



ESPE
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
CAMINO A LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

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

ING. MAURICIO CRUZ
DIRECTOR DE TESIS



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.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 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.



JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

El objetivo principal del vehículo eléctrico es la reducción de emisión de gases contaminantes especialmente en transporte público

Se busca determinar la eficiencia y rendimiento de los materiales usados en el sistema de frenos y de neumáticos y así establecer y durabilidad de los componentes que intervienen en dichos sistemas

Establecer una vida útil de los sistemas a partir del estudio e investigación debido al desgaste que se presenta en condiciones normales de funcionamiento

Mejoras en los materiales involucrados en el sistema mediante revisiones periódicas para garantizar seguridad a los ocupantes



METAS

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

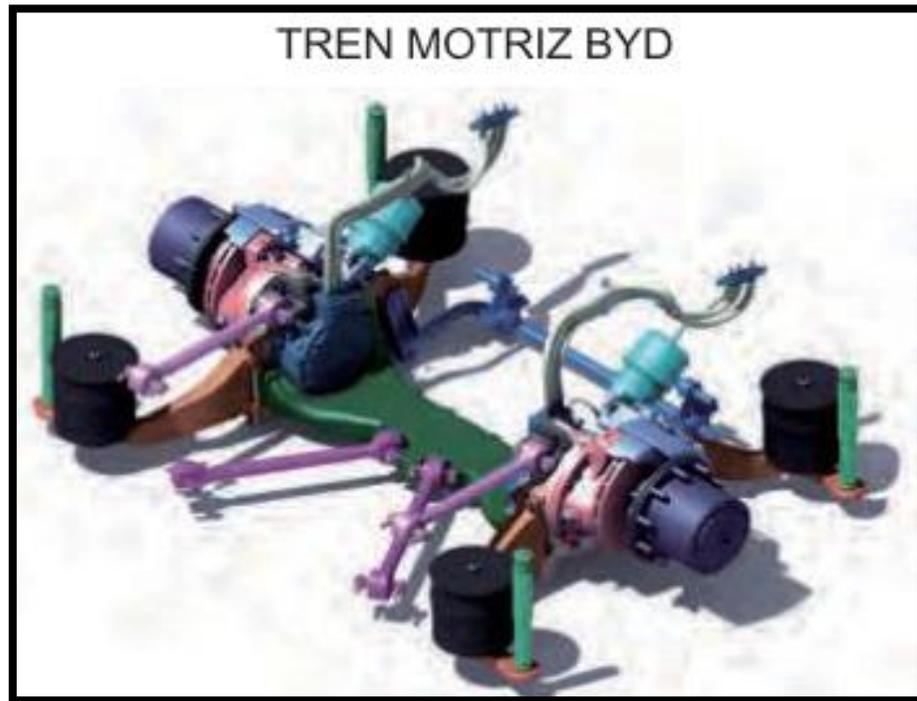
Determinar los materiales de composición de las pastillas de freno mediante pruebas de laboratorio.

