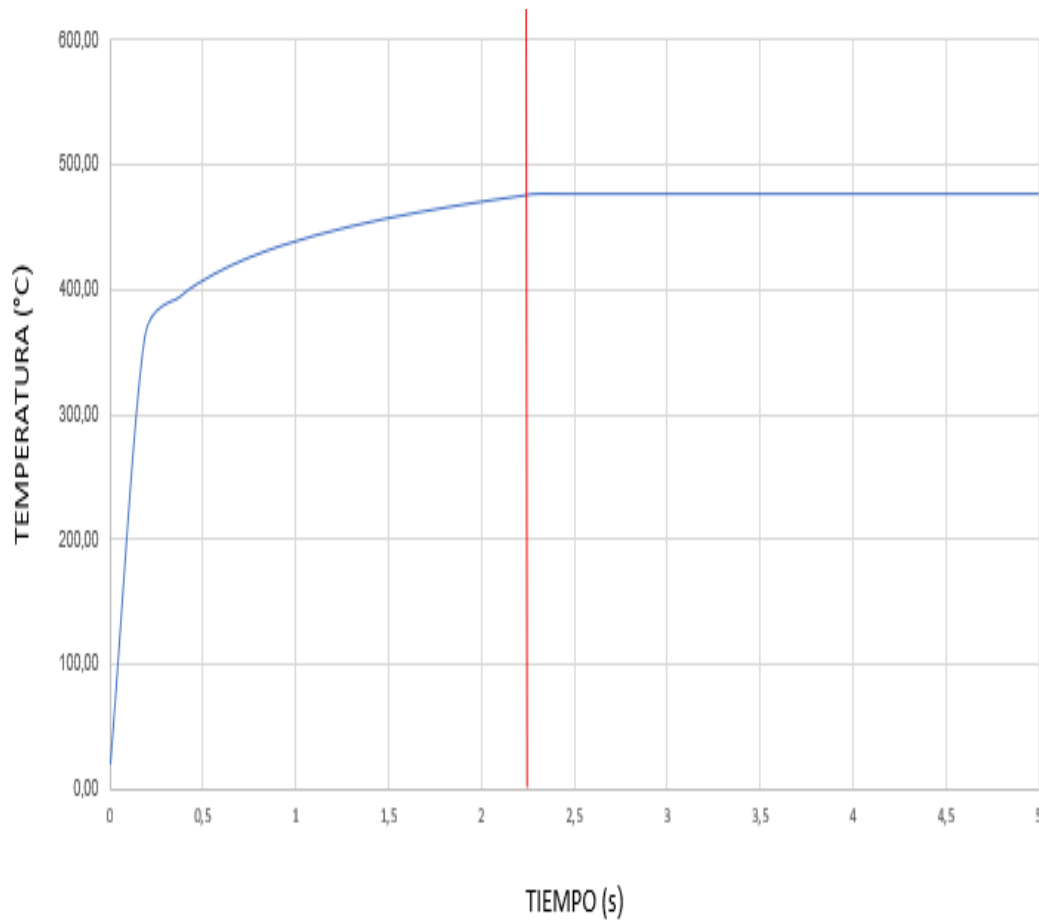
Vistas de las regiones térmicas en el disco al 96% de espesor



Y de forma paralela, el disco de freno, desarrolló una evolución de la temperatura como se puede visualizar en la siguiente figura:

Figura 106

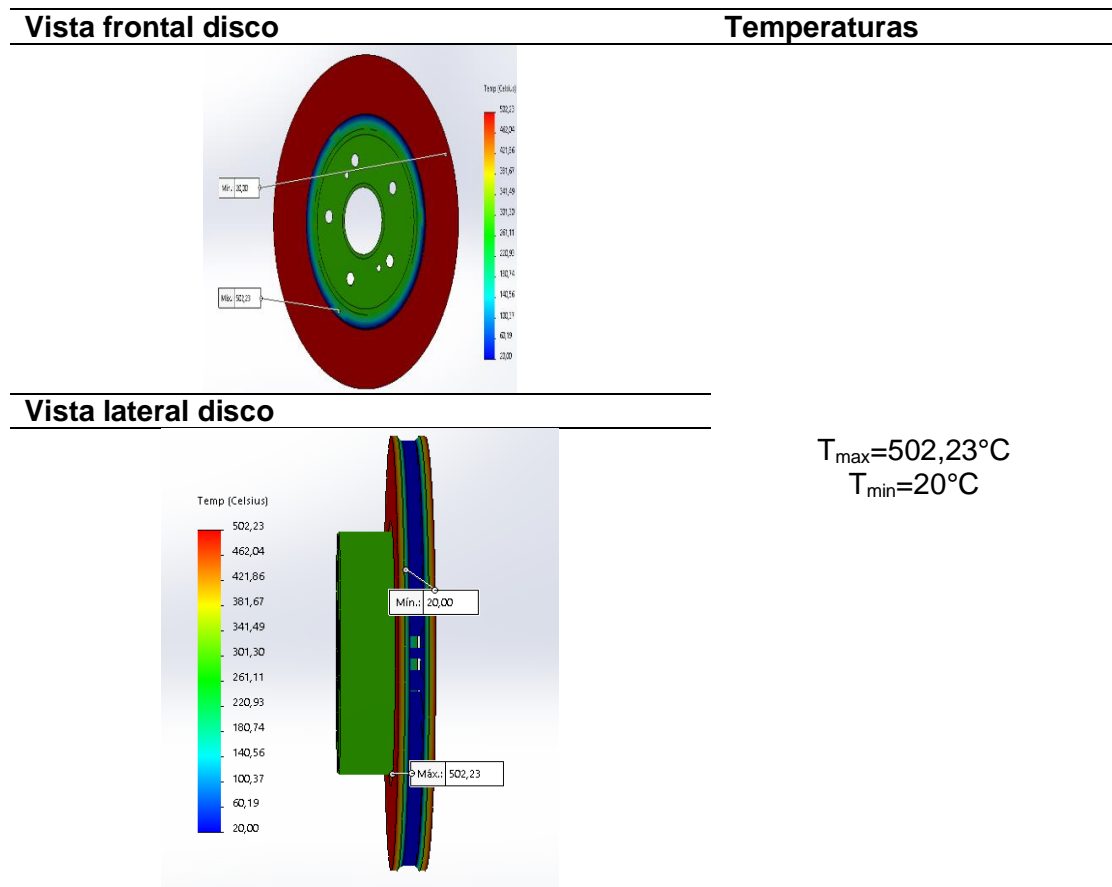
Gráfica temperatura vs. tiempo al 96% de espesor



La temperatura mayor se genera en la zona de fricción del disco de freno, con un valor de 476,25°C, mientras que en la Figura 106, se puede observar que el disco de freno, genera esta temperatura de forma exponencial, desde que empieza el frenado, a partir de una velocidad de 70km/h, en 2,29 segundos.

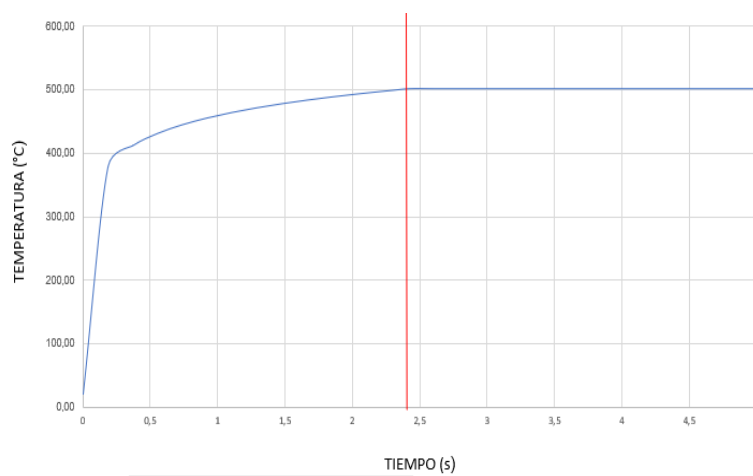
Finalmente, para el disco de freno al límite de espesor, toamando en consideración tanto la temperatura máxima que llega el disco, en función a las regiones que se ven afectadas por el mismo:

Tabla 50
Vistas de las regiones térmicas en el disco al 92% de espesor



En el análisis térmico de este caso, también se pudo visualizar la evolución de la temperatura a lo largo del tiempo dando la siguiente gráfica:

Figura 107
Gráfica temperatura vs. tiempo al 92% de espesor



En la gráfica anterior, el disco de freno llegó a su temperatura máxima de 502,23°C, en 2,42 segundos, presente a lo largo de la zona de rozamiento entre la pastilla y el disco de freno, contrarrestado únicamente, por la temperatura ambiente que es de 20°C.

Capítulo V

5. Análisis de resultados

5.1. Análisis de rendimientos

En este punto, se procedió a ordenar, tabular y comparar los resultados de distancia y tiempo de frenado, tanto simulado, como experimentado, tomando los valores y comparándolos con los datos establecidos por la normativa ECE R90. Los valores de tiempo de frenado según los resultados de la experimentación, para los distintos anchos del disco de freno (92%, 96% y 100%), están ordenados en la siguiente tabla.

