



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO AUTOMOTRIZ**

**TEMA: "ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA, DESGASTE Y RENDIMIENTO
DE LOS FRENOS Y NEUMÁTICOS DEL BUS ARTICULADO BYD K11A
DE 160 PASAJEROS"**

**AUTORES: CHICO TERÁN, MANUEL ALEJANDRO
TERÁN TERÁN, DANIEL ALEJANDRO**

DIRECTOR: ING. CRUZ ARCOS, GUILLERMO MAURICIO

LATACUNGA

2019



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 DE LA EFICIENCIA, DESGASTE Y RENDIMIENTO DE LOS FRENOS Y NEUMÁTICOS DEL BUS ARTICULADO BYD K11A DE 160 PASAJEROS”** fue realizado por los señores **CHICO TERÁN, MANUEL ALEJANDRO** y **TERÁN TERÁN, DANIEL ALEJANDRO** 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, 28 de noviembre del 2019

A handwritten signature in blue ink, reading 'Guillermo Mauricio Cruz Arcos', is written over a horizontal dotted line.

ING. CRUZ ARCOS, GUILLERMO MAURICIO

C.C.: 0503010555



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

Nosotros, **Chico Terán, Manuel Alejandro** y **Terán Terán, Daniel Alejandro**, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: ***“ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA, DESGASTE Y RENDIMIENTO DE LOS FRENOS Y NEUMÁTICOS DEL BUS ARTICULADO BYD K11A DE 160 PASAJEROS”*** es de nuestra 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, 28 de noviembre del 2019

Firma manuscrita en tinta azul de Chico Terán, Manuel Alejandro.

.....
Chico Terán, Manuel Alejandro

C.C.:1003537329

Firma manuscrita en tinta azul de Terán Terán, Daniel Alejandro.

.....
Terán Terán, Daniel Alejandro

C.C.: 1721649026



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **Chico Terán, Manuel Alejandro** y **Terán Terán, Daniel Alejandro**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: ***“ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA, DESGASTE Y RENDIMIENTO DE LOS FRENOS Y NEUMÁTICOS DEL BUS ARTICULADO BYD K11A DE 160 PASAJEROS”*** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Latacunga, 28 de noviembre del 2019

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Manuel Alejandro Terán'.

.....
Chico Terán, Manuel Alejandro

C.C.:1003537329

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Daniel Alejandro Terán Terán'.

.....
Terán Terán, Daniel Alejandro

C.C.:1721649026

DEDICATORIA

A mis padres Manuel y Evita que siempre han sido el ejemplo de lucha y superación.

A mis hermanas Fer y Gaby que han estado siempre para brindar las ganas de seguir adelante.

A mi querido país Ecuador, que con todos mis conocimientos espero aportar para verle crecer.

MANUEL ALEJANDRO CHICO TERÁN

DEDICATORIA

Dedico este trabajo principalmente a Dios, a mi madre Emérita por haber sido el pilar fundamental de mi formación tanto académica y personal mediante su diario esfuerzo para forjar un futuro de bien, de manera que me permitió culminar esta etapa tan importante de mi vida.

A mi mami Rosita por haber sido mi segunda madre que me ayudo a crecer como persona con todos sus valores que una persona debe tener.

A mi hermano Santiago por haberme ayudado en mi carrera con sus conocimientos y apoyo en la parte personal y académica siempre estuvo presente.

A Andrea por haberme apoyado de manera incondicional en el camino de mis estudios superiores con sus consejos, tiempo y dedicación durante esta etapa de mi vida y en todos los ámbitos que conllevó a cumplir esta meta.

DANIEL ALEJANDRO TERÁN TERÁN

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme la oportunidad de estar aquí, por estar vivo un día más en la faz de la tierra.

Agradezco a mi familia, a mis padres y hermanas que sin ustedes no habría sido posible forjar mis modales y mis valores.

A mi primo y compañero de tesis Daniel, sin él este trabajo no hubiera sido desarrollado de manera correcta. Gracias por estar.

Agradezco al Ing. Mauricio Cruz, director del proyecto de investigación, por haber dedicado su tiempo en el desarrollo de este trabajo.

Agradezco a mis compañeros y amigos, por todos los momentos difíciles y relajados compartidos a lo largo de este período de estudiantes.

MANUEL ALEJANDRO CHICO TERÁN

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi familia por haberme apoyado durante y en la culminación de mi carrera universitaria que siempre estuvieron al tanto en cada meta cumplida.

Agradezco a mi compañero de tesis que al mismo tiempo es mi primo por habernos apoyado mutuamente en este camino universitario.

Agradezco a mis tíos y tías por su preocupación e interés en que nos formemos como profesionales.

Agradezco a Dieguito y a Lucía por haberme apoyado desde el primer día que llegué a la ciudad de Latacunga, que mediante su acogida, consejos e integración a su familia hicieron posible esta parte de mi vida.

Agradezco a mi tutor el Ingeniero Mauricio Cruz que siempre estuvo dispuesto a compartir sus conocimientos, experiencia supo guiar el desarrollo de esta tesis satisfactoriamente.

DANIEL ALEJANDRO TERÁN TERÁN

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA

CERTIFICACIÓN i

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD ii

AUTORIZACIÓN iii

DEDICATORIA iv

DEDICATORIA v

AGRADECIMIENTO vi

AGRADECIMIENTO vii

ÍNDICE DE CONTENIDOS viii

ÍNDICE DE ECUACIONES xvii

ÍNDICE DE TABLAS xvii

RESUMEN xxvi

ABSTRACT xxvii

CAPÍTULO I

MARCO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Antecedentes investigativos 1

1.2. Planteamiento del problema 3

1.3. Descripción resumida de la investigación 5

1.4.	Justificación e importancia	7
1.5.	Objetivos	8
1.5.1.	Objetivo general.....	8
1.5.2.	Objetivos específicos	8
1.6.	Metas	9
1.7.	Hipótesis	10
1.8.	Variables de investigación	10
1.8.1.	Variable independiente	10
1.8.2.	Variable dependiente	10
1.9.	Metodología de la investigación.....	11
1.9.1.	Método de observación directa	11
1.9.2.	Método inductivo.....	11
1.9.3.	Método deductivo.....	12
1.9.4.	Método experimental	12
1.9.5.	Método de análisis de contenido	12
1.9.6.	Método analítico.....	13
1.9.7.	Método sintético.....	13

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1.	Vehículos Eléctricos.....	16
2.1.1.	Características de los vehículos eléctricos.	16
2.1.2.	Tipos de vehículos eléctricos.	17
2.2.	Bus eléctrico BYD K11A	18
2.2.1.	Características del bus eléctrico K11A	18
2.2.2.	Ficha técnica del bus articulado K11A	19
2.2.3.	Cargas por ejes del articulado BYD K11A	20
2.3.	Sistema de frenos de disco.....	21
2.3.1.	Funcionamiento de los frenos	23
2.3.2.	Partes del sistema de frenos de disco	24
2.4.	Parámetros de frenado	29
2.4.1.	Superficies de contacto.....	29
2.4.2.	Energía disipada por el sistema de frenos.....	31
2.4.3.	Fuerza de factor de roce sobre las pastillas	31
2.4.4.	Longitud de frenado	32
2.4.5.	Tiempo de frenado.....	33
2.4.6.	Desaceleración del vehículo	33

2.4.7. Velocidades de frenado	34
2.4.8. Temperatura de un disco de freno	35
2.4.9. Esfuerzo cortante debido al par de freno	37
2.4.10. Par de rozamiento del disco de freno	37
2.4.11. Potencia de fricción.....	38
2.4.12. Relación de diámetros para la fuerza de fricción del disco de freno	39
2.5. Freno regenerativo.....	40
2.5.1. Motor eléctrico	40
2.5.2. Generador.....	41
2.5.3. Freno regenerativo en motor de magneto permanente (sin escobillas)	42
2.6. Neumáticos.....	42
2.6.1. Partes del neumático	43
2.6.2. Dimensiones de los neumáticos	45
2.6.3. Tipos de neumático.....	46
2.6.4. Selección adecuada del neumático.	47
2.6.5. Comportamiento dinámico del neumático	49
2.6.6. Mecanismo de fricción neumático-carretera	51
2.6.7. Causas de deterioro de los neumáticos.....	56
2.7. Distribución del esfuerzo durante el frenado.....	59

2.7.1.	Cálculo del centro de gravedad de un vehículo	59
2.7.2.	Análisis de carga en un vehículo	60
2.7.3.	Cinemática de frenado de un vehículo.....	61
2.7.4.	Cargas en reposo de un vehículo	62
2.8.	Ensayos para determinar propiedades mecánicas en las pastillas de freno.....	63
2.8.1.	Norma NTE INEN-ISO 6311	63
2.8.2.	Norma NTE INEN-ISO 6310	65

CAPÍTULO III

MODELADO, SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE FRENOS Y MEDICIONES DEL DESGASTE DE NEUMÁTICOS Y PASTILLAS

3.1.	Cálculos del sistema de frenos	67
3.1.1.	Cálculo térmico en disco de freno.....	67
3.1.2.	Cálculo del centro de gravedad	70
3.1.3.	Fuerzas y momentos que actúan durante el frenado.....	71
3.1.4.	Dinámica de frenado del vehículo.....	72
3.1.5.	Eficiencia de frenado	72
3.2.	Materiales que componen la pastilla de freno.....	74
3.3.	Simulación de los componentes del sistema de freno y neumáticos	75
3.3.1.	Modelado de los componentes del neumático del bus articulado BYD K11A.....	75

3.3.2.	Modelado del sistema de frenos del bus articulado BYD K11A	77
3.4.	Simulación de los componentes del sistema de freno y neumáticos	78
3.4.1.	Propiedades de los materiales utilizados en la simulación	79
3.4.2.	Simulación para análisis térmico del disco de freno.	80
3.4.3.	Simulación para el análisis estructural Disco-Pastilla	83
3.4.4.	Resultados de la simulación	86
3.5.	Medición de desgaste de neumáticos.....	87
3.6.	Medición de desgaste de pastillas	93

CAPÍTULO IV

PROTOCOLOS DE PRUEBAS Y ENSAYOS

4.1.	Introducción	95
4.2.	Equipos.....	95
4.2.1.	Medidor digital de profundidad de banda de rodadura.....	95
4.2.2.	Termómetro infrarrojo láser	98
4.2.3.	Manómetro de presión de neumáticos.....	99
4.2.4.	Máquina de compresión.....	101
4.2.5.	Máquina universal de ensayos.....	102
4.2.6.	Placa de calentamiento.....	103
4.2.7.	Accesorios para prueba de resistencia interna al corte	103

4.3.	Ensayo de deformación por compresión en pastilla de freno.	104
4.3.1.	Muestra.....	105
4.3.2.	Ciclo de ensayo	105
4.3.3.	Ensayo a temperatura ambiente	106
4.3.4.	Ensayo de calentamiento.....	107
4.3.5.	Resultados.....	108
4.4.	Ensayo de resistencia interna al corte	110
4.4.1.	Muestra.....	110
4.4.2.	Cálculo del área de la sección transversal.....	111
4.4.3.	Procedimiento	112
4.4.4.	Resultados.....	113
4.5.	Medición de desgaste	113
4.5.1.	Determinación de la ruta de prueba.....	113
4.5.2.	Determinación de pasajeros en la ruta de prueba.	115
4.5.3.	Cálculo de carga.....	117

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1.	Análisis del desgaste de neumáticos vs carga.	119
5.1.1.	Análisis del desgaste con carga simulada	119

5.1.2.	Análisis del desgaste con carga viva	124
5.2.	Análisis térmico de la simulación Disco-Pastilla	127
5.2.1.	Análisis térmico del disco de freno.....	128
5.2.2.	Análisis de fricción en función de la temperatura.....	131
5.2.3.	Análisis térmico de la pastilla de freno.....	133
5.3.	Análisis estructural de la simulación Disco-Pastilla.....	135
A.	Análisis de la presión en el ensamble Disco-Pastilla	136
B.	Análisis de los esfuerzos Disco-Pastilla.....	138
5.4.	Análisis de resultados	140
5.4.1.	Análisis de mediciones de neumáticos	140
5.4.2.	Análisis de ensayos en las pastillas de frenos	141
5.4.3.	Análisis de mediciones de la pastilla de freno	142
5.4.4.	Análisis de simulación en la pastilla de freno.....	142

CAPÍTULO VI

MARCO ADMINISTRATIVO

6.1.	Recursos.....	144
6.1.1.	Recursos humanos.....	144
6.1.2.	Recursos tecnológicos.....	144
6.1.3.	Recursos materiales	145

6.2. Análisis de costos de la investigación	146
6.2.1. Costos de materiales y equipos necesarios para la obtención de datos.....	146
6.2.2. Costos de pruebas de laboratorio	146
6.2.3. Costo total de la investigación	147
CONCLUSIONES.....	148
RECOMENDACIONES	151
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	153
ANEXOS.....	157

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Variable independiente: Características específicas de frenos y neumáticos</i>	10
Tabla 2. <i>Variable dependiente: Características y parámetros de desgaste</i>	11
Tabla 3. <i>Análisis de la metodología de investigación</i>	13
Tabla 4. <i>Ficha técnica del bus articulado BYD K11A</i>	20
Tabla 5. <i>Cargas que soporta cada eje</i>	21
Tabla 6. <i>Coefficientes de adherencia</i>	32
Tabla 7. <i>Propiedades termo físicas del hierro fundido gris</i>	36
Tabla 8. <i>Factor de servicio basado en la aplicación para frenos</i>	38
Tabla 9. <i>Valores de coeficientes de rodadura a diferentes condiciones de superficie</i>	55
Tabla 10. <i>Ficha técnica MICHELINX® MULTI Z</i>	58
Tabla 11. <i>Símbolos y unidades del ensayo de resistencia interna al corte</i>	64
Tabla 12. <i>Símbolos y unidades del ensayo de deformación por compresión</i>	65
Tabla 13. <i>Datos iniciales para el cálculo térmico</i>	68
Tabla 14. <i>Valores de cargas y distribución de carga por eje</i>	71
Tabla 15. <i>Cálculo de la eficiencia de frenado</i>	74
Tabla 16. <i>Componentes de la pastilla de freno</i>	74
Tabla 17. <i>Componentes del neumático</i>	76
Tabla 18. <i>Componentes del sistema de frenos</i>	77
Tabla 19. <i>Parámetros para la simulación de análisis térmico</i>	81
Tabla 20. <i>Parámetros para la simulación de análisis estructural</i>	83
Tabla 21. <i>Medición en la disposición (a)</i>	89
Tabla 22. <i>Primera medición desgaste de neumáticos en la disposición (b)</i>	91

Tabla 23. <i>Segunda medición desgaste de neumáticos en la disposición (b)</i>	92
Tabla 24. <i>Tercera medición desgaste de neumáticos en la posición (b)</i>	93
Tabla 25. <i>Mediciones de las pastillas de freno</i>	94
Tabla 26. <i>Características del medidor de profundidad de la banda de rodadura</i>	96
Tabla 27. <i>Partes del medidor de profundidad</i>	97
Tabla 28. <i>Características del termómetro infrarrojo laser</i>	98
Tabla 29. <i>Partes del termómetro laser infrarrojo</i>	99
Tabla 30. <i>Características del manómetro digital de presión de neumáticos</i>	100
Tabla 31. <i>Partes del manómetro</i>	100
Tabla 32. <i>Valores muestra 1 a temperatura ambiente</i>	108
Tabla 33. <i>Valores muestra 1 a temperatura de calentamiento</i>	109
Tabla 34. <i>Valores muestra 2 a temperatura ambiente</i>	109
Tabla 35. <i>Valores muestra 2 a temperatura de calentamiento</i>	110
Tabla 36. <i>Dimensiones de las probetas NTE INEN-ISO 6311</i>	111
Tabla 37. <i>Dimensiones de las probetas para el ensayo</i>	111
Tabla 38. <i>Resultado prueba de resistencia interna</i>	113
Tabla 39. <i>Datos de kilometraje diario del Bus BYD K11A</i>	115
Tabla 40. <i>Pasajeros transportados en un día típico de trabajo</i>	116
Tabla 41. <i>Pasajeros transportados en diferentes horarios</i>	117
Tabla 42. <i>Cálculo de carga viva</i>	118
Tabla 43. <i>Variación de la temperatura en función del tiempo</i>	130
Tabla 44. <i>Temperatura de la pastilla en el tiempo</i>	134
Tabla 45. <i>Recursos humanos</i>	144

Tabla 46. <i>Recursos tecnológicos</i>	145
Tabla 47. <i>Recursos materiales</i>	145
Tabla 48. <i>Costos de materiales y equipos</i>	146
Tabla 49. <i>Costos de pruebas de laboratorio</i>	147
Tabla 50. <i>Costo total de la investigación</i>	147

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Árbol de problemas.....	4
Figura 2. Bus eléctrico BYD modelo K11A	18
Figura 3. Sistema de frenos de disco	22
Figura 4. Disco de freno.....	23
Figura 5. Esquema sistema de frenos neumáticos	24
Figura 6. Disco de freno no ventilado (izquierda) y ventilado (derecha)	25
Figura 7. Pastilla de freno	26
Figura 8. Pastilla de freno bus BYD K11A, con sus características.....	27
Figura 9. Mordaza de disco	28
Figura 10. Mordaza flotante.....	28
Figura 11. Mordaza fija	29
Figura 12. Contacto de la superficie del disco y la pastilla	30
Figura 13. Campo de fuerzas magnéticas	41
Figura 14. Partes del neumático	45
Figura 15. Dimensión del neumático.	46
Figura 16. Dibujo del neumático X Multi F	48
Figura 17. Dibujo del neumático X Multi D.....	49
Figura 18. Dibujo del neumático X Multi T	49
Figura 19. Fuerzas en el neumático	50
Figura 20. Sistema de referencia del neumático.....	51
Figura 21. Resistencia a la rodadura en función de la velocidad.....	53

Figura 22. Variación de los coeficientes f_o y f_s en función de la presión.....	54
Figura 23. Diagrama para el cálculo del centro de gravedad.....	59
Figura 24. Diagrama de cuerpo libre en condición de reposo.....	60
Figura 25. Cinemática de frenado de un vehículo	61
Figura 26. Diagrama de cuerpo libre de las fuerzas de frenado	62
Figura 27. Área de contacto de la pastilla de freno con el pistón.....	72
Figura 28. Resultados de la cromatografía aplicada a la pastilla de freno.....	75
Figura 29. Neumático Michelin X Multi Z	77
Figura 30. Ensamble del disco con las pastillas de freno	78
Figura 31. Propiedades del material del disco de freno.....	79
Figura 32. Propiedades del material de la pastilla de freno.	80
Figura 33. Método de mallado	81
Figura 34. Valor de temperatura inicial para la simulación	82
Figura 35. Coeficiente de fricción de la pastilla.....	82
Figura 36. Temperatura obtenida en la simulación.....	83
Figura 37. Ensamble y mallado para el análisis estructural Disco-Pastilla.	84
Figura 38. Coeficiente de fricción para simulación	85
Figura 39. Determinación de las caras de fricción	85
Figura 40. Determinación de la velocidad de rotación para la simulación.	86
Figura 41. Presión en la pastilla de freno	87
Figura 42. Presión y deslizamiento de la pastilla de freno	87
Figura 43. Disposición (a) neumáticos del bus K11A	88
Figura 44. Disposición (b) neumáticos del bus K11A	90

Figura 45. Partes del medidor de profundidad.....	97
Figura 46. Termómetro láser	99
Figura 47. Manómetro	100
Figura 48. Máquina de compresión y controles	101
Figura 49. Máquina universal de ensayos	102
Figura 50. Placa de calentamiento	103
Figura 51. Accesorios ensayo resistencia al corte.....	104
Figura 52. Muestra Tipo II Fuente: Norma NTE INEN – ISO 6310:2009.	105
Figura 53. Puntos de medición de la muestra.....	106
Figura 54. Ensayo a temperatura ambiente.....	106
Figura 55. Ensayo de calentamiento	107
Figura 56. Lecturas tomadas en X.....	108
Figura 57. Probetas para el ensayo de resistencia interna al corte.	111
Figura 58. Ensayo de resistencia interna al corte	112
Figura 59. Ruta del bus articulado BYD K11A.....	114
Figura 60. Profundidad de la escultura a los 12920 Km.	120
Figura 61. Porcentaje de conservación y desgaste a los 12920 Km.	121
Figura 62. Profundidad de la escultura del neumático a los 17910 km.....	121
Figura 63. Porcentaje de desgaste y conservación a los 17910Km.	122
Figura 64. Profundidad de la escultura del neumático a los 18886 km.....	123
Figura 65. Porcentaje de desgaste y conservación a los 18886 km.	123
Figura 66. Número de pasajeros por día.	124
Figura 67. Número de pasajeros por mes.....	125

Figura 68. Profundidad de la escultura del neumático a los 23690 Km	125
Figura 69. Porcentaje de conservación y desgaste de neumáticos a los 23690 Km. .	126
Figura 70. Desgaste total de los neumáticos.....	127
Figura 71. Temperatura máxima y mínima en el disco	128
Figura 72. Temperatura máxima y mínima en la pastilla.	129
Figura 73. Temperatura máxima y mínima en el sistema Disco-Pastilla.	129
Figura 74. Gráfico temperatura vs tiempo del ensamble Disco-Pastilla.....	130
Figura 75. Variación del coeficiente de fricción en función de la temperatura	131
Figura 76. Temperatura del sistema con factor de rozamiento de 0,325.....	132
Figura 77. Temperatura del sistema con factor de rozamiento de 0,295.....	132
Figura 78. Temperatura del sistema con factor de rozamiento de 0,287.....	133
Figura 79. Mallado de la pastilla de freno	133
Figura 80. Gráfico temperatura vs tiempo de la pastilla de freno.....	134
Figura 81. Temperatura de la pastilla de freno (frontal)	135
Figura 82. Temperatura de la pastilla de freno (posterior)	135
Figura 83. Presión en la pastilla de freno en la simulación	136
Figura 84. Pastilla de freno reemplazada	136
Figura 85. Distribución de presión en la pastilla a diferentes coeficientes de fricción...137	
Figura 86. Deformación total del ensamble Disco-Pastilla.....	138
Figura 87. Deformación total en la pastilla de freno.....	139
Figura 88. Valores de penetración de la pastilla de freno.	140

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Energía disipada.....	31
Ecuación 2. Fuerza de roce.....	32
Ecuación 3. Longitud de frenado.....	33
Ecuación 4. Tiempo de frenado.....	33
Ecuación 5. Desaceleración del vehículo.....	33
Ecuación 6. Velocidad angular del disco de freno.....	34
Ecuación 7. Radio del neumático.....	34
Ecuación 8 . Velocidad en función del tiempo.....	35
Ecuación 9. Velocidad inicial y final del automóvil.....	35
Ecuación 10. Temperatura de un disco de freno.....	36
Ecuación 11. Esfuerzo cortante debido al par de freno.....	37
Ecuación 12. Par de torsión.....	37
Ecuación 13. Potencia de fricción.....	39
Ecuación 14. Relación de diámetros para fuerza de fricción.....	39
Ecuación 15. Resistencia a la rodadura.....	52
Ecuación 16. Cálculo del coeficiente de rodadura.....	53
Ecuación 17. Factor de resistencia a la rodadura.....	54
Ecuación 18. Porcentaje de conservación.....	55
Ecuación 19. Porcentaje de desgaste.....	55
Ecuación 20. Cálculo del centro de gravedad.....	59
Ecuación 21. Carga total estática del neumático trasero.....	61
Ecuación 22. Carga total estática del neumático medio.....	61

Ecuación 23. Carga total estática del neumático delantero..... 61

Ecuación 24. Carga total en el eje medio..... 63

Ecuación 25. Carga total en el eje delantero..... 63

Ecuación 26. Eficiencia de frenado 73

RESUMEN

La investigación se trata del análisis del sistema Disco-Pastilla de freno y de los neumáticos del bus eléctrico BYD K11A, a partir de ciertos parámetros y condiciones que influyen en su desgaste. Se toma como fuentes de datos los manuales y catálogos tanto de la pastilla de freno como del disco de freno, además de la caracterización de materiales de la pastilla de freno mediante una cromatografía y ensayos de la misma mediante la norma NTE INEN-ISO 6310:2009, de deformación por compresión y la norma NTE INEN-ISO 6311:2009, de resistencia interna al corte. Además de la simulación CAD y CAE del sistema de frenos en la cual se realiza un análisis térmico según los distintos coeficientes de fricción de la pastilla de freno, y de la misma manera un análisis estructural tanto de la pastilla como del disco de freno, sometidos a la presión de trabajo. Para el análisis del desgaste de los neumáticos se toma en cuenta la carga de pasajeros en el bus, para lo cual se han tomado datos de pasajeros de manera diaria, mensual en la ruta por la que actualmente circula el bus, La Ofelia-Marín en la ciudad de Quito, compuesta de aproximadamente 30km entre ida y regreso. A través de los resultados obtenidos se pueden observar aspectos que influyen en desgaste y las zonas más afectadas por el mismo, de manera que se puede comparar la simulación realizada con el comportamiento real del sistema.

PALABRAS CLAVE:

- **AUTOMÓVILES - SISTEMA DE FRENOS**
- **AUTOMÓVILES – NEUMÁTICOS**
- **BUS ARTICULADO BYD K11A**

ABSTRACT

The investigation is based on the analysis of the disc-path system and tires of the electric vehicle BYD K11A, based on the parameters and conditions that influence its use, efforts, etc. both of the brake pad and the brake disc, in addition to the characterization of brake pad materials by means of chromatography and tests thereof by means of the NTE INEN-ISO 6310: 2009 standard, of compression deformation and NTE INEN-ISO 6311: 2009 standard, of internal shear strength. In addition to the CAD and CAE simulation, the braking system in which a thermal analysis is performed according to the different friction coefficients of the brake pad, and in the same way a structural analysis of both the brake pad and disc, something like that as to the work pressure. For the analysis of tire wear, the passenger load on the bus is taken into account, for which daily and monthly passenger data has been taken on the route through which the bus circulates, La Ofelia-Marín in Quito, composed of approximately 30km round trip. Through the results obtained can be observed aspects that influence wear and the areas most affected by it, so that we can compare the simulation performed with the actual behavior of the system.

KEY WORDS:

- **AUTOMOTIVE-BRAKING SYSTEM**
- **AUTOMOTIVE-TIRES**
- **ARTICULATED BUS BYD K11A**

CAPÍTULO I

1. MARCO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Antecedentes investigativos

La industria automotriz, en constante desarrollo para conseguir una menor contaminación medioambiental, busca implementar energías alternativas a los combustibles fósiles, una de estas es la energía eléctrica que está siendo implantada en gran variedad de automotores.

Sin embargo, Ecuador al tener apenas 240 autos eléctricos que circulan desde el 2015 hasta el 2018 (Castillo & Serrano, 2018), y se pronostica un aumento en los vehículos de transporte público, como prueba de ello es la llegada de 20 buses eléctricos que el pasado 4 de febrero de 2019 arribaron a Manta y estarán destinados a circular en la ciudad de Guayaquil.

Esta incursión de Ecuador en la industria automotriz amigable con el ambiente abre la necesidad de realizar análisis en los distintos sistemas de los vehículos.

La Empresa Pública Metropolitana de Transporte de pasajeros en su sitio web menciona que en los talleres ubicados detrás de la estación El Recreo y en Chiriyacu se efectúa el mantenimiento de 113 trolebuses, 42 articulados Volvo B10M, 80 articulados Volvo 12M (Ecovía) y 40 Mercedes Benz que forman parte de la flota de la EPMTTP.

“Diariamente, se efectúan revisiones preventivas y programadas para solucionar inconvenientes que presenten las máquinas. Adicionalmente, las inspecciones e intervenciones más profundas, se realizan cada 5.000 km en el caso de los trolebuses;

cada 6.000 km en los Volvo B10M, y cada 7.500 km en los B12M y Mercedes Benz”.
(Trole Quito)

En el caso del sistema de frenado afirman que (Garcia, Acosta, & Solano, 2014)
“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”.
(p.53)

(Di Rado, Presta, & Devincenzi, 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.”(p.2755)

(Luque, Álvarez, & Vera, 2004) aseveran 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, que aparecen en la interacción neumático-calzada como

respuesta a las sollicitaciones del vehículo, son la fuerza longitudinal, transversal, vertical y el momento autoalineante”. (p.39)

En el Ecuador además existen normas que establecen los requisitos o pruebas que deben cumplir los elementos de fricción o frenos, entre los cuales tenemos:

NTE INEN-ISO 6310:2009, VEHÍCULOS AUTOMOTORES- REVESTIMIENTOS DE FRENO - MÉTODO DE ENSAYO DE LA DEFORMACIÓN POR COMPRESIÓN.

NTE INEN-ISO 6311:2009, VEHÍCULOS AUTOMOTORES. REVESTIMIENTO PARA FRENOS. MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA INTERNA AL CORTE.

1.2. Planteamiento del problema

El análisis de los materiales de los que están compuestos las pastillas de frenos son los determinantes fundamentales para comprobar su eficiencia, rendimiento y el desgaste de los neumáticos en distintas condiciones de funcionamiento.

El tema propuesto se realiza por la escasa existencia de estudios sobre el desgaste de pastillas de frenos en vehículos eléctricos, la incursión de este tipo de vehículos en el Ecuador es reciente y con este estudio se pretende adquirir conocimientos en el tema frenos-neumáticos, tomando en cuenta distintas condiciones o variables.

Además, para el presente trabajo no se tiene un registro por parte del fabricante de la composición de los materiales de las pastillas de frenos del vehículo, requisito necesario para el análisis que se pretende desarrollar.

Un factor que incide de manera directa en el rendimiento, eficiencia y desgaste del sistema freno-neumático es el tipo de terreno por el cual transita el vehículo, con este proyecto de investigación se verificarán factores determinantes tales como la temperatura, presión y capacidad de carga.

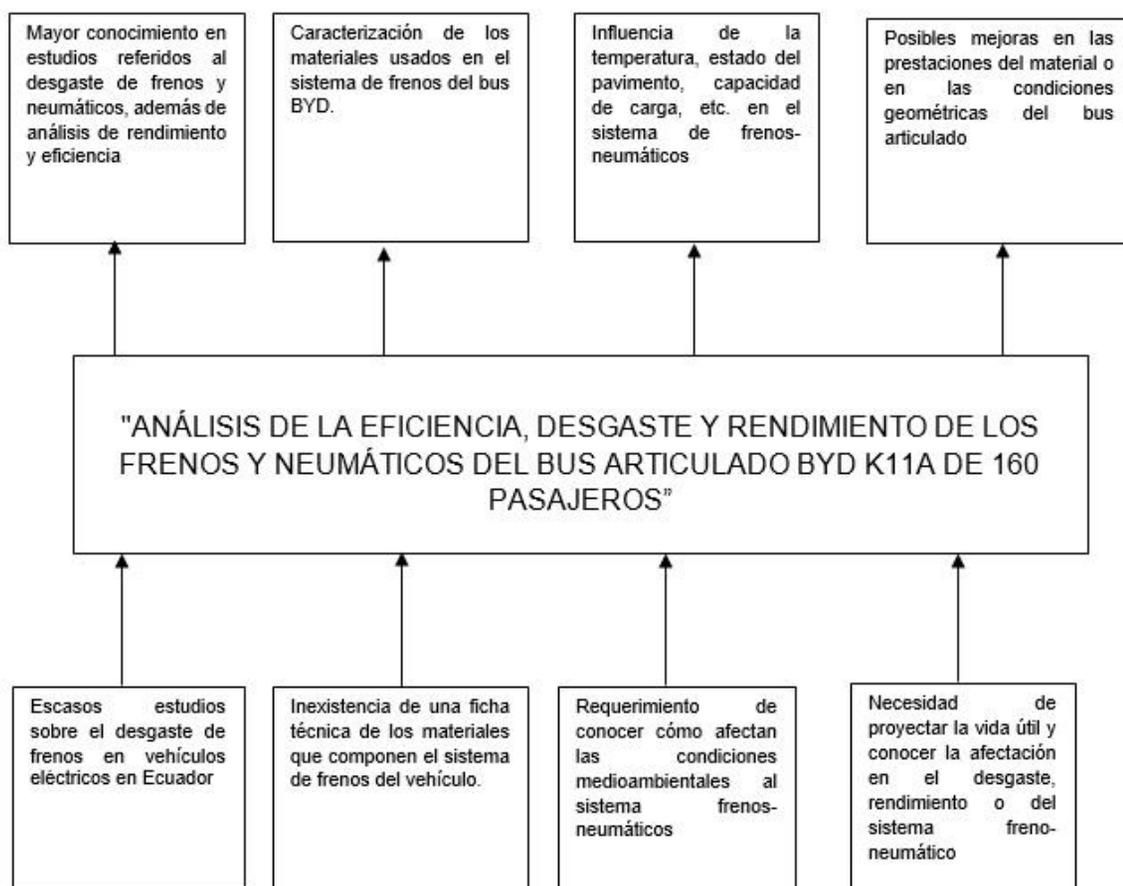


Figura 1. Árbol de problemas

1.3. Descripción resumida de la investigación

El presente proyecto de investigación se lo desarrollará en la ciudad de Quito, en el terminal de transferencia de pasajeros “La Ofelia” perteneciente al corredor central norte de la empresa Metrobús, para realizar las pruebas de medición y cuantificación de datos de desgaste tanto de pastillas de frenos como de neumáticos. El proyecto de investigación está fundamentado en las diferentes normas nacionales (INEN) e internacionales (ETRTO The European Tyre and Rim Technical Organization), que determinan los parámetros de pruebas, ensayos y requisitos de acuerdo a su tipo de servicio, dimensiones y distancia entre ejes.