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

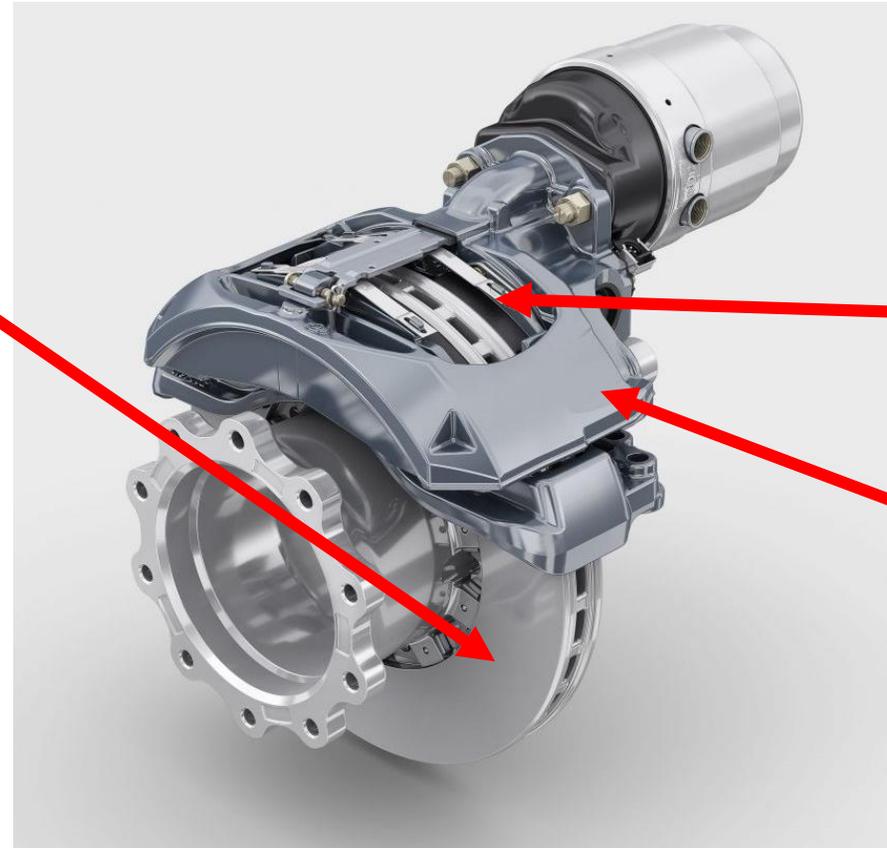


BYD K11A



PRINCIPALES COMPONENTES DEL SISTEMA DE FRENOS

Disco de freno



Pastillas de freno

Mordaza o cáliper



PASTILLAS DE FRENO Y DISCO DE FRENO

- MATERIAL DE LA PASTILLA DE FRENO: TEXTAR T7400
- NIVEL DE FRICCIÓN PASTILLA DE FRENO: MEDIO (0,31-0,34 μ)
- MATERIAL DISCO DE FRENO DE HIERRO FUNDIDO



TEXTAR
BRAKE TECHNOLOGY

CAST IRON MEETS ALUMINIUM

Two-piece composite brake discs



The two-piece Textar brake discs are another innovative product in the Light Technology range of TMD Friction. Each consist of a top hat and a friction ring, which are connected by means of rivets. By using aluminium for the top hat, weight savings of 15-20 percent can be achieved.

With the new composite brake discs, Textar offers to the aftermarket the innovative benefits of two-piece brake discs, which are also used in the original equipment sector:



NEUMÁTICOS: MICHELIN X 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)

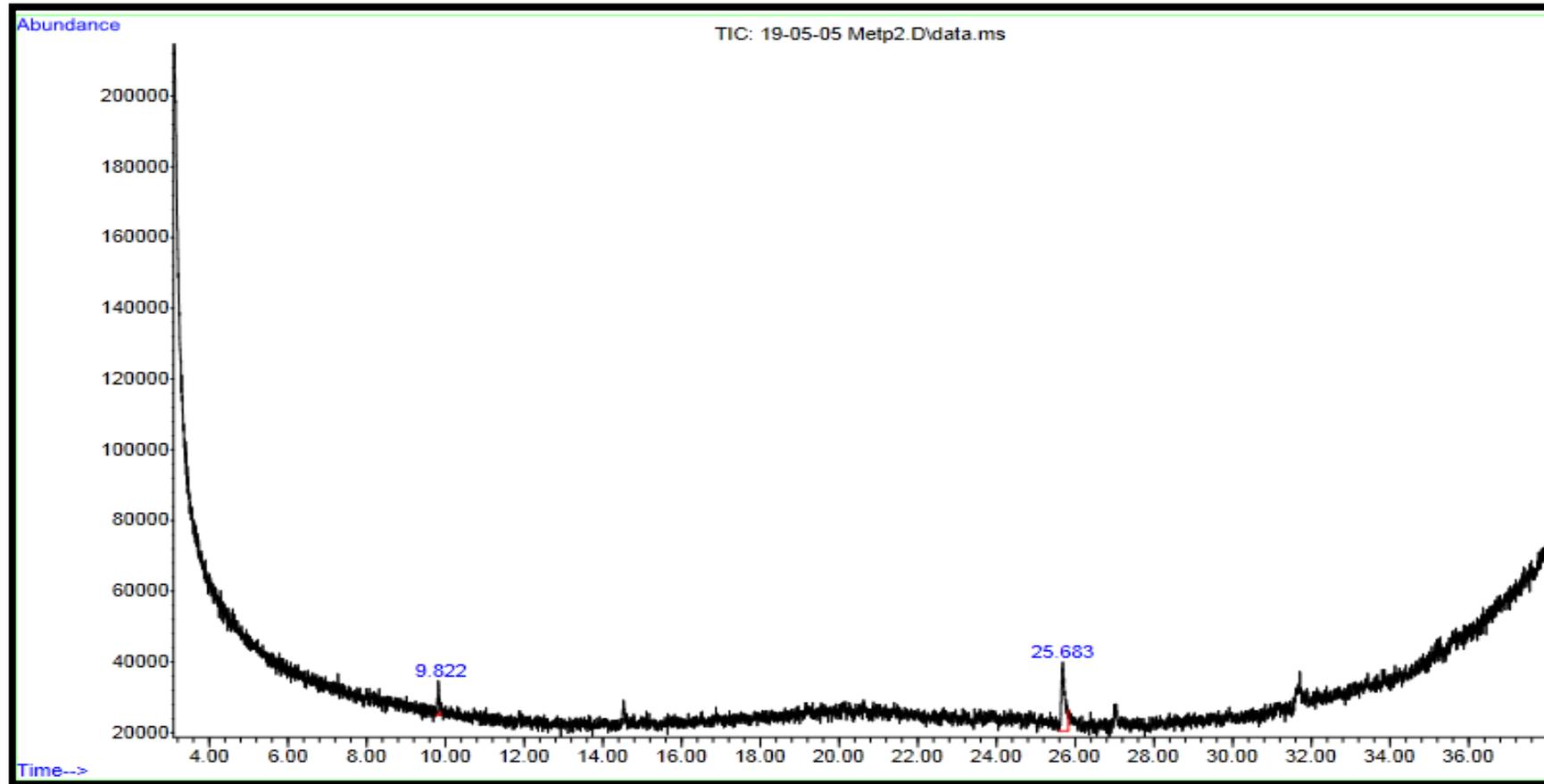


ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL MATERIAL DE FRICCIÓN DE LAS PASTILLAS DE FRENO

- Prueba de cromatografía
- Manual del fabricante
- Pruebas NTE INEN-ISO 6310:2009
- Pruebas NTE INEN-ISO 6311:2009

PRUEBA DE CROMATOGRAFÍA



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

MANUAL DEL FABRICANTE

2. COMPOSITIONAL INFORMATION

This non-asbestos friction material is a multi-ingredient system with resins and caoutchouc as a binding agent in a cured and vulcanised form.