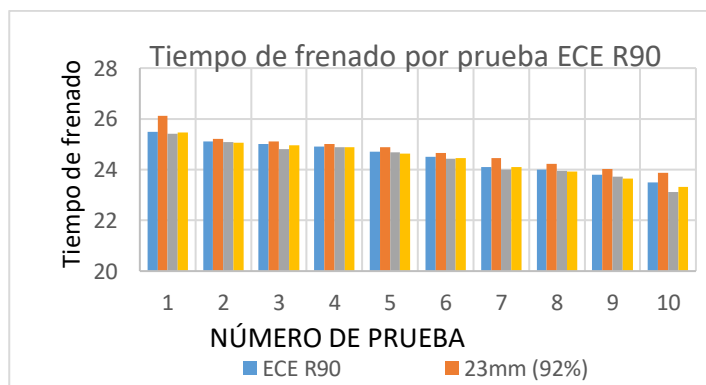
Tabla 51

Resultados de los tiempos de frenado en segundos según la experimentación

Pruebas	ECE R90	23,5mm (92%)	24mm (96%)	25,36mm (100%)
1	<25,5	26,12	25,41	25,45
2	<25,1	25,22	25,09	25,05
3	<25	25,12	24,81	24,95
4	<24,9	25	24,88	24,87
5	<24,7	24,89	24,69	24,63
6	<24,5	24,66	24,43	24,45
7	<24,1	24,45	23,99	24,09
8	<24	24,22	23,95	23,93
9	<23,8	24,02	23,72	23,64
10	<23,5	23,88	23,12	23,33

Figura 108

Gráfico de barras comparativo del tiempo de frenado

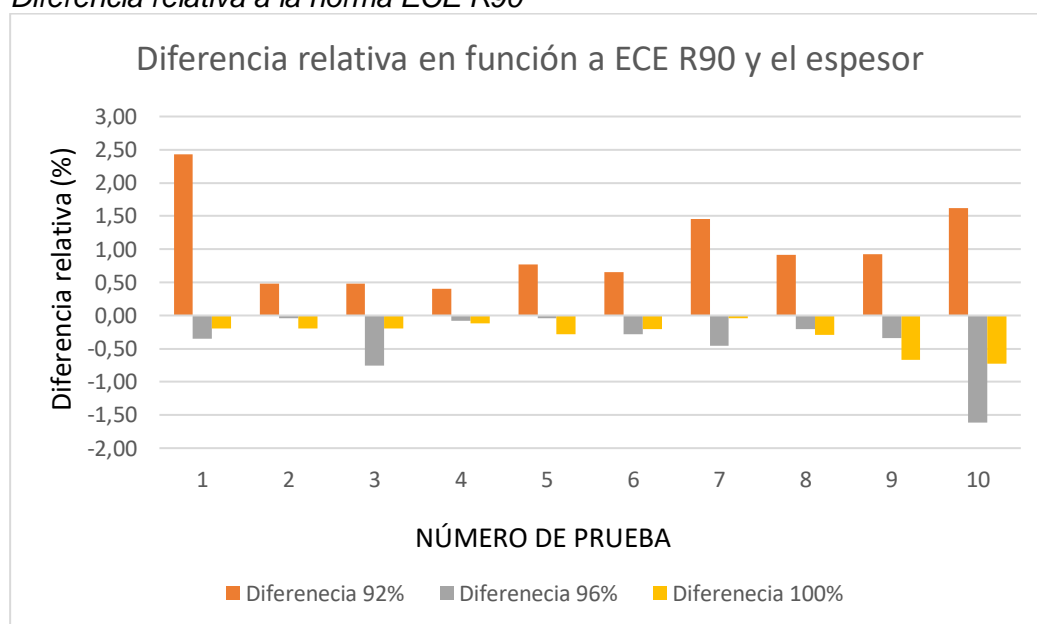


Como se puede visualizar, los resultados de la experimentación, dan a conocer, que cuando el disco de freno está al 96% de espesor, como al 100%, el

tiempo de frenado se mantuvo por debajo de lo que la normativa expresa, con una diferencia relativa máxima de 1,617% en el caso de la prueba 10 representando una diferencia de 0,17 segundos, para el disco de freno al 96% de espesor, y en el caso del 100%, en la misma prueba con una diferencia relativa de 0,723% representando una diferencia de 0,48 segundos.

Pero en el caso del disco de freno al 92% de espesor, los resultados en todas las pruebas, superaron los valores aconsejados por la normativa ECE R90, teniendo en cuenta, en el caso de la prueba número uno, donde este supera el valor máximo definido por la norma, por una diferencia relativa del 2,431%, representando esto, una diferencia máxima total de 0,62 segundos, las diferencias relativas del tiempo de frenado en función a la normativa, se pueden ver en la siguiente figura:

Figura 109
Diferencia relativa a la norma ECE R90



Para el caso de la distancia de frenado, se hizo un análisis similar, comparando los valores que dieron las experimentaciones, en relación a los valores regidos por la normativa ECE R90.

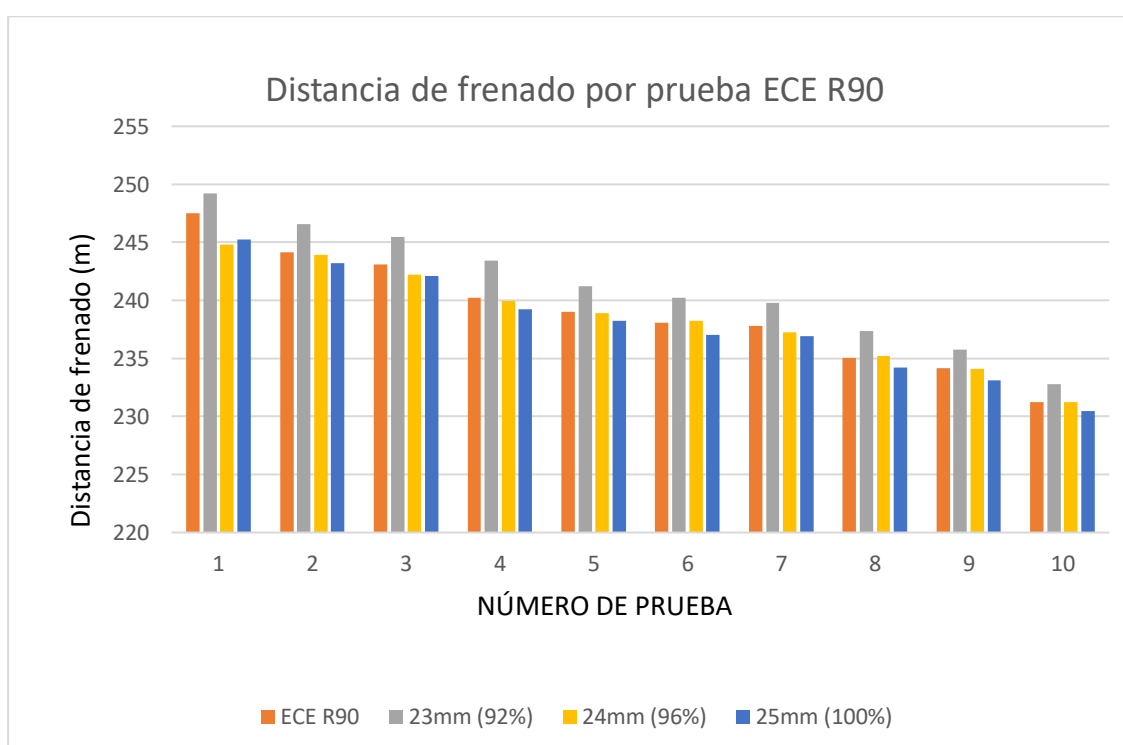
Tabla 52
Resultados de las distancias de frenado en metros según la experimentación

Pruebas	ECE R90	23,5mm (92%)	24mm (96%)	25,36mm (100%)
1	<247,51	249,234	244,795	245,234
2	<244,123	246,578	243,903	243,205

Pruebas	ECE R90	23,5mm (92%)	24mm (96%)	25,36mm (100%)
3	<243,112	245,456	242,234	242,093
4	<240,231	243,45	241,245	241,221
5	<239,02	241,234	239,89	238,23
6	<238,05	240,216	238,23	237,02
7	<237,806	239,803	237,234	236,902
8	<235,032	237,345	235,213	234,22
9	<234,16	235,781	234,092	233,123
10	<231,24	232,785	231,256	230,456

Figura 110

Gráfico de barras comparativo de la distancia de frenado



Como se puede observar en el gráfico anterior, en el caso de las pruebas del disco de freno al 96% (barras amarillas) y al 100% (barras azules) de espesor, en cada una de las experimentaciones, dan valores de distancias de frenado menores a las que establece la normativa ECE R90 (barras naranjas), dando como diferencia máxima en el caso del disco de freno al 96%, de 2,751 metros, y en el caso del disco de freno al 100%, este valor es de 2,276 metros, ambos en las pruebas número uno.

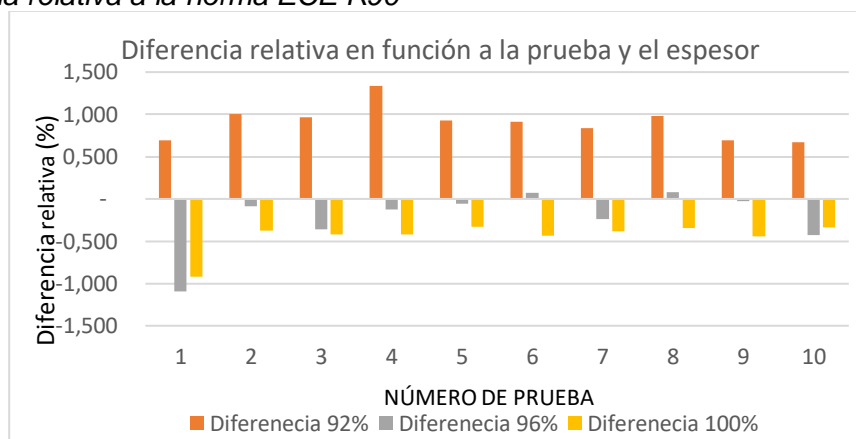
Pero en el caso del disco de freno al 92% de espesor (barras plomas), en todas las pruebas experimentales, el disco de freno sobrepasa la distancia de

frenado aconsejado por la normativa ECE R90, destacándose en el caso de la prueba número cuatro, en el que la distancia de frenado supera a la distancia de la normativa por 3,219 metros.

Posteriormente se encuentra la gráfica de la diferencia relativa existente entre las pruebas y la normativa.

Figura 111

Diferencia relativa a la norma ECE R90



Como se puede observar en la anterior ilustración, la mayor diferencia relativa se encuentra cuando el disco de freno tiene un espesor de 92%, con un valor del 1,34 %, en la prueba número 4, con respecto a lo que la normativa establece, mientras que el disco de freno al 96% y al 100%, tienen la menor diferencia relativa, de -1,097% y -0,92%, con respecto a la normativa.