Según la ITV (Inspección Técnica Oficial de Vehículos) organismo para el mantenimiento legal preventivo de la Unión Europea, en lo referente a neumáticos, estos deben corresponder siempre con el recomendado en la ficha técnica del vehículo, al igual que su índice de carga y su categoría de velocidad.

Por último, se debe verificar las especificaciones técnicas o características que presenta el manual de los neumáticos. Así como también tanto en el ámbito nacional la banda de rodadura debe tener un espesor mínimo legal de 1,6 mm para poder circular dentro del país acorde a la norma NTE INEN 2099:1996 sobre los NEUMÁTICOS PARA VEHÍCULOS DE PASAJEROS.

De acuerdo el manual de Documentación Técnica de MICHELIN, para realizar la elección y determinar la dimensión debe corresponder a la carga máxima en el eje, se debe tener en cuenta los siguientes aspectos y características técnicas; la capacidad de carga de cada eje y la carga homologada está proporcionada por el fabricante del vehículo de acuerdo con el reglamento vigente. Para cada medida del neumático corresponden uno o más anchos de llanta posibles de acuerdo con las normas ETRTO.

Dentro de las pruebas para los ensayos de frenos está la NTE INEN-ISO 6310:2009 sobre los métodos de ensayo de la deformación por compresión, la cual es aplicable en pastilla de freno de disco, y tiene el principio de que cierta fuerza es utilizada para dar una presión por unidad de área (procedimiento A, el método de ensayo por defecto), expresada en mega pascales.

Otra de las pruebas en ensayos de frenos es la NTE INEN-ISO 6311:2009 sobre el método de ensayo para determinar la resistencia interna al corte, la cual hace referencia al frenado en condiciones normales de trabajo, un esfuerzo cortante es generado en el material de fricción, en este caso la pastilla de freno. Para el ensayo se debe colocar la probeta de ensayo en el dispositivo y se debe aplicar una carga de manera progresiva en dirección paralela a la dirección del esfuerzo.

Para demostrar la eficiencia de frenado se toma del Diario Oficial de la Unión Europea, el Anexo 3 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.

En lo referente al modelado y simulación del sistema de frenos, se desarrollará en sistemas CAE, los cuales permitirán un análisis ingenieril más detallado de las zonas de trabajo más críticas, concentración de esfuerzos, deformaciones, etc. que posteriormente van a ser analizadas.

1.4. Justificación e importancia

En la actualidad la tecnología de vehículos eléctricos es incipiente y es por eso que el gobierno del Ecuador en conjunto con la empresa BYD han hecho posible que la ciudad de Guayaquil tenga una flota de 20 buses 100% eléctricos, climatizados los cuales su principal objetivo es no emitir gases tóxicos al medio ambiente, con esto no solamente se contribuye a desempeñar un servicio eficiente y cómodo para el 70% de los ciudadanos que utiliza este medio de transporte, sino que la implementación de esta tecnología implica tener buses menos contaminantes debido a la reducción del CO₂.

De esta manera con este proyecto se busca determinar la eficiencia y rendimiento de acuerdo con los materiales usados en el sistema de frenos y neumáticos para estimar la durabilidad de sus componentes como son las patillas en el sistema de frenado y para el caso de los neumáticos el desgaste de su labrado.

Según los estudios realizados por la empresa (BYD-Ecuador, 2018) “el bus eléctrico articulado K11A en comparación con los buses que actualmente se encuentran en Quito recorriendo 6.000 km en las mismas condiciones el bus eléctrico de Quito hubiese generado 12 toneladas de CO₂. Para mitigar esta cantidad de CO₂ es necesario plantar el equivalente de dos y medio estadios olímpicos Atahualpa de árboles.”

Es por eso que es importante resaltar que un motor a diésel disminuye su eficiencia hasta en un 45% debido a condiciones como la presión atmosférica y la dificultad que presenta el oxígeno para ingresar al motor en la combustión, en contraste, los buses eléctricos tienen una eficiencia de hasta 95% en una ciudad como Quito.

Para el medio ambiente y la población en general este tipo de tecnología representa un gran beneficio en materia de contaminación ya que el articulado que es objeto de la presente de la investigación se puede replicar su uso en diferentes ciudades

del país contribuyendo así de una manera significativa en la reducción de las emisiones de gases contaminantes, períodos más prolongados entre mantenimiento y mantenimiento debido a su menor número de componentes.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Analizar la eficiencia, desgaste y rendimiento de los frenos y neumáticos del bus articulado BYD K11A, mediante pruebas y simulaciones dinámicas para determinar los aspectos en donde se tiene su mayor incidencia.

1.5.2. Objetivos específicos

- Recopilar información técnica y teórica mediante fuentes confiables como libros, bases digitales, normativas, manuales de procedimientos, manuales de mantenimiento para llevar a cabo el desarrollo de la investigación.
- Analizar el comportamiento de los frenos del articulado BYD K11A, mediante procedimientos adecuados para desmontar las pastillas de frenos, tomando en cuenta el lugar en donde se encuentran ubicados.
- Realizar un estudio del desgaste de las pastillas de frenos, mediante pruebas de materiales y caracterización de las mismas, para comprender sus zonas críticas de trabajo.
- Desarrollar simulaciones dinámicas del sistema de frenos del articulado BYD K11A, mediante software CAE que permita observar y analizar las mayores concentraciones de esfuerzos.
- Realizar un estudio del desgaste de los neumáticos del bus articulado BYD K11A,

con el uso de distintas variables como la presión, la capacidad de carga, la temperatura y la superficie de la calzada para observar la influencia sobre los neumáticos.

- Analizar los datos obtenidos en cuanto a las pruebas y caracterización tanto de las pastillas de frenos como de los neumáticos y de esta manera determinar su desgaste, rendimiento y eficiencia acorde a su funcionamiento.

1.6. Metas

- Recopilar información y reglamentación técnica inherente a pruebas de frenado y desgaste de frenos y el equipo a utilizar para el desarrollo del proyecto de investigación en tres semanas.
- Determinar los factores que influyen directamente en el desgaste normal y anormal de la banda de rodadura del neumático.
- Efectuar mediciones de desgaste en las pastillas de freno de una manera periódica en base al kilometraje del bus articulado K11A.
- Recolectar datos de la profundidad del labrado del neumático en base a la carga y el kilometraje recorrido.
- Investigar qué sistemas de frenado posee el vehículo articulado y de qué manera son accionados en las 6 ruedas.
- Determinar los materiales de composición de las pastillas de freno mediante pruebas de laboratorio.

1.7. Hipótesis

¿Las condiciones de trabajo influyen directamente en el desgaste, rendimiento y eficiencia de las pastillas de freno y los neumáticos del autobús BYD K11A?

1.8. Variables de investigación

1.8.1. Variable independiente

Bus articulado eléctrico BYD K11A de 18 metros con capacidad para 160 pasajeros.

Tabla 1

Variable independiente: Características técnicas específicas de frenos y neumáticos

Concepto	Categoría	Indicadores	Ítem	Técnicas	Instrumentos
Características técnicas específicas del sistema de frenos y neumáticos del bus articulado BYD K11A	Frenos	Sistemas de freno	Neumático	Cálculos	Ecuaciones
			Discos de freno		
		Pastillas	mm	Cálculos	Ecuaciones
		Discos de freno	mm	Cálculos	Ecuaciones
	Neumáticos	Capacidad de carga	ton	Cálculos	Ecuaciones
		Peso del vehículo	ton	Cálculos	Ecuaciones
		Distancia entre ejes	mm	Cálculos	Ecuaciones

1.8.2. Variable dependiente

Parámetros de trabajo que varían en el análisis de desgaste, rendimiento, eficiencia del sistema freno-neumático.

Tabla 2.*Variable dependiente: Características y parámetros de desgaste*

Concepto	Categoría	Indicadores	Ítems	Técnicas	Instrumentos
Características de distintas maneras de funcionamiento que pueden estar directamente ligadas en el análisis del sistema freno-neumático	Capacidad de carga	Niveles de carga en el autobús	Kg	Cálculos	Ecuaciones
			Ton.	Medición	Contador
			%Capacidad		
	Desgaste de neumáticos	Profundidad de labrado	mm	Medición	Profundímetro
			plg		Calibrador
	Desgaste de pastillas	Espesor	mm	Medición	Calibrador
			plg	Cálculos	Ecuaciones
	Inflado de neumáticos	Presión de inflado de neumáticos	Psi	Medición	Manómetro de presión
			KPa		
			bar		
Temperatura de funcionamiento	Temperatura de los neumáticos	°C	Medición	Termómetro	
		°F			

1.9. Metodología de la investigación

1.9.1. Método de observación directa

Se utilizará instrumentos de medición como el profundímetro, calibrador pie de rey, termómetro láser los cuales son de importancia en el campo en el que se desarrolla el experimento para la recolección de datos sobre todo en el análisis de variación del labrado del neumático y de las pastillas de freno, caracterización de los materiales de composición de cada uno de estos y simulación en el software CAD.

1.9.2. Método inductivo

En este método, se proyectará el desgaste tanto de frenos como de neumáticos con la ayuda de instrumentos de medición específicos para este fin y obtener valores estadísticos para determinar el desgaste.

1.9.3. Método deductivo

En este método, mediante la utilización de un software de simulación tiene como finalidad establecer los factores que inciden en el desgaste del sistema de frenos y para que se pueda determinar su rendimiento.

1.9.4. Método experimental

Este método se operará con el manejo de pruebas controladas para la manipulación de parámetros en el cual se modificará la carga del vehículo y kilometraje para determinar los valores de las mediciones y análisis del desgaste para el respectivo análisis de resultados.

1.9.5. Método de análisis de contenido

La metodología que se va utilizar para la realización del presente proyecto de investigación se las realiza en cuatro fases específicas, la primera fase es el protocolo de pruebas que se compone de la preparación y reconocimiento de los componentes del vehículo así como también la toma de datos y mediciones iniciales para el análisis cualitativo y cuantitativo, la segunda fase está compuesta por diseño experimental de inducción donde se toman los datos de la primera fase para el diseño con los parámetros del producto de los resultados de las pruebas iniciales, la tercera fase es la implementación del sistema experimental de inducción en la misma que se toman en cuenta la experimentación con pruebas físicas, la cuarta fase consta de pruebas y análisis de resultados obtenidos durante la experimentación y la de la implementación del sistema experimental de inducción en el vehículo que se propone para la validación

de la propuesta de investigación para de esta manera emitir conclusiones y recomendaciones.

1.9.6. Método analítico

Se utilizará en el análisis de resultados tomando en cuenta los datos alcanzados en las pruebas, con ayuda de la ejecución del programa de simulación CAD.

1.9.7. Método sintético

Mediante los ensayos a realizar en las pastillas de freno y a los neumáticos para poder determinar los factores que influyen en el desgaste mediante el cálculo matemático y simulación CAE.

Tabla 3
Análisis de la metodología de investigación

Metodología	Descripción	Equipo	Laboratorio
Documental Bibliográfico	Se obtendrá toda la información a través de textos tales como tesis, artículos científicos, revistas los cuales permiten tener una idea más amplia acerca de los principales factores que determinan el desgaste tanto de pastillas de freno como de neumáticos y así poder adquirir los conocimientos necesarios para el desarrollo del proyecto.	<ul style="list-style-type: none"> ● Tesis ● Libros ● Artículos Científicos ● Manuales 	<ul style="list-style-type: none"> ● Biblioteca de la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE"
Método deductivo	Permite determinar los principios y relaciones existentes partiendo de lo general a lo particular como son: vehículo a usar, equipos de medición y factores de afectan en el desgaste de los neumáticos y pastillas de freno.	<ul style="list-style-type: none"> ● Pastillas de freno del articulado K11A ● Neumáticos del articulado K11A ● Equipos de medición 	<ul style="list-style-type: none"> ● Laboratorio de ensayo de materiales ● Laboratorio de ensayos destructivo
Método inductivo	Se conocen con exactitud el número de elementos que forma el objeto de estudio, como son en los neumáticos el desgaste pastillas de freno de acuerdo a determinado número de kilometraje y con variables en las	<ul style="list-style-type: none"> ● Neumáticos del articulado BYD K11A ● Pastillas de freno ● Discos de 	

	cargas vivas del vehículo.	freno BYD	
De medición	Genera la información y datos numéricos referentes al desgaste en milímetros que se obtiene del neumático de acuerdo al kilometraje recorrido y a la información que se obtiene para comprobar la eficacia de frenado y realizar el análisis con las mediciones obtenidas durante el período de pruebas.	<ul style="list-style-type: none"> • Termómetro digital infrarrojo • Calibrador pie de rey • Profundímetro 	<ul style="list-style-type: none"> • Laboratorio de mecánica de patio
Análítico	Este método de investigación permite distinguir y analizar de forma ordenada los resultados de las pruebas iniciales datos importantes para fijar los requerimientos para el diseño de los elementos que son objeto del estudio y del sistema de inducción así también la utilización de un software de diseño CAD para el modelado establecer los factores que implican un mayor desgaste.	<ul style="list-style-type: none"> • Computador • Suite informática Microsoft Excel. 	<ul style="list-style-type: none"> • Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE_L.
Experimental	Se utiliza este método para la experimentación y validación del diseño donde se realizan pruebas físicas con los dispositivos seleccionados y elementos construidos, con las condiciones y requerimientos para la implementación del prototipo sistema de inducción probando su sostenibilidad y su correcto funcionamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Termómetro digital infrarrojo • Calibrador pie de rey • Profundímetro 	<ul style="list-style-type: none"> • Laboratorio de ensayo de materiales • Laboratorio de ensayos destructivo
Observacional sistematizado	Permite alcanzar un mayor grado de precisión al controlar el entorno de desarrollo de la implementación del prototipo de sistema de inducción permitiendo evitar situaciones de riesgo como descargas de carga estática por parte del investigador evitando el daño de circuitos electrónicos y precautelando su seguridad.	<ul style="list-style-type: none"> • Equipo de protección personal • Guantes de nitrilo 	<ul style="list-style-type: none"> • Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE_L
Análisis	Permite llegar al objetivo propuesto en la investigación que requiere cumplir con cada uno de los	<ul style="list-style-type: none"> • Software de diseño CAD 	<ul style="list-style-type: none"> • Universidad de las Fuerzas

Matematización	Con este método, una vez representados los resultados de la investigación mediante números, será necesario la generalización del aspecto cuantitativo de los factores analizados mediante la ecuación de la eficacia de frenado, distancia de frenado, aceleración media estabilizada los lineamientos tomados en cuenta para la investigación.	<ul style="list-style-type: none"> • Computador • Suite informática Microsoft Office 	
De concordancia	Con los resultados obtenidos de las pruebas antes y luego del acondicionamiento del sistema de inducción comparan entre sí para señalar la diferencia entre los criterios de estudio.	<ul style="list-style-type: none"> • Computador • Suite informática Microsoft Office Excel. 	<ul style="list-style-type: none"> • Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE_L
Síntesis	Se plasma la información obtenida del análisis y la comparación en una conclusión respaldada con evidencias y magnitudes registradas en las pruebas, para posteriormente validar y aseverar la solución del problema.	<ul style="list-style-type: none"> • Computador • Suite informática Microsoft Office Word 	

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Vehículos Eléctricos

A partir de la necesidad de la producción de energía limpia, la electricidad se ha venido empleando en innumerables aplicaciones como la mecánica, química o la térmica y uno de los grandes desafíos para este tipo de vehículos eléctricos ha sido el almacenamiento de energía eléctrica sin necesidad de estar conectado a la red eléctrica y es por este motivo que en los últimos años se han desarrollado baterías, para disponer de energía eléctrica cuando esta sea solicitada. Esto ha llevado a los fabricantes de estos tipos de vehículos a desarrollar sistemas de frenado y propulsión alternativos al convencional para que estos sistemas cumplan funciones adicionales a los que están predestinados.

2.1.1. Características de los vehículos eléctricos.

(Doblado, 2017) Afirma: “Actualmente ya hay un buen número de fabricantes que comercializan modelos de vehículos eléctricos (EV) y este tipo de vehículo ya empieza a ser conocido por todos. Sus principales características son:

- La tracción es totalmente eléctrica y va a cargo de un motor eléctrico-generador. El motor va alimentado con una corriente eléctrica trifásica y la energía es proporcionada por una batería de alta tensión.
- El motor eléctrico realiza las funciones de generador para la recuperación de energía KERS.

- La autonomía de estos vehículos consiste en un equilibrio entre la capacidad de las baterías de alta tensión y el consumo que realice el motor eléctrico, ósea de las prestaciones que se requiere conseguir en el vehículo, la mayoría de los modelos actuales presentan una autonomía de entre 100 y 200 km de recorrido.
- El sistema de transformador (inversor) es el encargado de convertir la corriente continua de las baterías en corriente alterna, idónea para el motor”.

2.1.2. Tipos de vehículos eléctricos.

En el ámbito comercial se pueden encontrar varios tipos de vehículos eléctricos, que se utilizan para diferentes fines tanto comercial y de turismo es así que se consideran los siguientes tipos de vehículos eléctricos:

- **Vehículos eléctricos tipo sedán y SUV**

Este tipo de vehículos son generalmente utilizados para circular dentro de las ciudades, cuentan con similares características de otros vehículos tipo sedán de combustión, en cuanto a confort y espacio. Lo que los hace particulares a este tipo de vehículos es su autonomía eléctrica, el tipo de batería de alta tensión con la que están equipados y la forma de carga lo cual produce una energía totalmente limpia y amigable con el medio ambiente.

- **Buses eléctricos**

Los buses eléctricos están destinados al transporte de pasajeros, tienen condiciones como la eficiencia y potencia, además de que tiene menores gastos en mantenimiento. Los buses eléctricos en general poseen ciertas características: no tienen pedal de embrague ni caja de cambios, además de su muy bajo ruido.

- **Motocicletas eléctricas**

Las motocicletas eléctricas brindan una gran alternativa para movilizarse por la ciudad o para realizar actividades de trabajo. Los motores eléctricos están destinados a sustituir a los motores de combustión, y cada vez es más común ver Scooter eléctricos en las ciudades, en diferentes actividades como para servicios de mensajería como para realizar trayectos habituales y desplazamientos.

2.2. Bus eléctrico BYD K11A

El modelo de bus articulado K11A de la empresa BYD es un bus 100% articulado en el Ecuador, como característica principal es que posee su batería de alta tensión de Hierro- Fosfato, estas baterías suministran energía que nos permiten garantizar una autonomía > 350 km que se encuentra homologado en el ministerio de transporte, que de acuerdo a las siguientes características lo hacen amigable con el medio ambiente y una alternativa para el reemplazo de las flotas de buses a diésel por buses eléctricos. (BYD-Ecuador, 2018)



Figura 2. Bus eléctrico BYD modelo K11A
Fuente: (BYD-Ecuador, 2018)

2.2.1. Características del bus eléctrico K11A

Entre las principales características que posee el modelo K11A tenemos las siguientes que menciona (BYD-Ecuador, 2018):

- Aire acondicionado
- Sistema de frenos regenerativo. Regeneración de carga de sus baterías a través del frenado y desaceleración
- No utiliza aceite ni lubricantes
- Motores acoplados a las ruedas
- Cámaras de retro
- Software que permite configurar control de velocidad garantizando la seguridad de los pasajeros
- Torque instantáneo
- Asiento del conductor ergonómico
- Piso alto con accesibilidad para PMR (Personas con Movilidad Reducida)
- Tiempo de carga 2.5 a 3 horas. (BYD-Ecuador, 2018)

2.2.2. Ficha técnica del bus articulado K11A

El fabricante del bus BYD muestra en su página web una ficha de especificaciones técnicas de bus articulado modelo K11A en las cuales se muestran dimensiones y características específicas de los principales sistemas que posee, datos en los que se basarán los posteriores cálculos.

Tabla 4*Ficha técnica del bus articulado BYD K11A*

BUS K11A	
Largo	18000 mm
Ancho	2550 mm
Alto	3260 mm
Distancia entre ejes	5550/6755
Sillas PAX- Max	33/> 160 PAX+ Área de silla de ruedas
Áreas de sillas de ruedas	1
Velocidad máxima	60 km/h
Capacidad en pendiente	+ 17%
Distancia al suelo	320 mm
Autonomía	>350 Km
Corona circular exterior	13.8 m exterior
Suspensión	Suspensión neumática & ECAS, altura graduable
Sistema de frenos	Freno de disco 6 ruedas & ABS
Llantas	295/80 R 22.5
Motor eléctrico	AC motor de magneto permanente (sin escobillas)
Potencia máxima	360KW (180 KW*2) 492 Hp
Torque máximo	3000 Nm (1500 Nm *2)
Batería	Hierro-Fosfato
Capacidad energética	400 kWh /550 V
Potencia energética	200 KW (100 kW*2, 480 V, AC)
Tiempo de carga	2.5 a 3 h

Fuente: BYD Ecuador

2.2.3. Cargas por ejes del articulado BYD K11A

La carga que soporta cada eje viene dada en la placa de identificación dentro del bus articulado las cuales se describen a continuación

Tabla 5
Cargas que soporta cada eje

Peso en vacío (Kg)	19800
Peso bruto del vehículo	31000
Carga eje 1 (Kg)	7000
Carga eje 2 (Kg)	11500
Carga eje 3 (Kg)	12500

Fuente: Placa de identificación del bus BYD K11A

2.3. Sistema de frenos de disco

El bus articulado K11A está equipado con frenos de disco en sus seis ruedas y sistema de freno antibloqueo (ABS). Por lo cual nos enfocaremos en describir el sistema de frenos de disco, así como sus componentes.

Mencionan (Domínguez & Ferrer, 2012) que “el sistema de freno de disco es el más empleado en automóviles y motocicletas. Este freno es más ligero, sencillo y efectivo que el sistema de freno de tambor”. Es por esta razón que se está imponiendo en la mayoría de vehículos. (p.243)

“El freno de disco basa su funcionamiento y constitución en principios mecánicos e hidráulicos sencillos, la bomba transmite la presión en el circuito, y por medio de émbolos de las pinzas, se transforman en fuerzas de empuje sobre las pastillas. El disco gira solidario a la rueda y a las pastillas lo presionan hasta detenerlo.

El accionamiento hidráulico de las pinzas se basa en el más elemental de los principios hidráulicos: el principio de Pascal” (Domínguez & Ferrer, 2012).

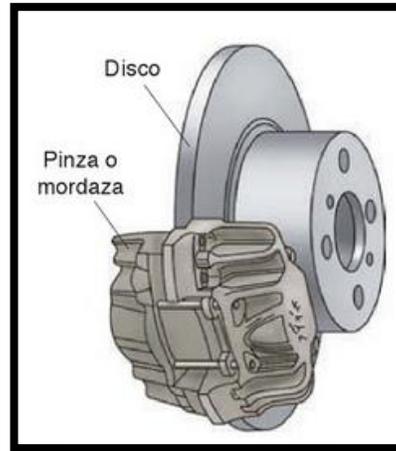


Figura 3. Sistema de frenos de disco
Fuente: (Domínguez & Ferrer, 2012)

(Granell, 2019) afirma que “Los discos de freno son los dispositivos empleados para garantizar la reducción de la velocidad de cada una de las ruedas de nuestro vehículo, hasta llegar a detenerlo. Esto se debe a la fricción que se crea cuando los frenos atrapan el disco al accionar el pedal.”

Para que los frenos de disco activen el freno de estacionamiento, poseen un tambor de freno en el disco que tiene el funcionamiento común.

“El desgaste de los discos de freno no se produce tempranamente ya que se trata de elementos que han sido fabricados en metal, al contrario de lo que sucede con otros elementos del sistema como las pastillas de freno, fabricadas con un componente de fricción.” (Granell, 2019).

Por esta razón normalmente el recambio es de las pastillas de freno, mas no del disco de freno que puede también ser rectificado.



Figura 4. Disco de freno
Fuente: (Fraemma, 2019)

Los frenos de disco son los frenos más utilizados y empleados en los vehículos actuales debido a sus prestaciones y ventajas en comparación con los de tambor, entre las cuales se pueden mencionar:

- La facilidad de montaje que poseen, debido a menos componentes y posteriormente se ve reflejada en disminución de costos.
- Mayor dispersión de calor cuando el vehículo posee gran potencia y se necesita un mayor rendimiento.
- Mayor poder de frenado que los frenos de tambor.

2.3.1. Funcionamiento de los frenos

El funcionamiento de los frenos de disco tiene como principio la transformación de la energía rotacional en calor, debido principalmente a la fricción entre dos componentes que son el disco y las pastillas de freno, la acción de frenado se produce debido a la acción hidráulica que proviene de la bomba mediante presión, la cual llega hasta las pastillas y estas se presionan contra el disco, deteniendo de esta manera el vehículo.

Para enviar la fuerza necesaria para el frenado en los vehículos grandes, como los buses, camiones, etc. es necesaria la utilización de un mando neumático en lugar de un mando hidráulico para fines de mayor efectividad y seguridad, el mando neumático posee aire comprimido a presión.

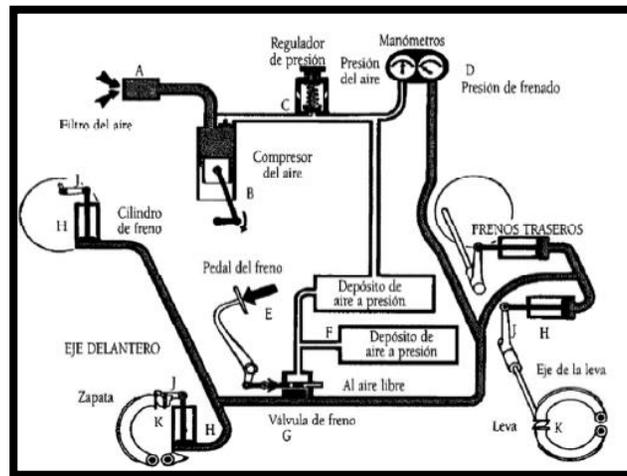


Figura 5. Esquema sistema de frenos neumáticos
Fuente: (Venegas W. , 2012)

2.3.2. Partes del sistema de frenos de disco

- **Discos de freno**

“Son uno de los elementos de fricción en la acción de frenado de los sistemas de freno de disco. Suelen estar fabricados con acero aleado con cromo, ya que deben soportar elevadas temperaturas sin sufrir deformaciones”. (Borja, Fenoll, & Seco de Herrera, 2009)

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.

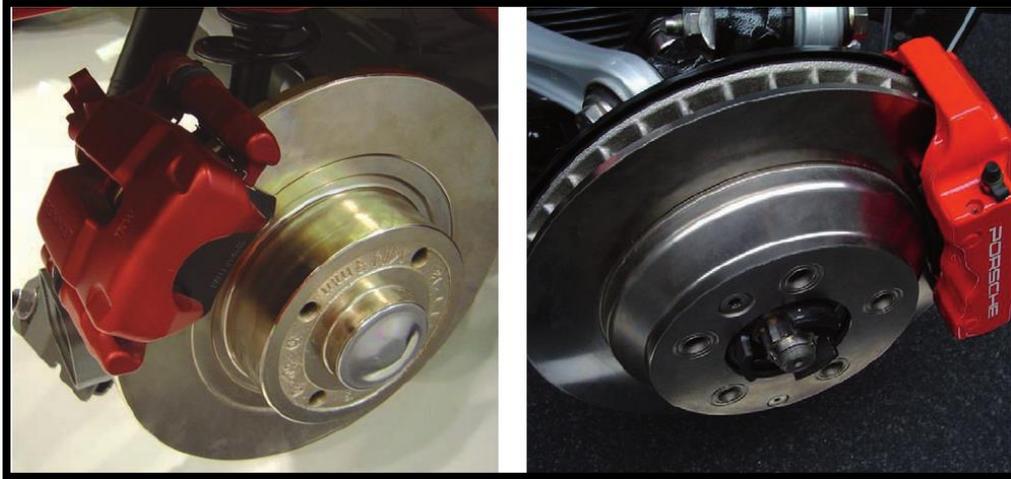


Figura 6. Disco de freno no ventilado (izquierda) y ventilado (derecha)
Fuente: (Borja, Fenoll, & Seco de Herrera, 2009)

Los discos de freno Textar, (Anexo 6) utilizados en el sistema del bus BYD K11A son usualmente fabricados con hierro fundido, para soportar las altas temperaturas que se producen, que entre sus beneficios se tiene:

- La conductividad térmica mejorada conduce a una distorsión térmica reducida y, por lo tanto, a una vibración del freno minimizada.
- Mayor resistencia a la carga gracias a una optimización de la dinámica de frenado.
- Protección contra la corrosión
- Reducción del ruido de frenado (menos susceptible a los chirridos)
- **Pastillas de freno**

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. (Borja, Fenoll, & Seco de Herrera, 2009).



Figura 7. Pastilla de freno

Fuente: (Borja, Fenoll, & Seco de Herrera, 2009)

En la antigüedad el componente que se utilizaba para darle rigidez a la pastilla de freno era amianto, pero debido a que es cancerígeno se ha suspendido su uso.

Para el caso de la pastilla de estudio, su fabricante Knorr-Bremse con manufactura Textar, el material de fricción es el T7400, según el catálogo del fabricante (Anexo 3), este material especifica que es libre de asbestos, con un bajo porcentaje de fibras de acero, fibras adhesivas, en la hoja de datos del producto (Anexo 2) nos especifica que posee 9% de cobre y a temperaturas mayores a 300 ° C dependiendo de las condiciones de reacción, se pueden desarrollar hidrocarburos de CO, H, fenólicos, aromáticos y alifáticos.



Figura 8. Pastilla de freno bus BYD K11A, con sus características

- **Mordazas, pinzas o cálipers**

“La pinza de freno encierra el disco, como una pinza. Asistidos por uno o varios pistones operados hidráulicamente, los segmentos de acero o aluminio con material de fricción aplicada que se mueven axialmente se presionan contra el disco. Son posibles fuerzas de presión de superficie muy altas debido a la fuerza de tensión opuesta. Al aumentar el desgaste de los forros de fricción, los pistones se extienden más y reajustan la trayectoria de desgaste. La holgura del freno, que debe garantizarse después de cada operación, permanece constante. Volumen adicional de fluido requerido para que esto fluya desde un reservorio. Las tapas protectoras de los pistones y los pernos de guía evitan que el freno se atasque debido a la suciedad y corrosión” (Drexler & Leiter, 2014).



Figura 9. Mordaza de disco

Fuente: (Drexler & Leiter, 2014)

Existen dos tipos de mordazas de freno:

- Mordazas flotantes:

Son las que son accionadas por un solo pistón, al momento en el que este recibe la fuerza, mueve la mordaza hacia el otro lado y de esta manera presiona los dos lados del disco de freno, empezando la fricción para detener el automóvil.

Las mordazas flotantes son utilizadas en los vehículos livianos como por ejemplo vehículos turismo.

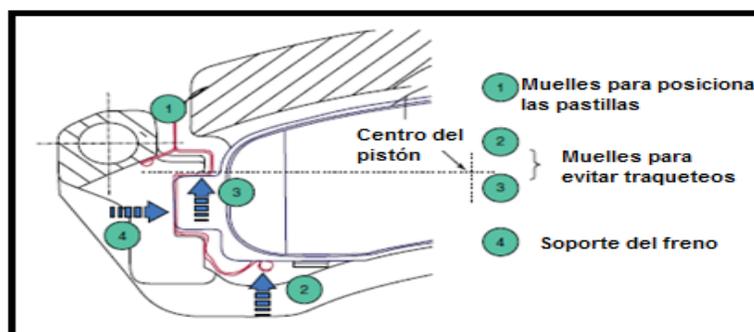


Figura 10. Mordaza flotante

Fuente: (Drexler & Leiter, 2014)

- Mordazas estacionarias o fijas:

Son las que poseen más de un pistón en cada lado de la mordaza, con lo cual al momento de frenar, las dos pastillas son presionadas por igual para llevar a cabo la fricción. La potencia y el peso del vehículo son los factores que inciden en la cantidad de pistones que tengan. Los frenos de mordaza fijos son construidos hasta con ocho pistones por lado.



Figura 11. Mordaza fija
Fuente: (Drexler & Leiter, 2014)

2.4. Parámetros de frenado

2.4.1. Superficies de contacto

Las superficies pulidas, que son consideradas lisas, poseen gran cantidad de imperfecciones que a simple vista no son observadas, pero a escala microscópica, estas se pueden apreciar. Las imperfecciones de las dos superficies tienden a juntarse, generando un área real de contacto, la cual incrementa cuando también lo hace la presión.