CAS-No	EU rules	Term	Content	Unit	Character Letter	R-/S- Phrases
7440-50-8	Copper		9	m%	Not applicable	Not applicable

When handling friction liners fine dusts with harmful substances can be released especially when carrying out mechanical finishing work during maintenance work.



TEST CONDITIONS: Caliper: SB/SN 7
Axle Rating: 20,000 lb
Rolling Radius: 19.2 inch
Air Chamber T24

PHYSICAL PROPERTIES:

Density	3.1 g/cm ³
Compressibility	90-140 μm
Shear Strength	7.0-9.0 N/mm ²



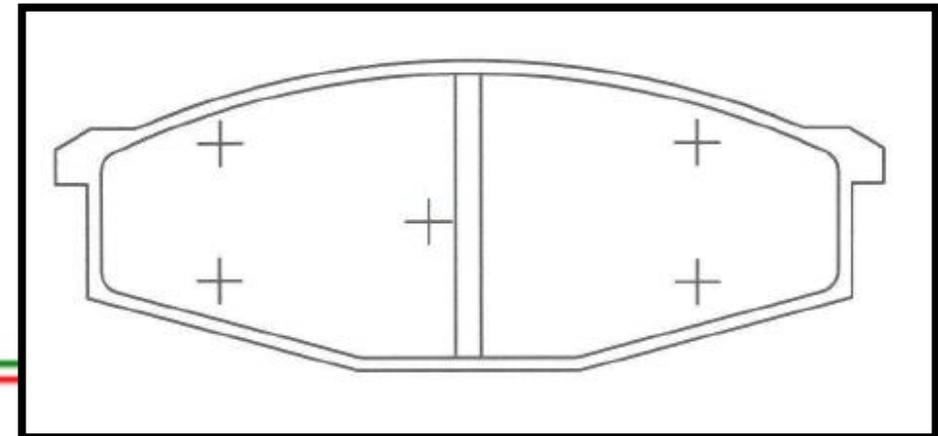
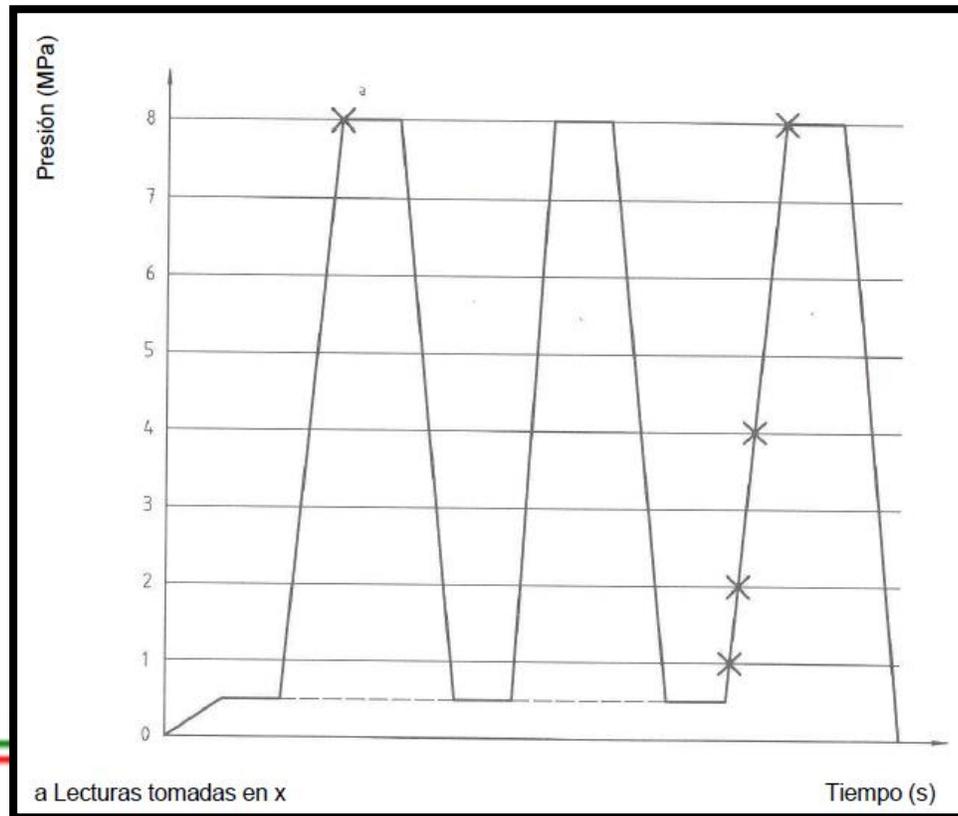
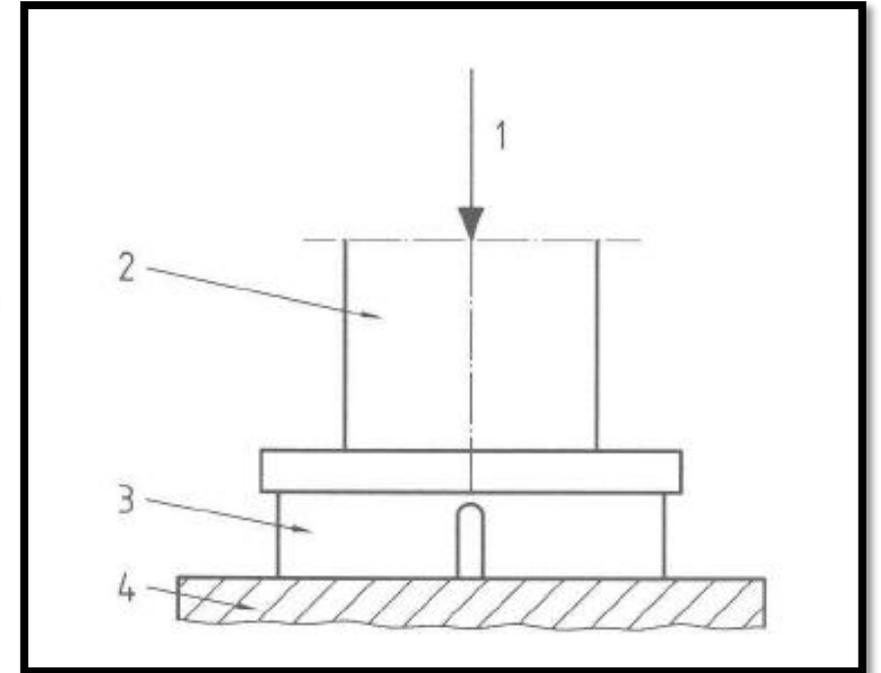
NORMA NTE INEN-ISO 6310: MÉTODO DE ENSAYO DE LA DEFORMACIÓN POR COMPRESIÓN