Después de haber hecho el análisis de los resultados experimentales, se comparó los valores máximos de distancia de frenado real, visibles en la Tabla 33, Tabla 36 y Tabla 39, para cada espesor de trabajo, con los valores calculados por la simulación:

Tabla 53

Resultados de las distancias y tiempos, de las simulaciones y experimentaciones

Distancia de frenando (m)					
92% (23mm)		96% (24mm)		100% (25mm)	
Real	Simulado	Real	Simulado	Real	Simulado
22,658	23,52	22,254	22,26	22,294	21,49
Tiempo de frenado (s)					
92% (23mm)		96% (24mm)		100% (25mm)	
Real	Simulado	Real	Real	Simulado	Real
2,37	2,42	2,31	2,29	2,31	2,21

Con los valores mencionados, se definió las siguientes gráficas:

Figura 112

Comparativa entre los resultados de distancia de frenado

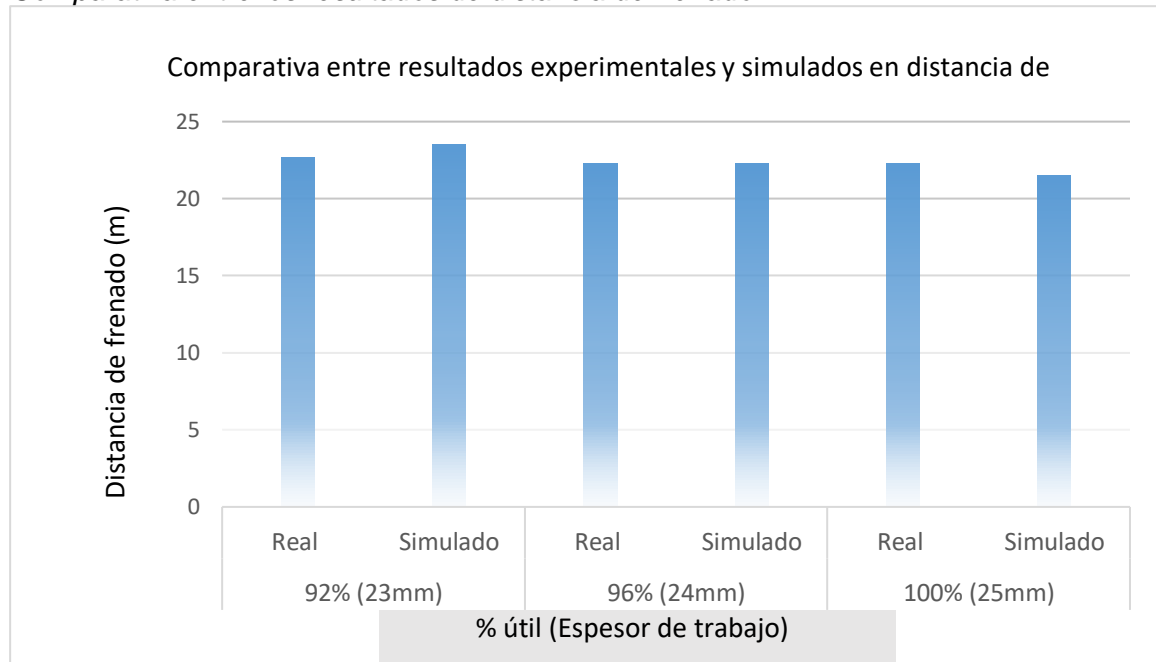
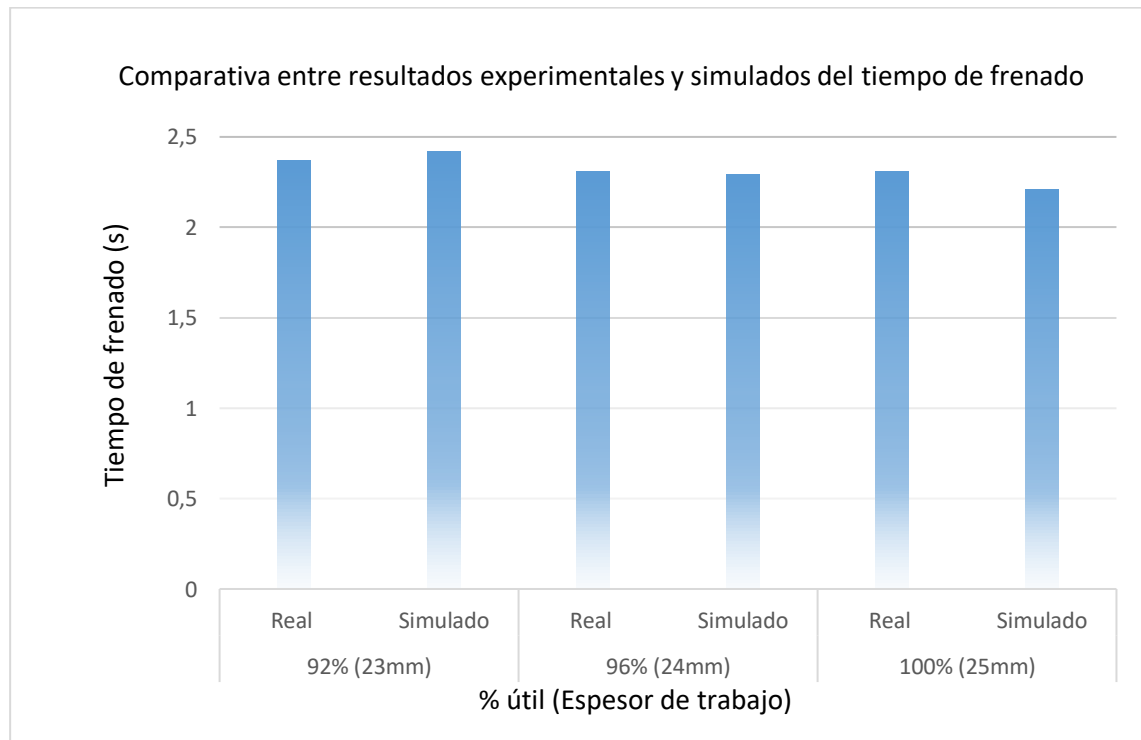


Figura 113

Comparativa entre los resultados de tiempo de frenado



Como se puede observar en la imagen anterior, los valores de distancia y tiempo de frenado real y simulada, en el caso del disco de freno al 92% de espesor, fueron de 22,658 metros a 2,37 segundos, y 23,52 metros a 2,42 segundos, representando esto un margen de diferencia del 3,66%, en distancia, y en tiempo, 2,109% ; en el caso del espesor al 96%, los valores fueron de 22,254 metros a 2,31 segundos, y 22,26 metros a 2,29 segundos, representando una diferencia total de 0,026%, en distancia y en tiempo, 0,873%, y finalmente en el caso del disco de freno al 100% de espesor, los valores fueron de 22,294 metros a 2,31 segundos y 21,49 metros, a 2,21 segundos, teniendo una diferencia de 3,606% en distancia, y en tiempo, de 4,52% dando un error promedio de medición entre el ambiente real y el simulado de 2,43%, en distancia, y en tiempo, un valor de 2,5%, demostrando que el ambiente simulado es capaz de emular las pruebas de distancia y tiempo de frenado, con un margen de error aceptable menor al 5%.

5.2. Análisis de trabajo

Se estableció la comparación entre los resultados de desempeño, en lo que respecta al trabajo del disco de freno, a los diferentes espesores, mediante los valores del esfuerzo efectivo de Von Misses, deformación y temperatura a los que, tanto la simulación, como la experimentación, dieron resultados.

En el caso del esfuerzo efectivo de Von Misses, se comparó, el esfuerzo máximo, visibles en la Tabla 42, Tabla 43, Tabla 44, con los valores del esfuerzo de tracción admisibles para el material del disco, visible en la

Tabla 3, para el material EN – GJL 200, comprobando, que el primero no se pase ni se acerque al valor del segundo, calculando así, el valor del factor de seguridad.

Los resultados de esfuerzo efectivo de Von Misses, y el límite de tracción, se pueden visualizar en la siguiente tabla:

Tabla 54

Esfuerzos efectivos de Von Misses resultantes de la simulación, en función del espesor del disco de freno

Esfuerzos de Von Misses		
Espesor	Esfuerzo de tracción (MPa)	Valor (MPa)
23mm (92%)	≥220	51,2
24mm (96%)		47,7

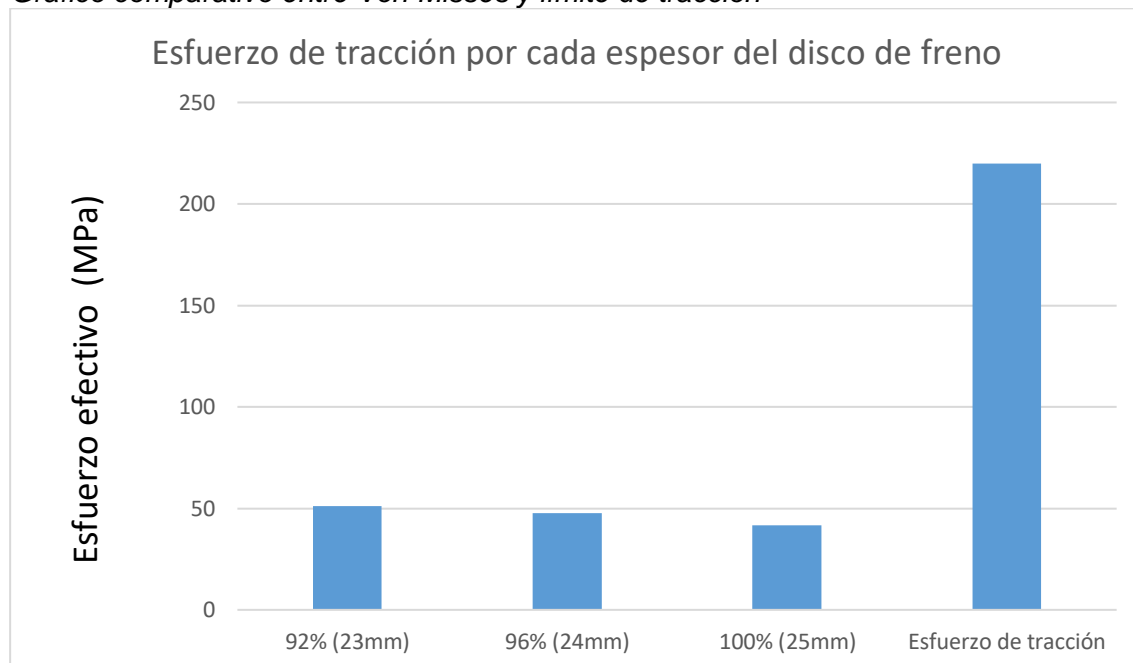
25mm (100%)