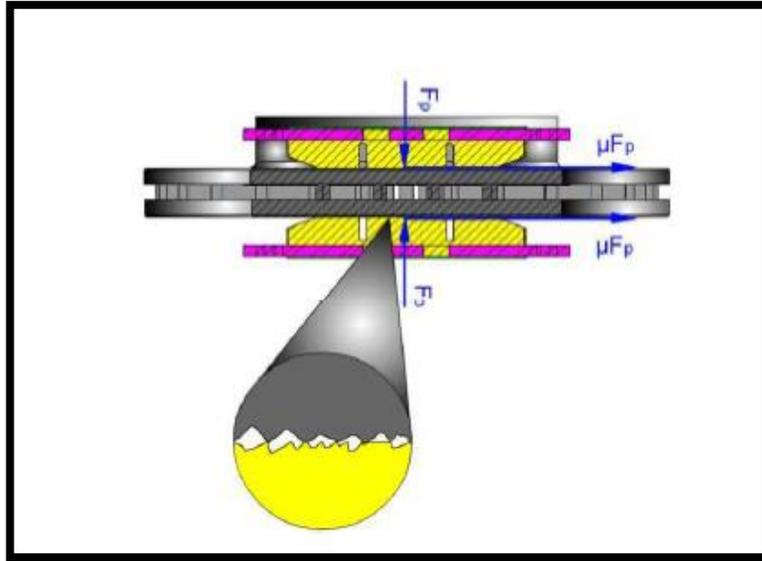


Figura 12. Contacto de la superficie del disco y la pastilla
Fuente: (Venegas W. , 2012)

(Venegas W. , 2012) asevera que “Los metales tienden a soldarse en frío, debido a las fuerzas de atracción que ligan a las moléculas de una superficie con la molécula de otra. Estas soldaduras tienen que romperse para que el deslizamiento se produzca. Además, existe siempre la incrustación de los picos con los valles. Este es el origen del rozamiento estático.”

“Cuando el disco se desliza sobre las pastillas las soldaduras en frío se rompen y se rehacen constantemente. Pero la cantidad de soldaduras que haya en cualquier momento se reduce por debajo del valor estático, de modo que el coeficiente de rozamiento cinético es menor que el coeficiente de rozamiento estático” (Venegas W. , 2012).

2.4.2. Energía disipada por el sistema de frenos

Como afirma (García & Flórez, 2018): “Debido a que el frenado del vehículo transforma la energía cinética en energía calorífica”, esta energía es posible calcularla según mediante la ecuación”:

$$E_f = \frac{k \times m \times (v_i^2 - v_f^2)}{2}$$

Ecuación 1. Energía disipada

“Para lo cual es necesario conocer la masa del vehículo (m), el factor de corrección para masas rodantes (k) y la velocidad del vehículo al momento en el que empieza a frenar” (García & Flórez, 2018).

El factor de corrección para masas rodantes viene dado según (Limpert, 1999): “Para carros de pasajeros en el rango de 1.05 a 1.15 en marcha alta y 1.3 a 1.5 en marcha baja. Los valores correspondientes para camiones son de 1.03 a 1.06 en marcha alta y 1.25 a 1.6 para marchas bajas.”

2.4.3. Fuerza de factor de roce sobre las pastillas

(García & Flórez, 2018) afirman que: “Para calcular la fuerza de roce en la pastilla es necesario tener un factor de adherencia entre la calzada y el neumático”

Basados en la siguiente tabla:

Tabla 6

Coeficientes de adherencia

Velocidad de marcha (Km/H)	Estado de los neumáticos	Carretera Seca (M)	Carretera Mojada (M)
50	Nuevo	0.85	0.65
	Usado	1	0.5
80	Nuevo	0.8	0.6
	Usado	0.95	0.2
120	Nuevo	0.75	0.55
	Usado	0.9	0.2

Fuente: (García & Flórez, 2018)

Mediante la tabla mencionada, se puede determinar la fuerza de roce con la siguiente ecuación:

$$Fr = u_b \times Fn$$

Ecuación 2. Fuerza de roce

En donde u_b es el coeficiente de adherencia (Tabla 6) y Fn la fuerza normal que ejerce el vehículo.

2.4.4. Longitud de frenado

Se denomina así a la distancia que recorre el vehículo desde que se presiona el freno hasta que el vehículo se detiene, para encontrar este valor es necesario saber la masa del vehículo (m), la fuerza de factor de roce sobre las pastillas (Fr) y la velocidad a la que se comienza a frenar el vehículo (V_i).

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

Ecuación 3. Longitud de frenado

2.4.5. Tiempo de frenado

Es el tiempo necesario en el que el vehículo se detiene, este tiempo es importante para la comparación entre otros sistemas de frenado y debe ser el óptimo para que la seguridad del conductor y los pasajeros no se vea comprometida.

$$t = 0.28 \frac{v_{x1}}{a_x}$$

Ecuación 4. Tiempo de frenado

Para lo cual es necesario conocer la desaceleración (a_x) y la velocidad a la que se empieza a frenar el vehículo (v_{x1}).

2.4.6. Desaceleración del vehículo

La desaceleración del vehículo se produce cuando se acciona el mando del freno y este a su vez comienza el proceso de accionamiento para lo cual se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$a_x = \mu_n \pm i$$

Ecuación 5. Desaceleración del vehículo

Donde:

a_x = desaceleración

μ_n = coeficiente de adherencia del neumático al suelo

i = inclinación del suelo

2.4.7. Velocidades de frenado

La velocidad angular inicial del disco de freno depende de la velocidad del vehículo

$$\omega = 277,8 * \frac{v_x}{r_n}$$

Ecuación 6. Velocidad angular del disco de freno.

Donde:

v_x = velocidad instantánea

r_n = radio del neumático

Para el cálculo del radio del neumático se utiliza la siguiente ecuación:

$$r_n = \left(\frac{Dl}{2} + An * Ran \right)$$

Ecuación 7. Radio del neumático.

Donde:

Dl = diámetro de la llanta en pulgadas

An = ancho de la llanta en milímetros

Ran = relación altura- ancho del neumático

Si se asume que la desaceleración del vehículo es uniforme, el cambio de la velocidad es en función lineal del tiempo, y t_f es el tiempo de frenado es decir:

$$v_x(t) = v_x \left(1 - \frac{t}{t_f}\right)$$

Ecuación 8 . Velocidad en función del tiempo

Pero mientras esta disminuye la velocidad V_{x1} y V_{x2} se convierte en:

$$v_{x1} = v_x \left(1 - \frac{t - \Delta t}{t_f}\right)$$

$$v_{x2} = v_x \left(1 - \frac{t}{t_f}\right)$$

Ecuación 9 . Velocidad inicial y final del automóvil

2.4.8. Temperatura de un disco de freno

Según el autor (Venegas W. , 2012) expresa que “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”.

$$T = \frac{T_{Fr} * \omega * t_f + m_d * c_d * T_o + h * A_c * T_{amb}}{m_d * c_d + h * A_c}$$

Ecuación 10. Temperatura de un disco de freno

Donde:

T_{Fr} = par de rozamiento del disco de freno

ω = velocidad angular

t_f = tiempo de frenado

m_d = masa del disco de freno.

c_d = capacidad de calor específico del disco de freno.

T_o = temperatura inicial del disco de freno.

h = coeficiente de convección del disco de freno

A_c = área de convección del disco de freno (área de la pastilla)

T_{amb} = temperatura ambiente.

Tabla 7

Propiedades termo físicas del hierro fundido gris

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

CONTINÚA 

Capacidad de calor específico	460	505	J/Kg°C
Coeficiente de expansión térmica	11	13	μstrain/°C
Calor latente de fusión	270	275	kJ/kg

Fuente: (Venegas W. , 2012)

2.4.9. Esfuerzo cortante debido al par de freno

Este esfuerzo depende del par de fricción total que se produce en el disco de freno el mismo que es distinto al esfuerzo cortante por contacto.

$$\tau = \frac{T_{Fr} * r}{J}$$

Ecuación 11. Esfuerzo cortante debido al par de freno

Donde:

J= momento polar de inercia del disco de freno.

T_{Fr} = par de rozamiento del disco de freno

r = radio del disco de freno

2.4.10. Par de rozamiento del disco de freno

La capacidad torsional requerida se relaciona con la potencia del motor que impulsa el sistema entonces se calcula de la siguiente manera.

$$T_{fr} = P_f * \frac{K}{\omega}$$

Ecuación 12. Par de torsión

Donde:

T_{fr} = par de torsión del disco.

P_f = potencia de fricción.

W = velocidad angular.

K = factor de servicio basado en la aplicación para frenos.

Tabla 8

Factor de servicio basado en la aplicación para frenos.

Aplicaciones	Factor de servicio basado en la aplicación
Para frenos bajo condiciones promedio	1
Para frenos en servicio ligero, donde el eje de salida toma su carga normal solo después de que está en su velocidad	1.5
Para freno en servicio pesado donde se debe acelerar grandes cargas conectadas	3
Para frenos que tienen carga variable, usa un factor K al menos igual al factor por el cual el par torsional máximo del motor es mayor que el par torsional de carga total:	
Para un motor industrial típico (diseño NEMA B)	2.75
Para un motor con alto par torsional de arranque (diseño NEMA C)	4
Para freno en sistema impulsado para motores de gasolina, diésel u otras máquinas impulsoras	5

Fuente: (Venegas W. , 2012)

2.4.11. Potencia de fricción

Es la potencia que se requiere para desarrollar el trabajo del frenado, tomando en cuenta la fuerza de roce de la ecuación 2, la distancia de frenado, el tiempo de frenado y el número de ruedas que realizan la fricción, especificados en la ecuación siguiente:

$$P_f = \frac{F_r \times D_f}{t_f}$$

Para obtener la potencia para un solo lugar de trabajo se utiliza la ecuación:

$$P_f = \frac{\frac{F_r \times D_f}{t_f}}{n}$$

Ecuación 13. Potencia de fricción

Donde:

F_r = fuerza de roce

D_f = distancia de frenado

t_f = tiempo de frenado

n = número de ruedas que realizan el trabajo de fricción

2.4.12. Relación de diámetros para la fuerza de fricción del disco de freno

La relación de diámetros viene dada por el radio del neumático y el radio del disco de freno el cual se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$r_k = \frac{r_n}{r}$$

Ecuación 14. Relación de diámetros para fuerza de fricción

Donde

r_k = relación de diámetros

r_n = radio del neumático

r = radio del disco de freno

2.5. Freno regenerativo

El freno regenerativo es un sistema de freno utilizado en vehículos eléctricos e híbridos principalmente, su objetivo se basa en recuperar parte de la energía del movimiento en energía que va a ser utilizada para recargar las baterías de alto voltaje, la idea del freno regenerativo se llevó desde antes de los años cincuenta, con el uso de elevadores eléctricos se utilizaba la corriente eléctrica para llevar a cabo el frenado. Los sistemas de frenos en un motor eléctrico pueden ser electromecánicos y netamente eléctricos. Para comprender el funcionamiento de este sistema es necesario revisar algunos conceptos:

2.5.1. Motor eléctrico

“Un motor eléctrico es una máquina eléctrica rotatoria que transforma la energía eléctrica en energía mecánica mediante un proceso electromagnético. Se puede observar las múltiples ventajas en relación al motor de combustión interna, como eficiencia mayor, limpieza de las partes, comodidad debido al tamaño, además de la seguridad de funcionamiento” (Méndez, Cely, & Monar, 2016).

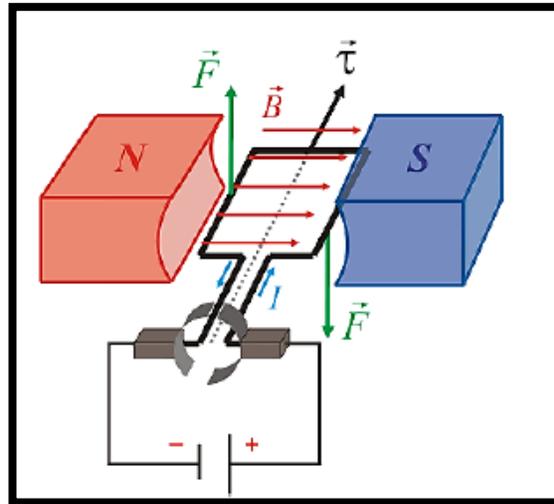


Figura 13. Campo de fuerzas magnéticas

Fuente: (Méndez, Cely, & Monar, 2016)

El principio del funcionamiento está basado en el campo electromagnético, en el cual una fuente de energía alimenta al campo magnético, produciendo un momento de fuerzas y una rotación, convirtiendo de esta manera una energía eléctrica inicial en una energía mecánica.

2.5.2. Generador

El generador eléctrico tiene un principio contrario al motor eléctrico, en el cual es necesario un movimiento rotatorio para generar energía eléctrica, que posteriormente puede ser utilizada en varios aparatos, es decir requiere energía mecánica para ser convertida en energía eléctrica.

“El generador sigue el principio de la ley de inducción electromagnética, que dice que al tomar en cuenta el giro de una espira dentro de un campo magnético se producirá una variación del flujo del mismo tipo a través del campo, generando así una corriente eléctrica. La fuerza electromotriz inducida depende del ritmo de cambio del flujo, mas no del número de líneas de campo que atraviesa el circuito, es decir solo de su variación en

el tiempo y se produce por el movimiento relativo de los conductores sobre el estator dentro de un campo magnético.” (Méndez, Cely, & Monar, 2016)

2.5.3. Freno regenerativo en motor de magneto permanente (sin escobillas)

“En los motores sin escobillas, por lo general se utiliza el campo generado por el paso del rotor (imán permanente) a través de los embobinados del estator, y así excitar los sensores de efecto Hall montados sobre el rotor, de esta manera se genera señales para controlar el motor. La teoría electromagnética dice que se produce un campo, proporcional a la velocidad, cuando se mueve un dipolo magnético en el espacio” (Escobar, Martínez, & Téllez, 2005).

A diferencia del motor con escobillas, en donde las utiliza para hacer el cambio de polaridad en el rotor mientras están conectadas al colector.

“Este campo es inducido en las bobinas, de las que están compuestas las fases del motor, de esta manera forma una f.e.m de retorno en el embobinado. En el caso de los motores sin escobillas, la energía aplicada a cada fase debe ser mayor que la f.e.m de retorno inducida para tener un torque mayor a cero. Esta energía se puede utilizar cuando el motor deja de ser excitado, es decir cuando se está frenando debido a que es proporcional a la velocidad y por lo tanto a la inercia, y es en ese momento donde se recargan las baterías” (Escobar, Martínez, & Téllez, 2005).

2.6. Neumáticos

Es la parte del automóvil, motocicleta o autobús que cumple con una función en específico la cual es transmitir la potencia motriz y la del freno contra el suelo además de

guiar la trayectoria que se dirige el vehículo, así como también participar como elemento activo de la suspensión y soportar el peso del vehículo.

Las características principales que posee un neumático son: la adherencia a los distintos tipos de suelo, como seco o mojado y buen comportamiento en curva como en recta, así como también una baja resistencia a la rodadura. Los materiales más utilizados en la fabricación de los neumáticos es el caucho natural, los neumáticos de caucho natural superan en prestaciones a los sintéticos salvo a altas velocidades donde estos superan en cuanto a fenómenos vibratorios (Martín, 2007).

2.6.1. Partes del neumático

Los neumáticos están compuestos de tres partes principales los cuales son: cubierta, válvula y cámara si lleva esta.

- La Cámara

Es el componente de goma que almacena el aire y le proporciona la forma al neumático. Hoy en día los neumáticos en su mayoría no tienen cámara (tubeless) y tienen la ventaja que en el caso de un pinchazo se desinfla más lentamente pudiéndose.

- La válvula

Es la sección por la cual se infla el neumático y tiene como función mantener la presión, existen varios tipos de válvulas y todos estos están normalizados.

- La cubierta

La cubierta es la porción principal del neumático y está compuesta de las siguientes partes:

- A) Carcasa: cuya función es dar la firmeza a la cubierta la cual soporta los esfuerzos de la carga aplicada, del exterior y de la propia presión de inflado. Está compuesta de una o más telas engomadas que a su vez se componen de cuerda de material flexible y resistente. Va revestida de una capa de goma que le brinda impermeabilidad.
- B) Cintura: está ubicado en las cubiertas de la estructura radial y la función principal que cumple es la de proporcionar firmeza al cubrimiento soportando su carga. Se compone de varias telas en la parte superior de la carcasa dándole una forma plana en esa área.
- C) Banda de rodamiento: es la franja de la cobertura que tiene contacto directo con el piso la función principal es de proteger a la carcasa de los golpes y de la abrasión. Su dibujo está formado por tacos y surcos que determinan la adherencia al suelo. La banda de rodadura dispone de indicadores de desgaste.
- D) Hombros: son las porciones de unión entre la banda de rodadura y el flanco de cubierta. Su trabajo es el de impedir los golpes desde los lados que se den en el neumático.
- E) Talones: la misión principal es anclar la estructura de refuerzo en el neumático y transferir parte de los movimientos de aumento de velocidad y frenado.

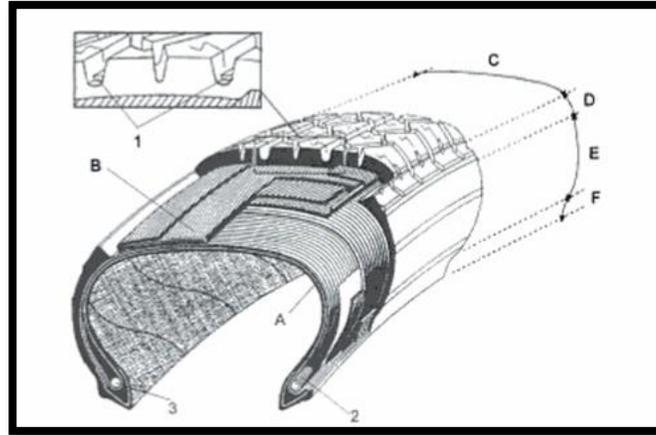


Figura 14. Partes del neumático
Fuente: (Martín, 2007)

2.6.2. Dimensiones de los neumáticos

- Ancho total: es medida de la sección transversal del neumático es decir la zona que va asentada en el suelo, incluyendo los costados de la llanta
- Ancho de sección: es el ancho total sin considerar los rebordes de la llanta.
- Ancho de la sección de rodadura: distancia ubicada entre los extremos de la banda de rodadura, al estar sin carga el neumático.
- Profundidad de la sección de rodadura: la medición más grande de profundidad de la ranura ubicada entre la banda de rodamiento y su base.
- Altura de sección: distancia entre el asiento de ceja hasta la banda de rodamiento, estando el neumático sin carga.
- Ancho de rim: longitud transversal entre los laterales del asiento de la ceja del rin.
- Diámetro nominal de rin: distancia del rin desde el asiento de ceja hasta el extremo opuesto del mismo, es decir el diámetro
- Radio estático con carga: longitud comprendida entre el centro del eje del vehículo y la zona de rodamiento estando el neumático cargado a su máxima capacidad.

- Ancho de sección con carga: es la distancia entre el ancho de sección máximo que la llanta alcanza al estar llevando su carga máxima de capacidad

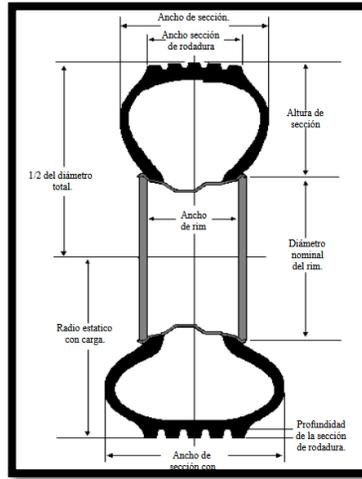


Figura 15. Dimensión del neumático
Fuente: (Bridgestone, 2018).

2.6.3. Tipos de neumático

Los neumáticos varían de acuerdo a su composición interna y el uso al cual el usuario los va a someter, en el caso del transporte de pasajeros generalmente se utilizan los siguientes tipos de neumáticos:

A) Neumático radial tubeless

(Paredes & Sánchez, 2008) mencionan que “Un neumático radial tubeless es un neumático que se monta sin cámara sobre una llanta especial provista de una válvula apropiada. El neumático radial tubeless se presenta, en su parte exterior, como un neumático montado con cámara de aire. Su fabricación es idéntica desde el punto de vista arquitectónico; pero, por dentro de la cubierta, una capa de goma especial (butyl) garantiza su estanqueidad total.”

B) El neumático radial

“La arquitectura radial disminuye el roce y el consumo de energía. Mejora la adherencia y reduce el desgaste, mientras que su cintura de acero resiste mejor a las perforaciones. La carcasa del neumático radial está integrada por una o más capas metálicas que van de un talón al otro. Está apretada por tres o cuatro capas en la cima de acero indeformable. Esta estructura radial además permite disociar el trabajo de la cima con el de los flancos” (Paredes & Sánchez, 2008) (p28).

Para lo cual era lo mejor analizar las labores que realizan la cima del neumático y los flancos. Además es importante señalar la asociación de las capas textiles o metálicas a una composición llamada cintura fabricada de lonas de acero indeformable para fortalecer la cima de la llanta.

2.6.4. Selección adecuada del neumático.

A. Dimensión adecuada del neumático

“La carga máxima que soporta cada eje viene especificada por el fabricante del vehículo de acuerdo a las normativas vigentes. Es necesario que se equipe el eje con neumáticos adecuados y que soporten dichas cargas recomendadas” (Michellin, 2019).

B. Dibujo adecuado del neumático

Es necesario aclarar que existen tres tipos principales de ejes en los vehículos pesados: eje de dirección, eje motriz y eje portador.

- Para un eje de dirección.

“Son rayados o el dibujo diseñados y fabricados para actuar de manera correcta en los ejes de dirección de los vehículos: carga dinámica, ángulos de la geometría de los ejes, rendimientos kilométricos elevados” (Michellin, 2019).



Figura 16. Dibujo del neumático X Multi F
Fuente: (Michellin, 2019)

- Para un eje motriz

“Son desarrollados para dar contestación a los requerimientos específicos de los ejes motrices, es decir la transmisión de par y el frenado, articulación combinada (por parejas), carga del eje (la más importante del conjunto)” (Michelin, 2017).



Figura 17. Dibujo del neumático X Multi D
Fuente: (Michellin, 2019).

- Para el eje portador

“Estos dibujos han sido desarrollados para los requerimientos que necesitan los ejes portadores, entre los cuales se destacan: cargas estáticas y dinámicas, recorridos elevados en los ejes centrales. Los neumáticos con dibujos/rayados cuentan con índices de carga y velocidad acondicionados a los vehículos remolcados” (Michellin, 2019).



Figura 18. Dibujo del neumático X Multi T
Fuente: (Michellin, 2019)

2.6.5. Comportamiento dinámico del neumático

“El análisis dinámico de los neumáticos, se refiere a las fuerzas que se ejercen sobre el neumático y la respuesta a los factores en función de las diferentes características

operativas y de diseño. Las fuerzas que actúan concisamente sobre el vehículo, son la fuerza longitudinal, transversal, vertical y momento autoalineante” (Rodríguez Luque, Alvarez, & Vera, 2005).

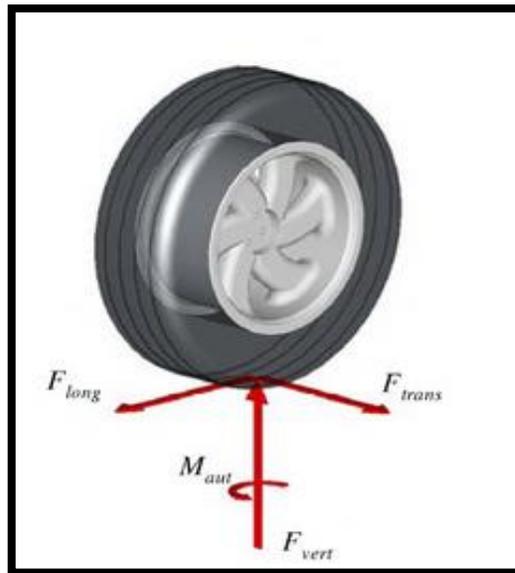


Figura 19. Fuerzas en el neumático
Fuente: (Rodríguez Luque, Alvarez, & Vera, 2005)

Para facilitar el estudio de la representación adecuada de las condiciones de operación y fuerzas que interactúan en el neumático se ha trazado un sistema de referencia como se muestra en la Figura 19, además de que se definen de la siguiente manera:

“El eje X viene dado por la intersección del plano medio de la rueda y el plano de la superficie de rodadura, longitudinal al vehículo. El eje Z es el eje perpendicular al plano de superficie de rodadura y su sentido positivo hacia el suelo. El eje Y es el eje perpendicular a X e Y, donde forma con ellos un sistema ortogonal.

El origen del sistema de referencia coincide con la zona de contacto del neumático y el suelo” (Rodríguez Luque, Alvarez, & Vera, 2005).

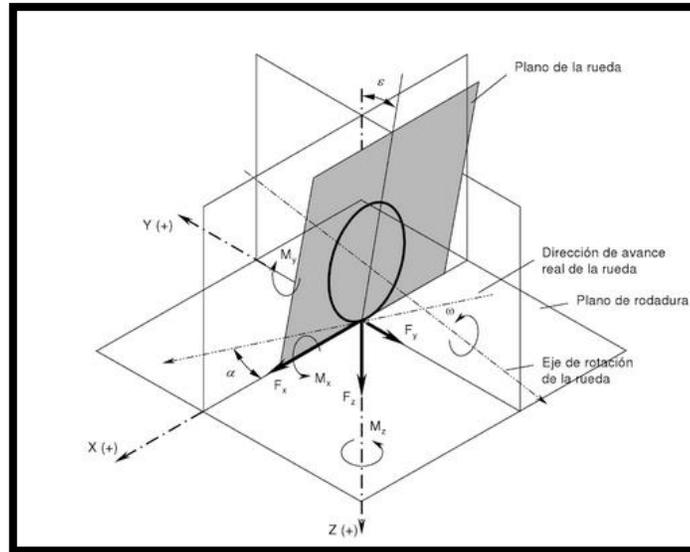


Figura 20. Sistema de referencia del neumático
Fuente: (Rodríguez Luque, Alvarez, & Vera, 2005).

2.6.6. Mecanismo de fricción neumático-carretera

Las fuerzas de fricción que actúan en el contacto del neumático y el suelo se deben a dos fenómenos diferentes, las cuales son la adhesión e histéresis. Dichas fuerzas de adhesión se producen por la atracción entre las moléculas de las dos superficies de contacto en áreas con una elevada presión localizada, esto se produce por el giro que realiza la rueda o en el deslizamiento, el enlace entre moléculas se rompe y se genera constantemente, disipando energía y dando lugar a las fuerzas de fricción.

“Las fuerzas que se producen por el fenómeno de histéresis se producen de acuerdo a la constante deformación que se sufre la banda de rodadura por las irregularidades de la superficie de la carretera, las irregularidades de la carpeta asfáltica. Estas irregularidades tienen longitudes de onda que varían entre 0,5 y 50 mm con amplitudes entre 0,01 y 20mm. En el momento que se deforma la banda de rodadura, hay una fuerza que actúa en el sentido contrario para recuperar su forma. La influencia de ambos

fenómenos en la fuerza de rozamiento final depende de diferente factor. La fuerza de adhesión es predominante en rodadura” (Luque, Álvarez, & Vera, 2004)

- Resistencia a la rodadura

Según el autor (Ramírez, 2017) nos menciona que “La resistencia a la rodadura siempre se opone al movimiento del vehículo, ayudando así al momento de frenar”. La fuerza de resistencia a la rodadura se calcula como:

$$R_r = f_r + (W_f + W_r) = f_r W$$

Ecuación 15. Resistencia a la rodadura

Donde:

W_f y W_r = fuerza normal que experimentan las llantas de los vehículos con la carretera, representando el peso dinámico llevado a las llantas traseras y delanteras.

f_r = es el coeficiente de resistencia de rodadura.

W = es el peso del vehículo actuando sobre el centro de gravedad.

- Cálculo del coeficiente de rodadura (f_r)

Según (Font Jaumandreu, 2014) dice que “El estado de equilibrio en dirección longitudinal atribuye la existencia de una fuerza igual y contraria generada en el área de contacto neumático-suelo, esta fuerza horizontal es conocida como resistencia a la rodadura (R_r) y la relación entre esta fuerza y la carga normal a la superficie de rodadura (W) aplicada a la rueda, se denomina coeficiente de resistencia a la rodadura (f_r).”

$$f_r = \frac{Rr}{W}$$

Ecuación 16. Cálculo del coeficiente de rodadura

- Coeficiente de resistencia a la rodadura en función de la velocidad

El coeficiente de resistencia a la rodadura se lo puede calcular en función de la velocidad de circulación, como podemos observar en la figura 21.

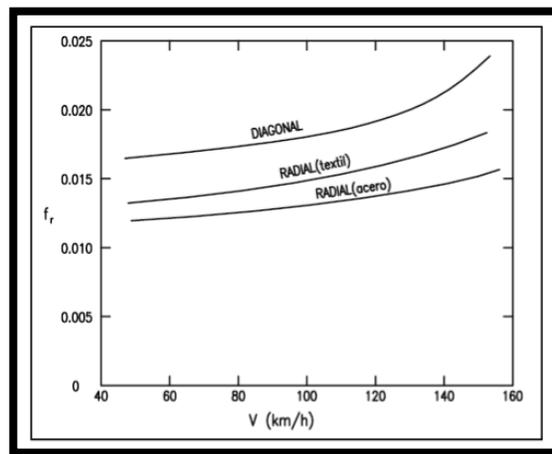


Figura 21. Resistencia a la rodadura en función de la velocidad

Fuente: (Font Jaumandreu, 2014).

El tipo de calzada por la que circula el vehículo también tiene una atribución importante sobre el valor de la resistencia a la rodadura.

Para nuestro caso el bus BYD K11A circula sobre hormigón para lo cual según el autor (Font Jaumandreu, 2014) menciona que “para neumáticos de vehículos, sobre pavimento de hormigón, el coeficiente de resistencia a la rodadura puede calcularse por la ecuación:

$$f_r = f_o + f_s \cdot \left(\frac{V}{100}\right)^{2,5}$$

Ecuación 17. Factor de resistencia a la rodadura.

Donde:

f_r = resistencia a la rodadura

f_o y f_s = parámetros que dependen de la presión de inflado

V = velocidad del vehículo en Km/h.

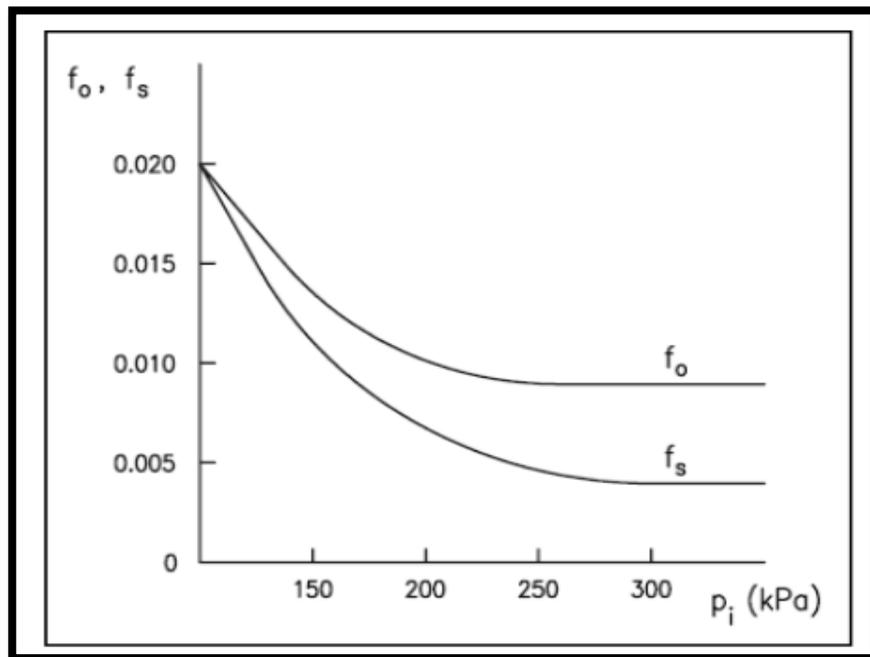


Figura 22. Variación de los coeficientes f_o y f_s en función de la presión

Fuente: (Font Jaumandreu, 2014)

Como referencia en la siguiente tabla se presentan los valores del coeficiente, en función del tipo de neumático, según el tipo de vehículo y el tipo del suelo o calzada.

Tabla 9

Valores de coeficientes de rodadura a diferentes condiciones de superficie

Tipo de Vehículo	Tipo de Superficie		
	Hormigón/ Asfalto	Dureza Media	Arena
Turismo	0,015	0,08	0,3
Camiones / Buses	0,012	0,06	0,25
Tractores	0,020	0,04	0,2

Fuente: (Font Jaumandreu, 2014)

- Cálculo del porcentaje de conservación del neumático.