- Es un importante parámetro de diseño en la evaluación del desplazamiento del volumen del fluido de freno, recorrido del pedal del freno y la propensión a la vibración o ruido.
- La deformación por compresión es la relación entre la reducción en 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)



CONDICIONES DEL ENSAYO

- 1- CARGA
- 2-PISÓN
- 3-MUESTRA DE ENSAYO
- 4-PLACA DE CALENTAMIENTO



MATERIALES PARA EL ENSAYO



RESULTADOS PRUEBA DE DEFORMACIÓN POR COMPRESIÓN. MUESTRA 1

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

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

RESULTADOS PRUEBA DE DEFORMACIÓN POR COMPRESIÓN. MUESTRA 2

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

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

NORMA NTE INEN-ISO 6311: MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA INTERNA AL CORTE

- Mientras se frene bajo condiciones normales de servicio, un esfuerzo de corte es generado en el material de fricción de las pastillas de freno de disco.
- Esta norma tiene por objeto establecer el método de ensayo para determinar la resistencia interna al corte de los materiales de fricción

MATERIALES PARA EL ENSAYO



PREPARACIÓN DE LA MUESTRA: DIMENSIONES DE LA PROBETA

Largo	20 mm ± 0,1 mm
Ancho	20 mm ± 0,1 mm
Espesor	5 mm ± 0,1 ó 10 mm ± 0,1 mm

Fuente: Norma NTE INEN – ISO 6311:2009

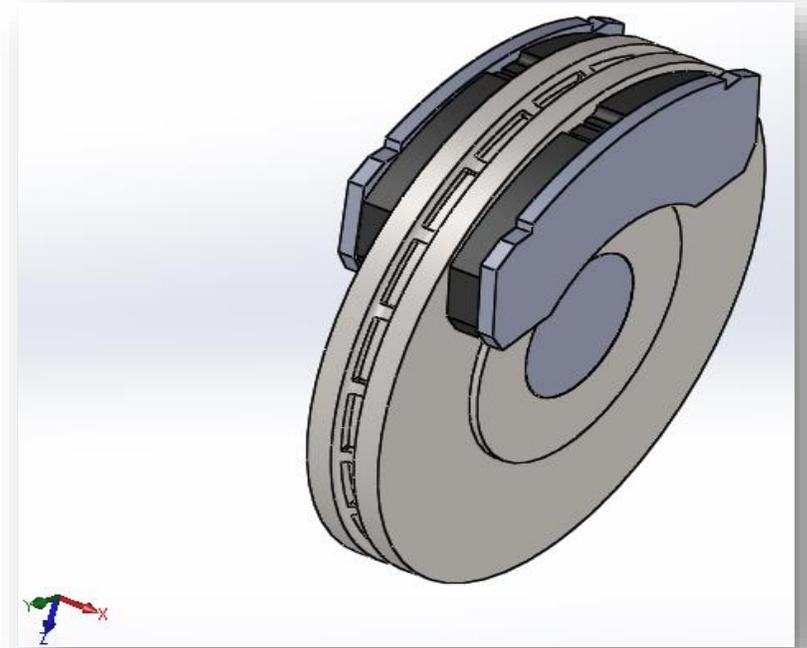
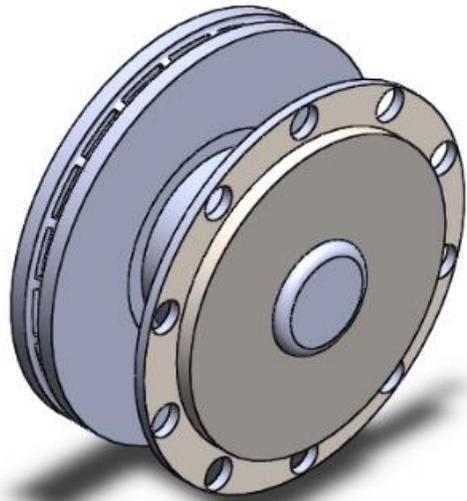
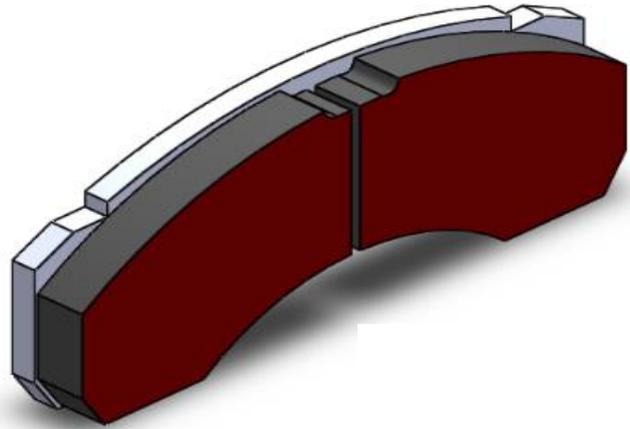


RESULTADOS PRUEBA DE RESISTENCIA INTERNA AL CORTE

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



SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE FRENOS



TEMPERATURA DEL DISCO

- Cálculo de la temperatura
- Medición de la temperatura
- Simulación de la temperatura

CÁLCULO DE LA TEMPERATURA EN EL DISCO DE FRENO

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

$$T = 159.04^{\circ}C$$

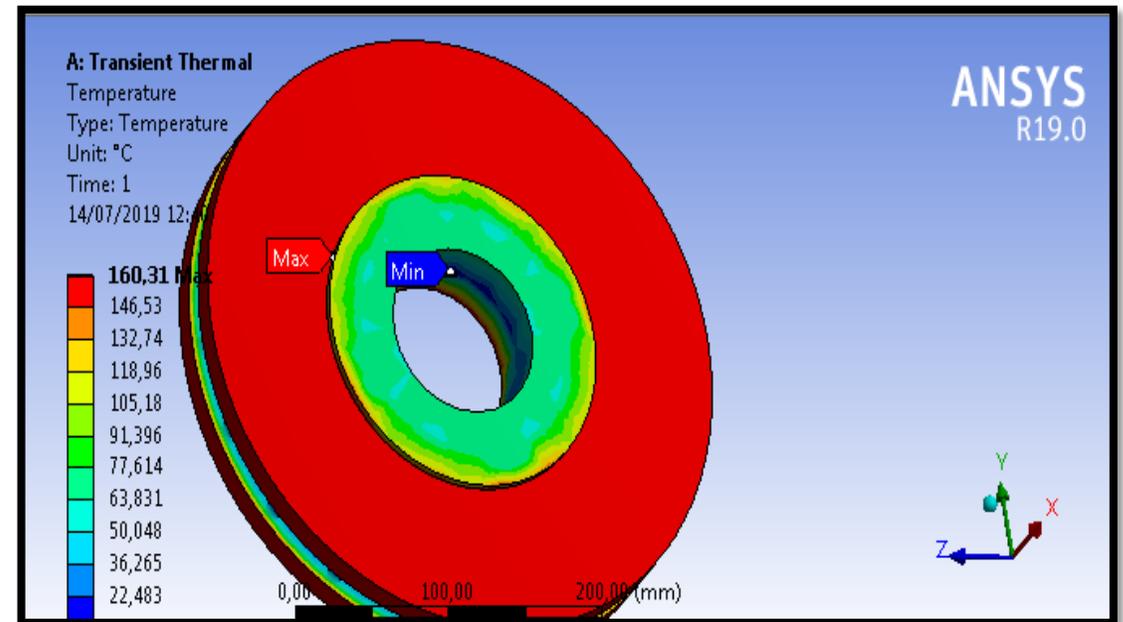
Par de rozamiento	40465,48 J/rad
Velocidad angular	15.97 rad/s
Tiempo de frenado	6s.
Masa del disco de freno	58 kg
Calor especifico del disco de freno	482,5 J/Kg°C
Temperatura inicial del disco de freno	20,5°C
Coeficiente de convección del disco de freno	4x10-5 W/mm ² °C
Área de convección del disco de freno	18447 mm ²
Temperatura ambiente	20,5°C