41,7

Como se puede observar, el esfuerzo efectivo de Von Misses no se acerca al valor recomendado por la norma ECE R90, para el material elegido, para el disco de freno, en ninguno de los 3 casos. Para mejor comprensión, se generó la siguiente gráfica:

Figura 114

Gráfico comparativo entre Von Misses y límite de tracción



Ninguno de los valores del esfuerzo efectivo de Von Misses, se aproxima al esfuerzo de tracción recomendado por la normativa. Posteriormente, se aplicó la ecuación Ecuación 20, para poder determinar el factor de seguridad, en relación a los resultados obtenidos:

$$FS(92\%) = \frac{220 \text{ MPa}}{51,2 \text{ MPa}} = 4,297$$

Resultando en la siguiente tabla:

Tabla 55

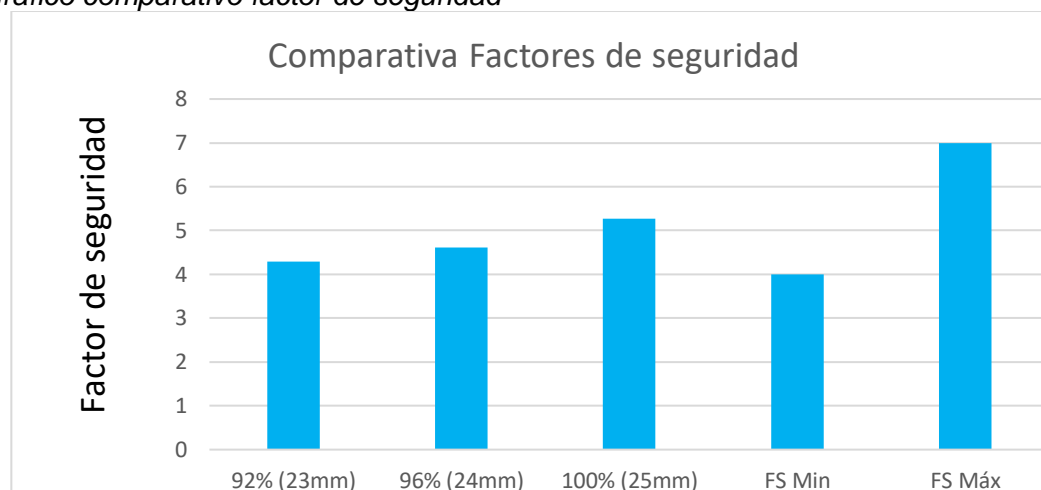
Factores de seguridad resultantes, en función al espesor del disco de freno

Espesor	Factor de seguridad
23mm (92%)	4,297
24mm (96%)	4,612
25mm (100%)	5,276

Los factores de seguridad, se comparan con los valores mínimos y máximos aconsejados para un disco de freno.

Figura 115

Gráfico comparativo factor de seguridad



Cada uno de los factores de seguridad, en función al espesor, se encuentran en el rango aconsejable para discos de freno, (de 4 a 7), notándose que a medida que el espesor del disco disminuye, también lo hizo el factor de seguridad.

Después de evaluar los resultados del desempeño mecánico del disco, se procedió a ver el análisis de trabajo, en función a la temperatura de funcionamiento, desde el punto de vista experimental y en la simulación, comparándolo con los estándares que establece la normativa en la Tabla 8.

Los resultados de la parte experimental, tomados de la Tabla 31, Tabla 34, Tabla 37 se pueden visualizar, en la siguiente tabla:

Tabla 56

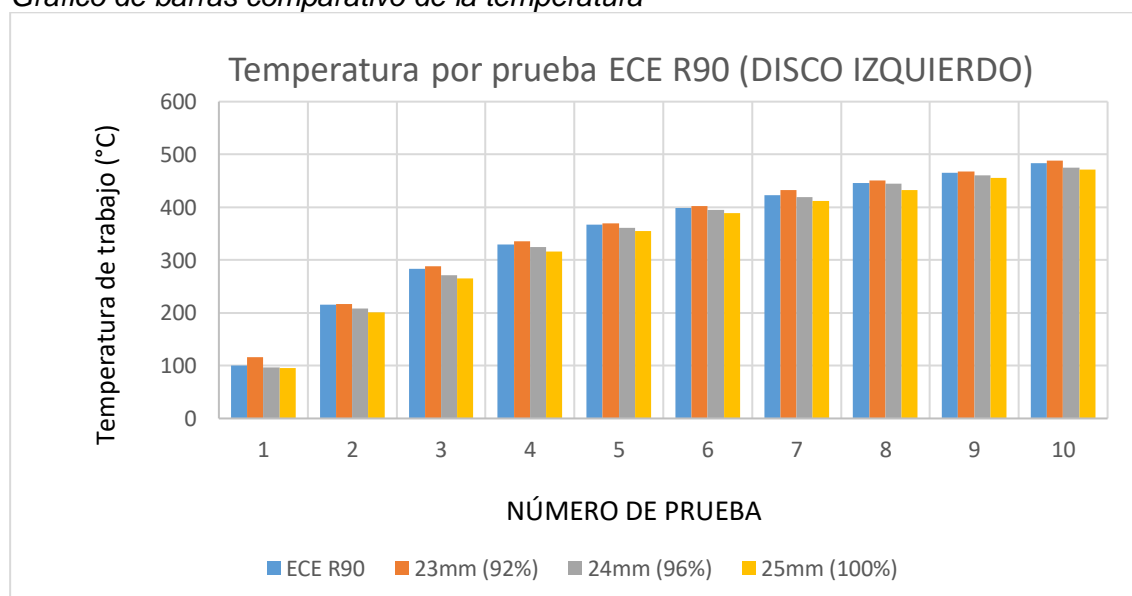
Temperaturas resultantes de la parte experimental en función a los espesores del disco de freno

DISCO IZQUIERDO				
PRUEBAS	ECE R90	23mm (92%)	24mm (96%)	25mm (100%)
1	<100	116,10	96,43	95,32
2	<215	217,23	208,31	201,23
3	<283	287,98	271,09	265,31
4	<330	335,02	324,21	315,62

5	<367	369,23	361,52	355,23
6	<398	401,67	395,22	389,34
PRUEBAS	ECE R90	23mm (92%)	24mm (96%)	25mm (100%)
7	<423	433,09	419,61	412,31
8	<446	450,12	444,12	432,23
9	<465	467,21	460,12	455,12
10	<483	488,22	475,45	471,23
DISCO DERECHO				
PRUEBAS	ECE R90	23mm (92%)	24mm (96%)	25mm (100%)
1	<100	115,32	98,81	95,24
2	<215	217,45	209,42	204,45
3	<283	286,23	273,23	267,89
4	<330	335,24	323,34	312,45
5	<367	368,43	367,26	357,43
6	<398	401,24	396,12	388,23
7	<423	432,68	420,44	411,44
8	<446	450,45	443,43	431,21
9	<465	467,34	462,17	457,24
10	<483	489,32	470,92	468,92

Para visualizar, si las temperaturas en cada uno de los espesores, cumple los requisitos normados por ECE R90, se los comparó en la gráfica a continuación:

Figura 116
Gráfico de barras comparativo de la temperatura

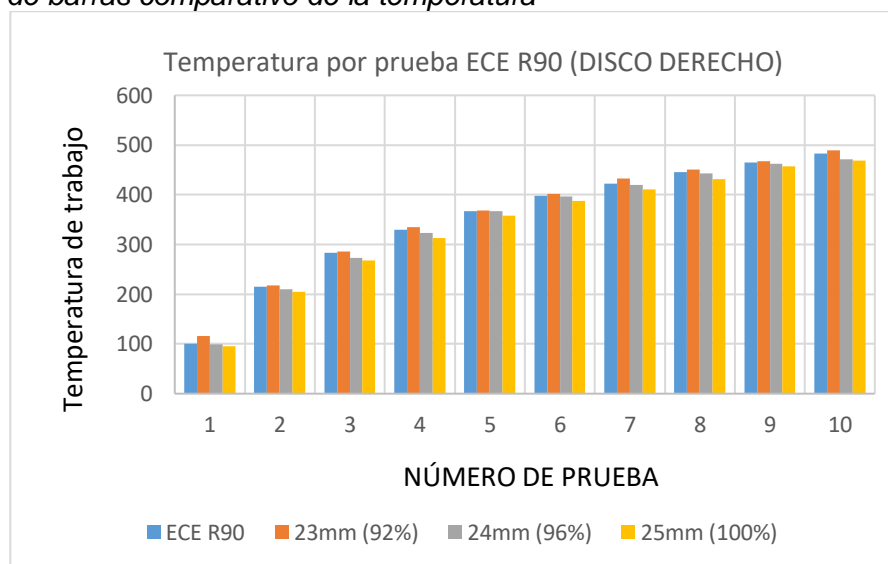


En todos los casos de las pruebas en el disco de freno izquierdo, cuando se encuentra al 92% de espesor (barras naranjas), la temperatura supera los valores establecidos por la normativa (barras azules), sobresaliendo en el caso de la prueba

número uno, donde la diferencia de temperatura con el límite de la norma, es del 16,1%.