El cálculo del porcentaje de conservación del neumático está dado por la profundidad promedio de las mediciones del neumático y la profundidad de la escultura de fábrica.

$$C\% = \frac{\textit{promedio profundidad}}{\textit{profundidad de fábrica}} * 100$$

Ecuación 18. Porcentaje de conservación

- Cálculo del porcentaje de desgaste

El cálculo del porcentaje de desgaste del neumático viene dado por la profundidad de medidas promedio multiplicado por la profundidad de fábrica.

$$D\% = 100 - \frac{\textit{profundidad promedio} * 100}{\textit{profundidad de fábrica}}$$

Ecuación 19. Porcentaje de desgaste

2.6.7. Causas de deterioro de los neumáticos

(Paredes & Sánchez, 2008) afirman que: "Un gran número de neumáticos para uso de Ingeniería se deterioran como consecuencia de:

- Un inflado insuficiente: Se la reconoce como la flexión del neumático, produciendo el aumento de la temperatura dentro del mismo.
- Sobre inflado: Se da cuando presenta un desgaste precoz de la banda de rodadura, y presenta mayor sensibilidad a los choques o los daños por cortes.
- Sobrecarga: Desgaste a corto plazo de la banda de rodadura, se presenta sensibilidad de los flancos y aumento de la flexión del neumático, lo que da lugar a un incremento de la temperatura al interior del neumático.
- Velocidad excesiva: Aumento de la temperatura al interior del neumático y desgaste precoz de la banda de rodadura."(p.32).

2.6.8. Factores que influyen en la duración de vida de los neumáticos

A) La temperatura interna de funcionamiento

Cuando un neumático se encuentra en rodamiento, se incrementa la temperatura como consecuencia de:

- El trabajo realizado.
- El incremento de temperatura en los discos de freno.
- El calentamiento de los reductores.

B) Injerencia de la presión en la vida útil del neumático

La presión es uno de los factores principales para la estimación de vida de un neumático.

A título indicativo

- Un inflado insuficiente en un 10% disminuye la vida útil del neumático en un 10%.
- Un inflado insuficiente en un 20% acorta la duración del neumático en un 25%
- Un inflado limitado en un 30% disminuye la vida útil del neumático en un 50%.
- Un sobre inflado de un 10% reduce la duración del neumático en un 5%.
- Un sobre inflado de un 20% disminuye la duración del neumático en un 10%.
- Un sobre inflado de un 30% reduce la duración del neumático en un 20%.

C) Influencia de las condiciones climáticas

Dependiendo de que la temperatura sea elevada o de que el clima sea seco o húmedo, el neumático sufrirá las consecuencias. (Paredes & Sánchez, 2008)

D) Posición de los neumáticos en el vehículo

Se permite que los neumáticos colocados sobre ruedas motrices tienen una vida útil por desgaste inferior en un 25% en comparación con los montados sobre ruedas directrices. (Paredes & Sánchez, 2008)

E) La sobrecarga

En ocasiones podemos encontrar una carga excesiva en los neumáticos, sobrecarga que se debe, a la naturaleza y al tipo de material trasladado, así como la manera en que se efectúa la carga.

A título indicativo

- Un exceso de carga del 10% limita la duración del neumático en un 15%.
- Un exceso de carga del 20% limita la duración del neumático en un 30%.
- Un exceso del 30% limita la duración del neumático en un 50%.

F) Sobrecarga permanente

Es conveniente no sobrecargar el vehículo de una forma permanente. El material o carga viva transportada puede tener una densidad más alta que de costumbre.

G) Sobrecarga puntual

A una carga que no es la correcta, hace que la mayor parte de la carga se apoye sobre un eje, un lado, un neumático (Paredes & Sánchez, 2008).

2.6.9. Ficha técnica del neumático Michelin X Multi Z

El fabricante de los neumáticos Michelin muestra en su página web una ficha de especificaciones técnicas del modelo que utiliza el articulado modelo K11A en las cuales se muestran dimensiones, datos en lo que se basarán los posteriores cálculos.

Tabla 10

Ficha técnica MICHELINX® MULTI Z

Dimensión	295/80 R22.5
Ancho (mm)	295
Índice de carga/velocidad	152/148 L
Carga por eje - simple (kg)	7.100
Carga por eje geminado (kg)	12.600
Rueda indicada (in.)	22,5X 8,25
Peso (kg)	63,6
Diámetro libre (mm)	1.054
Profundidad de la escultura (mm)	15,5
Profundidad de resurcaje (mm)	3,0

Fuente: (Michelin, 2017)

2.7. Distribución del esfuerzo durante el frenado.

2.7.1. Cálculo del centro de gravedad de un vehículo

Para el cálculo del centro de gravedad se asume que el centro del eje de coordenadas se encuentra en la ubicación que se muestra en la figura 23. de modo que el eje de las abscisas coincide con el centro de los ejes del vehículo. De acuerdo a la ficha técnica se obtuvo las distancias entre los ejes y las cargas por eje.

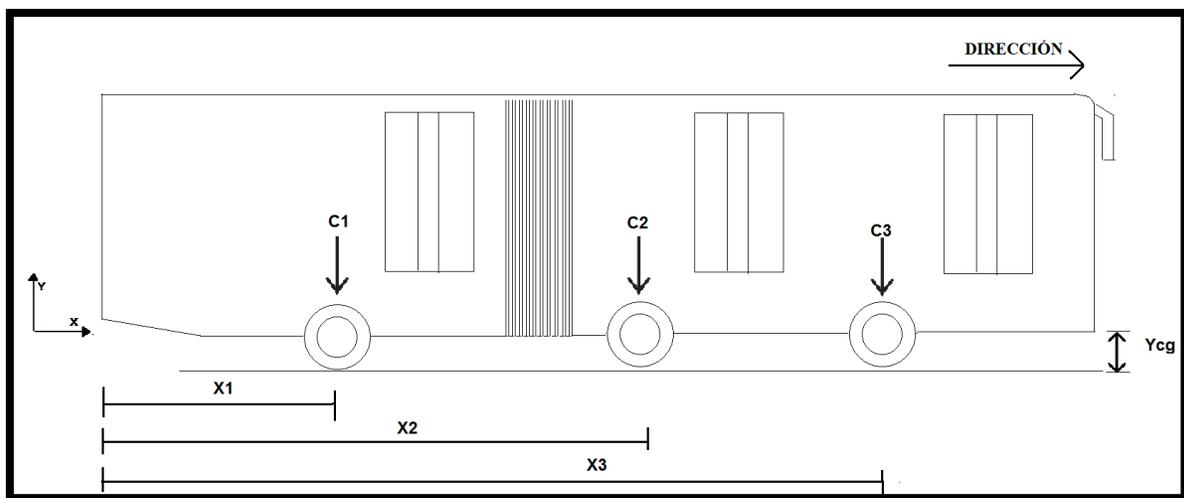


Figura 23. Diagrama para el cálculo del centro de gravedad.

El cálculo del centro de gravedad se realiza las siguientes ecuaciones:

$$X_{cg} = \frac{C1X1 + C2X2 + C3X3}{C1 + C2 + C3}$$

Ecuación 20. Cálculo del centro de gravedad.

Donde:

X_{cg} = es la distancia desde el eje de coordenadas hasta el centro de gravedad.

Y_{cg} = es la distancia desde el centro del eje del vehículo hacia el suelo.

$C1, C2, C3$ = es la carga que soporta cada eje del vehículo.

$X1, X2, X3$ = es la distancia desde el centro del eje del vehículo hasta el centro de coordenadas.

2.7.2. Análisis de carga en un vehículo

Para determinar el esfuerzo que se produce durante el frenado en un sistema dinámico se procede a realizar el análisis de la carga en estado de reposo.

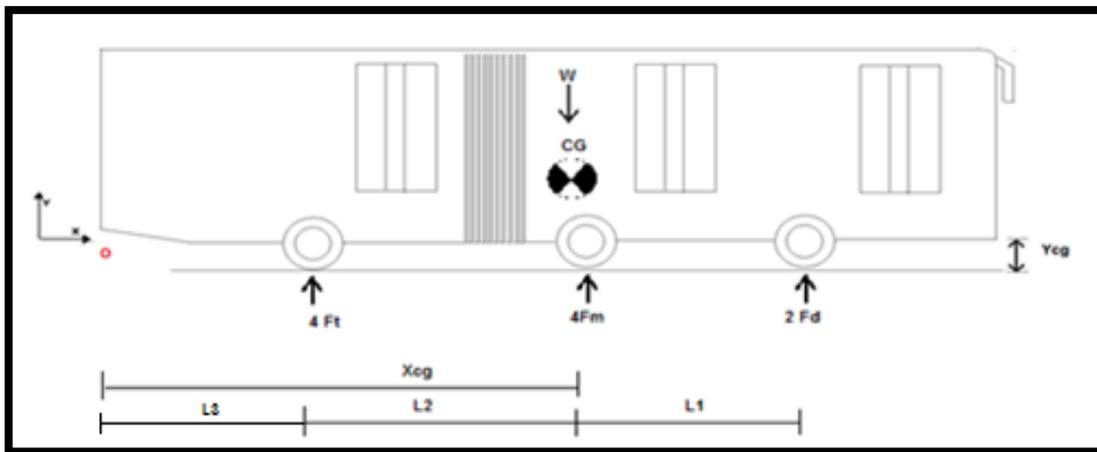


Figura 24. Diagrama de cuerpo libre en condición de reposo.

Aplicando la primera ley de Newton

$$\sum Fy = 0$$

$$4 * Ft + 4 * Fm + 2 * Fd = m * g$$

$$\sum Mo = 0$$

$$4F_t * (L_3) + 4F_m * (L_3 + L_2) + 2F_d * (L_1 + L_2 + L_3) = mg * X_{cg}$$

$$F_t = \frac{W * X_{cg} - 4F_m(L_3 + L_2) - 2F_d * (L_1 + L_2 + L_3)}{4(L_3)}$$

Ecuación 21. Carga total estática del neumático trasero.

$$F_m = \frac{mg - 2F_d - 4F_t}{4}$$

Ecuación 22. Carga total estática del neumático medio.

$$F_d = \frac{mg - 4F_m - 4F_t}{2}$$

Ecuación 23. Carga total estática del neumático delantero.

Donde:

F_d = carga total estática del neumático delantero.

F_m = carga total estática del neumático.

F_t = carga total estática del neumático trasero.

2.7.3. Cinemática de frenado de un vehículo

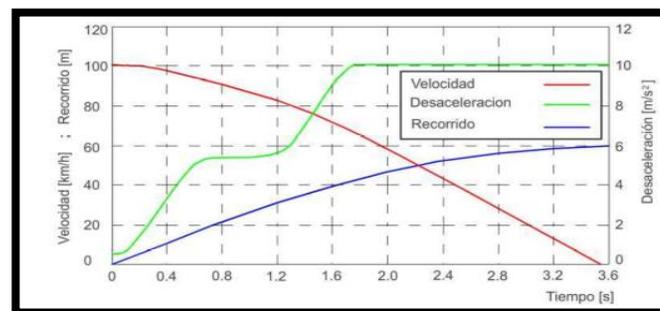


Figura 25. Cinemática de frenado de un vehículo

Fuente: (Venegas W. , 2012)

Como expresa el autor (Venegas W. , 2012): “Las fuerzas aerodinámicas al avance pueden ser tomadas en cuenta principalmente a altas velocidades, ya que a bajas velocidades existe la fuerza de frenado, por lo cual pueden ser despreciables. Durante el proceso de frenado, aparece sobre el centro de gravedad del vehículo una fuerza dirigida hacia adelante que es el resultado de la magnitud de la masa del vehículo multiplicada por la aceleración de frenada.”

2.7.4. Cargas en reposo de un vehículo

Para el cálculo de las fuerzas de frenado que actúan en el bus articulado se procede a realizar un diagrama de cuerpo libre tomando en cuenta la dirección de aceleración y desaceleración y así determinar las fuerzas y los momentos que generan.

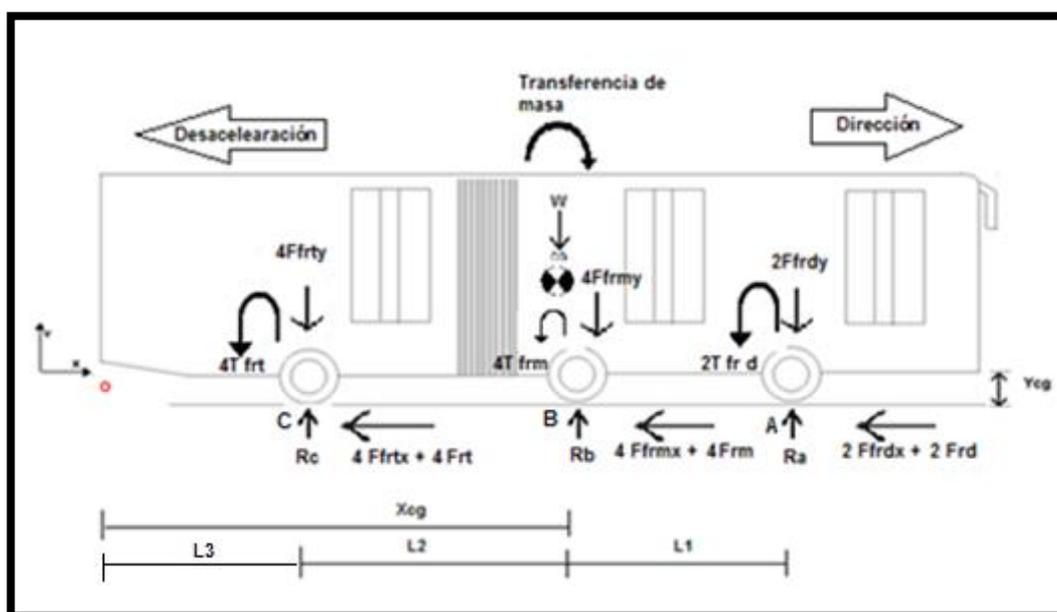


Figura 26. Diagrama de cuerpo libre de las fuerzas de frenado

Condiciones de equilibrio

$$\sum MC = 0$$

$$-Ycg * max - W(Xcg) + Rb(L2) + Ra(L1 + L2) = 0$$

$$Rb = \frac{Ycg * max + W * Xcg + Ra(L1 + L2)}{L2}$$

Ecuación 24. Carga total en el eje medio

Aplicando la primera ley de Newton

$$\sum Fy = 0$$

$$Ra + Rb + Rc = W$$

$$Ra = W - Rb - Rc$$

$$Ra = mg - \frac{Ycg * max + W * Xcg + Ra(L1 + L2)}{L2} - Rc$$

Ecuación 25. Carga total en el eje delantero.

2.8. Ensayos para determinar propiedades mecánicas en las pastillas de freno

2.8.1. Norma NTE INEN-ISO 6311

La normativa (INEN N. , 2009) establece que “el método de ensayo para determinar la resistencia interna al corte mientras se frene bajo condiciones normales, un esfuerzo cortante es generando en el material de fricción de las pastillas de freno de disco.”

A. Objeto

Esta norma tiene por objeto establecer el método de ensayo para determinar la resistencia interna al corte de los materiales de fricción.

B. Símbolos, unidades y definiciones

En la tabla que se presenta se describe los símbolos, unidades y definiciones que ayudan a comprender mejor el alcance que posee la norma 6311.

Tabla 11

Símbolos y unidades del ensayo de resistencia interna al corte.

Descripción	Símbolo	Unidad
Esfuerzo de corte	T	N/mm ²
Fuerza de corte	F	N
Área bajo esfuerzo	A	mm ²

- Esfuerzo interno de corte.

Es la relación de la fuerza de corte al área bajo esfuerzo.

- Fuerza de corte.

Es la fuerza vertical aplicada sobre la pastilla o revestimiento, que causa el rompimiento de la probeta.

2.8.2. Norma NTE INEN-ISO 6310

La normativa (INEN, 2009) establece que “la deformación por compresión de un revestimiento de freno es un parámetro importante de diseño en la evaluación del desplazamiento del volumen del fluido de freno y la propensión a la trepidación o ruido.”

A. Objeto

“Esta norma especifica el método para el ensayo y medición de la deformación por compresión de los revestimientos de freno los cuales son aplicables a los ensambles de pastillas de freno de disco” (INEN N. , 2009).

B. Símbolos, unidades y definiciones

La tabla que se muestra describe los símbolos y una definición de las unidades que se utilizan para llevar a cabo el ensayo de la norma 6310.

Tabla 12

Símbolos y unidades del ensayo de deformación por compresión.

Descripción	Símbolo	Unidad
i	Muestra de ensayo	-
X	Carga de ensayo	-
\bar{d}_i	Espesor promedio de i	μm
n	Numero de muestras del ensayo	-
t_1	Temperatura de ensayo para ensayo de calentamiento	$^{\circ}\text{C}$
t_2	Temperatura más alta de ensayo de calentamiento	$^{\circ}\text{C}$

Fuente: NTE INEN 6310

- Deformación por compresión.

“Relación entre la reducción del espesor del revestimiento de freno, debida a las fuerzas de compresión y temperaturas, para su espesor inicial (medida en la dirección de la fuerza de aplicación perpendicular a la superficie de fricción)” (INEN-ISO, 2009).

CAPÍTULO III

3. MODELADO, SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE FRENOS Y MEDICIONES DEL DESGASTE DE NEUMÁTICOS Y PASTILLAS

3.1. Cálculos del sistema de frenos

3.1.1. Cálculo térmico en disco de freno

Para realizar el cálculo térmico del disco de freno es necesario considerar algunos de los parámetros vistos en el capítulo anterior, para este objetivo es necesario conocer el par de frenado y la velocidad angular como describe la ecuación 6.

Con esta premisa se considera el tamaño del neumático del modelo de bus analizado el cual es: 295/80 R 22.5 mostrado en la tabla 10, por lo tanto, el cálculo el radio del neumático viene dado por:

$$r_n = \left(\frac{Dl}{2} + An * Ran \right)$$

$$r_n = \left(\frac{22,5 \text{ in} * 25,4 \text{ mm}}{2} + 295 * 0,8 \right)$$

$$r_n = 521,75$$

La velocidad angular de la ecuación 6 se calcula por:

$$\omega = 277,8 * \frac{v_x}{r_n}$$

$$\omega = 277,8 * \frac{30}{521,75}$$

$$\omega = 15,97 \text{ rad/s}$$

A continuación, en la tabla 13 se presentan los parámetros iniciales que fueron tomados en las condiciones reales de funcionamiento del sistema de frenos para determinar la temperatura que alcanza el disco en su ciclo normal de funcionamiento, siendo estos datos tomados de la tabla 7 del material para obtener datos específicos del material de fabricación del disco.

Tabla 13
Datos iniciales para el cálculo térmico

Temperatura inicial del disco de freno	20,5 °C
Temperatura ambiente	20,5°C
Masa del disco de freno	58 kg
Área de convección del disco de freno	18447 mm ²
Calor específico del disco de freno	482,5
Coefficiente de convección del disco	4x10-5 W/mm ² °C
Conductividad térmica del disco de freno	45 W/m°C
Distancia de frenado	30m
Tiempo de frenado	6s.
Coefficiente de adherencia	0.85
Fuerza normal	304110 N
Velocidad angular	15.97 rad/s
Velocidad del vehículo	30 Km/h=8.33m/s
Masa del vehículo	31000 Kg

Se realiza el cálculo de la energía disipada durante el frenado, utilizando la ecuación 1.

$$E_f = \frac{k \times m \times (v_i^2 - v_f^2)}{2}$$

$$E_f = \frac{1,25 \times 31000 \times (8.33^2 - 0)}{2}$$

$$E_f = 1344.40 \text{ KJ}$$

El bus tiene una distribución de frenado, relacionada directamente con la capacidad de carga de sus 3 ejes, la cual se muestra en la tabla 14, con lo cual se toma el porcentaje del eje que más peso lleva, que es el posterior y se obtiene la energía disipada en el tercer eje con la siguiente ecuación:

$$E_{posterior} = E_f \times 40.32\%$$

$$E_{posterior} = 1344409.938 \times 40.32\%$$

$$E_{posterior} = 542066.087 \text{ J}$$

Como menciona (Lillo, 2006), en su trabajo, la energía absorbida por la pastilla es de un 10%, mientras que la del disco de freno es de un 90%, para lo cual se procede:

$$E_{disc} = E_{posterior} \times 0,9$$

$$E_{disc} = 542066.08 \times 0.9$$

$$E_{disc} = 487859.478 \text{ J}$$

Ahora el eje posterior cuenta con dos discos de frenos por lo cual la energía absorbida por el disco de frenos está dada por:

$$E = E_{disc}/2$$

$$E = 487859.472 \text{ J}/2$$

$$E = 243929.73 \text{ J}$$

$$E = 243.92 \text{ KJ}$$

Ahora se determina la potencia de fricción, mediante la ecuación 2 de fuerza de rozamiento, posteriormente tomando la ecuación 13, y evaluando los datos obtenidos en la tabla 13

$$F_r = u_b * F_n$$

$$Fr = 0,85 \times 304110$$

$$Fr = 258493,5 \text{ N}$$

$$P_f = \frac{Fr * Df}{n * tf}$$

$$P_f = \frac{258493,5 \times 30}{6}$$

$$P_f = 215411,25 \text{ W}$$

A continuación, se determina el par de rozamiento del disco, tomando la ecuación 12 y posteriormente la ecuación 10, para determinar la temperatura del disco de freno T

$$T_{fr} = P_f * \frac{K}{\omega}$$

$$T_{fr} = \frac{215411,25 * 3}{15,97}$$

$$T_{fr} = 40465,48 \text{ J/rad}$$

$$T = \frac{T_{Fr} * \omega * t_f + m_d * c_d * T_o + h * A_c * T_{amb}}{m_d * c_d + h * A_c}$$

$$T = \frac{40465,48 * 15,97 * 6 + 58 * 482,5 * 20,5 + 4 \times 10^{-5} * 18447 * 20,5}{58 * 482,5 + 4 \times 10^{-5} * 18447}$$

$$T = 159,04^\circ\text{C}$$

3.1.2. Cálculo del centro de gravedad

Para determinar el centro de gravedad se tomó las cargas que soporta cada eje como indica la tabla 5 y el eje de coordenadas como se muestra en la figura 23. Para lo cual se mide el centro del neumático hacia el suelo como se indica en el anexo 4 para

calcular la componente en el eje Y y aplicando la ecuación 20 para establecer la componente en el eje X.

$$X_{cg} = \frac{C1X1 + C2X2 + C3X3}{C1 + C2 + C3}$$

$$X_{cg} = \frac{12500 * 4458 + 11500 * 11213 + 7000 * 16763}{12500 + 11500 + 7000}$$

$$X_{cg} = 9742$$

$$Y_{cg} = 521,75$$

3.1.3. Fuerzas y momentos que actúan durante el frenado

Para el cálculo de las fuerzas y momentos que actúan se determinan mediante las ecuaciones 21, 22 y 23, correspondientes al eje trasero, medio y delantero respectivamente como se lo muestra en la tabla 14, en donde además se detalla el porcentaje de distribución que tiene cada eje según su valor de carga, basados en la tabla 5.

Tabla 14
Valores de cargas y distribución de carga por eje

Disposición de carga en el neumático	Valor (N)	Distribución de carga en los ejes (%)
Carga total en el neumático delantero	68670	22.58
Carga total en el neumático medio	112815	37.10
Carga total en el neumático posterior	122626	40.32
Carga total	304111	100

Fuente: (BYD-Ecuador, 2018)

3.1.4. Dinámica de frenado del vehículo

Se detalla los factores que influyen en la dinámica del frenado la fuerza de fricción que produce la pastilla y el disco, para el análisis esta fuerza debe ser trasladada hacia el radio del neumático este factor se calcula mediante la ecuación 14.

$$r_k = \frac{r_n}{r}$$

$$r_k = \frac{521,75}{130}$$

$$r_k = 4,01$$

El área del pistón que está en contacto con la pastilla es de 2042 mm² que se obtuvo mediante la medición de la huella sobre la pastilla como se muestra en la figura:



Figura 27. Área de contacto de la pastilla de freno con el pistón.

3.1.5. Eficiencia de frenado

Para la eficiencia de frenado se ha procedido a tomar mediciones en la ruta realizada por el bus K11A (Terminal La Ofelia-Marín) en el sentido sur-norte, tomando una superficie plana comprendida entre las paradas “La Y” y “La Florida” (4.6.1). Las

mediciones realizadas son las de tiempo, pendiente de la carretera y velocidad. Además del coeficiente de adherencia entre el neumático y el suelo que se detalla en la Tabla 5 el cual es de 1 para carretera seca y 0,85 para neumáticos usados y nuevos respectivamente a 50 km/h.

Para las medidas de tiempo se toma con la ayuda de un cronómetro desde el momento en el que el conductor pisa el pedal del freno hasta el momento en el que se detiene el vehículo.

Para la medida de la pendiente de la carretera, se realizó mediante el uso de una aplicación celular, en la cual se determina el valor de -12° .

Para la velocidad inicial se tomó el dato mediante observación en el tablero de instrumentos expresados en la tabla 15

A continuación, se detalla la eficiencia de frenado en base a la desaceleración y el tiempo de frenado de acuerdo a las ecuaciones 4 y 5 respectivamente, tomando los coeficientes de adherencia de la tabla 6, a 50 Km/h.

La eficiencia de frenado viene dada por la ecuación

$$\eta = \frac{a_x}{g}$$

Ecuación 26. Eficiencia de frenado

Donde:

a_x = desaceleración

g = gravedad

Tabla 15
Cálculo de la eficiencia de frenado

Coefficiente de adherencia	Desaceleración (m/s²) a_x	Tiempo de frenado (s) t_f	Eficiencia de frenado η
0,85	7,13	1.76	73%
1	8,63	1,46	88%

3.2. Materiales que componen la pastilla de freno

Para determinar en la simulación el material del cual se compone la pastilla de freno dentro del software CAE es necesario conocer los materiales por los que está conformado la pastilla de freno por este motivo se realizó un estudio de Cromatografía, el cual es una técnica denominada Cromatografía de Gases/Masas (GC-MS) que es capaz de separar gases y detectar masas, ya que esta combinación permite realizar el análisis, cuantificación de materiales orgánicos.

El ensayo de cromatografía (Anexo 1) se lo realizó en las instalaciones del laboratorio de Petróleos, Energía y Contaminación de la Universidad Central del Ecuador. Para lo cual se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 16
Componentes de la pastilla de freno

Determinación	Unidad	Método	Resultado
Nonadecatrieno		Método interno	17,76
Benzofenona	% Relativo	Cromatografía de (GC-MS)	82,24

Fuente: Resultados ensayo de cromatografía

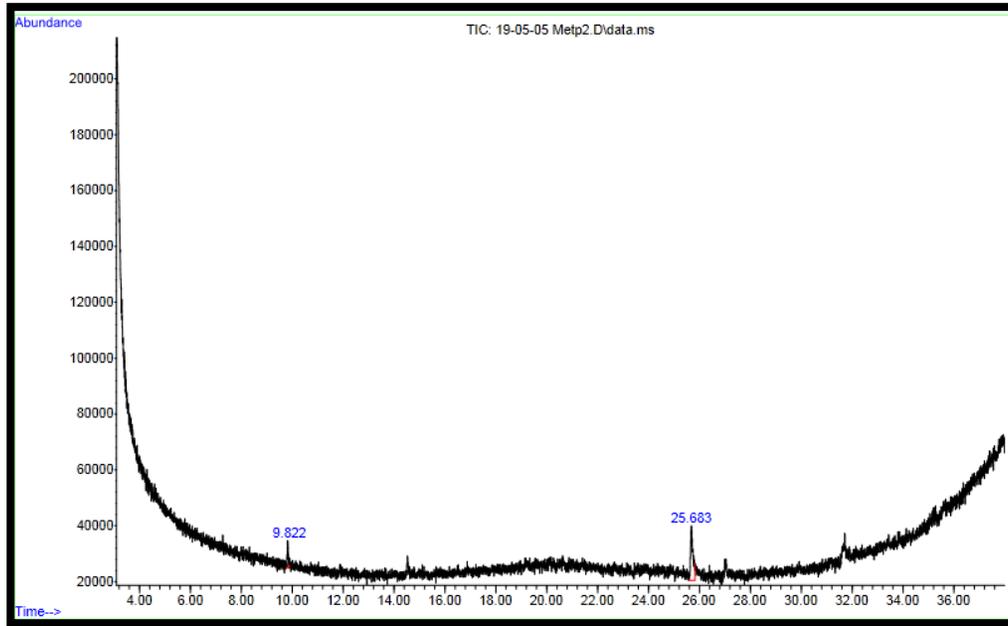


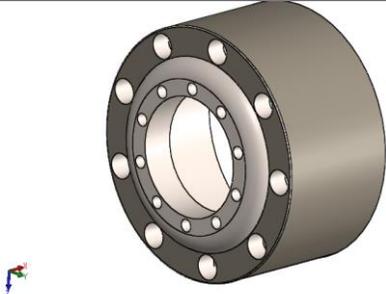
Figura 28. Resultados de la cromatografía aplicada a la pastilla de freno
Fuente: Resultados ensayo cromatografía

3.3. Simulación de los componentes del sistema de freno y neumáticos

3.3.1. Modelado de los componentes del neumático del bus articulado BYD K11A

Para el modelado en el software CAD de los neumáticos del bus articulado BYD K11A se utilizó las medidas y especificaciones técnicas del modelo de neumático MICHELIN X Multi Z, de la tabla 7 en el cual se ingresó las propiedades de los materiales según la ficha técnica del fabricante.

Tabla 17
Componentes del neumático

Componente	Gráfico
Llanta	
Aro	

En el software CAD se considera los parámetros de construcción tales como son las medidas del neumático y el aro, para la óptima simulación y posteriores resultados que sean verídicos.

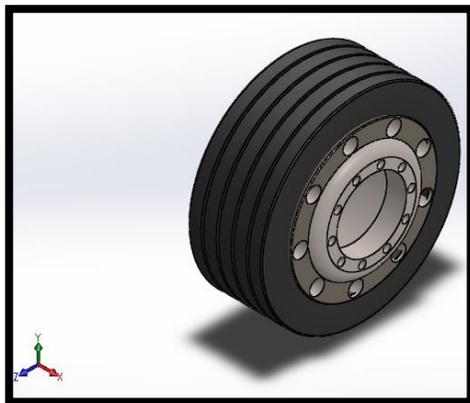


Figura 29. Neumático Michelin X Multi Z

3.3.2. Modelado del sistema de frenos del bus articulado BYD K11A

En el sistema de frenos se realizó la simulación de los componentes principales los cuales son la pastilla y el disco de freno, para la simulación de cada componente se realizó la toma de medidas correspondientes dentro del mismo sistema de frenos en el mantenimiento periódico que se le realiza al mismo.

Tabla 18

Componentes del sistema de frenos

Componente	Gráfico
Pastilla de freno	

CONTINÚA 

Disco de freno

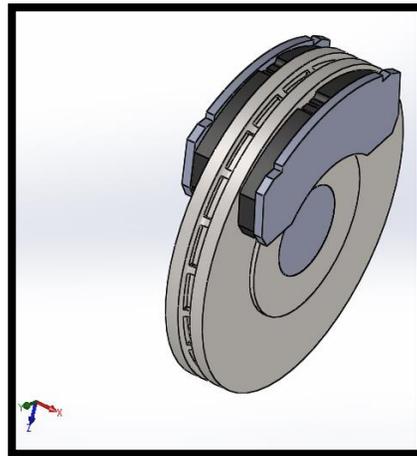
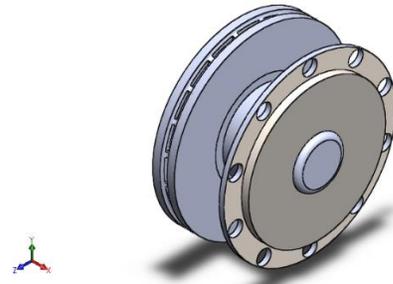


Figura 30. Ensamble del disco con las pastillas de freno

3.4. Simulación de los componentes del sistema de freno y neumáticos

Para la simulación por separado de la pastilla y el disco de freno se utiliza el entorno Transient-Thermal el cual nos permite interactuar con diferentes estados en cuanto a temperatura, radiación, flujo de calor entre otras y así en función del tiempo analizar temperaturas máximas y mínimas así para determinar el comportamiento térmico del ensamble.

La simulación dentro del entorno Transient Structural pueden ser lineales o no lineales, en los ensambles o partes no lineales se permite analizar deformaciones largas, plasticidad y contacto y es esta última función mencionada la que nos permite simular y analizar el contacto entre el disco y la pastilla partiendo del coeficiente de fricción

necesario obtenido de la ficha técnica de las partes del ensamble para poder simular dentro de un entorno en condiciones reales de funcionamiento.

3.4.1. Propiedades de los materiales utilizados en la simulación

Para la simulación del comportamiento térmico y mecánico del par Disco-Pastilla se deben cargar algunas propiedades mecánicas para que la simulación determine resultados reales para lo cual se utilizó los materiales referidos en la tabla 7.