CONTRASTE CON LA SIMULACIÓN Y MEDIDA EN EL DISCO DE FRENO

Temperatura medida en el disco



Temperatura obtenida en la simulación



A: Transient Thermal

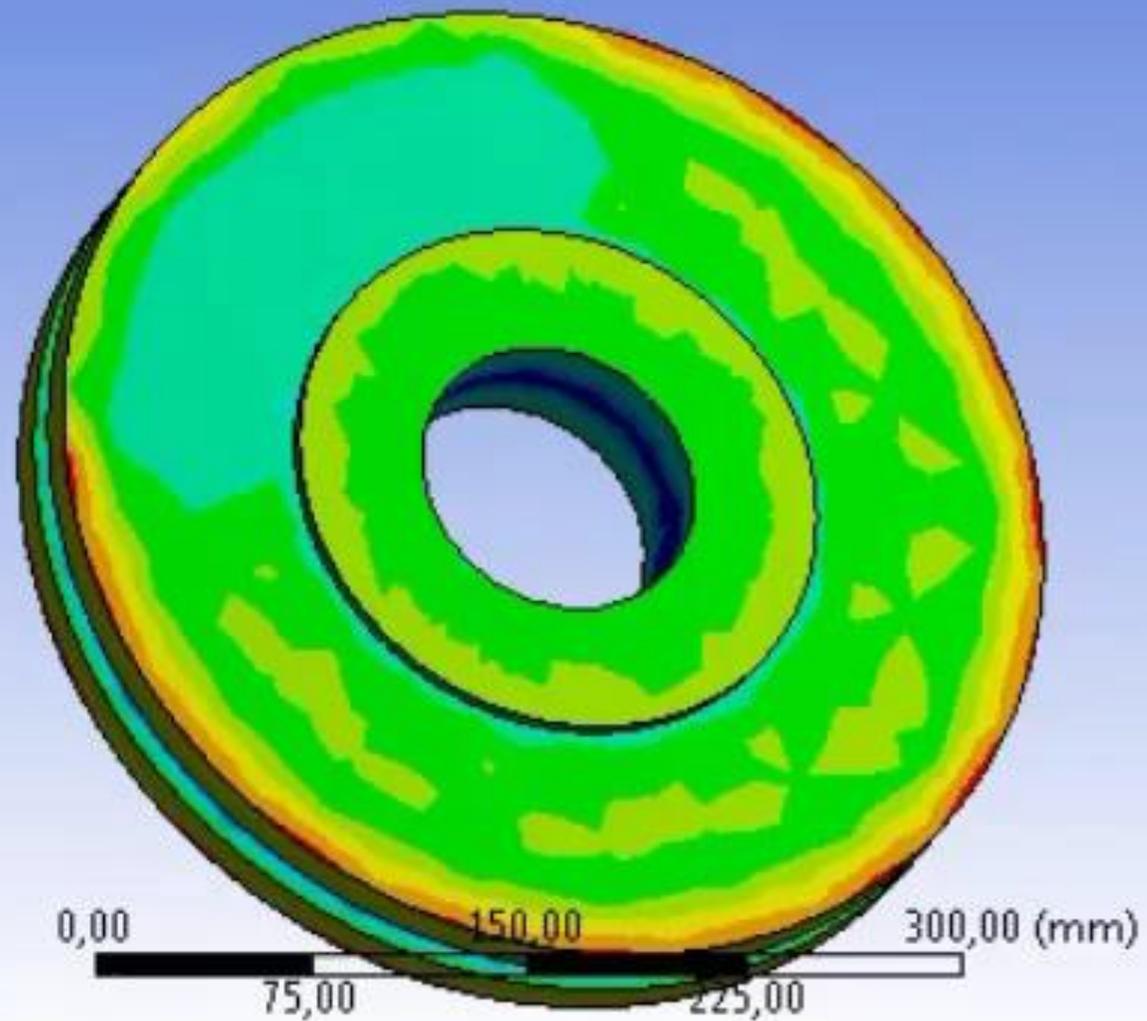
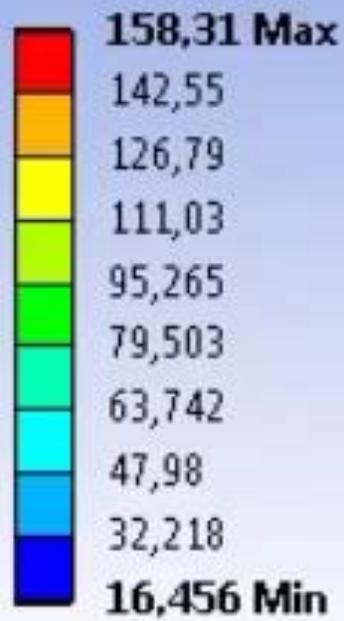
Temperature