Después del análisis en el disco izquierdo, se graficó los datos del lado derecho:

Figura 117
Gráfico de barras comparativo de la temperatura



Al igual que el anterior análisis, se puede observar que el disco de freno supera la temperatura recomendada por la normativa, cuando el espesor es del 92%, destacando como caso más notorio, la prueba número uno, superando el límite de la norma, por 15,32 °C.

Una vez detallada la comparativa entre temperaturas resultantes, de la experimentación, se procedió a establecer la relación de las temperaturas máximas de trabajo, en función a los resultados de las simulaciones, tomando los valores de la Tabla 48, Tabla 49 y Tabla 50, quedando tabuladas de la siguiente manera:

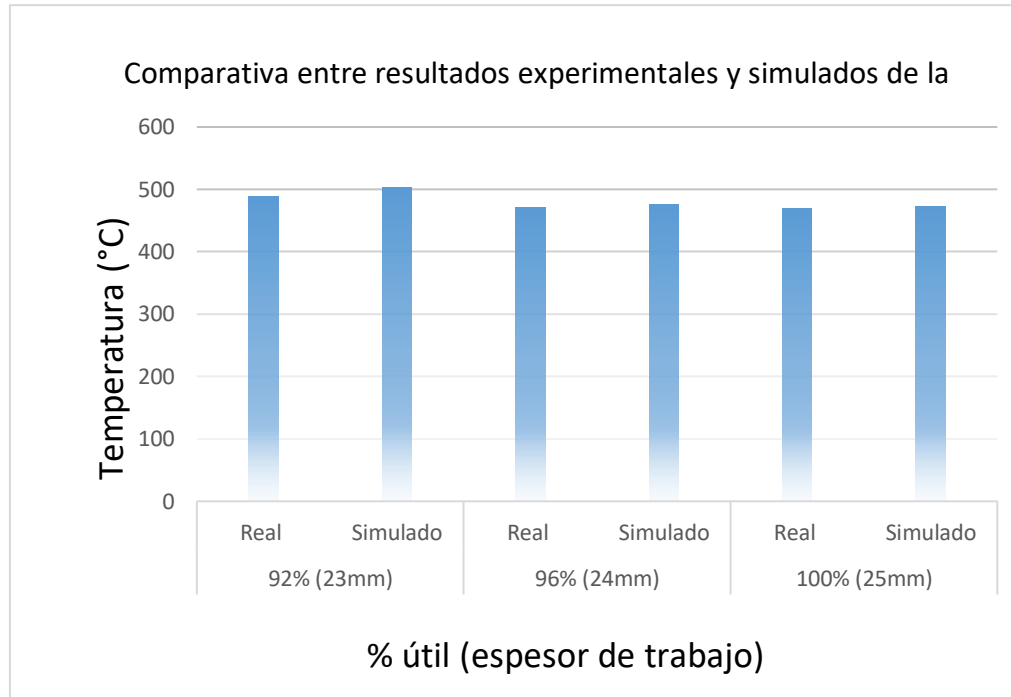
Tabla 57
Resultados resumidos de temperatura máxima del disco de freno

Temperatura máxima de funcionamiento (°C)					
92% (23mm)		96% (24mm)		100% (25mm)	
Real	Simulado	Real	Simulado	Real	Simulado
489,32	502,23	470,92	476,26	468,92	473,25

Para poder hacer la comparativa directa entre ambos casos (experimentación y simulación), se realizó la siguiente gráfica comparativa:

Figura 118

Gráfica comparativa entre resultados de temperatura



Como se puede observar en la imagen anterior, el disco de freno, cuando se encuentra al 100% de espesor, tiene una temperatura experimental de 468,92°C y simulado de 473,25°C, lo que representa un margen de error entre ambos valores de 0,923%, en el caso del 96% de espesor, los valores son 476,26°C y 470,92°C, dando una diferencia relativa de 1,134%, y finalmente para el caso del 92% de espesor, dieron los valores de 489,32°C y 502,23°C, dando una diferencia total del 2,638%, definiendo así un margen de error promedio de 1,565%, tomando un valor aceptable, menor que el 5% de margen de error aceptado, concluyendo, que la simulación puede definir temperaturas de frenado confiables.

5.3. Análisis de desgaste

En este análisis, se tomó en cuenta la cantidad de espesor de trabajo, que perdió el disco de freno, durante la fase de desgaste, desde que tenía su valor nominal (25mm), hasta que llegó a su espesor crítico de trabajo (23mm), en función al kilometraje marcado por el vehículo Grand Vitara SZ.

Para poder hacer este proceso, se decidió medir el espesor del disco de freno cada 6000km recorridos, estableciendo así la siguiente tabla:

Tabla 58

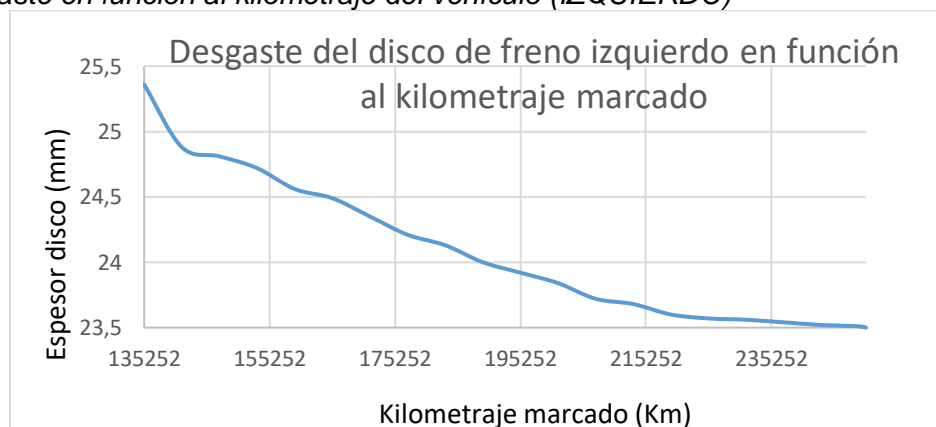
Espesores del disco de freno en función al kilometraje marcado por el vehículo

Grand Vitara SZ

Kilometraje (Km)	TH _{medido} (mm)	
	IZQUIERDO	DERECHO
135252	25,36	25,35
141252	24,88	24,87
147252	24,81	24,83
153252	24,72	24,74
159252	24,56	24,55
165252	24,49	24,48
171252	24,35	24,35
177252	24,21	24,23
183252	24,13	24,15
189252	24	24,01
195252	23,92	23,91
201252	23,84	23,83
207252	23,72	23,74
213252	23,68	23,67
219252	23,6	23,61
225252	23,57	23,58
231252	23,56	23,55
237252	23,54	23,52
243252	23,52	23,51
249252	23,51	23,50
250353	23,5	23,49

Figura 119

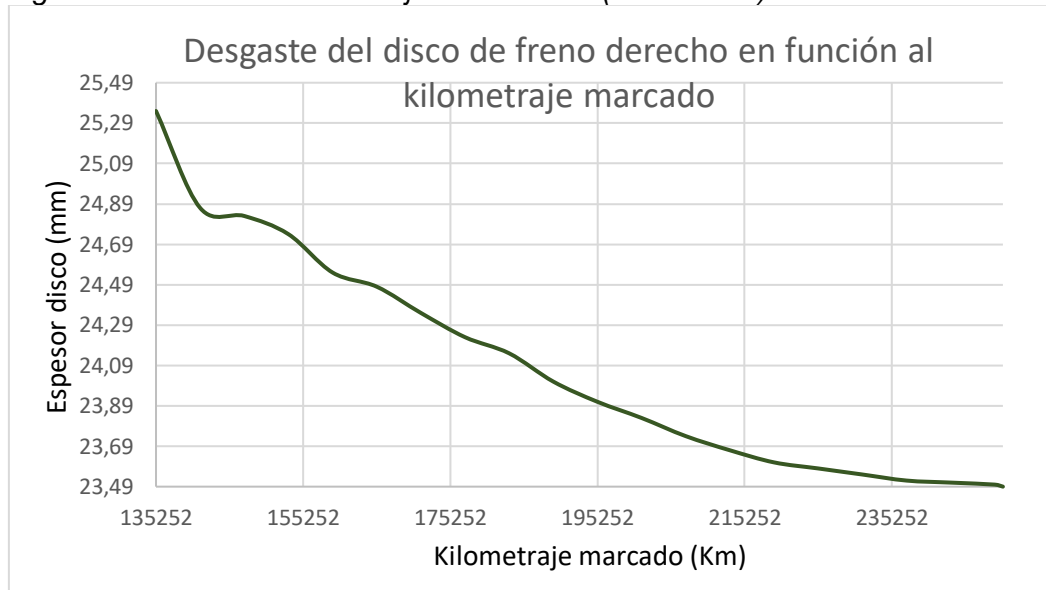
Desgaste en función al kilometraje del vehículo (IZQUIERDO)



Y para el disco derecho, la siguiente gráfica:

Figura 120

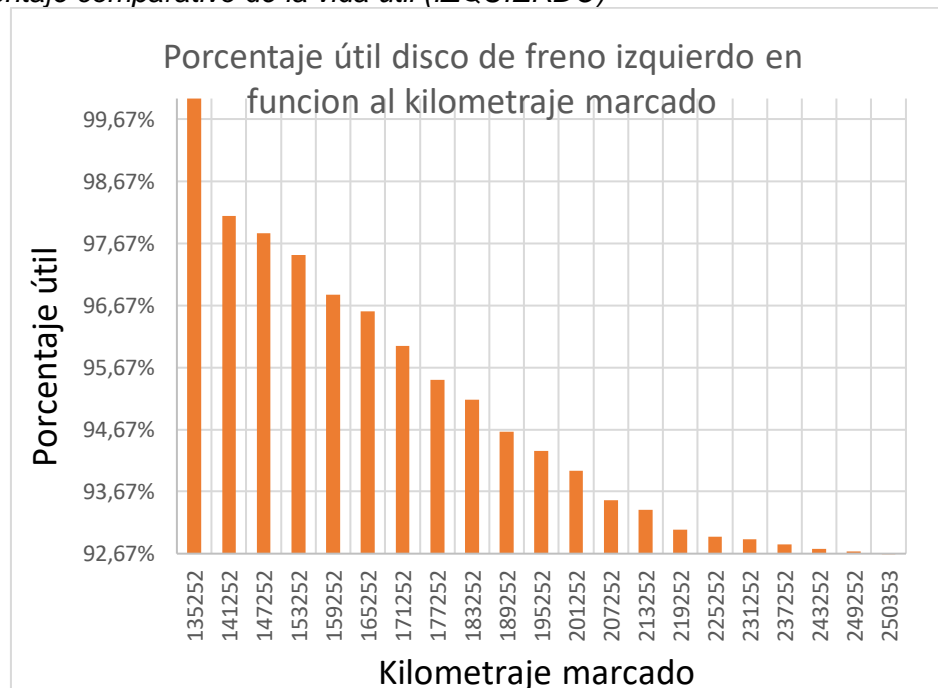
Desgaste en función al kilometraje del vehículo (DERECHO)



Para poder determinar el porcentaje utilizable por parte del disco de freno, a las diferentes distancias recorridas por el vehículo, se desarrolló la siguiente gráfica en el caso del disco de freno izquierdo:

Figura 121

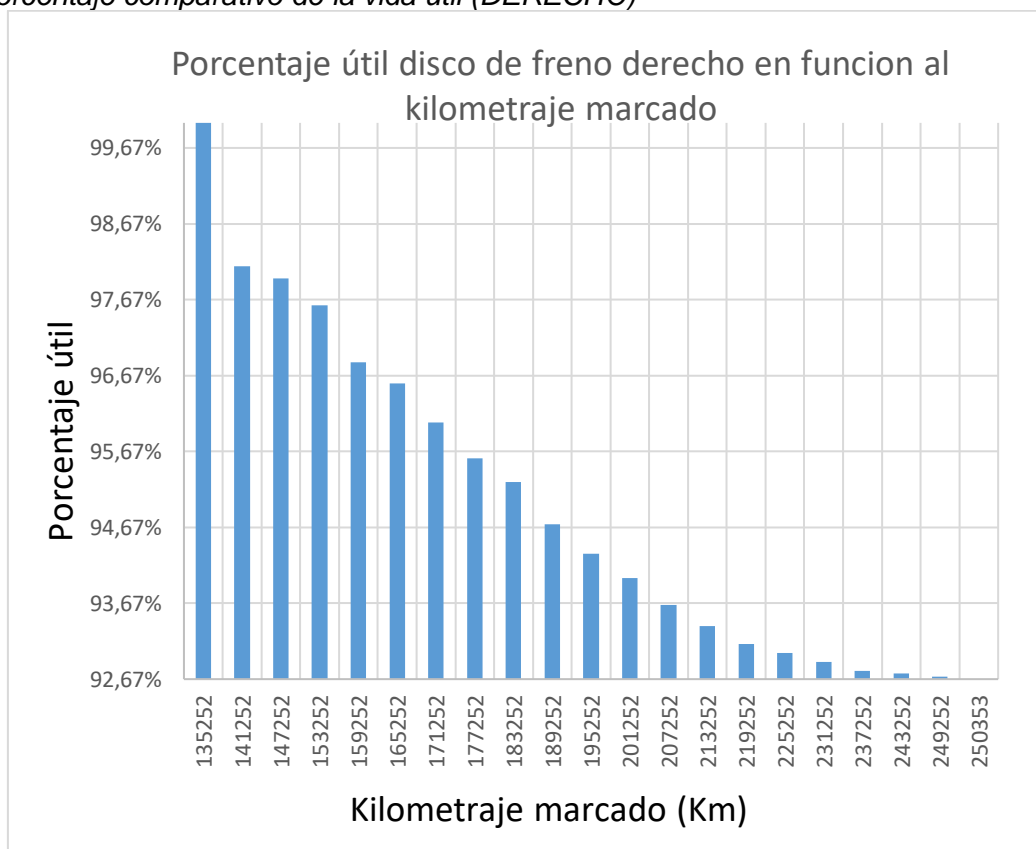
Porcentaje comparativo de la vida útil (IZQUIERDO)



En ambos discos, el porcentaje de vida útil del disco de freno fue disminuyendo, a medida que el kilometraje iba aumentando, llegando a su porcentaje mínimo útil de trabajo de 92%, después de haber recorrido una distancia establecida.

Figura 122

Porcentaje comparativo de la vida útil (DERECHO)



Como se puede observar, a medida que el vehículo se ha movido a lo largo de su vida, se puede apreciar, que el disco de freno fue perdiendo espesor de trabajo, finalmente llegando al espesor crítico de trabajo de 92,67% de trabajo, tanto en el disco derecho, como en el izquierdo, tomando una medida de 23,49mm, en ambos casos. Para llegar a este valor, el vehículo quien tenía un kilometraje inicial de 145252Km, tuvo que llegar a recorrer 250353Km, desarrollando un total de kilómetros recorridos, desde que el disco se encontraba nuevo (100% de espesor), hasta reducirse al espesor anteriormente mencionado.

Las mediciones que fueron hechas en un vehículo turismo convencional, utilizado para el transporte de personas dentro de la ciudad de Ibarra a Quito, de manera continua, de tal manera que el estudio comenzó el 17 de octubre del 2020, hasta el 31 de marzo del 2021, representando en vida útil del disco de freno, en tiempo, de 226 días.

5.4. Análisis de eficiencia

Para el análisis de eficiencia, se comparó las desaceleraciones generadas por el sistema de frenos de pastillas del vehículo, clasificado por su nivel de espesor (100%, 96% y 92%), en función a la aceleración de la gravedad, el cual, es definida según (Metrólogos Asociados, 2002), con valor de $9,780 \text{ m/s}^2$, en el Ecuador. Utilizando la Ecuación 5 y los resultados de la desaceleración del capítulo 4, en cuestión de desaceleración, se obtuvieron los siguientes resultados:

$$\eta_{100\%} = \frac{8,798 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{9,780 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} * 100 = 89,95\%$$

Dando la siguiente tabla de resultados:

Tabla 59

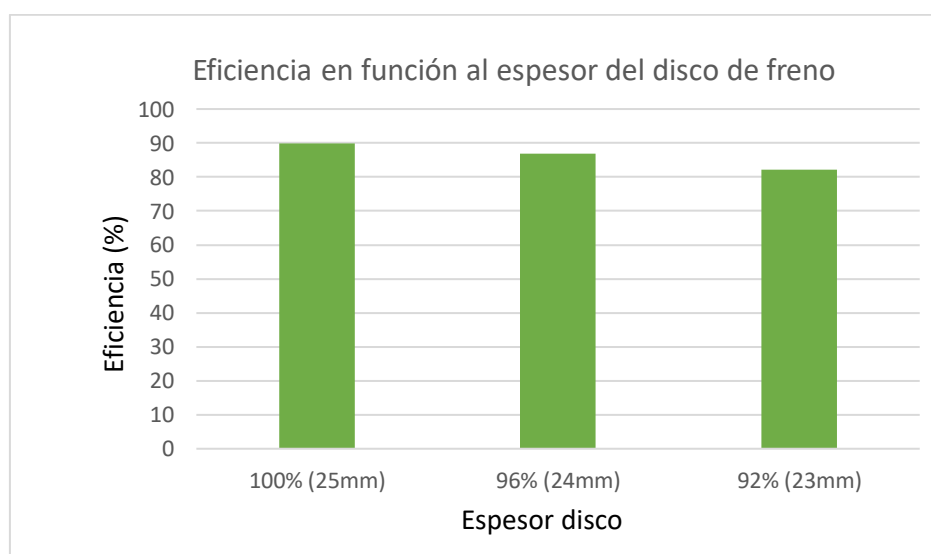
Resultados de eficiencia de frenado, por espesor de trabajo del disco

Espesor disco de freno	Resultado desaceleración (m/s^2)	Eficiencia de frenado (%)
100% (25mm)	8,798	89,95
96% (24mm)	8,491	86,82
92% (23mm)	8,035	82,15

Con el objetivo de una mejor visión comparativa, se graficó los resultados, visible en la siguiente imagen:

Figura 123

Comparativa de eficiencias de frenado



Como se puede observar en el gráfico de barras anterior, la eficiencia de frenado, desde que el disco, estaba al 100%, fue de 89,95%, llegando hasta una eficiencia, en su espesor crítico de 82,15%, pudiéndose observar que las eficiencias disminuyeron un total del 7,8% de eficiencia, tomando una tendencia a disminuir a medida que el espesor del disco se ve afectada.