- Propiedades del material para el disco de freno

En la simulación se colocó las propiedades del disco de freno para el material hierro fundido gris, como se muestra en el anexo 6

	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Density	7,3E-06	kg m ⁻³
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
4	Coefficient of Thermal Expansion	1,2E-05	C ⁻¹
5	Reference Temperature	22	C
6	Isotropic Elasticity		
7	Derive from	Young's Modu...	
8	Young's Modulus	1,38E+05	MPa
9	Poisson's Ratio	0,26	
10	Bulk Modulus	9,5833E+10	Pa
11	Shear Modulus	5,4762E+10	Pa
12	Field Variables		
16	Tensile Yield Strength	243,5	MPa
17	Compressive Yield Strength	485	MPa
18	Tensile Ultimate Strength	375	MPa
19	Compressive Ultimate Strength	610	MPa

Figura 31. Propiedades del material del disco de freno

- Propiedades del material para la pastilla de freno

En la simulación se colocó las propiedades de la pastilla para el material aleación de cobre debido al catálogo anexo 2 y con sus propiedades como se muestra en el anexo 3.

Properties of Outline Row 3: Copper Alloy			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Density	3100	kg m ⁻³
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
4	Coefficient of Thermal Expansion	1,8E-05	C ⁻¹
5	Reference Temperature	22	C
6	Isotropic Elasticity		
7	Derive from	Young's Modu...	
8	Young's Modulus	1,1E+11	Pa
9	Poisson's Ratio	0,34	
10	Bulk Modulus	1,1458E+11	Pa
11	Shear Modulus	4,1045E+10	Pa
12	Field Variables		
16	Tensile Yield Strength	2,8E+08	Pa
17	Compressive Yield Strength	2,8E+08	Pa
18	Tensile Ultimate Strength	4,3E+08	Pa
19	Compressive Ultimate Strength	0	Pa

Figura 32. Propiedades del material de la pastilla de freno.

3.4.2. Simulación para análisis térmico del disco de freno.

Para determinar el análisis del disco de freno se lo realiza mediante el un software CAE que determina las temperaturas de trabajo mediante la aplicación del material de composición del disco de freno.

En la simulación se utilizan los parámetros como se muestra en la tabla 19, que son necesarios para las condiciones iniciales en el software CAE, el coeficiente de fricción es tomado de un valor promedio entre los especificados en el anexo 4.

Tabla 19
Parámetros para la simulación de análisis térmico

Parámetro	Valor	Unidad
Temperatura inicial	20.5	°C
Coefficiente de fricción	0,325	-
Temperatura ambiente	20.5	°C
Tipo de mallado	Tetraedro	-
Tiempo de simulación	1	Seg.

Para realizar el análisis térmico en el ensamble Disco-Pastilla es necesario determinar condiciones iniciales para simular las condiciones reales de funcionamiento en las que debe funcionar el sistema de frenos. Como primer paso debemos determinar el mallado en el ensamble para así obtener un mejor análisis de los resultados obtenidos.

Para la selección del mallado se elige la opción tetraedros como se muestra en la figura

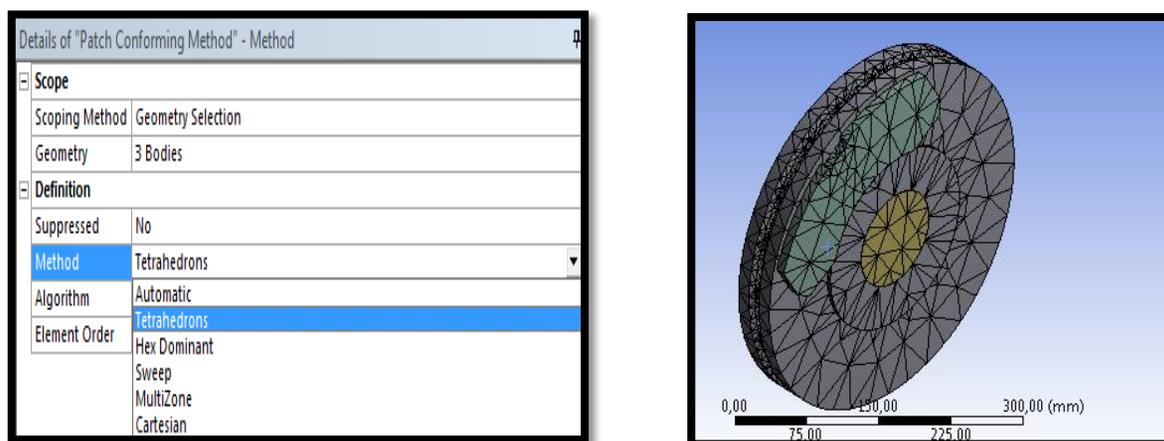
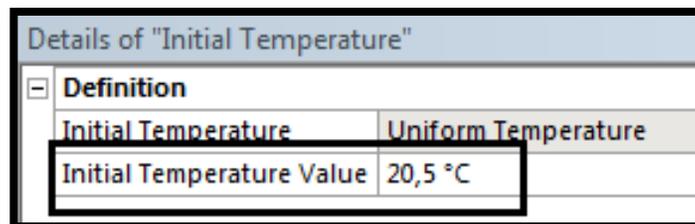


Figura 33. Método de mallado

Se determina la temperatura inicial del trabajo y la temperatura ambiente como se indica la figura 33



Details of "Initial Temperature"	
Definition	
Initial Temperature	Uniform Temperature
Initial Temperature Value	20,5 °C

Figura 34. Valor de temperatura inicial para la simulación

La simulación se realiza en el del ensamble, por lo tanto es necesario determinar la región de contacto así como el coeficiente de fricción por lo que se selecciona en la sección de contactos del software CAE. Como se muestra en la figura 35, para lo cual toma el coeficiente de fricción de la pastilla según el anexo 4

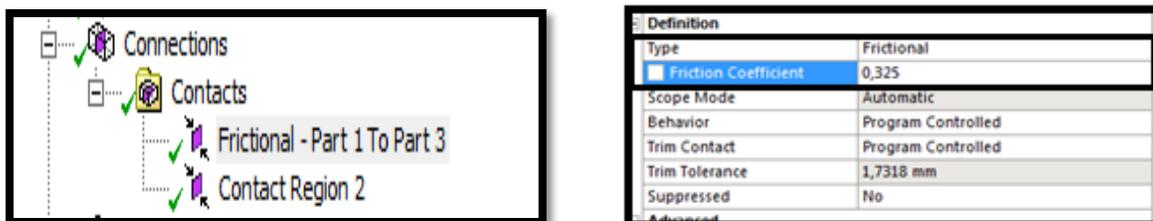


Figura 35. Coeficiente de fricción de la pastilla

A partir de estos datos iniciales se procedió a realizar la simulación ingresando todos los parámetros obtenidos anteriormente, y se determinó la distribución de las temperaturas en cada elemento de la simulación y la distribución de la temperatura sobre toda la geometría.

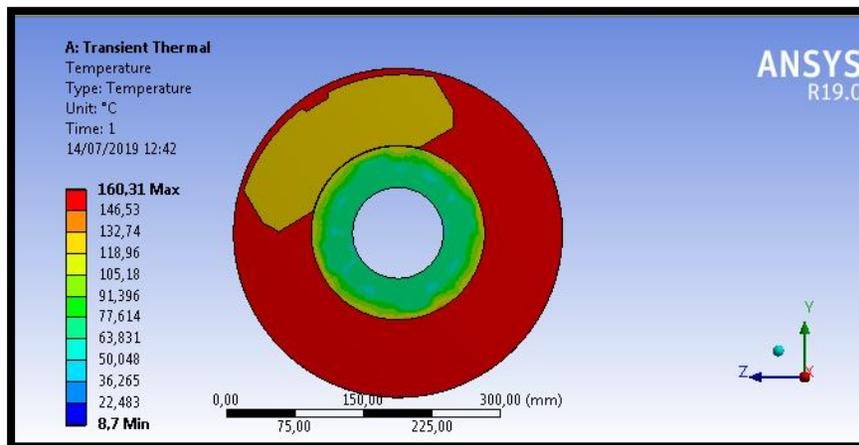


Figura 36. Temperatura obtenida en la simulación

3.4.3. Simulación para el análisis estructural Disco-Pastilla

Se realizó la simulación en un software CAE aplicando la velocidad de rotación al momento del frenado así la fuerza que aplica el pistón neumático para el desplazamiento de la mordaza que causa que la pastilla tome el contacto con el disco como para determinar factores como la deformación total, la temperatura que causa la fricción entre los dos cuerpos.

Tabla 20

Parámetros para la simulación de análisis estructural

Parámetro	Valor	Unidad
Coeficiente de fricción	0,325	-
Velocidad angular	15.97	Rad/s
Temperatura ambiente	20.5	°C
Tipo de mallado	Por defecto	
Tiempo de simulación	1	Seg.
Presión aplicada	3	MPa

Como primer paso se debe obtener un mallado el cual está definido por el análisis mediante elementos finitos es así que depende el mallado para poder obtener un resultado favorable en la simulación.

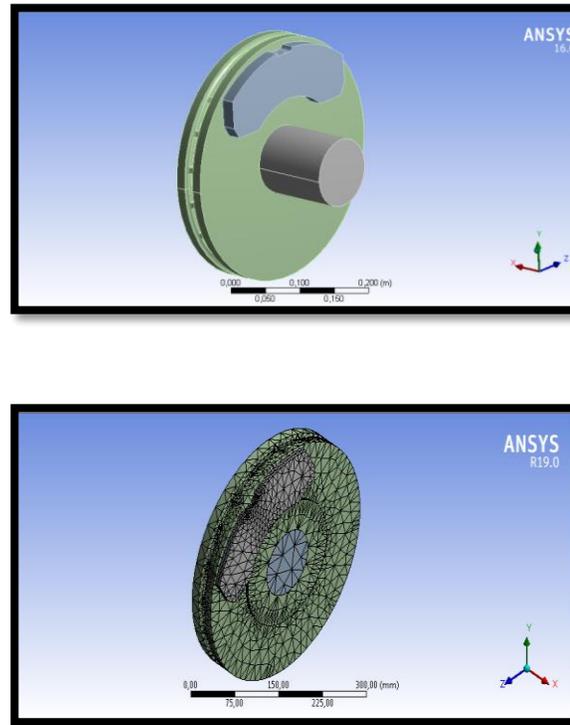


Figura 37. Ensamble y mallado para el análisis estructural Disco-Pastilla.

Se determinan los elementos de fricción Disco-Pastilla y el coeficiente de fricción de la pastilla obtenida de los manuales del fabricante de acuerdo al anexo 4

Details of "Frictional - Part 1 To Part 3"	
Target Bodies	Part 3
Protected	No
Definition	
Type	Frictional
<input type="checkbox"/> Friction Coefficient	0,325
Scope Mode	Automatic
Behavior	Asymmetric
Trim Contact	On
Trim Tolerance	0, mm
Suppressed	No
Advanced	

Figura 38. Coeficiente de fricción para simulación

Se delimitan las zonas de contacto las cuales son analizadas en el par Disco Pastilla para obtener los resultados en la zona de contacto

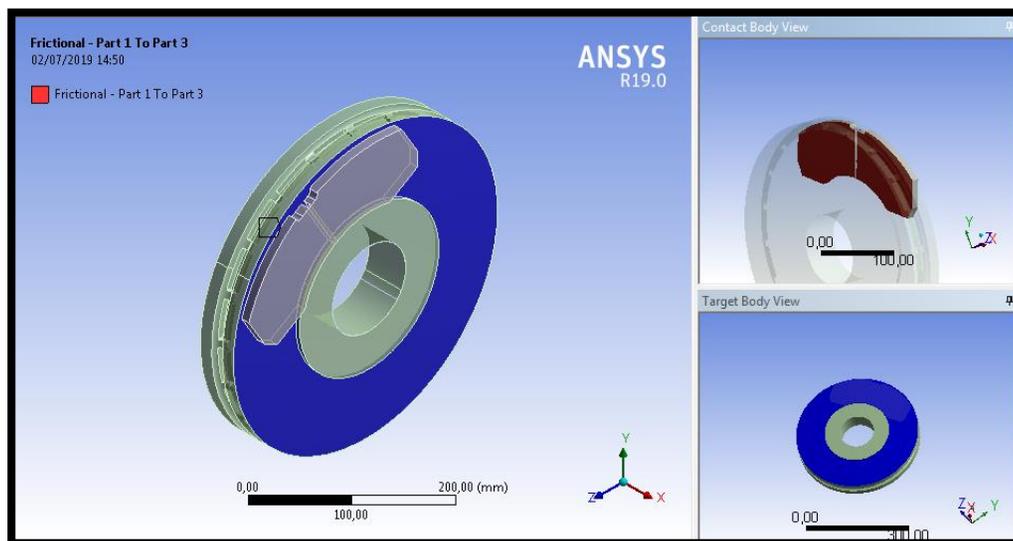


Figura 39. Determinación de las caras de fricción

Se define la velocidad de rotación que se calculó previamente de acuerdo a las dimensiones del disco y la velocidad con la que opera el bus articulado de acuerdo con el sentido de giro definido por la geometría de referencia del ensamble.

Los componentes que se determinan en la simulación de fricción que van a realizar el giro mediante el cual podemos analizar el eje de referencia que se encuentra en la mitad del disco se le coloca un soporte fijado para que el disco pueda realizar el giro en condiciones normales de funcionamiento.

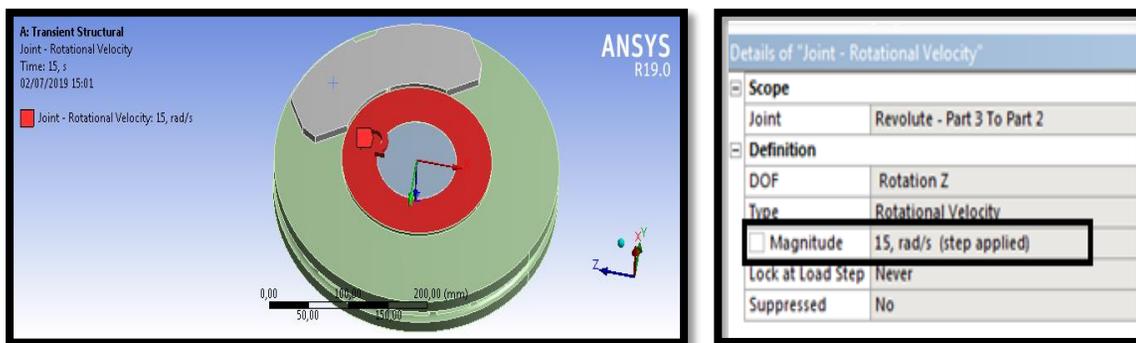


Figura 40. Determinación de la velocidad de rotación para la simulación.

3.4.4. Resultados de la simulación

A través de la simulación realizada con los componentes del sistema de frenos se cargó al sistema de simulación las condiciones y materiales usados para la fabricación de estos componentes, donde se obtuvieron los siguientes resultados:

- **Presión y distancia de deslizamiento de la pastilla de freno**

En este resultado se muestran las zonas donde se ejerce la mayor presión y por lo tanto el área de la pastilla donde sufre el mayor rozamiento ejercida por la presión del pistón al momento de ejercer el frenado.

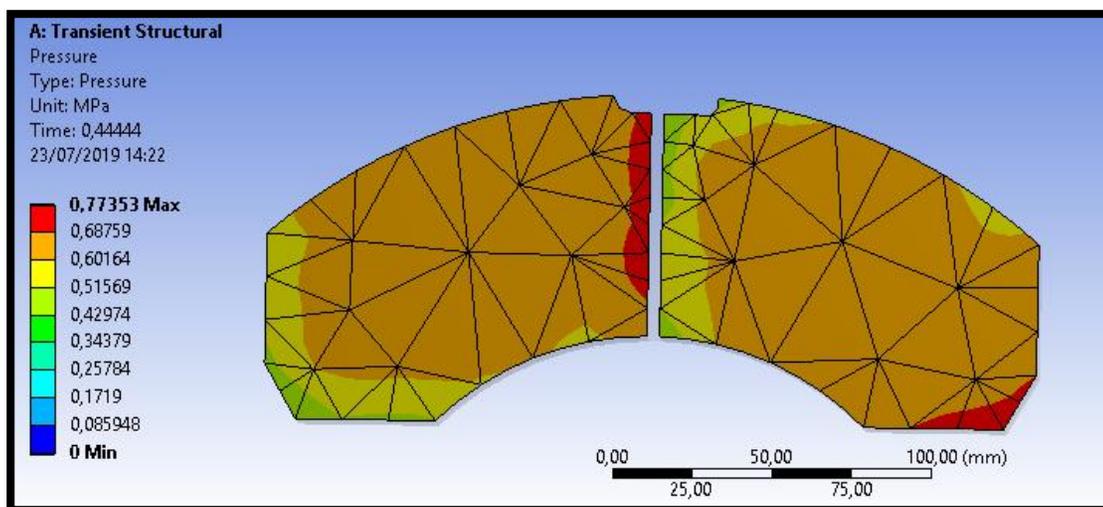


Figura 41. Presión en la pastilla de freno

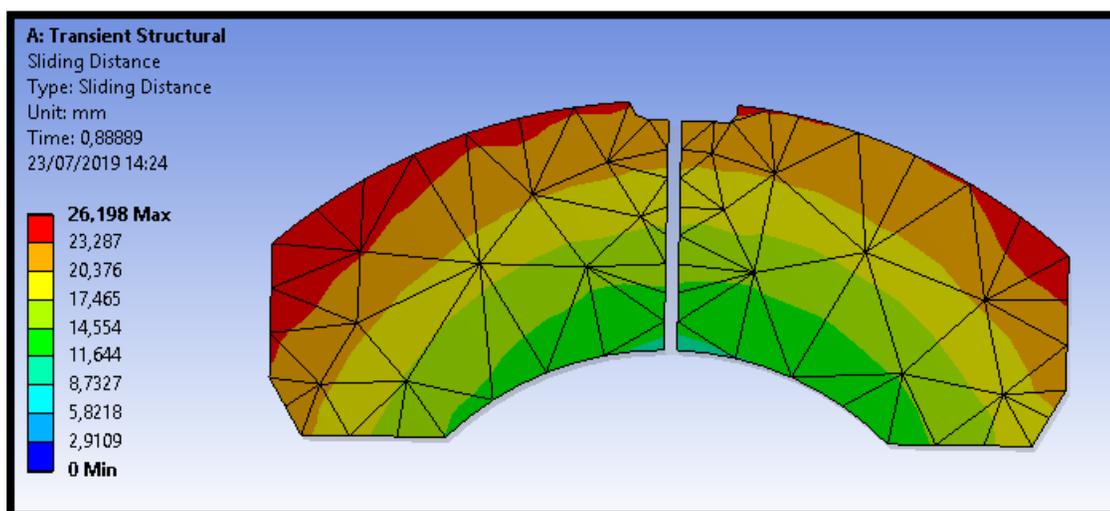


Figura 42. Presión y deslizamiento de la pastilla de freno

3.5. Medición de desgaste de neumáticos

Para realizar la medición de desgaste de los neumáticos del bus articulado BYD K11A se realizaron dos tipos de mediciones, la primera se la realizo con el bus cargado al total

de su capacidad con peso simulado y la segunda medición se la realizó en operaciones normales con pasajeros en el Corredor Central Norte.

- **Medición de desgaste de neumáticos con carga total simulada**

Para esta medición periódica se la realizó con un peso simulado de 70 Kg para cada costal de arena, tomando en cuenta que los neumáticos fueron rotados de la siguiente manera:

a) Forma inicial de los neumáticos

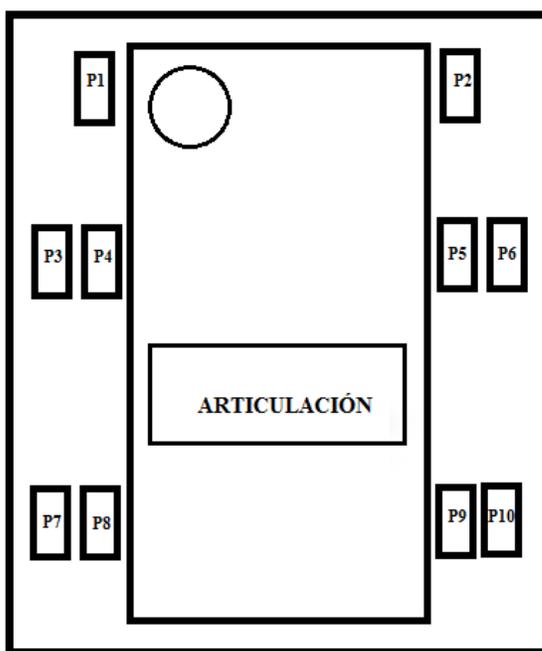


Figura 43. Disposición (a) neumáticos del bus K11A

A continuación, en la tabla 21 se presentan las mediciones periódicas que se realizaron con la disposición (a) y con la carga simulada, el porcentaje de conservación y de desgaste están expresados en las ecuaciones 18 y 19.

Tabla 21.
Medición en la disposición (a)

Mediciones de desgaste				
Fecha	25/08/2018	Marca de neumático	Michelin	
Kilometraje	12920	Medida de neumático	295/80 R 22,5	
MEDIDAS				
Posición	Profundidad de la escultura	Presión (PSI)	Porcentaje de conservación (%)	Porcentaje de desgaste (%)
P1	13,67	106	88,19	11,81
P2	13,67	120	88,19	11,81
P3	13,83	122	89,23	10,77
P4	13,83	118	89,23	10,77
P5	14,83	120	95,68	4,32
P6	14,83	120	95,68	4,32
P7	8,67	120	55,94	44,06
P8	8,33	115	53,74	46,26
P9	8,50	120	54,84	45,16
P10	9,17	120	59,16	40,84
P11(emergencia)	15,5	120	100	0

b) Forma de disposición después de la rotación y mantenimiento



Figura 44. Disposición (b) neumáticos del bus K11A

El bus entró a mantenimiento, en el cual se llevó a cabo una rotación de los neumáticos de la disposición (a) a la disposición (b), y ahora la carga simulada pasa a ser una carga viva y se tomaron distintas mediciones a distintos kilometrajes como lo expresan las tablas 22, 23 y 24 a continuación.

Tabla 22.*Primera medición desgaste de neumáticos en la disposición (b)*

Mediciones de desgaste				
Fecha	19/02/2019	Marca de neumático	Michelin	
Kilometraje	17922	Medida de neumático	295/80 R 22,5	
Medidas				
Posición	Profundidad de la escultura	Presión (PSI)	Porcentaje de conservación (%)	Porcentaje de desgaste (%)
P1	13,32	104	85,9	14,06
P2	13,37	107	86,3	13,74
P3	12,7	108	81,9	58,90
P4	13,01	105	83,9	53,48
P5	13,14	106	84,8	53,29
P6	12,93	104	83,4	51,48
P7	6,37	102	41,1	18,06
P8	7,21	108	46,5	16,06
P9	7,24	102	46,7	15,23
P10	7,52	100	48,5	16,58
Observación	El articulado se encuentra cargado a su máxima capacidad (11.4 ton.)			

Tabla 23.
Segunda medición desgaste de neumáticos en la disposición (b)

Mediciones de desgaste				
Fecha	23/04/2019	Marca de neumático	Michelin	
Kilometraje	18886	Medida de neumático	295/80 R 22,5	
Medidas				
Posición	Profundidad de la escultura	Presión (PSI)	Porcentaje de conservación (%)	Porcentaje de desgaste (%)
P1	13,22	106	85,3	14,7
P2	13,39	105	86,4	13,6
P3	12,70	107	82,0	18,0
P4	12,58	107	81,1	18,9
P5	12,78	108	82,5	17,5
P6	12,63	107	81,5	18,5
P7	6,30	103	40,7	59,3
P8	7,16	107	46,2	53,8
P9	7,22	105	46,6	53,4
P10	7,44	102	48,0	52,0
Observación	El articulado se encuentra vacío y en mantenimiento			

Tabla 24.
Tercera medición desgaste de neumáticos en la posición (b)

Mediciones de desgaste				
Fecha	29/05/2019	Marca de neumático	Michelin	
Kilometraje	23690	Medida de neumático	295/80 R 22,5	
Medidas				
Posición	Profundidad de la escultura	Presión (PSI)	Porcentaje de conservación (%)	Porcentaje de desgaste (%)
P1	12,31	106	79,42	20,58
P2	12,76	105	82,32	17,68
P3	11,46	103	73,94	26,06
P4	11,89	107	76,71	23,29
P5	12,09	105	78,00	22,00
P6	11,73	102	40,06	59,94
P7	6,21	107	45,74	54,26
P8	7,09	107	45,68	54,32
P9	7,08	108	47,68	52,32
P10	7,39	107	79,42	20,58
Observación	El articulado se encuentra en circulación en la ruta La Ofelia-Marín			

3.6. Medición de desgaste de pastillas

Para la medición del desgaste, se las realizó en las pastillas de freno que fueron reemplazadas en el mantenimiento realizado a los 18886 Km, cabe recalcar que estas fueron cambiadas debido a que se encontraban bastante desgastadas debido a que se estaban realizando pruebas de funcionamiento del bus en condiciones que favorecían el prematuro deterioro. Para la denominación de las posiciones de las pastillas se toma en cuenta que P1 y P2 corresponden a las pastillas frontales del lado izquierdo y derecho

respectivamente (izquierdo lado del conductor), P3 y P4 son las del medio de izquierda a derecha y P5 con P6 son las posteriores de la misma manera.

Posteriormente también se procedió a medir las pastillas nuevas, teniendo los resultados que se muestran a continuación:

Tabla 25.
Mediciones de las pastillas de freno

Mediciones de las pastillas de freno		
Posición	Medidas pastillas reemplazadas (mm)	Medidas pastillas nuevas (mm)
P1	25,85	
P2	25,65	
P3	12,45	
P4	12,5	30
P5	10,7	
P6	10,85	

CAPÍTULO IV

4. PROTOCOLOS DE PRUEBAS Y ENSAYOS

4.1. Introducción

En este capítulo se describe equipos, materiales y procedimientos aplicados para realizar el análisis del desgaste de los neumáticos y pastillas de freno del bus BYD K11A, para el ensayo de deformación por compresión y su resistencia interna al corte.

En cuanto a los ensayos para medir el desgaste de los neumáticos se los realizó utilizando un medidor digital de profundidades, tomando en cuenta medidas periódicas, además de la utilización de un medidor de presión y termómetro infrarrojo para medición de temperaturas en las distintas condiciones del vehículo.

Los ensayos de deformación y compresión se realizaron en una máquina universal de ensayos, para el ensayo en caliente se utilizó una placa de calentamiento, mediante una resistencia eléctrica que transmitía su calor a la placa, midiéndose el espesor en determinados puntos del ensayo.

4.2. Equipos

4.2.1. Medidor digital de profundidad de banda de rodadura

(Puiggrós, 2016) menciona que “Es un dispositivo cuya función es medir profundidades, gracias al despliegue de una varilla dirigida hacia el interior del canal de la banda de rodadura del neumático. Existen dos diferentes tipos los cuales son: analógicos y digitales, en los primeros se toma la lectura de la profundidad observando un reloj o regla milimetrada, mientras que en los digitales solo hay que realizar la medición

y leer el valor obtenido en la pantalla del profundímetro, pudiendo llegar a obtener valores en décimas, centésimas y milésimas de precisión, además de la posibilidad de elegir la unidad de medida” (p 10).

Este medidor de profundidad de la banda de rodadura se lo empleó para el registro del desgaste periódico de la banda de rodadura en operación normal de pasajeros en el bus articulado BYD K11A.

Tabla 26.

Características del medidor de profundidad de la banda de rodadura

Especificación	Valor
Resolución	0,01 mm (0,0005")
Rango	0-25 mm (0-1")
Precisión	±0,02 mm (±0,001")
Funciones	Botón de cero, selección de unidades (mm, in), prendido y apagado
Tipo de batería	SR44(1,5 V)
Temperatura de operación	0- +40°

Fuente: (Impormel, 2019)

- Partes del medidor de profundidad



Figura 45. Partes del medidor de profundidad
Fuente: (Mitutoyo, 2011)

Tabla 27.
Partes del medidor de profundidad

Número	Parte
1	Unidades: milímetros/ pulgadas
2	Conexión RS-232
3	Botón Encendido/Apagado
4	Botón encendedor
5	Recubrimiento de batería

Fuente: (Mitutoyo, 2011)

4.2.2. Termómetro infrarrojo láser

El termómetro láser infrarrojo se lo utilizó para medir la temperatura de la plancha de calentamiento que se emplea en el calentamiento de la muestra de la pastilla de freno según la normativa NTE INEN ISO 6311 la cual es de 400°C que es la temperatura de operación, prueba de laboratorio de análisis de deformación por compresión.

Este dispositivo se usa para evaluar la temperatura sin necesidad de contacto, mediante una luz infrarroja al contacto de un disparador. El láser incorporado aumenta la precisión al objetivo y cuenta también con una pantalla LCD retro iluminada donde se muestran los valores de temperatura en diferentes escalas que son a elección del operador, este medidor se encuentra calibrado para medir a una distancia máxima de 1500 mm.

Tabla 28.
Características del termómetro infrarrojo laser

Especificación	Valor
Rango de medición	-20 ~ 450 °C / (-4 °F ~ 662 °F)
Emisividad	0.95
Campo de visión	12: 1
Precisión	-20 ~ 50 °C ± 2,5 °C, 51 ~ 350 °C
Potencia del láser	<1 mW

Fuente: (Instruments, 2015)

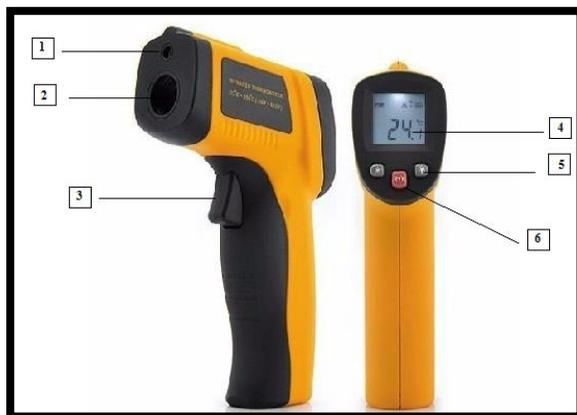


Figura 46. Termómetro láser
Fuente: (Instruments, 2015)

Tabla 29

Partes del termómetro laser infrarrojo

Número	Parte
1	Haz del puntero láser
2	Sensor IR
3	Gatillo de medida
4	Pantalla LCD
5	Botones de luz de fondo
6	Interruptor de unidades de temperatura (°C/°F)

Fuente: (Instruments, 2015)

4.2.3. Manómetro de presión de neumáticos

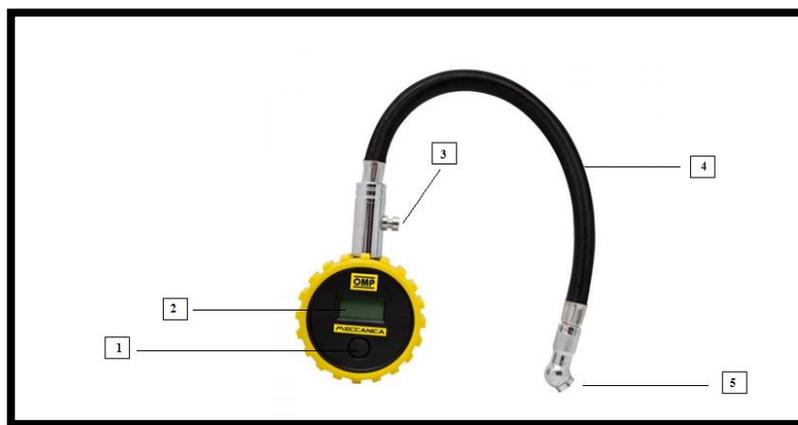
Es un instrumento de precisión que permite comprobar de una forma eficaz y segura la presión de inflado de los neumáticos del vehículo.

Este instrumento fue utilizado para determinar y verificar los valores adecuados de presión de los neumáticos dentro de los que recomienda el fabricante para una vida útil apropiada.

Tabla 30**Características del manómetro digital de presión de neumáticos**

Características del manómetro digital de presión de neumáticos	Despliega tres unidades de medición: PSI, BAR y KPA.
	Cuenta con una pantalla LCD para mejor lectura de las mediciones
	Posee un rango operativo de: 3-150 PSI
	Encendido y Apagado automático al detectar presión de aire

Fuente: (OMP, 2019)

**Figura 47. Manómetro**

Fuente: (OMP, 2019)

Tabla 31**Partes del manómetro**

Número	Parte
1	Botón ON/OFF, unidades de medición
2	Pantalla LCD
3	Válvula de alivio de presión
4	Tubería flexible
5	Acople de boquilla de neumático

Fuente: (OMP, 2019)

4.2.4. Máquina de compresión

Similar a una prensa, el equipo pertenece a la Universidad de las Fuerzas Armadas Espe (Sangolquí), marca Alfred J. Amsler y Cia. Schaffhouse/Suiza y está ubicada en el laboratorio de Resistencia de Materiales del Departamento de Energía y Mecánica.