Type: Temperature

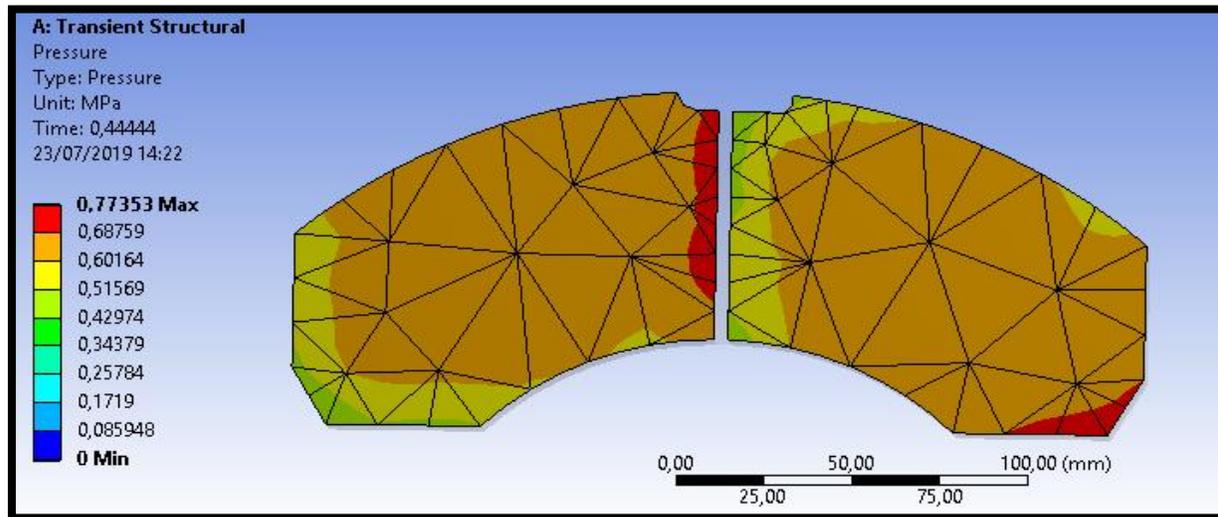
Unit: °C

Time: 2

21/11/2019 12:11



DISTRIBUCIÓN DE LA PRESIÓN EN LA PASTILLA DE FRENO



B: Pastilla bien

Directional Deformation

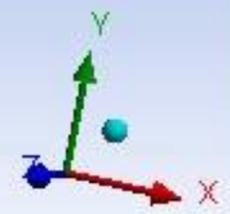
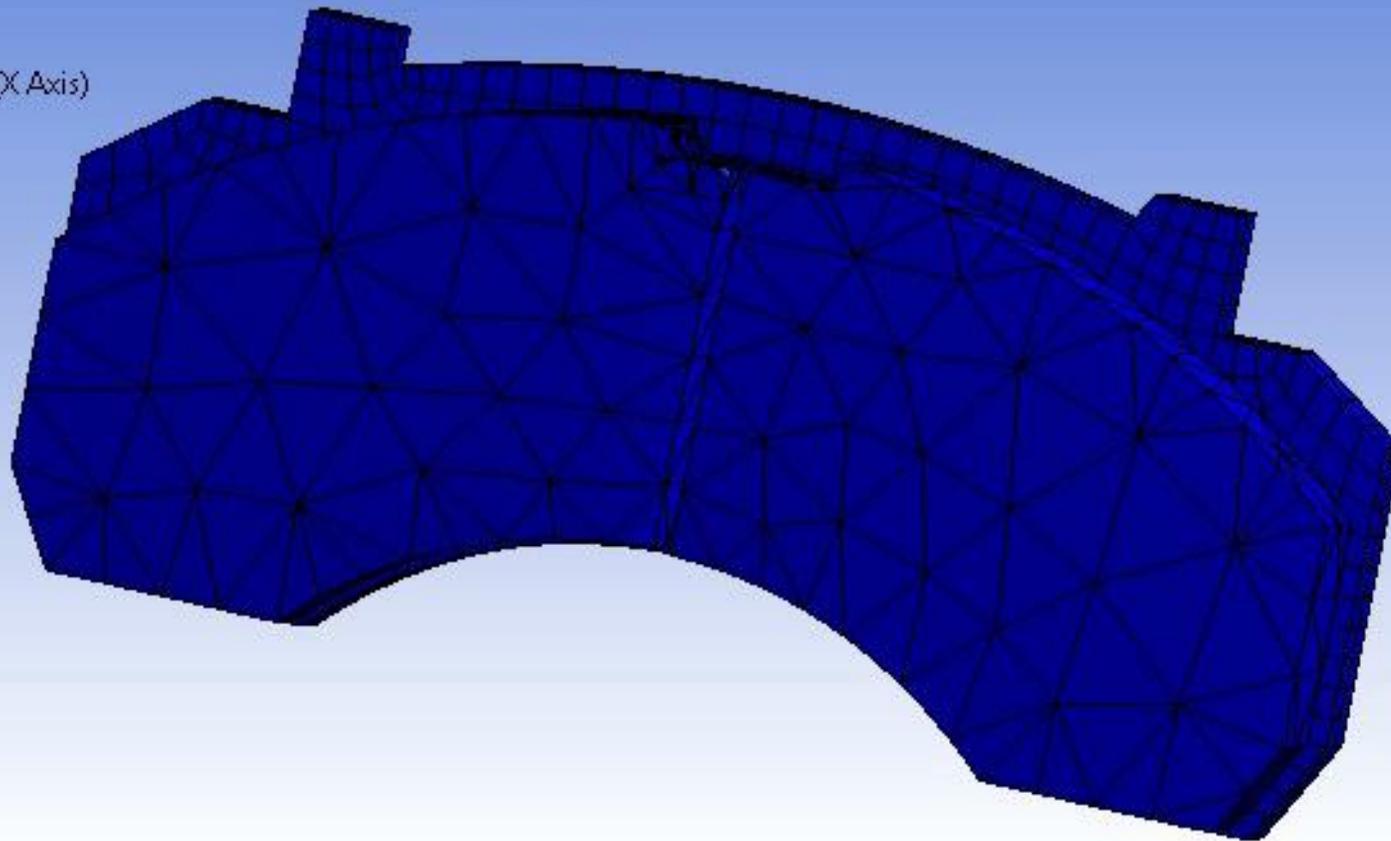
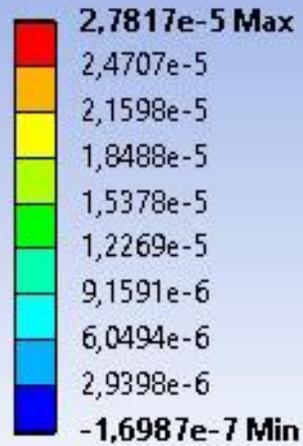
Type: Directional Deformation(X Axis)