5.5. Conclusiones

- Se obtuvo información, en Tomando de fuentes digitales, en ambientes propios para conseguir manuales, artículos científicos y académicos, con respecto a los discos de freno del Grand Vitara SZ, definiéndose así, las características, geométricas, térmicas y mecánicas de esas piezas, además de definir mediante catálogos propios de las pastillas de freno marca HIGH POWER BRAKE, el coeficiente de fricción necesario para los estudios posteriores.
- Se estudió el comportamiento, del disco de freno de manera mecánica, cuando se encuentra sometido a una fuerza efectiva de Von Misses, de 1,75KN, y se definió que el esfuerzo máximo generado por esta interacción, fue de 51,2MPa, cuando el disco de freno se encuentra a su espesor mínimo de trabajo (23mm), ubicado en la aleta que permite la ventilación del disco de freno.
- Se analizó, de manera experimental, el funcionamiento del sistema disco – pastilla, con manuales de uso, y observación directa, de tal manera que el disco de freno llegó a tener un espesor definido de 23,49mm, luego de que el vehículo Grand Vitara SZ, recorrió 105101Km, en 226 días, generando una relación de desgaste de $2,408 \cdot 10^{-4} \text{mm/Km}_{\text{recorrido}}$, y en razón al tiempo de vida: $8,0973 \cdot 10^{-3} \text{mm/día}_{\text{recorrido}}$.
- Se constató la caracterización de los materiales presentes en el disco de freno, por ensayos de dureza según la norma NTE ISO 6506-1:2005, ensayo de tracción según ISO 6892:1998, y ensayos de composición química por barrido, según los manuales de uso de la máquina EDS-SEM, resultando en una dureza promedio de 213,932HBW, una resistencia a la tracción promedio de 255,289MPa, y finalmente la composición química, que en promedio determinó un valor de hierro del 94,7181%, y composición de carbono promedio de 3,2625%, los cuales corresponden a características propias del metal denominado EN – GJL 200.
- Se estableció, que mientras más baja el espesor de trabajo, mayor es la distancia de frenado, cuando el disco de freno fue TH=25mm, de 25,45 metros, y cuando el TH=23mm, la distancia de frenado fue de 26,12metros, lo que ocasiona una diferencia de 0,67 metros.

- Se comprobó que la distancia de los discos de freno al 100%, 96% y 92%, fueron de 21,49m, 22,26m y 23,52m, con tiempos de 2,21s, 2,29s y 2,42s, respectivamente, resultando así en un margen de error que tiene la simulación, con respecto a la experimentación del sistema de frenado, de un 2,431%, en medición de distancia de frenado, y en el caso del tiempo de frenado, fue de 2,5%, demostrando la efectividad del análisis por un ambiente CAE.
- El sistema CAE, según la simulación, calculó que la temperatura máxima de trabajo del disco de freno, fue de 502,23°C, pasando por 19,23°C, a la temperatura máxima definida por la normativa ECE R90.
- La simulación dentro del ambiente CAE, definió que, en trabajo, el disco de freno, genera una deformación máxima de $1,85 \cdot 10^{-5}$ mm, cuando se encuentra al 92% de espesor, lo cual lleva a verificar, que no existe riesgo de rotura, a pesar de que el disco este en su espesor mínimo de vida útil.
- Dentro del estudio de campo, se precisó, que el disco de freno alcanza su temperatura máxima de trabajo de 489,32°C, en el neumático derecho, cuando el espesor del disco de freno es del 92%, rebasando el valor aconsejado por la normativa ECE R90, por 6,32°C.
- Se definió, según la simulación, que la eficiencia de frenado, disminuye a medida que el espesor del disco de freno disminuye, debido a que cuando el %útil del disco era del 100%, su eficiencia de frenado era del 89.95%, y cuando era del 92%, su eficiencia fue del 82,15%.

5.6. Recomendaciones

- Los valores de velocidad, movimiento, composición mecánica, son indispensables, para un correcto análisis, dentro de un ambiente CAE.
- No realizar pruebas, ni utilizar el disco de freno, en el punto exacto de espesor crítico de trabajo, debido a que pueden presentarse problemas riesgosos, dentro del experimento, dejar que el disco este al menos un 0,5mm, más ancho que el TH mínimo.
- Para una evaluación correcta del disco de freno, es recomendable revisar la normativa ECE R90, en función a que categoría se encuentre el vehículo de evaluación, con el objetivo de, cada 6000Km, verificar el espesor de vida útil del mismo.
- Dentro del análisis térmico, es necesario determinar todos los estímulos térmicos, de valor y ubicación real, con el objetivo de dar resultados mas satisfactorios en ese aspecto de uso.

- Para realizar las pruebas mecánicas de dureza y tracción es necesario, al menos hacerlo en 3 probetas, para mayor criterio de selección, en el caso del análisis químico, con 2 probetas es suficiente.
- Para evitar desgastes prematuros en el disco de freno del Grand Vitara SZ, es necesario utilizar una pastilla de freno categoría FF, debido a que este generará un factor de rozamiento de 0,45 cuando el sistema de frenos sea accionado a los 80Km/h.
- Utilizar herramientas metrológicas digitales con una apreciación mínima de 3 dígitos, para mayor efectividad de cálculos y toma de datos.
- Para hacer las experimentaciones de manera mas precisa, es aconsejable, utilizar el vehículo en carga máxima de trabajo, cuando todos los espacios destinados a pasajeros, se encuentren con los pesos especificados por la normativa ECE R90.

5.7. Bibliografía

- 3DCadPortal. (2021 de 04 de 2021). *3DCadPortal*. Obtenido de <https://www.3dcadportal.com/3d-software/cae/>. Recuperado el 20 de diciembre del 2020.
- Amazon. (2020). Obtenido de <https://www.amazon.es/KETOTEK-Term%C3%B3metro-infrarrojo-term%C3%B3metro-profesional/dp/B07M8YBNMR>. Recuperado el 23 de abril del 2021.
- Amazon Inc. (04 de 14 de 2021). *Amazon*. Obtenido de <https://www.amazon.com/-/es/Navegaci%C3%B3n-navegaci%C3%B3n-advertencia-velocidad-actualizaci%C3%B3n/dp/B085215ZDQ>. Recuperado el 24 de mayo del 2021.
- Andrango, J. (2009). Tutorial n°218. En J. Andrango, *Tutoriales para la correcta medición de dureza* (págs. 23-24). Panamá.
- Andrés, C. (26 de Marzo de 2018). *Intelligy*. Obtenido de <https://intelligy.com/blog/2018/03/26/los-5-pasos-a-seguir-para-un-estudio-estatico-es.simulacion/>. Recuperado el 12 de febrero del 2021.
- AreaTecnología. (26 de 05 de 2021). *AreaTecnología*. Obtenido de https://www.areatecnologia.com/el_abs.htm. Recuperado el 11 de noviembre del 2020.
- Arredondo, A., Bermúdez, J., & Prado, W. (2019). *Determinación experimental de la distancia de frenado de un automóvil*. Risaralda.
- Arroyo, C. (1996). *Los frenos en el automóvil*. Barcelona: Ediciones CEAC.
- ASTM, I. (2020). *Standard test Methods and definitions for ASTM*. Nueva York: International ASTM.
- AUTODESK. (6 de Octubre de 2020). *AUTODESK*. Obtenido de <https://www.autodesk.com/solutions/cad-software>. Recuperado el 12 de febrero del 2021.
- Beer, F., & Russel, J. (2020). *Mecánica de Materiales*. Londres: Mobissue.
- Belhocine, A., & Afzal, A. (2019). FEA Analysis of coupled thermo-mechanical response of grey cast iron material used in brake discs. *Revista Científica*, 20-30.

- Borja, J., Fenoll, J., & de Herrera, J. (2020). *Sistemas de transmisión y frenado*. Barcelona: MacMillan Profesional.
- Brüll, D. (2009). *Ciencia de los materiales*. Munich.
- Budynas, R., & Nisbett, K. (2015). *Diseño de Ingeniería Mecánica*. Estocolmo: Publicaciones General Engineering .
- Canós, D. (6 de Octubre de 2015). *ITV de Levante*. Obtenido de <https://laitv.com/tabla-de-clasificacion-de-categorias-de-vehiculos/>. Recuperado el 12 de febrero del 2021.
- Capello, E. (1999). *Tecnología de la fundición*. Barcelona: Gustavo Guili.
- Carbo, F. (2012). *Determinación del desgaste por calor, por parte de un disco de freno*. Latacunga: ESPE.
- Carrillo, M., & Castillo, L. (2011). *Consideraciones del mallado aplicadas al cálculo de flujos bifásicos con las técnicas de la dinámica de fluidos computacional*. España.
- Cartagena, S., & Salvador, J. (2005). *Simulador de frenos hidráulicos con ABS*. Latacunga.
- Castro, L. (18 de Marzo de 2019). *3D Natives*. Obtenido de <https://www.3dnatives.com/es/mejores-sofware-cad-programa-180320192/>. Recuperado el 02 de febrero del 2021.
- Cengel, Y. (2008). *Termodinámica de materiales*. Copenhagen: Distrito 1 Editoriales.
- CEPE. (2012). *Reglamento ECE 90*. Zurich: Diario Oficial de la UE.
- Cherrez, M., Martínez, J., Peralta, D., & Llanes, A. (2018). *Métodos multicriterio aplicados en la selección de un material para discos de freno*. Cuenca.
- CHEVROLET. (2012). *Ciencia detras del Grand Vitara SZ, maravilla del 2010*. Massachusetts: Owned by Chevy.
- CHEVROLET. (2018). *Seguridad de los Vehículos Grand Vitara SZ*. Chevrolet own Work.
- Chico, M., & Terán, D. (2019). *Análisis de la eficiencia, desgaste y rendimiento de los frenos y neumáticos del bus articulado BYD K11A*. Latacunga.
- Chiluisa, M., & Pulluquitín, C. (2009). *Diseño, adaptación y montaje de un sistema de frenos para la cargadora frontal caterpillar modelo 930*. Latacunga.