Consta de los siguientes elementos:

- Tablero de control
- Carátula de agujas (medidas)
- Mecanismo de apertura y cierre manual
- Émbolo
- Pisón
- Motor



Figura 48. Máquina de compresión y controles

La máquina universal es utilizada para materiales que necesitan mayor fuerza de compresión, como en nuestro caso, en donde se necesita una fuerza máxima de aproximadamente 15.5 toneladas.

4.2.5. Máquina universal de ensayos

El equipo pertenece a la Universidad de las Fuerzas Armadas Espe (Sangolquí), marca Amstler y está ubicada en el laboratorio de Resistencia de Materiales del Departamento de Energía y Mecánica. Consta de los siguientes elementos:

- Tablero de control
- Carátula de agujas (medidas)
- Doble émbolo para compresión
- Doble émbolo para tensión
- Mordazas
- Motor

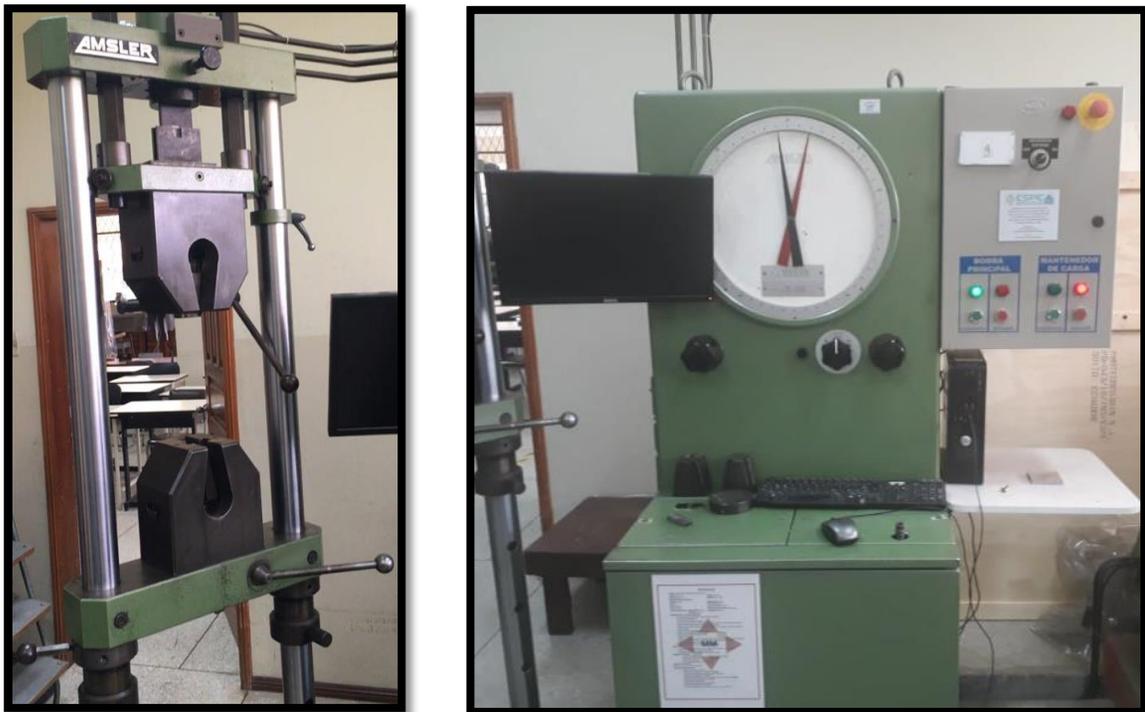


Figura 49. Máquina universal de ensayos

La máquina universal es utilizada para la compresión y tensión de materiales, con un rango de hasta 1 tonelada, rango suficiente para llevar a cabo el ensayo de resistencia interna al corte.

4.2.6. Placa de calentamiento

Para el ensayo de calentamiento es necesario contar con una placa de calentamiento, para este propósito se construyó una placa de calentamiento que alcanza los 400°C. Mediante una resistencia eléctrica y un regulador de temperatura. Se utilizaron dos platinas de 10 mm con 4 ejes de acero de transmisión soldados a las platinas como base.



Figura 50. Placa de calentamiento

4.2.7. Accesorios para prueba de resistencia interna al corte

Los accesorios con los que se realizó los ensayos se los fabricó de acuerdo a las dimensiones de las probetas obtenidas a partir de la pastilla de freno, constan de dos placas de acero de igual medida (7cm de alto x 10cm de ancho x 6mm de espesor) con un corte en el centro destinado para colocar la probeta, soldadas perpendicularmente a

una placa base de 1cm de espesor, además de una placa cortante de las mismas magnitudes que las dos anteriores.



Figura 51. Accesorios ensayo resistencia al corte

4.3. Ensayo de deformación por compresión en pastilla de freno.

Para el ensayo de la deformación por compresión para pastillas de freno se realizó en base a la normativa NTE INEN – ISO 6310:2009, la cual indica que es un método de ensayo para los ensambles de pastilla de freno de disco y zapatas de freno con tambor, dicho estudio analiza el comportamiento y relación entre la disminución del espesor de revestimiento de freno debido a las fuerzas de compresión y a las temperaturas en comparación con su espesor inicial, la cual es medida en la dirección de fuerza de aplicación y perpendicular a la superficie de fricción.

Para el ensayo se aplicó el procedimiento A, expresado en la norma el cual es aplicar una fuerza para dar una presión por unidad de área.

4.3.1. Muestra

El tipo de muestra que se utilizó para el ensayo es el descrito en la norma como la muestra Tipo II que se trata de la pastilla de freno sin placa de respaldo sobre la placa de calentamiento, la cual se presenta en la figura.

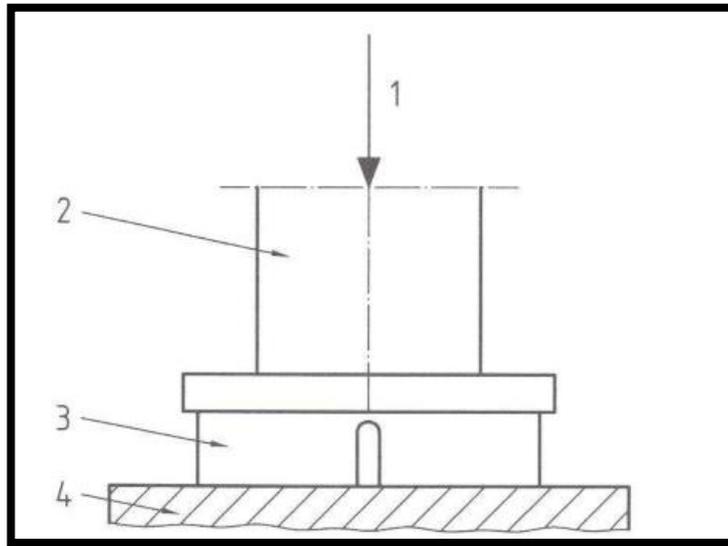


Figura 52. Muestra Tipo II
Fuente: Norma NTE INEN – ISO 6310:2009.

- Simbología
- 1. Carga
- 2. Pisón.
- 3. Muestra de ensayo.
- 4. Placa de calentamiento.

4.3.2. Ciclo de ensayo

Para el ensayo se debe medir con un micrómetro en cinco puntos diferentes para la muestra de pastilla con ranura como muestra la figura.

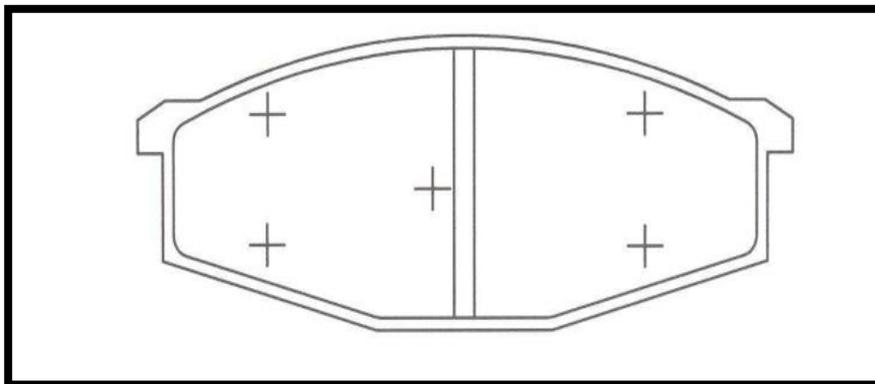


Figura 53. Puntos de medición de la muestra
Fuente: Norma NTE INEN – ISO 6310:2009

4.3.3. Ensayo a temperatura ambiente

Este ensayo debe realizarse a temperatura ambiente del laboratorio ($25^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$), después se realizó los tres ciclos de carga y descarga correspondientes comenzando con una precarga de 0,5 MPa manteniéndola esta por 1 segundo y luego aumentando a la presión máxima (8 MPa).



Figura 54. Ensayo a temperatura ambiente

Posteriormente se toma lecturas de deflexión mientras se mantiene la precarga y se toma lectura del desplazamiento con la carga máxima en el primer y tercer ciclo.

4.3.4. Ensayo de calentamiento

En el ensayo se debe calentar la placa a $400^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ para después colocar la muestra en la placa y mantener esta por 10 minutos para asegurar un buen contacto térmico al igual que en el ensayo de temperatura ambiente se debe realizar dos ciclos comenzando con una precarga de 0,5 MPa manteniéndola esta por 1 segundo y luego aumentando a la presión máxima (8 MPa).



Figura 55. Ensayo de calentamiento

Los datos se toman como se indica en la figura:

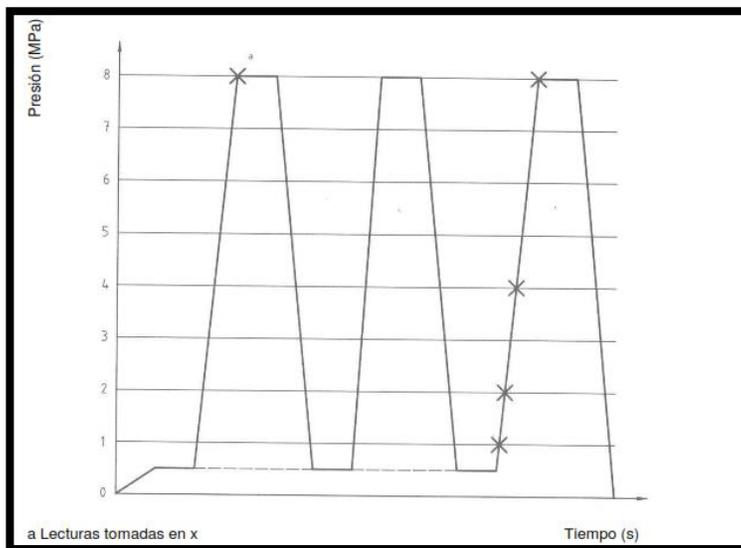


Figura 56. Lecturas tomadas en X
Fuente: Norma NTE INEN – ISO 6310:2009

4.3.5. Resultados

Tabla 32

Valores muestra 1 a temperatura ambiente

MUESTRA 1		
Valor promedio del espesor \bar{d}_i	30.824 mm	
Número de ciclos	3	
Tamaño de la muestra (área)	18447 mm ²	
Temperatura del ensayo	20.5°C	
Presión (MPa)	Espesor (mm)	Diferencia respecto al promedio (mm)
8	30.725	0.099
1	30.732	0.092
2	30.731	0.093
4	30.729	0.095
8	30.724	0.100

Tabla 33
Valores muestra 1 a temperatura de calentamiento

MUESTRA 1		
Valor promedio del espesor \bar{d}_i	30.824 mm	
Número de ciclos	3	
Tamaño de la muestra (área)	18447 mm ²	
Temperatura del ensayo	390°C	
Presión (MPa)	Espesor (mm)	Diferencia respecto al promedio (mm)
8	30.724	0.100
1	30.721	0.103
2	30.712	0.112
4	30.699	0.125
8	30.688	0.136

Tabla 34
Valores muestra 2 a temperatura ambiente

MUESTRA 2		
Valor promedio del espesor \bar{d}_i	30.892 mm	
Número de ciclos	3	
Tamaño de la muestra (área)	18447 mm ²	
Temperatura del ensayo	20.7°C	
Presión (MPa)	Espesor (mm)	Diferencia respecto al promedio (mm)
8	30.795	0.097
1	30.801	0.091
2	30.799	0.093
4	30.798	0.094
8	30.787	0.105

Tabla 35
Valores muestra 2 a temperatura de calentamiento

MUESTRA 2		
Valor promedio del espesor \bar{d}_i	30.892 mm	
Número de ciclos	3	
Tamaño de la muestra (área)	18447 mm ²	
Temperatura del ensayo	395°C	
Presión (MPa)	Espesor (mm)	Diferencia respecto al promedio (mm)
8	30.787	0.105
1	30.791	0.101
2	30.789	0.103
4	30.767	0.125
8	30.756	0.136

4.4. Ensayo de resistencia interna al corte

Este ensayo tiene como objeto determinar la resistencia interna al corte de los materiales de fricción para pastillas de freno que se la realiza en base a la normativa NTE INEN – ISO 6311:2009. Este ensayo se la realiza en relación a la fuerza cortante al área bajo esfuerzo, así como la fuerza vertical que se aplica sobre la pastilla, la cual es la causante del rompimiento de la probeta.

4.4.1. Muestra

Se deben realizar 5 muestras como mínimo y esta muestra será escogida para la prueba en un plano paralelo al plano o superficie de esfuerzo en condiciones normales de servicio. Las probetas deben ser planas y deben cumplir con las siguientes dimensiones.

Tabla 36*Dimensiones de las probetas NTE INEN-ISO 6311.*

Largo	20 mm \pm 0,1 mm
Ancho	20 mm \pm 0,1 mm
Espesor	5 mm \pm 0,1 ó 10 mm \pm 0,1 mm

Fuente: Norma NTE INEN – ISO 6311:2009

De acuerdo a las medidas indicadas en la norma se procedió a cortarlas y calcular su área de la sección transversal del eje paralelo al área de esfuerzo.

**Figura 57.** Probetas para el ensayo de resistencia interna al corte.**4.4.2. Cálculo del área de la sección transversal**

Esta área se calculó de acuerdo a las mediciones realizadas con un calibrador de precisión 0,05 mm en la sección transversal paralelo al eje de trabajo.

Tabla 37*Dimensiones de las probetas para el ensayo.*

Número de probeta	Largo (mm) x Ancho (mm)	Área transversal (mm ²)
1	20,10 x 20,10	404.01
2	20,10 x 20,05	403.005
3	19.90 x 20.10	399.99
4	20.05 x 19,90	398.995
5	19.95 x 20,15	401,993

4.4.3. Procedimiento

“En este ensayo la carga debe aplicarse sin golpes y la tasa de incremento debe ser la tasa instantánea dentro de los límites de $4500 \text{ N/s} \pm 2500 \text{ N/s}$ cuando la fuerza cortante sea mayor a los 5000 N.

Para el ensayo se debe colocar en el dispositivo y aplicar progresivamente la carga en dirección paralela a la dirección de esfuerzo en condiciones normales de servicio” (INEN N. , 2009).



Figura 58. Ensayo de resistencia interna al corte

4.4.4. Resultados

Tabla 38

Resultado prueba de resistencia interna

Parámetro	Área sección transversal (mm^2)	Carga máxima aplicada (N)	Fuerza interna de corte (N/mm^2)
Muestra 1	404.01	3865.14	9.567
Muestra 2	403.005	3776.85	9.372
Muestra 3	399.99	3001.86	7.505
Muestra 4	398.995	2943	7.376
Muestra 5	401.993	3384.45	8.419

4.5. Medición de desgaste

4.5.1. Determinación de la ruta de prueba

El bus articulado BYD K11A al momento de las mediciones se encuentra operando dentro del Corredor Central Norte en el circuito C2 el cual está comprendido entre la terminal de transferencia “La Ofelia” y la estación “Playón de la Marín que se encuentran con las etiquetas A y B respectivamente en la figura 59. La ruta está formada por las siguientes paradas y distancia como se muestra en la figura.

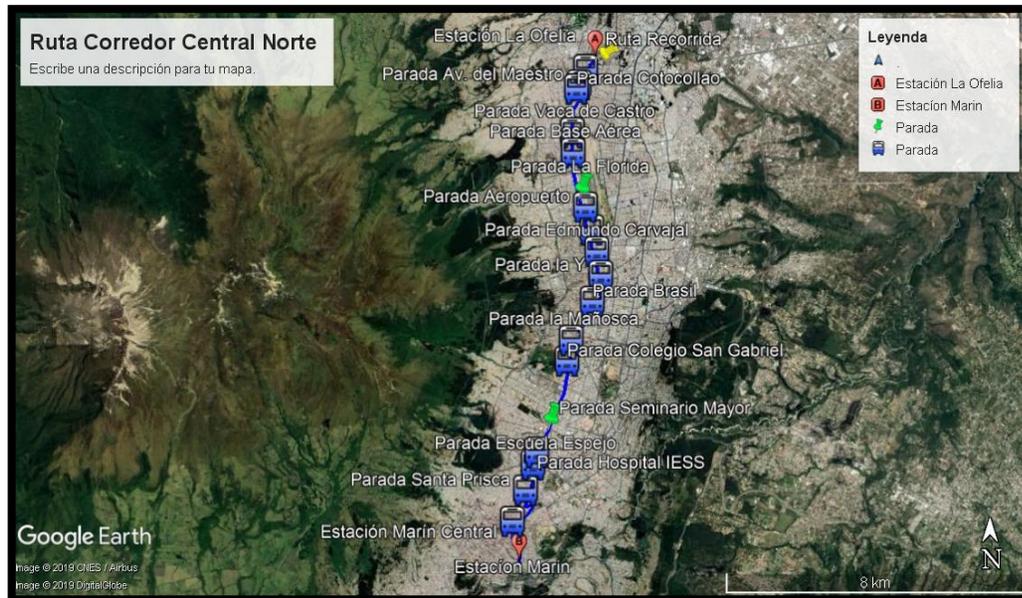


Figura 59. Ruta del Bus articulado BYD K11A

Fuente: Corredor Central Norte

- Los datos obtenidos son en base a la operación normal dentro del Corredor Central el cual se realiza de lunes a viernes realizando ocho vueltas diarias entendiéndose como vueltas a el recorrido entre la terminal “La Ofelia” y la estación “Playón de la Marín” y de regreso, donde se encuentra ubicado un marcador de color verde en las paradas donde se registraron las medidas en las estaciones principales “La Ofelia” con el marcador A , la florida, seminario mayor, con marcador verde y la estación Marín con marcador B obteniendo así los siguientes datos como se muestra en la tabla 39.

Tabla 39
Datos de kilometraje diario del Bus BYD K11A.

N° de vuelta	Hora salida	Hora llegada	Kilometraje salida	Kilometraje llegado	Kilómetros recorridos
1	5h:30	7h:05	22580	22610	30
2	7H:05	9h:01	22610	22641	30
3	9h:01	10h:43	22641	22672	30
4	11h:05	12h:56	22672	22702	30
5	12h:56	14h:32	22702	22732	30
6	15h:04	16h:47	22733	22764	30
7	17h:17	19h:05	22764	22794	30
8	19h:07	20h:40	22794	22825	30
TOTAL					240

4.5.2. Determinación de pasajeros en la ruta de prueba.

Para determinar el número de usuarios que son movilizados en un día típico de lunes a viernes en la ruta y que tienen influencia directa sobre el desgaste de neumáticos y pastillas de freno debido al peso que soportan los neumáticos y la fuerza de frenado, se las realizó mediante un estudio de campo dentro del articulado que cubre la ruta C2 del Corredor Central Norte para realizar una proyección diaria y mensual de tal forma que se contabilizaron los asientos con los que cuenta el bus articulado que suman un total de 35 que en su gran mayoría de casos estos siempre se encontraban ocupados facilitando así el conteo de pasajeros y posteriormente se cuentan dentro de los dos vagones el número de pasajeros de pie al iniciar la ruta en la estación, al llegar al 25% de la ruta que fue tomada en la parada “la florida, al 50% de la ruta en donde se encuentra la parada “Seminario Mayor” y al 100% de la ruta al llegar a la estación “la Marín” obteniendo los siguientes resultados:

- **Pasajeros transportados en un ciclo de trabajo.**

En la tabla 40 podemos observar la suma de los pasajeros que transporta el bus en día completo de trabajo y para fines del estudio se tomaron dos días completos durante la semana.

Tabla 40

Pasajeros transportados en un día típico de trabajo.

Fecha	Ida	Vuelta	Total
20/05/2019	2.038	2.412	4.450
22/05/2019	2.249	2.253	4.502
Total, general	4.287	4.665	8.952

- **Pasajeros transportados por vueltas en diferentes horarios.**

Para objeto del estudio se determinaron las horas pico donde existe una mayor concentración de usuarios durante la mañana y tarde obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 41.
Pasajeros transportados en diferentes horarios

Fecha	N° de vuelta	Ida	Vuelta	Total
30/04/2019	1	225	184	409
30/04/2019	2	203	223	426
30/04/2019	3	194	290	484
02/05/2019	1	228	248	476
02/05/2019	2	189	205	394
02/05/2019	3	138	96	234
02/05/2019	4	264	167	431
06/05/2019	1	243	271	514
06/05/2019	2	332	321	653
08/05/2019	1	302	318	620
08/05/2019	2	188	204	392
08/05/2019	3	145	351	496
Total, general		2.651	2.878	5.529

4.5.3. Cálculo de carga

En la tabla que se muestra a continuación se ha procedido al cálculo de la carga viva en el bus en un día normal de trabajo, tomando 4 paradas como referencia, obteniendo un promedio de pasajeros en cada una de ellas, y para obtener la carga viva se define la masa mínima de un ocupante en 70 Kg para medios de transporte urbano, como lo establece la norma INEN 1323.

Tabla 42.
Cálculo de carga viva

PARADA	PASAJEROS	CARGA VIVA (Kg)
La Ofelia	66	4620
La Florida	84	5880
Seminario Mayor	78	5460
Marín	50	3500
Promedio	70	4865

CAPÍTULO V

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Análisis del desgaste de neumáticos vs carga.

Para determinar el desgaste que tienen los neumáticos fue necesario conocer la cantidad de usuarios que transporta el bus articulado BYD K11A de una manera diaria y mensual en diferentes tipos de operación, el cual fue en pruebas del bus con una carga muerta representando la capacidad total del vehículo y con carga viva de pasajeros en la ruta normal de operaciones mediante los cuales se obtuvieron los resultados mostrados a continuación.

5.1.1. Análisis del desgaste con carga simulada

Durante este análisis el bus articulado fue cargado con un peso de 11,4 toneladas, tomando en cuenta que la profundidad de escultura de las llantas de fábrica es de 15,5 mm y posteriormente se realizó pruebas de diferente índole como arranque en pendiente a diferentes cargas de batería distancia de frenado entre otros para lo cual se tomaron medidas periódicas mostradas a continuación.

- Profundidad, porcentaje de conservación y porcentaje de desgaste luego de un kilometraje observado en el odómetro de 12920 Km.

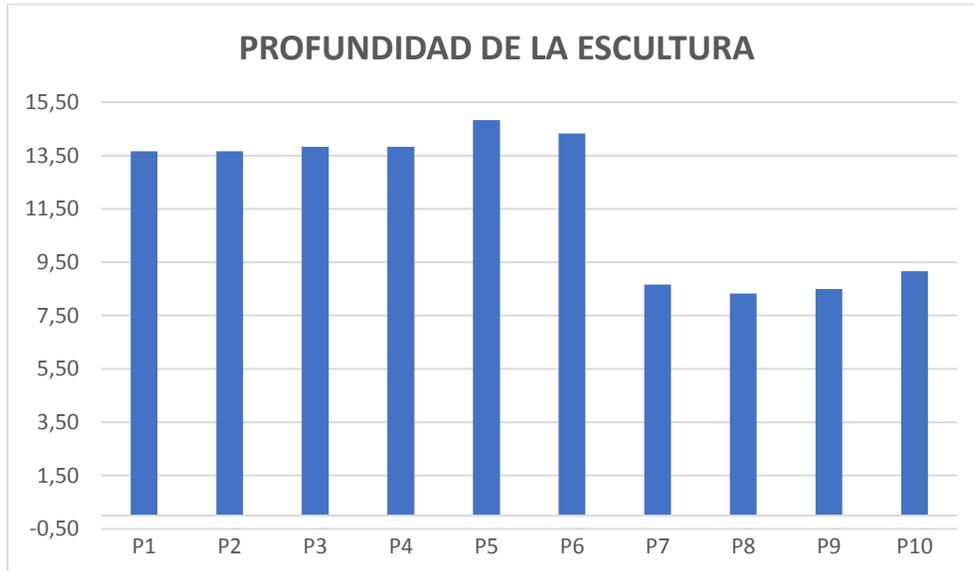


Figura 60. Profundidad de la escultura a los 12920 Km.

En la figura 60 tenemos el desgaste medido inicialmente a los 12920 kilómetros, medidas que fueron tomadas en un mantenimiento programado por la empresa al bus articulado donde podemos observar el desgaste que es más pronunciado es las cuatro ruedas posteriores, esto debido a que en esas posiciones se encuentran los dos motores eléctricos por lo tanto son llantas de tracción y es debido a esto que se presenta un mayor desgaste en estas llantas.

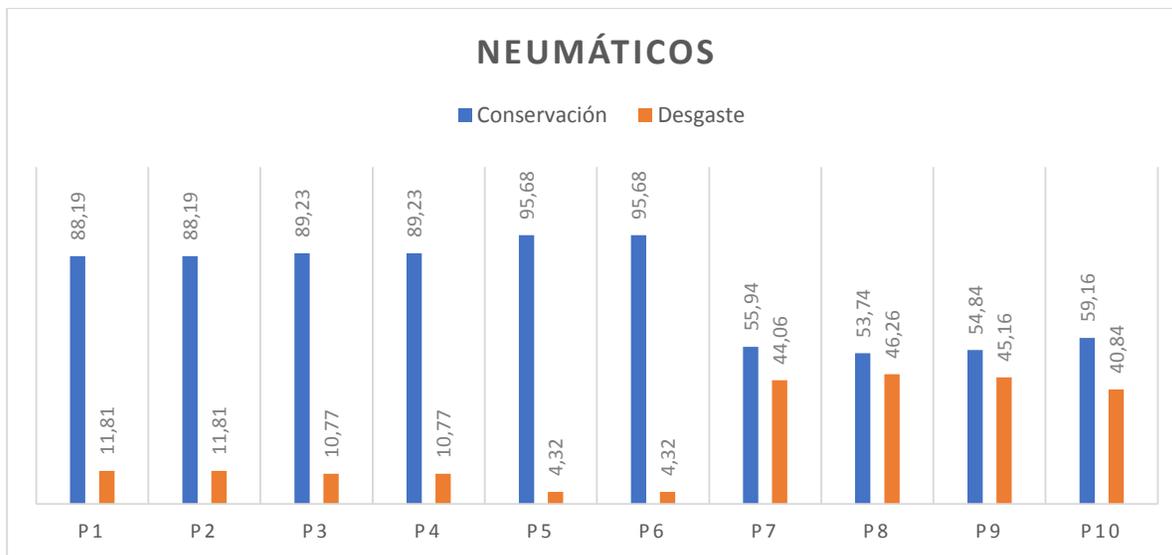


Figura 61. Porcentaje de conservación y desgaste a los 12920 Km.

De acuerdo con la figura 61 podemos observar un porcentaje de conservación y un porcentaje de desgaste en las posiciones p7, p8, p9 y p10 llegando estos neumáticos a tener un 54% de conservación en promedio.

- Profundidad, porcentaje de conservación y porcentaje de desgaste luego de un kilometraje observado en el odómetro a los 17910km

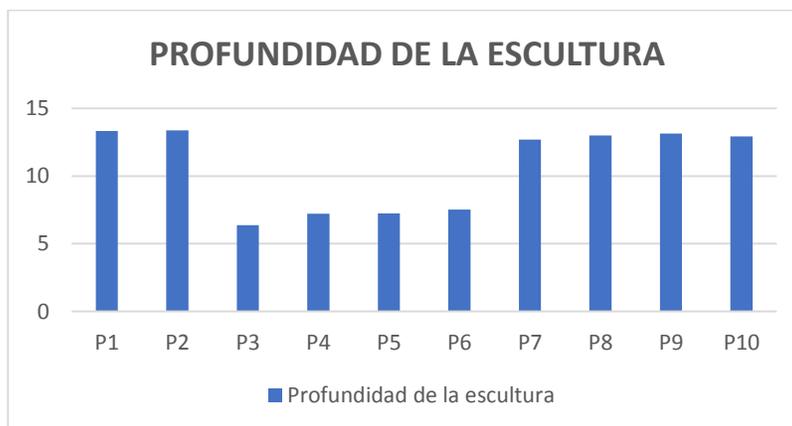


Figura 62. Profundidad de la escultura del neumático a los 17910 km.

Para la figura 62 observamos que ahora el desgaste es mayor en el eje medio del bus y esto es debido a que dentro de un mantenimiento programado por parte de la empresa se realizó una rotación de neumáticos de la siguiente manera:

Los neumáticos de las posiciones p7, p8, p9 y p10 fueron trasladados a las posiciones p4, p5, p6 y p7 respectivamente teniendo así una nueva disposición de los neumáticos. Y se puede observar la profundidad del labrado de cada posición a los 17910 Km

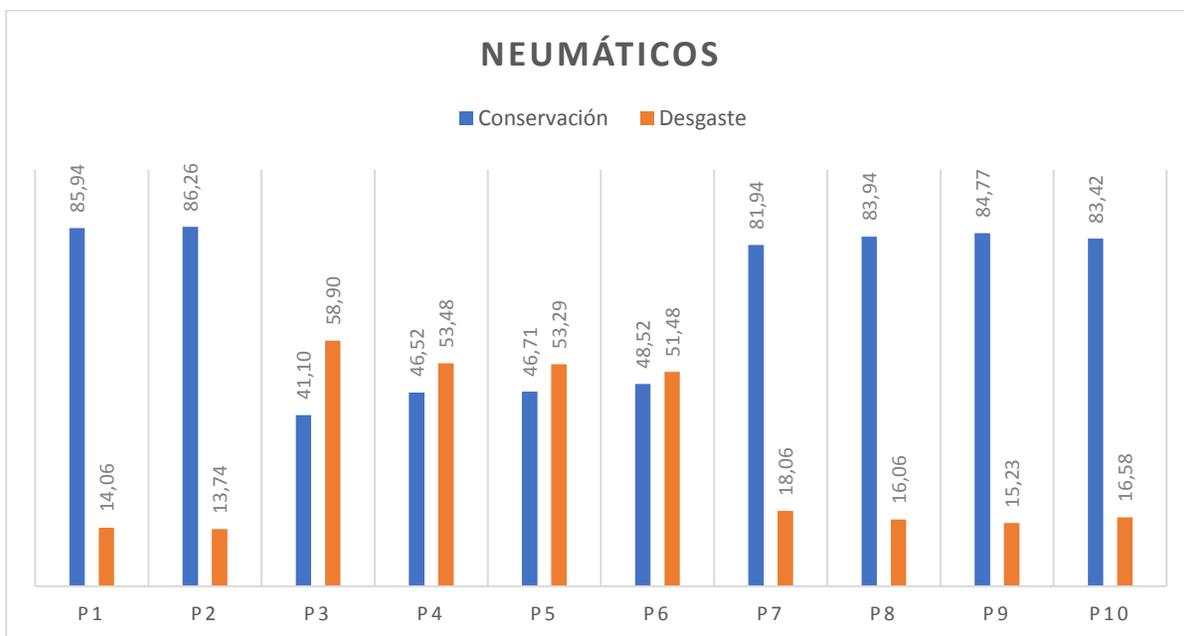


Figura 63. Porcentaje de desgaste y conservación a los 17910Km.

Como podemos observar en la figura 63 después de haber recorrido 4990 kilómetros los neumáticos comienzan a presentar un desgaste mínimo en las posiciones p1 a p6 pero como se mencionó anteriormente en las posiciones p7 a p10 se nota un desgaste significativo debido a que son neumáticos de tracción

- Como se muestra en la figura 64 se observa las gráficas de profundidad, porcentaje de conservación y porcentaje de desgaste luego de un kilometraje observado en el odómetro a los 18886 Km

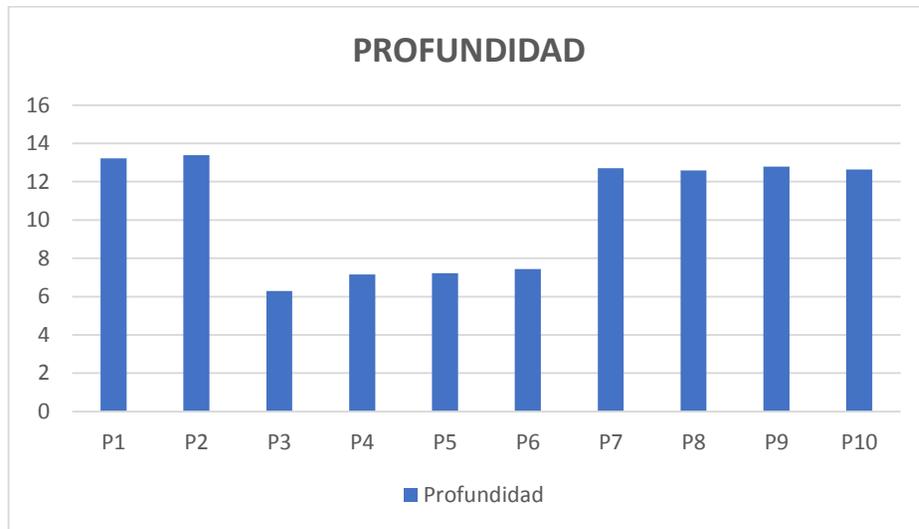


Figura 64. Profundidad de la escultura del neumático a los 18886 km.