- Crouse, W. (1993). *Mecánica del automóvil II*. Barcelona: Editores Boixareu.
- Cruz, A., Ortiz, M., Suarez, Y., Rivera, E., Lechuga, C., Muños, Y., . . . García, C. (2018). *Teoría de falla bajo carga estática*. Sahagún.
- Cueva, F., & Ochoa, S. (2012). *Análisis del comportamiento del material del disco de freno de un vehículo chevrolet Aveo a diversas Temperaturas*. Cuenca.
- Denos, F. (2020). *Mecánica de materiales. Las normas ASTM en los ensayos de dureza Rockwell y Brinell*. Arequipa.
- Di Rado, F., Presta, J., & Divicenzi, D. (2016). *La ciencia del sistema neumático*. Provenza: Capoeiri Editoriali.
- Domínguez, E. (2010). *Sistema de transmisión y frenado*. Barranquilla: Editex.
- ENAC. (2020). *Análisis químico de metales*. Madrid: Metaltest Manuales.
- Endado, P. (2018). *Diseción de los sistemas automotrices mecánicos*. México, D.F.
- Enterprises, N. (2020). Lijas fuertes. En N. Enterprises, *Manual de lijas* (págs. 21-22). Bologna: Norton Illustrations.
- ESAMIL. (2006). Ensayo de tracción. En ESAMIL, *Tratamientos Metalúrgicos Variados* (págs. 50-52).
- Eugene, H. (2019). *Química: la ciencia central*. Cali: Editoriales Cristianas.
- Federal-Mogul. (2018). *Elementos mecánicos del vehículo*. Detroit: Federal-Mogul.
- Fitzgerald, R. (2012). *Mecánica de materiales*. Manchester: Joy Studios.
- García, A., Echavez, R., & Flórez, E. (2018). *Análisis termodinámico de un disco de freno automotriz con pilares de ventilación tipo NACA 66-209*. Ocaña.
- García, R., Acosta, M., & Solano, E. (2015). *Análisis del comportamiento de los frenos de disco de los vehículos a partir de la aceleración del proceso de corrosión*. Lima: Tecnura.
- García, R., Echavez, R., & Florez, E. (2019). *Termodinámica del disco de freno*. Málaga: Libertad.
- García, R., Flores, E., & Espinel, E. (2020). Análisis de los principales mecanismos de falla en tres frenos de disco automotrices. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*.

- García-Leon, R., Rivera-Lopez, J., & Gutiérrez, G. (21 de Marzo de 2029). *Sistema de bibliotecas*. Obtenido de <https://doi.org/10.23850/22565035.1785>. Recuperado el 26 de junio del 2021.
- Geneveva, F. (2008). *Mecánica de los materiales en la Industria Automotriz*. Marsella: Ediciones Libertad.
- GETAUTO. (2017). *GETAUTO*. Obtenido de <https://getauto.es/sistema-de-frenos/>. Recuperado el 11 de abril del 2021.
- Gracia, L. (2016). *Dinámica de frenado*. Porto Alegre: Editorial La Paz.
- Granada, F. (2009). *Termodinámica aplicada a los metales*. Barranquilla: Cronenberg Editoriales.
- Gushner, F. (2019). *Mecánica de materiales en un ambiente Virtual*. Zúrich: Klomstauffel Editoriale.
- Gusmán, H., Quimbita, J., & Quishpe, M. (2018). *Eficiencia de frenado entre discos originales y alternos*. Quito.
- Heredia, D. (2018). *Física del sistema de frenado*. Florencia: Editoriales mitologia griega.
- Hernandez, A. (1999). *Diseño, cálculo y construcción de Freno Hidráulico didáctico*. Cali: UAOCF.
- Inc., C. (2019). *Manual de uso del SEM, acompañado con ESD*. Málaga: Greco Editoriales.
- Inc., M. (2018). *Manual de Pastillas y accesorios de frenos*. Bronx: Reneview Editorials.
- Industries, A. (2019). *Manual de sistema de freno ATL*. Maine: ERA Editions.
- INEN. (2014). *Materiales metálicos - Ensayo de dureza de Brinell Parte 1: Método de ensayo*. Quito.
- INSTRON. (2020). *Manual de Uso Instron 8800*. Glasgow: Inerbloom Editorials.
- ISO. (2005). *Metallic Materials - Tensile testing at ambient temperature*.
- Lacroose, F. (2020). *Dureza, peculiaridades y microestructuras*.
- Landa, J. (2015). *Manual de mecánica básica en situaciones cotidianas y extremas*.

- Lascano, D. (2016). *Análisis de los discos de freno de un Chevrolet Aveo cuando está sometido a diversas temperaturas para determinar el cambio de propiedades del mismo*. Quito.
- Limpert, R. (1999). *Brake Design and Safety*. SAE International.
- López, I., Maldonado, L., Mendoza, J., & Merino, A. (2020). *Propiedades de los materiales*. Celaya.
- Lorca, F. (2007). *Tecnología en la Metalurgia*. México, D.F.: Patitas.
- Luque, A., Álvarez, A., & Vera, C. (2004). *Dinámica del Neumático*. Barcelona: Santillana.
- Macías, A. (07 de Mayo de 2019). *intelligy blog*. Obtenido de <https://intelligy.com/blog/2019/05/07/calculo-e-interpretacion-del-factor-de-seguridad/>. Recuperado el 11 de abril del 2021.
- Marius, A., & Slazuli, F. (2011). *Metrología Automotriz*. Marsella: Liberte et Egalite.
- Mecánica Automotriz GNL*. (2008). Obtenido de <https://sites.google.com/site/mecanicaautomotrizgnl/sistemas-de-frenos>. Recuperado el 12 de febrero del 2021.
- Mecánica de autos*. (Abril de 2014). Obtenido de <http://mecanicaautomotores.blogspot.com/2014/05/partes-de-un-disco-de-freno.html>. Recuperado el 01 de febrero del 2021.
- Medina, J. (2020). *Análisis de la eficiencia del sistema de frenos en diferentes condiciones de uso en un automóvil sedan eléctrico BYD E5 300*. Latacunga.
- Michaels, J. (2017). *Methalurgic Proofs*. Alabama: Power Books.
- Mirovich, M. (2012). *Seguridad del sistema de frenado*. Moscú: Yemen Industries.
- Molero, L. (2009). *Los frenos en el automóvil*.
- Morales, G. (2015). *Dinámica del funcionamiento del frenado con disco*. Los Angeles.
- Pablon, G. (2014). *Cinemática del sistema ABS de frenado*. Málaga.
- Paez, A. (2017). *Automovil Magazine*. Obtenido de <https://www.expertoautorecambios.es/magazine/chirridos-de-los-frenos-1702>. Recuperado el 01 de abril del 2021.

- Parera, A. (1993). *Frenos ABS*. Barcelona: Marcombo S.A.
- Pascual, J. (08 de Diciembre de 2012). *motor.es*. Obtenido de <https://www.motor.es/noticias/conoces-la-diferencia-frenos-de-disco-vs-frenos-de-tambor-201212483.php>. Recuperado el 05 de abril del 2021.
- Pérez, A. (2009). *Durometría molecular de los metales*. Lima: Frankfurte.
- Poulsen, K. (2015). *Procesos de manufactura por CNC*. Oslo: Ediciones Octubre.
- Prieto, A. (20 de Agosto de 2018). *Automoción*. Obtenido de <https://www.autonocion.com/tipos-discos-de-freno-pros-contras/>. Recuperado el 01 de agosto del 2021.
- Robert Bosch GmbH. (2003). *Sistemas de frenos convencionales y electrónicos*. Pstfach.
- Roger, L. (2018). *Aplicación del mantenimiento centrado en la confiabilidad RCM en el sistema de freno*. La Paz: Universidad Mayor San Andrés.
- SAE. (2019). *Sistemas de freno*. SAE Internationals.
- SAE. (2020). *Normativa 10025*. Galicia: Erasmus.
- San Bartolomé Prieto, Á. (2017). *Control de calidad del proceso de fabricación de los discos de freno mediante análisis multivariante*. Barcelona: Egalité Editions.
- Sánchez, I., De Luxan, P., & Frías, M. (2012). *Inductively coupled plasma emission*. Málaga.
- Sánchez, S. (2018). *Propuesta de diseño para disco de freno ventilado*. Valladolid.
- SCI. (2020). Tipos de análisis químicos en metales en un laboratorio metalúrgico. *SCISA Anual*.
- Shackelford, J. (2014). *Introducción a la Ciencia de los materiales para Ingenieros*. Milán: Estrella del Norte.
- SIEMENS. (20 de 04 de 2021). *Siemens Ingenuity For Life*. Obtenido de <https://www.plm.automation.siemens.com/global/es/our-story/glossary/computer-aided-design-cad/12507#:~:text=El%20dise%C3%B1o%20asistido%20por%20ordenador,y%20a%20los%20prototipos%20de%20producto>. Recuperado el 03 de abril del 2021.
- SUZUKI. (2011). *Manual de Uso Grand Vitara SZ 2.0 4x2*. Florida: Chevy Editions.

- Talati, F. (2009). Analysis of heat conduction in a disk brake system. *Springer Link*, 12-13.
- Tapia, G., Cabrera, N., & Lemus, W. (2019). Construcción de maqueta didáctica de frenos hidráulicos. Viña del Mar.
- Textar Brake Technology. (2016). *Discos de freno TEXTAR Gama de Productos*. Leverkusen: TMD Friction.
- TodoMecánica. (12 de 05 de 2005). *TodoMecánica*. Obtenido de <https://www.todomecanica.com/blog/50-los-frenos-sistemas-de-mando-y-asistencia.html>. Recuperado el 05 de enero del 2021.
- toyocostanoticia. (28 de 07 de 2014). *Toyocosta*. Obtenido de <http://www.toyocosta.com/blog/sistema-de-frenos-del-auto/>. Recuperado el 11 de septiembre del 2020.
- Ubillus, J. (2003). *Estudio Metalúrgico General*. Madrid: Tesis Digitales UNSM.
- Universidad Andres Bello. (2019). *Normativa CS-001 uso de la máquina SEM-EDS*. Santiago de Chile: Record Works.
- Vaca, J. (2014). *Banco de pruebas para el análisis y comportamiento térmico del sistema de frenos de disco y tambor en automóviles*. Latacunga.
- Vázquez, Q., Villegas, J., Vázquez, I., Avilés, C., Osuna, I., & Pérez, Y. (2012). *Enriquecimiento de señal para activación de frenos ABS en automóviles*. México, D.F.
- Velasteguí, A. (2015). *Los materiales de fricción y su influencia en la eficiencia de frenado*. Quito: USFQ.
- Venegas, W. (2012). *Análisis por el método de elementos finitos de un disco de freno con sistema de mordaza*. Quito.
- XPress. (04 de 15 de 2021). *xpress.com*. Obtenido de <https://xpress.com.ec/producto/suzuki-grand-vitara-sz/>. Recuperado el 15 de abril del 2021.

ANEXOS