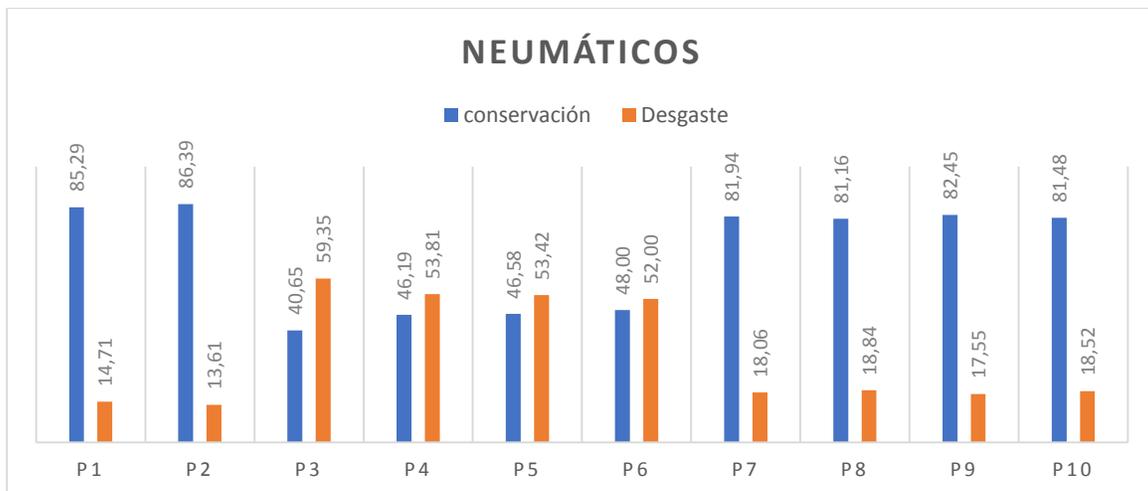


Figura 65. Porcentaje de desgaste y conservación a los 18886 km.

Como podemos observar en la figura 65. Las posiciones p3, p4, p5 y p6 se observa un desgaste significativo a este kilometraje que tiene un promedio de 46% de

conservación lo cual nos indica que en la posición que se encontraban dichos neumáticos anteriormente son los que presentan una menor vida útil en comparación a las otras posiciones.

5.1.2. Análisis del desgaste con carga viva

Para realizar este análisis se contabilizó a los pasajeros que suben en un día típico y en horario normal de trabajo del conductor para determinar el número de pasajeros que suben diariamente y que influye directamente la carga viva que soporta el vehículo en su operación normal de trabajo.

Para lo cual se presentan las tablas del número de pasajeros diario y mensual

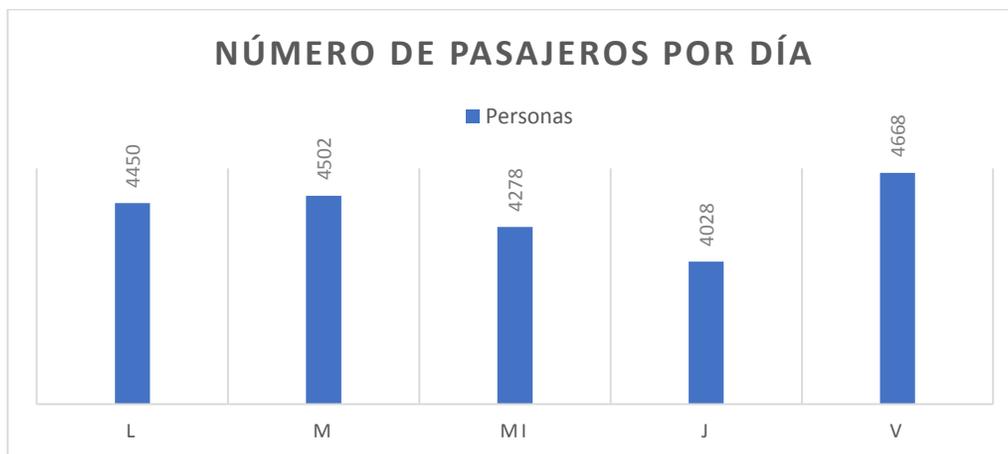


Figura 66. Número de pasajeros por día.

Para determinar el número de pasajeros por día como se muestra en la figura 66 podemos observar que se registraron datos diarios y esto se dio de una manera del ciclo de trabajo del conductor del bus articulado realizándose así 8 vueltas diarias en el corredor central norte de manera que se contabilizaron en 3 paradas principales los usuarios que van de pie y los que van sentados es así que se tabularon los resultados para el análisis de la carga viva que lleva el articulado de una manera diaria

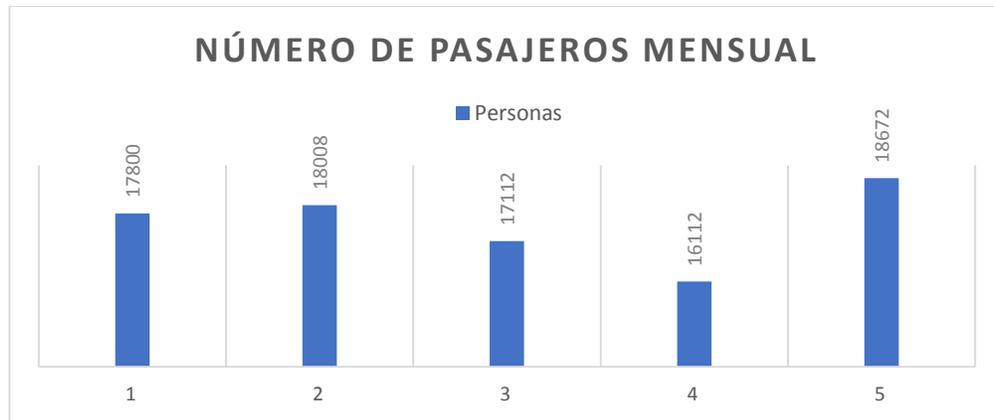


Figura 67. Número de pasajeros por mes.

Como podemos corroborar en la figura 67 se realizó una proyección de pasajeros que utilizan el bus articulado de esta manera obtenemos un valor mensual y así completando el mes de estudio donde se calculó la carga viva que transporta el vehículo dentro de su operación normal.

Después de haber analizado los pasajeros que se transportan en el articulado se obtuvieron los siguientes resultados de desgaste de neumáticos en una operación normal a los 23690 Km

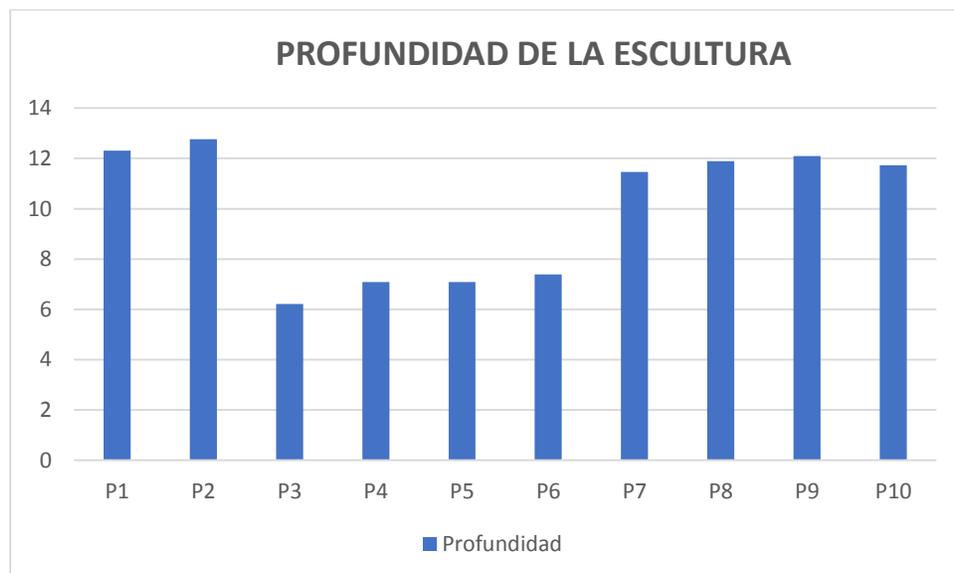


Figura 68. Profundidad de la escultura del neumático a los 23690 Km

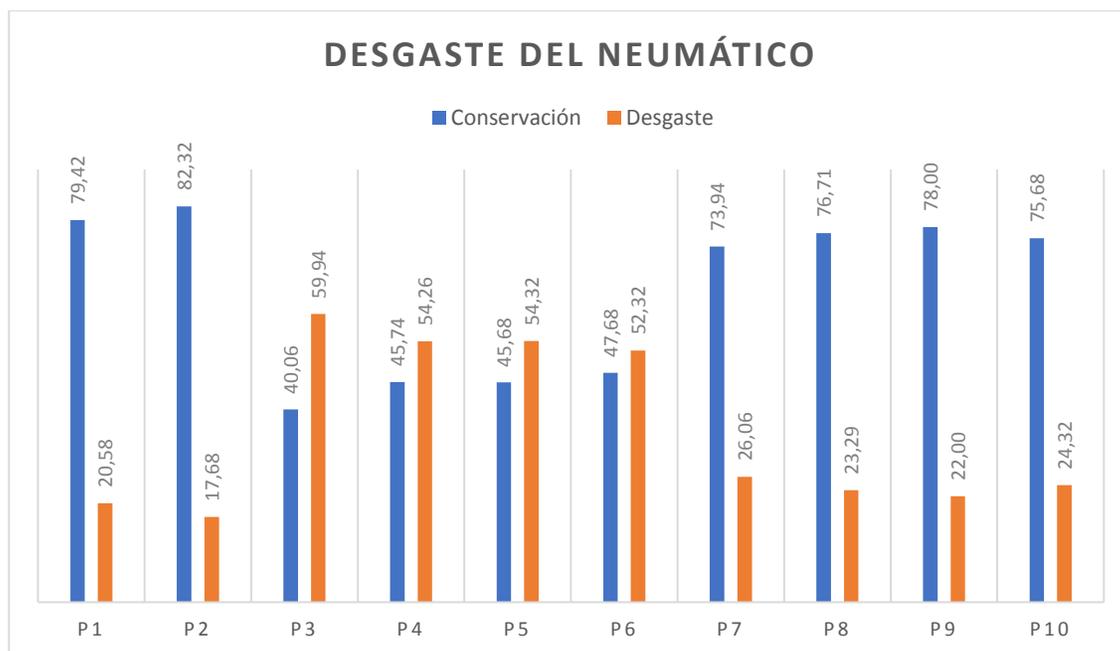


Figura 69. Porcentaje de conservación y desgaste de neumáticos a los 23690 Km.

Para determinar el desgaste que se produce en los neumáticos durante el período de estudio en relación a los pasajeros que transporta la unidad basado en el kilometraje recorrido durante la ruta normal del bus articulado, el cual tiene un trayecto diario de 240 kilómetros y se obtienen los siguientes resultados:

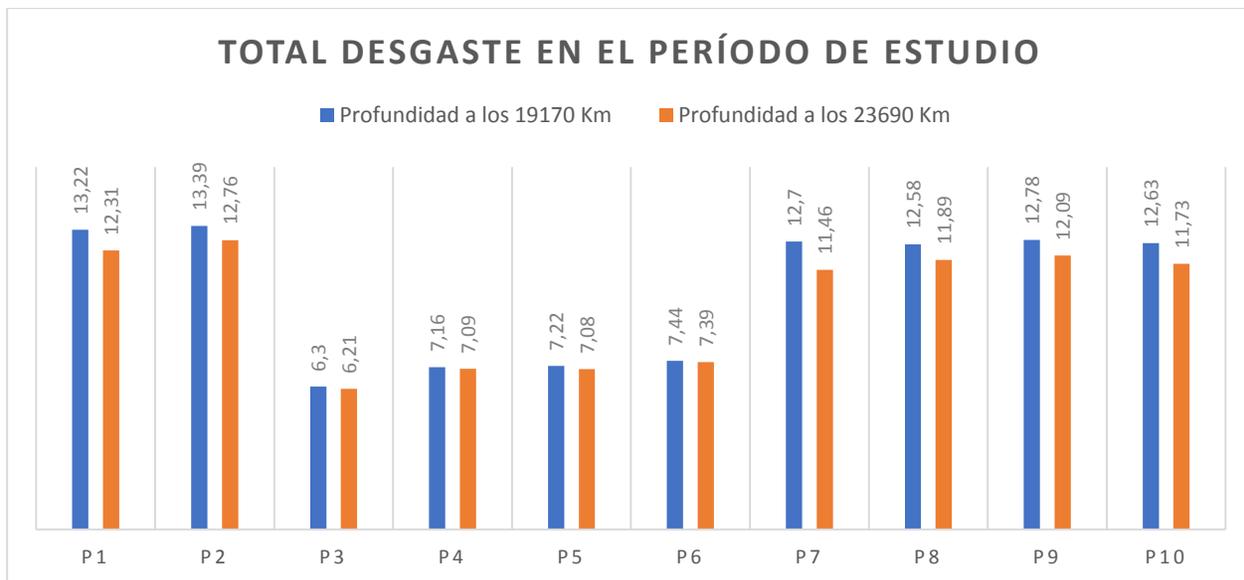


Figura 70. Desgaste total de los neumáticos.

Como se muestra en la figura 70 podemos observar que habiendo transcurrido 4520 km que es la diferencia entre el kilometraje final y el inicial de las operaciones a partir del inicio del trabajo del bus articulado con carga viva, las posiciones p3, p4, p5 y p6 presentan un valor del 6,9 mm en promedio a los 19170 km mientras que a los 23690 Km presentan un valor de 6,8 mm en promedio, el cual nos indica que no se ve mayor afectación mientras que en las posiciones p7, p8, p9 y p10 se muestra un desgaste promedio a los 23690 km de 11,79 mm en comparación al del inicio de la operación que fue un promedio de 12,67 esto nos demuestra que en dichas posiciones se ven afectados por los motores eléctricos y a su vez la carga viva soportada.

5.2. Análisis térmico de la simulación Disco-Pastilla

Para el análisis del estudio de distribución de temperaturas en el ensamble Disco-Pastilla se lo realizó mediante el software CAE el cual nos presenta el modelo Transient-Structural (transitorio-estructural) donde nos permite analizar las cargas que envuelven

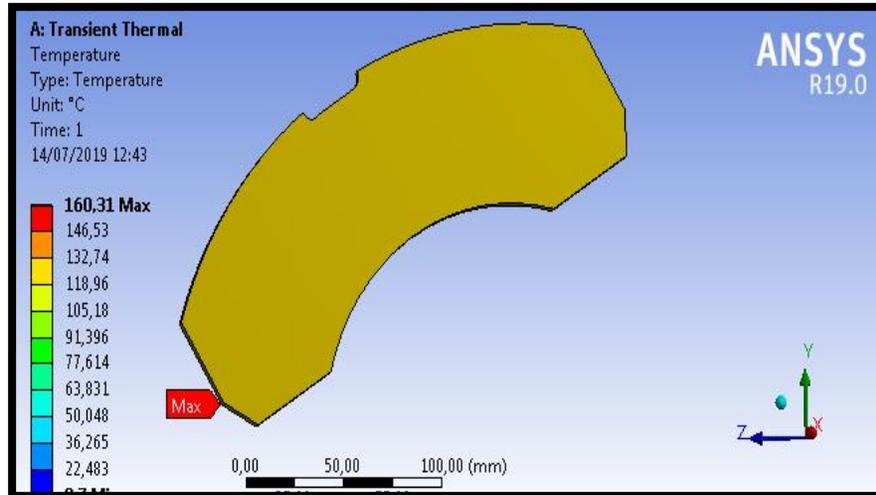


Figura 72. Temperatura máxima y mínima en la pastilla.

En la figura se puede apreciar como se distribuye la temperatura en las zonas de trabajo de la pastilla y el disco, así como la variación de la temperatura en los canales de ventilación del disco para poder disipar de una mejor manera el calor producido por la fuerza de fricción.

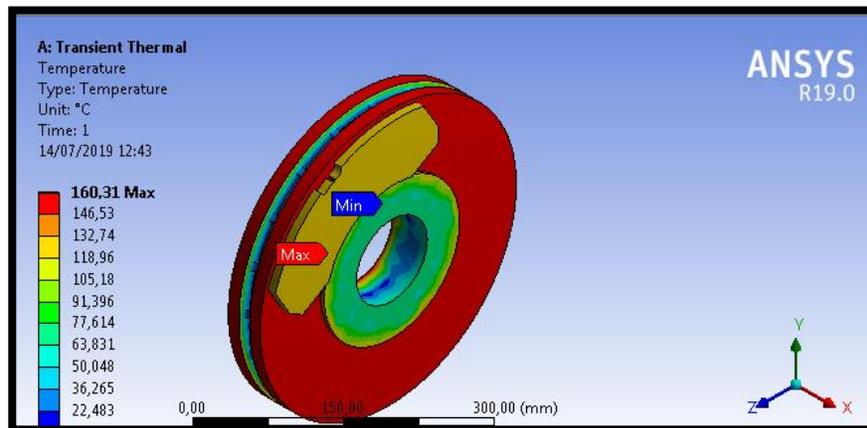


Figura 73. Temperatura máxima y mínima en el sistema Disco-Pastilla.

En la siguiente tabla se puede observar como se eleva la temperatura en función del tiempo y de esta manera obtener la gráfica temperatura vs tiempo.

Tabla 43.

Variación de la temperatura en función del tiempo

Tiempo (s)	Temperatura (°C)	Tiempo (s)	Temperatura (°C)
0,01	8,77	0,44	91,06
0,02	22,48	0,54	104,78
0,03	36,203	0,64	118,5
0,14	49,92	0,74	132,22
0,24	63,66	0,84	145,93
0,34	77,35	0,94	147,08
0,039	82,67	1	159,65

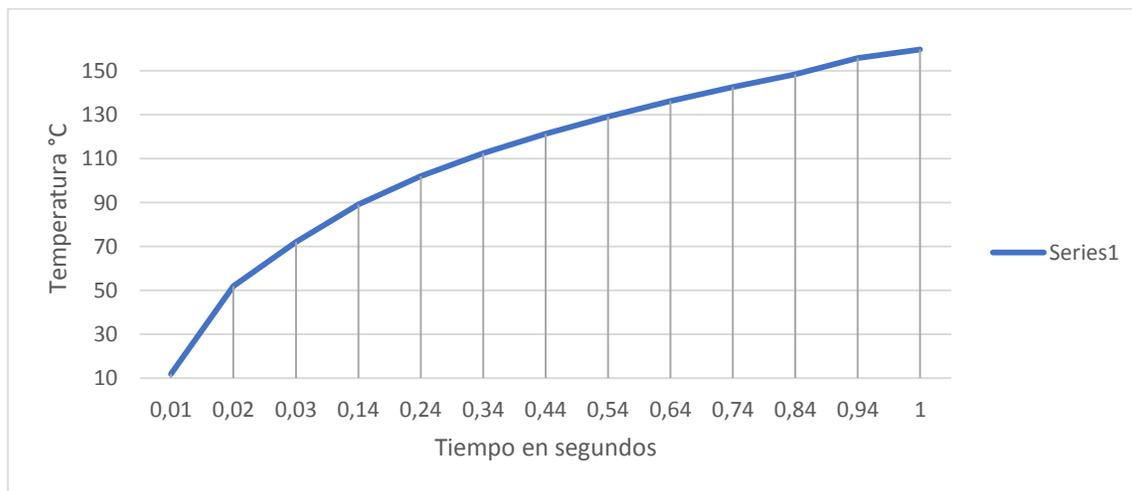


Figura 74. Gráfico temperatura vs tiempo del ensamble Disco-Pastilla

En la figura 74 se puede observar como la temperatura inicial de 8,5°C varia hasta una temperatura maxima de 160.31°C, comparándose los resultados de los cálculos donde se obtuvo un valor de temperatura en el disco de 159.04 °C.

5.2.2. Análisis de fricción en función de la temperatura

Durante la simulación se obtienen los resultados de temperatura con el coeficiente de fricción utilizado en los parámetros iniciales de la simulación, a continuación, se realiza una comparación con las especificaciones del material de fricción obtenidos del anexo 4

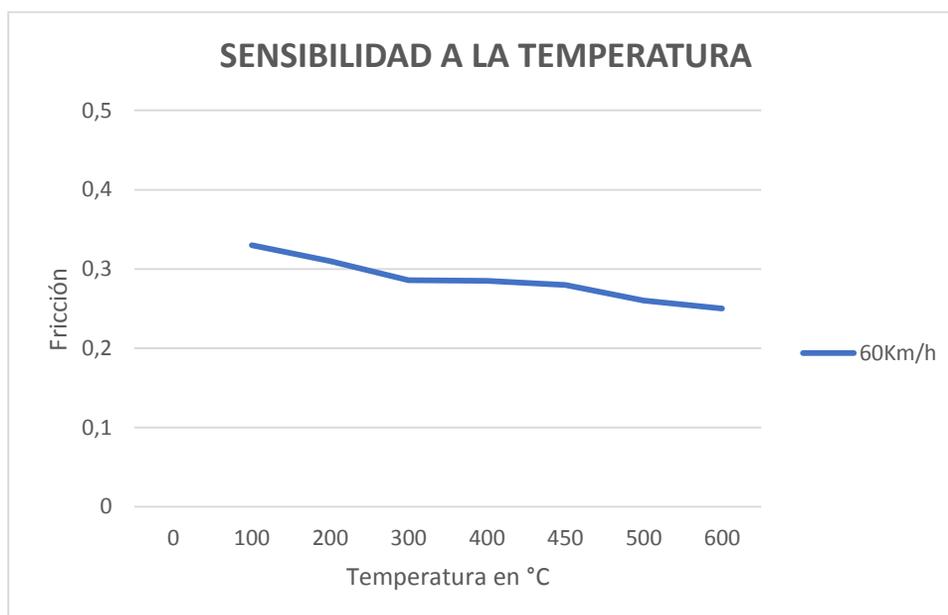


Figura 75. Variación del coeficiente de fricción en función de la temperatura

Fuente: (Textar, 2015)

La figura expresa la variación del coeficiente de fricción utilizado en la pastilla de freno en función de la temperatura. En esta gráfica podemos observar que los 100°C a una velocidad de 60 Km/h el coeficiente de fricción se mantiene aproximadamente en 0,33 y comienza a variar en función de la temperatura donde se puede apreciar que a medida que sube la temperatura el coeficiente de fricción disminuye. A continuación, se

obtiene las gráficas a partir de la variación del coeficiente de fricción y verificando las temperaturas de la simulación realizada en el software CAE.

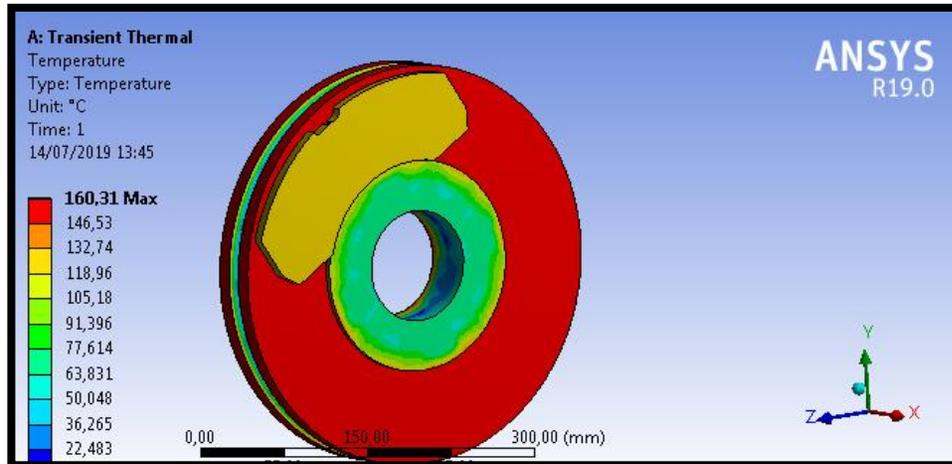


Figura 76. Temperatura del sistema con factor de rozamiento de 0,325

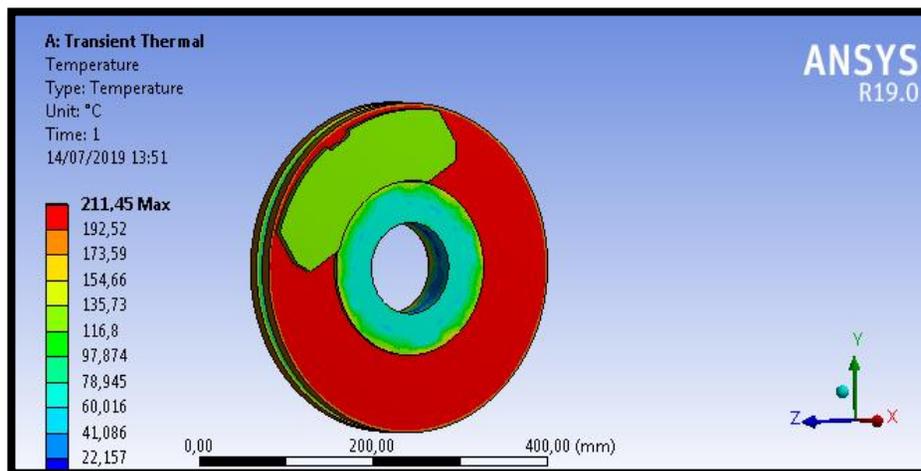


Figura 77. Temperatura del sistema con factor de rozamiento de 0,295

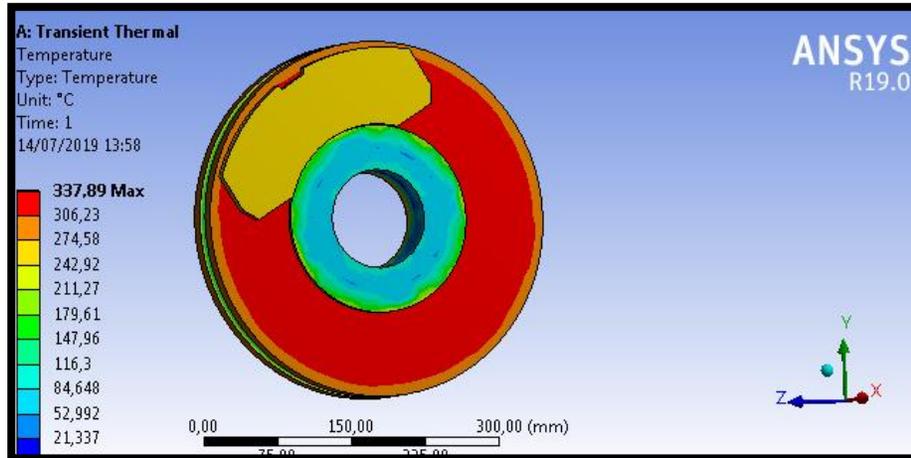


Figura 78. Temperatura del sistema con factor de rozamiento de 0,287.

5.2.3. Análisis térmico de la pastilla de freno

Para el análisis térmico de la pastilla de freno se define en el software CAE las propiedades de los que está compuesto el disco de freno y es así que se obtienen la variación de temperatura en la siguiente gráfica como se puede apreciar en la figura 80.

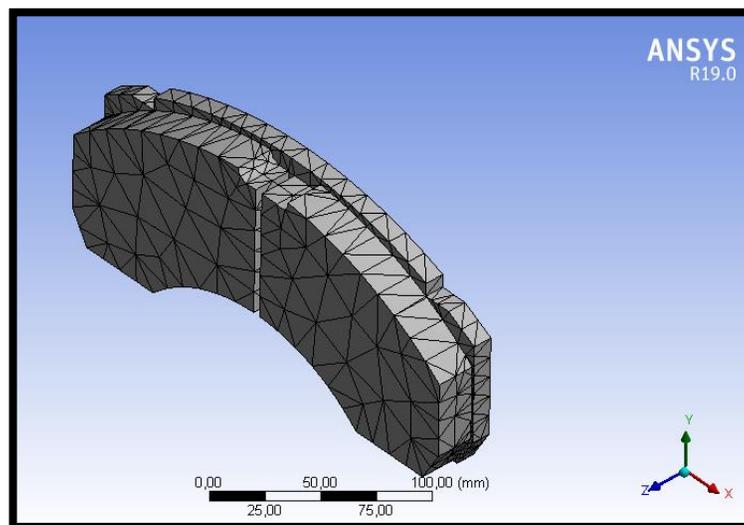


Figura 79. Mallado de la pastilla de freno

Tabla 44.
Temperatura de la pastilla en el tiempo

Tiempo (s)	Temperatura (°C)	Tiempo (s)	Temperatura (°C)
0,1001	35,425	5,54	51,466
1	40,421	6	52,102
1,54	42,548	6,54	52,79
2	44,075	7	53,332
2,54	45,628	7,54	53,924
3	46,787	8	54,392
3,54	47,996	8,54	54,906
4	48,918	9	55,315
4,54	49,897	9,54	55,765
5	50,654	10	56,125

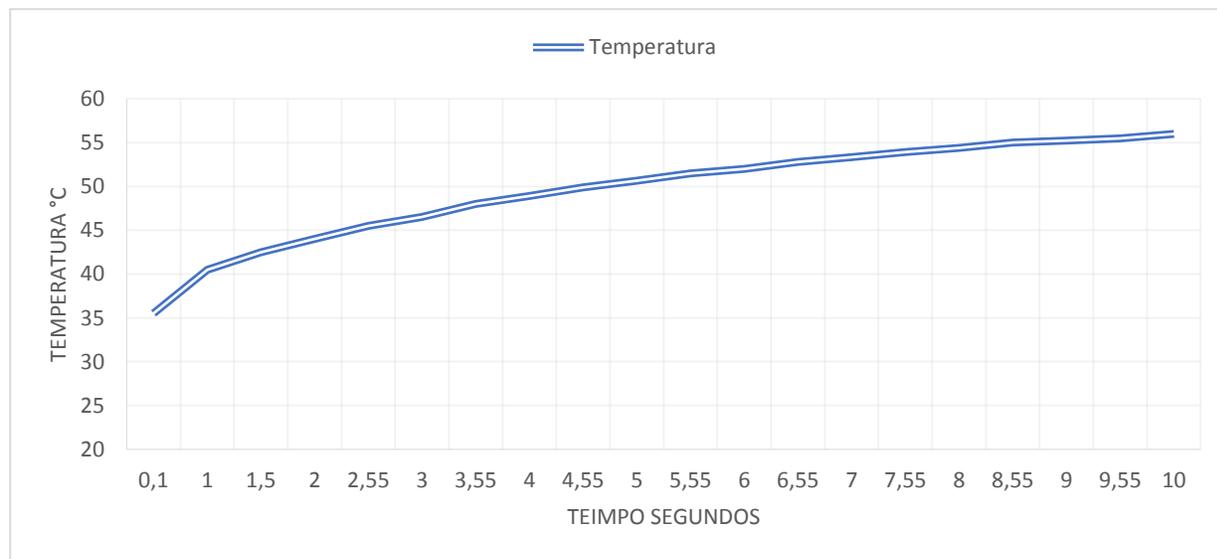


Figura 80. Gráfico temperatura vs tiempo de la pastilla de freno

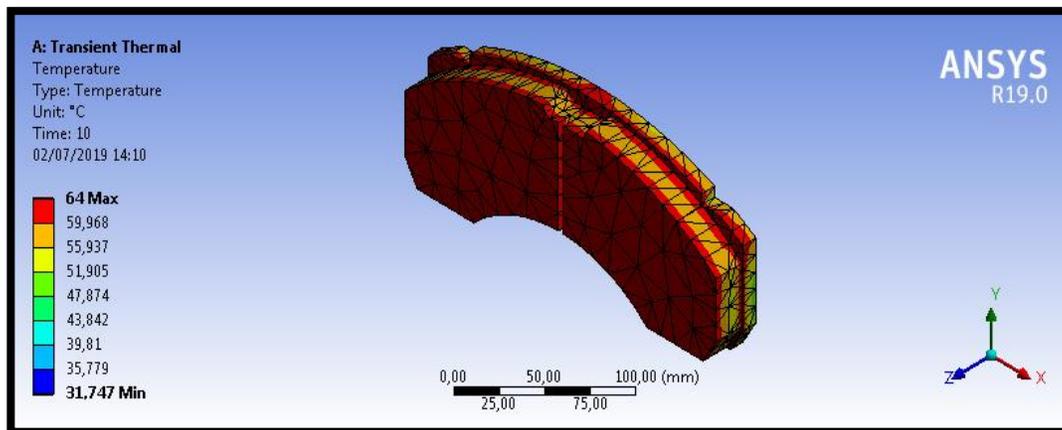


Figura 81. Temperatura de la pastilla de freno (frontal)

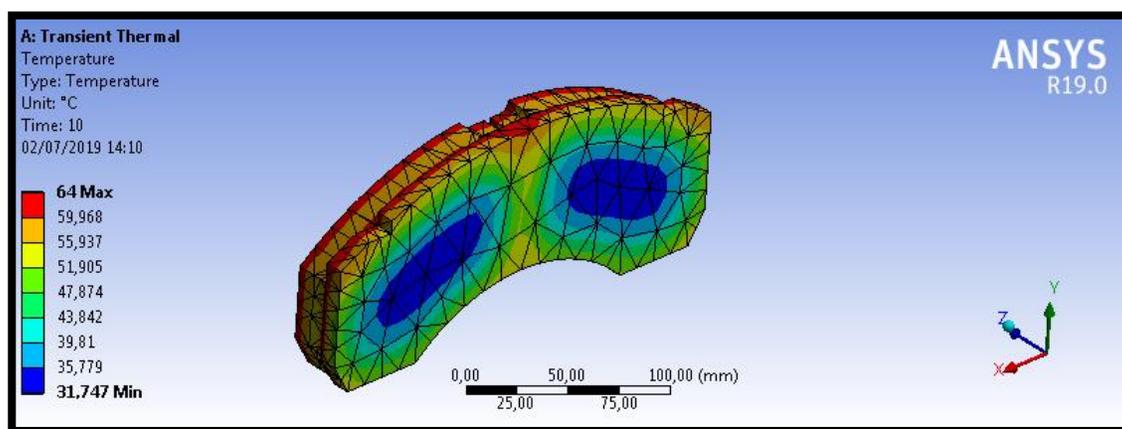


Figura 82. Temperatura de la pastilla de freno (posterior)

5.3. Análisis estructural de la simulación Disco-Pastilla

Para el análisis del estudio estructural en el ensamble Disco-Pastilla se realizó mediante el software CAE el cual nos presenta el modelo Transient-Structural (transitorio-estructural) donde nos permite analizar las cargas que afectan al ensamble en función del tiempo y sometido a parámetros como la velocidad de giro, el sentido de giro, el mallado.

A. Análisis de la presión en el ensamble Disco-Pastilla

En la figura 83, se puede observar el comportamiento de la pastilla, cuando recibe la presión para el funcionamiento, y esta se la puede contrastar con la figura 84, la cual muestra a la pastilla real luego de ser reemplazada en el mantenimiento, en los círculos se muestra el mayor desgaste que esta sufre debido a la presión.

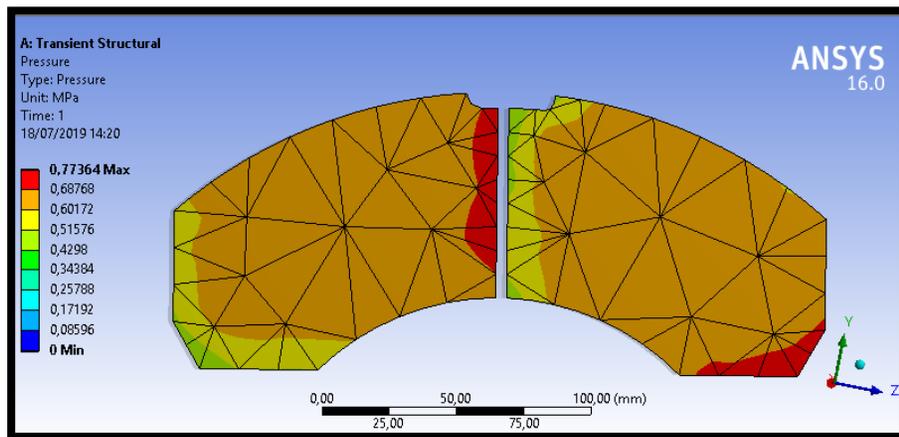


Figura 83. Presión en la pastilla de freno en la simulación



Figura 84. Pastilla de freno reemplazada

De acuerdo con la norma (INEN, 1984) “Vehículos Automotores. Frenos neumáticos, presiones en cañerías y eficiencia del frenado, se establece y limita los valores en la presión en las cañerías de aire comprimido utilizadas para conexión

neumática de vehículos de tracción y sus remolques. La presión de operación máxima en la cañería del sistema de frenado debe ser: $0.65 \pm 0.05 \text{MPa}$ ” (p.1).

La presión en la cañería de frenado automático, para rodaje normal, y la presión en el reservorio de aire comprimido del remolque alimentado por la cañería del freno automático, debe estar entre: 0.65 y 0.8MPa.

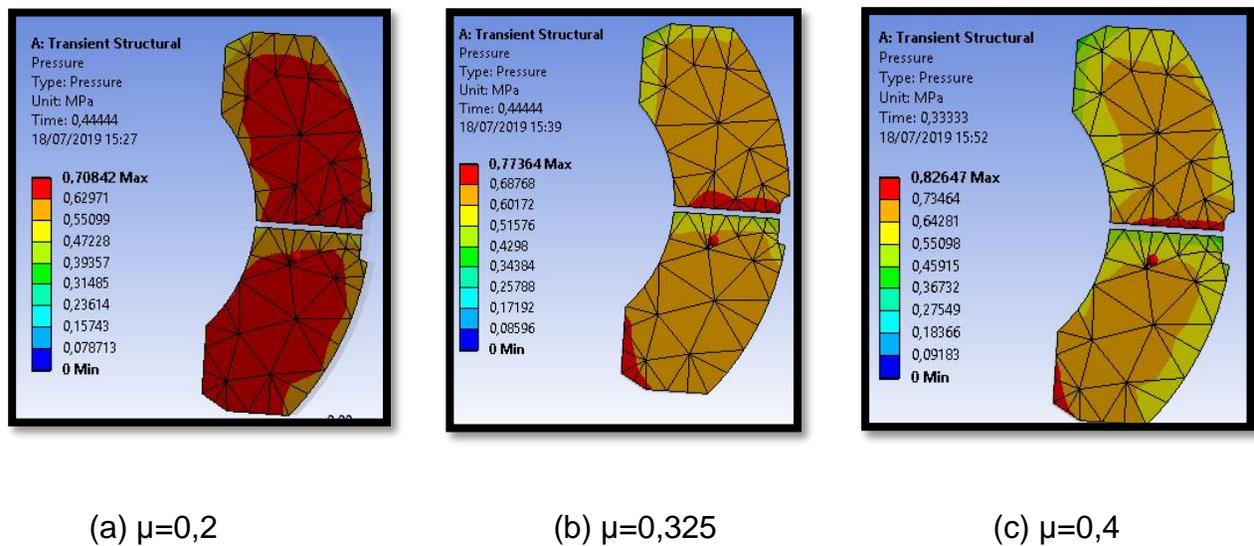


Figura 85. Distribución de presión en la pastilla a diferentes coeficientes de fricción

En la figura 85, se puede observar la distribución de la presión en la pastilla de freno, con diferentes coeficientes de fricción:

En (a) se puede observar que la máxima presión a la que llega la pastilla es de 0,708MPa con un μ de 0,2 que es un coeficiente muy bajo para la pastilla en estudio

En (b) se puede observar que la máxima presión a la que llega la pastilla es de 0,773MPa. con un μ de 0,325 que es el coeficiente normal de trabajo en la pastilla en estudio

En (c) se puede observar que la máxima presión a la que llega la pastilla es de 0,826MPa con un μ de 0,4 que es un coeficiente muy alto para la pastilla en estudio.

Estos valores se mantienen entre los rangos especificados en la norma INEN 964.

B. Análisis de los esfuerzos Disco-Pastilla

• Deformación total

Como se puede observar en la figura la deformación total que tiene el ensamble de acuerdo a la carga aplicada es de 0,755 mm podemos notar que en el disco es donde se produce la principal deformación ya que está sometida a una presión de compresión que es relacionada con la función realizada desde la pastilla hacia el disco de freno.

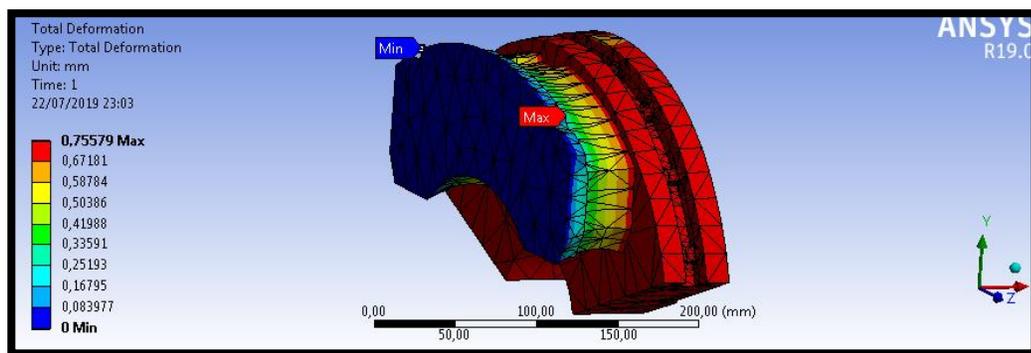


Figura 86. Deformación total del ensamble Disco-Pastilla.

A continuación, podemos observar en la figura la deformación total en la pastilla de freno ya que es la encargada de transmitir la fuerza de frenado hacia el disco y de esta manera se llega a tener una deformación en la misma siendo está en la cara de fricción un valor de 0,75 mm y una deformación mínima en la placa de la pastilla de 0,08 mm.

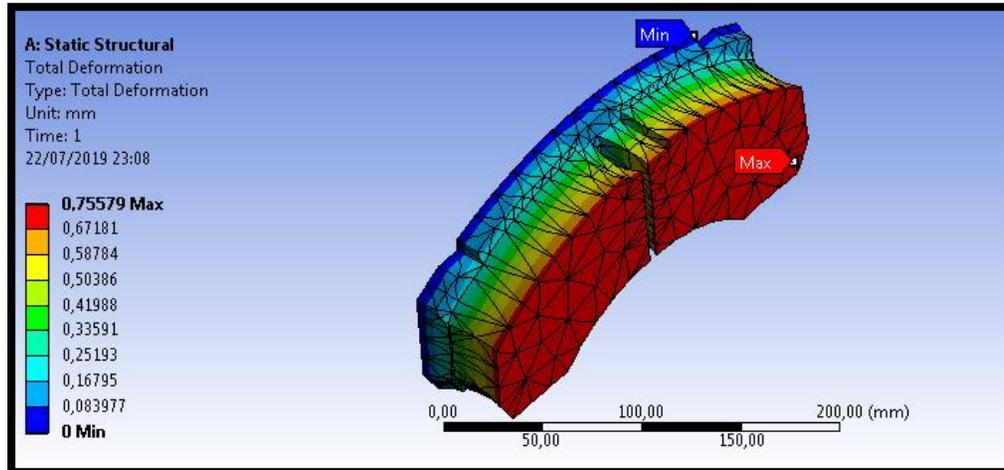


Figura 87. Deformación total en la pastilla de freno

- **Penetración**

Dentro del análisis de esfuerzos podemos determinar la penetración de la pastilla hacia el disco de freno obteniendo un resultado de $0,10 \mu\text{m}$, este valor se ve relacionado con la presión que se ejerce en la pastilla para frenar el autobús.

La penetración se utiliza en casos en los que los elementos presentan deformación como es el caso de la pastilla de freno.

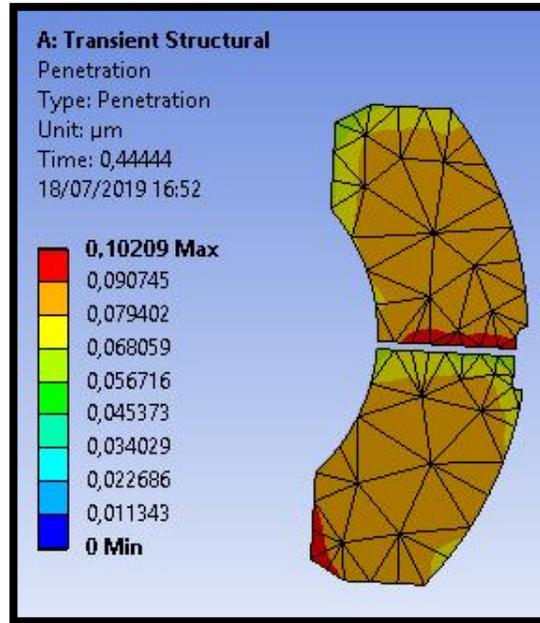


Figura 88. Valores de penetración de la pastilla de freno.

5.4. Análisis de resultados

5.4.1. Análisis de mediciones de neumáticos

Para el análisis de las mediciones en los neumáticos se realizó la toma de datos periódicamente en dos circunstancias diferentes, con el vehículo en pruebas de desempeño y con el vehículo en condiciones de trabajo normal. En el inicio de la toma de datos el bus presentaba un kilometraje de 12920 Km y en la finalización de 23690 Km, obteniéndose una diferencia de 10770 Km, siendo este recorrido el aprovechado para el estudio.

El desgaste final de los neumáticos nos demuestra que en las posiciones P3, P4, P5 y P6 se obtuvo una mayor reducción en la escultura en comparación con las otras, tomando en cuenta que estos, se encontraban en el eje posterior hasta los 12920 Km,

lugar donde están ubicados los motores eléctricos del bus presentando un porcentaje de desgaste promedio de 55,21%, y a su vez las posiciones restantes presentan un porcentaje de 22,42%.

En base a lo mencionado anteriormente los neumáticos de las posiciones P3, P4, P5 y P6 han presentado una reducción de 1,5 mm de escultura cada 5000 Km. aproximadamente y realizando una proyección de la vida útil de los neumáticos en estas posiciones se puede decir que tendrían que ser cambiados luego de 17500 Km más de recorrido, es decir cuando el odómetro presente 41190 Km y en un tiempo aproximado de 3 meses más de trabajo.

A su vez los neumáticos de las posiciones P1, P2 presentan una reducción de 1 mm de escultura cada 5000 Km. recorridos, luego de lo cual se estima una vida útil de 50000 Km más de recorrido, cuando el odómetro marque los 73690 Km y en un tiempo aproximado de 10 meses.

En los neumáticos de las posiciones P7, P8, P9 y P10 presentan una reducción de 1,5 mm de escultura cada 5000 Km. recorridos, luego de lo cual se estima una vida útil de 35000 Km más de recorrido, cuando el odómetro marque los 58690 Km y en un tiempo aproximado de 7 meses.

5.4.2. Análisis de ensayos en las pastillas de frenos

En el ensayo de resistencia interna al corte se determinó la carga máxima que soportó cada probeta de la pastilla de freno, en la cual la muestra 1 es la más alta con 9.567 N/mm² y la muestra 4 es la más baja siendo 7.376 N/mm², estos valores se deben a las diferencias existentes entre las áreas de sección transversal de 404.01 mm² y

398.995 mm² respectivamente, siendo el área de la muestra 5 la que presenta el valor más óptimo para el ensayo de 401.993 mm² y una fuerza interna de corte de 8.419 N/mm² colocándose así en el valor promedio de las propiedades físicas que detalla el fabricante (7-9 N/mm²) y comprobando sus prestaciones.

En el ensayo de deformación por compresión de la pastilla de freno se obtuvo resultados en cuanto a la temperatura ambiente (20.7°C) y de calentamiento (395°C), donde se utilizaron dos muestras, las cuales a temperatura ambiente presentaron un valor de compresibilidad promedio de 0.0959 mm y en el ensayo de calentamiento el valor promedio fue de 0.1146 mm, comprobándose de esta manera que en condiciones reales de funcionamiento la temperatura influye en el desgaste de la pastilla de freno.

5.4.3. Análisis de mediciones de la pastilla de freno

Una vez medidas las pastillas de freno reemplazadas en el mantenimiento de los 18886 Km, se puede decir que el desgaste promedio de las pastillas delanteras es de 4,75mm, la razón por la cual se escogieron estas pastillas es que representaban el menor daño para llevar a cabo el estudio, debido a que el resto de pastillas no presentaban un desgaste normal a consecuencia del recalentamiento que sufrieron durante la fase de pruebas. En base a lo mencionado se proyecta que a estas pastillas les resta una vida útil de 31808 Km, tomando en cuenta que el espesor mínimo que deben poseer es de 12mm incluida la placa base.

5.4.4. Análisis de simulación en la pastilla de freno

En la simulación de distribución de la presión con respecto al coeficiente de fricción, se obtuvo que dichos valores son proporcionales, es decir que si aumenta uno

de ellos, el otro también lo hace. Entonces el valor de presión que se ejerce sobre la pastilla debe mantenerse entre 0.65 y 0.8 MPa, de manera que el coeficiente de fricción de la pastilla esté entre los rangos de 0.31 a 0.34, teniendo una fricción media que proporcionará un desgaste normal.

CAPÍTULO VI

6. MARCO ADMINISTRATIVO

6.1. Recursos

Para el desarrollo del proyecto de investigación, se procedió de manera ordenada y sistemática con el fin de optimizar los recursos, que se detallan a continuación:

6.1.1. Recursos humanos

El desarrollo de la investigación “Análisis de la eficiencia, desgaste y rendimiento de los frenos y neumáticos del bus articulado BYD K11A de 160 pasajeros” fue realizado por:

Tabla 45.
Recursos humanos

Investigadores:	Manuel Chico	Investigador
	Daniel Terán	Investigador
Tutor:	Ing. Mauricio Cruz	Director de Tesis
Colaboradores científicos	Ing. Francisco Navas	Colaborador Laboratorio Mecánica de Materiales- Espe

6.1.2. Recursos tecnológicos

En el proyecto de investigación se utilizó recursos tecnológicos de diferente índole, los cuales permitieron el desarrollo de la misma y se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 46.
Recursos tecnológicos

ORDEN	NOMBRE
1	Máquina universal de ensayos
2	Profundimetro
3	Termómetro laser
4	Medidor de presión digital
5	Cronómetro
6	Computadora
7	Celular

6.1.3. Recursos materiales

Los recursos materiales que se utilizaron en el desarrollo del proyecto de investigación son los elementos que se detallan en la tabla 47:

Tabla 47.
Recursos materiales

Orden	Nombre
1	Pastillas de freno
2	Platinas
3	Ejes de transmisión
4	Cocina eléctrica

6.2. Análisis de costos de la investigación

Para el desarrollo de la investigación realizada se toman en cuenta costos, tales como, costos de materiales y equipos necesarios para la obtención de datos, costo de pastillas para el análisis de materiales de composición, costo de pruebas laboratorio.

6.2.1. Costos de materiales y equipos necesarios para la obtención de datos

Para la obtención de datos, es necesario tener equipos que permitan medir los parámetros necesarios para continuar con la investigación

Tabla 48.
Costos de materiales y equipos

Descripción	Cantidad	Valor Unitario	Valor total
Juego de pastillas de freno	1	409.16	409.16
Termómetro	1	20	20
Profundímetro	1	16	16
Platinas	2	25	50
Ejes de transmisión	5	2	10
Cocineta eléctrica	1	16	16
Cortes pastilla	5	4,40	22
Manómetro	1	20	20
TOTAL			563.16

6.2.2. Costos de pruebas de laboratorio

Para determinar la caracterización del material de la pastilla de freno, se envió una muestra al Laboratorio de Petróleos, Energía y Contaminación de la Universidad Central en Quito, el resto de pruebas realizadas, es decir, Resistencia Interna al Corte y

Deformación a la compresión no tuvieron costo debido a que se realizaron en la misma Universidad

Tabla 49.
Costos de pruebas de laboratorio

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	VALOR TOTAL
Prueba de Cromatografía	1	128.80
Prueba de Resistencia Interna al Corte	1	0
Prueba de Deformación por Compresión	1	0
TOTAL		128.80

6.2.3. Costo total de la investigación

Para el costo final de la investigación además de los mencionados anteriormente se añaden gastos de transporte, alimentación y de oficina.

Tabla 50.
Costo total de la investigación

Descripción	Valor
Costo de materiales y equipos	563.16
Costo de pruebas de laboratorio	128.80
Costo de movilización	180
Material de oficina	50
Alimentación	90
Valor total	1011.96

CAPÍTULO VII

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

- Se investigó en fuentes y bases digitales tales como artículos científicos, Google académico, manuales de fabricantes de autopartes como TEXTAR, KNORR-BREMSE. Los cuales permitieron desarrollar el proyecto de investigación.
- Se analizó el comportamiento de las pastillas delanteras de freno y el proceso para el recambio de las mismas mediante la observación y medición, donde su medida inicial era 20 mm en su material de fricción y luego a los 18886 km llegó a 15,25 mm con un porcentaje de desgaste de 23,75%
- Se determinó la caracterización de materiales de la pastilla de freno mediante un análisis por cromatografía se obtuvieron dos componentes fundamentales los cuales son Benzofenona en un valor del 82,24% y un componente orgánico denominado Nonadecatrieno en un valor de 17,76% y en base a las características grabadas en la pastilla de freno se muestra que el material de fricción corresponde al T7400 de manera que se obtuvo la ficha técnica del mismo, en donde su composición principal es de 9% cobre con una densidad de 3,1 g/cm³, fundamentados en esto para los fines de simulación se utilizó cobre como material principal y a su vez sus propiedades físicas.
- Se comprobó en el ensayo de resistencia interna al corte mediante la norma NTE INEN- ISO 6311 de la pastilla de freno que en la muestra 5 a una carga máxima aplicada de 3384.45N da como resultado una resistencia interna al corte de 8.419

N/mm², este valor se debe al área de la sección transversal, y está acorde con el que muestra la ficha técnica (7.0-9.0 N/mm²)

- Para determinar la compresibilidad del material de fricción, se realizó el ensayo de deformación por compresión según la norma NTE INEN ISO 6310 donde se aplicó tres ciclos a cada muestra de 1-2-4-8 MPa respectivamente a una temperatura ambiente y posteriormente a 400°C y se obtuvo una reducción del espesor de la pastilla (compresibilidad) promedio de 96µm a temperatura ambiente y 115 µm a temperatura de calentamiento, cumpliendo con las propiedades físicas como la densidad (3,1 g/cm³) y compresibilidad de la pastilla expresadas en el manual (90-140 µm), esto garantiza durabilidad, estabilidad y seguridad para los ocupantes.
- Mediante la medición de las pastillas de freno reemplazadas durante el mantenimiento, se presentaron daños anormales en las pastillas de los ejes medio y posterior por lo cual se realizó el estudio en las pastillas del eje delantero, obteniendo un desgaste promedio de 4,75mm después de recorridos 18886 Km, proyectando un rendimiento de las pastillas de 50000 Km.
- En el análisis CAE de la presión se pudo comprobar que el coeficiente de fricción afecta directamente con la presión que ejerce la pastilla en el disco de freno, en la que con un coeficiente $\mu=0.2$ la presión máxima es de 0.708MPa, con $\mu=0.325$ la presión máxima es de 0.773MPa y con $\mu=0.4$ la presión máxima es de 0.826MPa, siendo el segundo el adecuado para un desgaste normal y siendo un condicionante para elegir la pastilla de freno del mismo material, debido a que en base a la ficha técnica se mantiene estable el valor de fricción entre 0.31 y 0.34 en función de la temperatura de las pastillas y la velocidad del vehículo.

- Basados en el estudio de campo realizado para determinar la temperatura de funcionamiento del disco de freno, se obtuvo un promedio de 136°C, mientras que en la simulación realizada se obtuvo una temperatura de 160°C, de la misma manera en los cálculos realizados la temperatura obtenida fue de 159.04°C, esta diferencia de 24°C, se debe a que en los parámetros utilizados para la simulación y los cálculos no se utilizó el flujo de aire que circula alrededor del disco.
- En la simulación realizada se puede observar que la mayor concentración de esfuerzos en la pastilla de freno está ubicada en la parte central y en los extremos de la misma, de igual manera en la pastilla de freno reemplazada se pudo corroborar el desgaste presentado en las mismas zonas mencionadas.
- Al realizar el estudio del desgaste de neumáticos se determinó que el neumático de la posición P3 tuvo el mayor desgaste del 59.94% habiendo recorrido el bus articulado 10770 Kilómetros debido a que se encontraba el neumático en el eje posterior donde se ubican los motores eléctricos.
- En el análisis del desgaste de los neumáticos se pudo observar que en la posición P1 y P2 que corresponden al eje delantero se obtuvo una profundidad de 13,22 y de 13,39 mm respectivamente siendo estas posiciones con un mayor porcentaje de conservación del neumático que corresponde al 79.42% para P1 y el 82.32% para P2.
- Tomando en cuenta los parámetros tales como el tiempo de frenado de 1.46 segundos, la desaceleración del vehículo de 8,63 m/s², la inclinación de la pendiente de la carretera de -12° y un coeficiente de adherencia de 1 se obtuvo

una eficiencia de frenado del 88%, siendo un valor aceptable ya que debe tener por lo menos 80% para que sea seguro y confiable.

7.2. Recomendaciones

- Los parámetros de funcionamiento como velocidad, desplazamiento, distancia de frenado y dimensiones de los componentes son fundamentales para el análisis y comprobación de resultados.
- Para la conducción cuando el vehículo se encuentra con más del 90% de la carga de batería es necesario conocer que los motores generadores no obtienen la energía del freno regenerativo por lo cual solo es utilizado el frenado por fricción.
- Para un correcto funcionamiento de los frenos y para medidas de seguridad e inspección del material de fricción, se recomienda un mantenimiento preventivo del sistema cada 15000 Km.
- Para el análisis estructural del sistema de frenos se recomienda tomar en cuenta mayor cantidad de parámetros en cuanto a la temperatura de funcionamiento por ejemplo el flujo de aire que interactúa con el disco de freno, ya que difiere de la medición real.
- Para evitar un desgaste pronunciado de los neumáticos del eje posterior se recomienda utilizar neumáticos específicos de eje motriz ya que de esta manera se tendría una vida útil más prolongada de los neumáticos en esta posición.
- Para llevar a cabo las mediciones de los sistemas se recomienda tomar los datos en condiciones similares considerando para el caso del conteo de pasajeros los horarios, las rutas establecidas y los días regulares.

- Se recomienda realizar 3 mediciones diferentes para verificar el desgaste de los neumáticos en el eje delantero debido a que al ser directrices presentan un desgaste no proporcional en su banda de rodadura, no así en los ejes restantes en donde se recomienda realizar una sola medición en cada neumático.
- Se recomienda realizar una alineación, balanceo y rotación de los neumáticos cada 10000 Km, para prevenir el deterioro prematuro y tener un rendimiento óptimo.
- La presión debe medirse y reponerse con los neumáticos fríos para tener una medición correcta y veraz, según lo especificado por el fabricante.
- Para el reemplazo de las pastillas de freno se debe tomar en cuenta que estas no deben sobrepasar el límite de funcionamiento recomendado que es de 2mm en el material de fricción.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Borja, J., Fenoll, J., & Seco de Herrera, J. (2009). *Sistema de transmisión y frenado*.

Macmillan Iberia, S.A.

Bridgestone. (2018). *Data Truck Tire*. Recuperado el 25 de abril del 2019. Obtenido de

<https://commercial.bridgestone.com/content/dam/bcs-sites/bridgestone-ex/products/Databooks/TBR/Bridgestone-TBR-DataBook-08-07-2018.pdf>

BYD-Ecuador. (2018). *BYD e-Motors Ecuador*. Recuperado el 27 de abril del 2019.

Obtenido de <https://bydelectrico.com/buses-electricos/bus-electrico-k11a/>

Castillo, M., & Serrano, D. (10 de Junio de 2018). 240 vehículos eléctricos circulan en

Ecuador. *El Comercio*.

Di Rado, G., Presta, D., & Devincenzi, G. (2016). Modelo de simulación de desaceleración

de un automóvil utilizando freno por fricción. *Mecánica Computacional Vol XXXIV*, 2755-2766.

Doblado, J. A. (2017). *Vehículos eléctricos e híbridos*. Madrid: Paraninfo,SA.

Domínguez, E., & Ferrer, J. (2012). *Elementos y piezas del sistema de frenos (Sistemas*

de transmisión y frenado). EDITEX.

Drexler, C., & Leiter, R. (2014). Brake Systems, an Overview. *Encyclopedia of Automotive*

Engineering.

Escobar, C., Martínez, J., & Téllez, G. (2005). *Control de un motor Brushless DC con*

frenado regenerativo. Bogotá.

Font Jaumandreu, M. (2014). *Estudio de la relación del conjunto neumático-llanta de un automóvil, con el consumo energético y la seguridad vial*. Barcelona.

Fraemma. (2019). *Fraemma*.

García, & Flórez. (2018). *Análisis termodinámico de un disco de freno*.

García, R., Acosta, M., & Solano, E. (2014). *Análisis del comportamiento de los frenos de disco de los vehículos a partir de la aceleración del proceso de corrosión*.

García, R., Echavez, R., & Flórez-Solano, E. (2018). Análisis termodinámico de un disco de freno automotriz con pilares de ventilación tipo NACA 66-209. *INGE CUC*, 9-18.

Granell, A. (2019). *Red Operativa de Desguaces Españoles*. Recuperado el 15 de septiembre del 2019. Obtenido de <https://www.ro-des.com/mecanica/discos-freno-funcionamiento-mantenimiento/>

Impormel. (2019). *Mercado Libre*.

Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (1999). *Fundamentos de la Transferencia de Calor* 4ª Ed. Mexico, D.F.: Prentice Hall.

INEN. (1984). *Frenos neumáticos, presiones en cañerías y eficiencia del frenado*.

INEN. (2009). *VEHÍCULOS AUTOMOTORES – REVESTIMIENTOS DE FRENO - MÉTODO DE ENSAYO DE LA DEFORMACIÓN POR COMPRESIÓN*. Quito.

INEN, N. (2009). *VEHÍCULOS AUTOMOTORES. REVESTIMIENTO PARA FRENOS MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA INTERNA AL CORTE*. Quito.

INEN-ISO. (2009). *VEHÍCULOS AUTOMOTORES – REVESTIMIENTOS DE FRENO - MÉTODO DE ENSAYO DE LA DEFORMACIÓN POR COMPRESIÓN*. Quito.

Instruments, P. (2015). *Manual de Instrucciones Termómetro por Infrarrojos PCE-889A*. Santiago de Chile.

Lillo, S. (2006). *Comportamiento termomecánico en un disco de freno macizo y uno auto-ventilado*. Valdivia.

Limpert, R. (1999). Brake design and safety. En *Temperature Analysis* (pág. 112). Pennsylvania: SAE.

Luque, P., Álvarez, D., & Vera, C. (2004). *Ingeniería del automóvil: sistemas y comportamiento dinámico*. Madrid: Thomson.

Martín, J. C. (2007). *Mecánica del automóvil actual*. Zaragoza: Reverte.

Méndez, A., Cely, M., & Monar, W. (2016). Diseño del Sistema de Freno Regenerativo de Automóviles Híbridos. *Revista Politécnica*.

Michelin. (2017). *Conauto*. Recuperado el 30 de junio del 2019. Obtenido de <http://www.conauto.com.ec/>

Michellin. (2019). *Consejos- guías de neumático*. Recuperado el 15 de agosto del 2019. Obtenido de <https://camion.michelin.es/Consejos/Gu%C3%ADa-del-neum%C3%A1tico>

Mitutoyo. (2011). *Tire Tread Depth Gauge User's Manual*.

OMP. (2019). *Amazon*. Recuperado el 18 de octubre del 2019. Obtenido de <https://www.amazon.es>

Paredes, & Sánchez. (2008). *Eficiencia en tiempo de vida de neumáticos con relación a rotación de posiciones uno y dos en volquetes Komatsu 930 E-3*. Lima.

Puiggrós, C. D. (2016). Cálculo del porcentaje de conservación y desgaste de neumáticos. *Skopein*, 10-12.

Ramírez, J. (2017). *ESTUDIO DE LA DINÁMICA DE TRACCIÓN DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO*. Pereira.

Rodriguez Luque, P., Alvarez, D., & Vera, C. (2005). *Ingeniería del automóvil: sistemas y comportamiento dinámico*. Madrid: Paraninfo.

Textar. (12 de 2015). Recuperado el 3 de mayo del 2019. Obtenido de <https://textar.com/>

Venegas, W. (2012). *Análisis por el método de elementos finitos de un disco de freno con sistema de mordaza*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.

Venegas, W. (2012). *Análisis por el método de elementos finitos de un disco de freno con sistema de mordaza*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.

ANEXOS



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo de investigación fue desarrollado por los señores **TERÁN TERÁN, DANIEL ALEJANDRO** y **CHICO TERÁN, MANUEL ALEJANDRO**.

En la ciudad de Latacunga a los 28 días del mes de Noviembre del 2019.

Aprobado por:




ING. MAURICIO CRUZ ARCOS
DIRECTOR DEL PROYECTO



ING. DANILO ZAMBRANO LEÓN
DIRECTOR DE CARRERA




ABG. DARWIN ALBÁN
SECRETARIO ACADÉMICO