Unit: mm

Global Coordinate System

Time: 0,11111

21/11/2019 19:53



Geometry | Print Preview | Report Preview

Animation | Messages

Graph

Animation 10 Frames 2 Sec (Auto)

Tabular Data

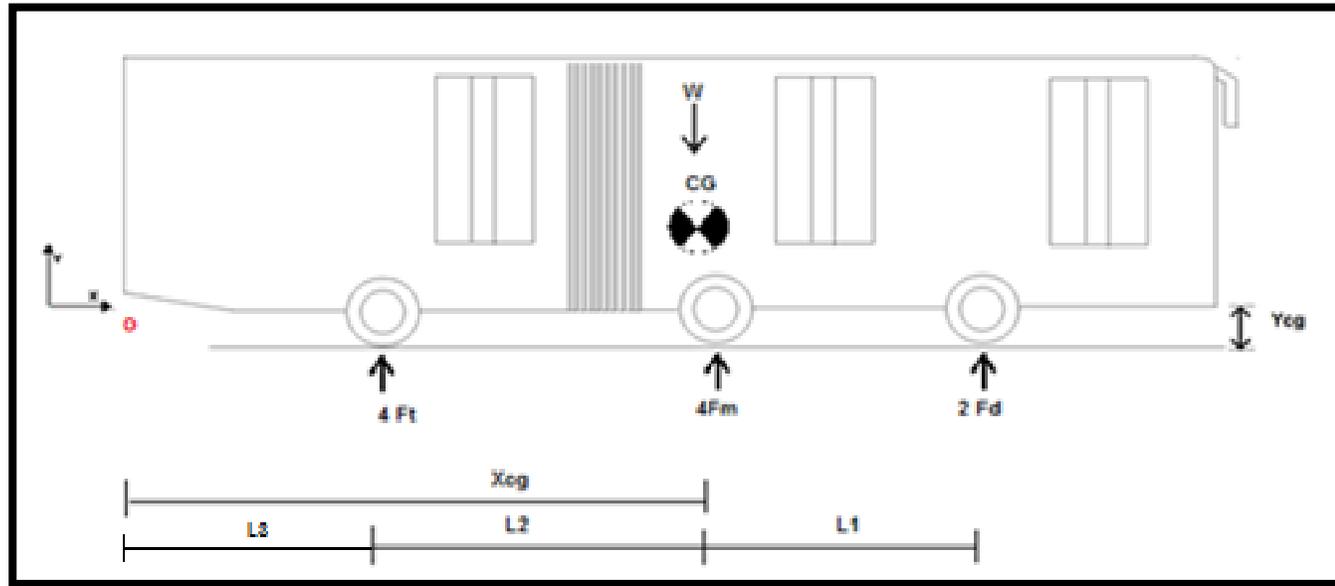
Time [s]	<input checked="" type="checkbox"/> Minimum [mm]	<input checked="" type="checkbox"/> Maximum [mm]
1 1,	-1,6987e-007	2,7817e-005



PARÁMETROS PARA EL CÁLCULO DE DESGASTE DE LOS NEUMÁTICOS

- Análisis de carga en el vehículo
- Distribución de carga por ejes
- Análisis de la ruta de prueba
- Análisis de resultados

ANÁLISIS DE CARGA EN EL VEHÍCULO



$$Ft = \frac{W * Xcg - 4Fm(L3 + L2) - 2Fd * (L1 + L2 + L3)}{4(L3)}$$

$$Fm = \frac{mg - 2Fd - 4Ft}{4}$$

$$Fd = \frac{mg - 4Fm - 4Ft}{2}$$



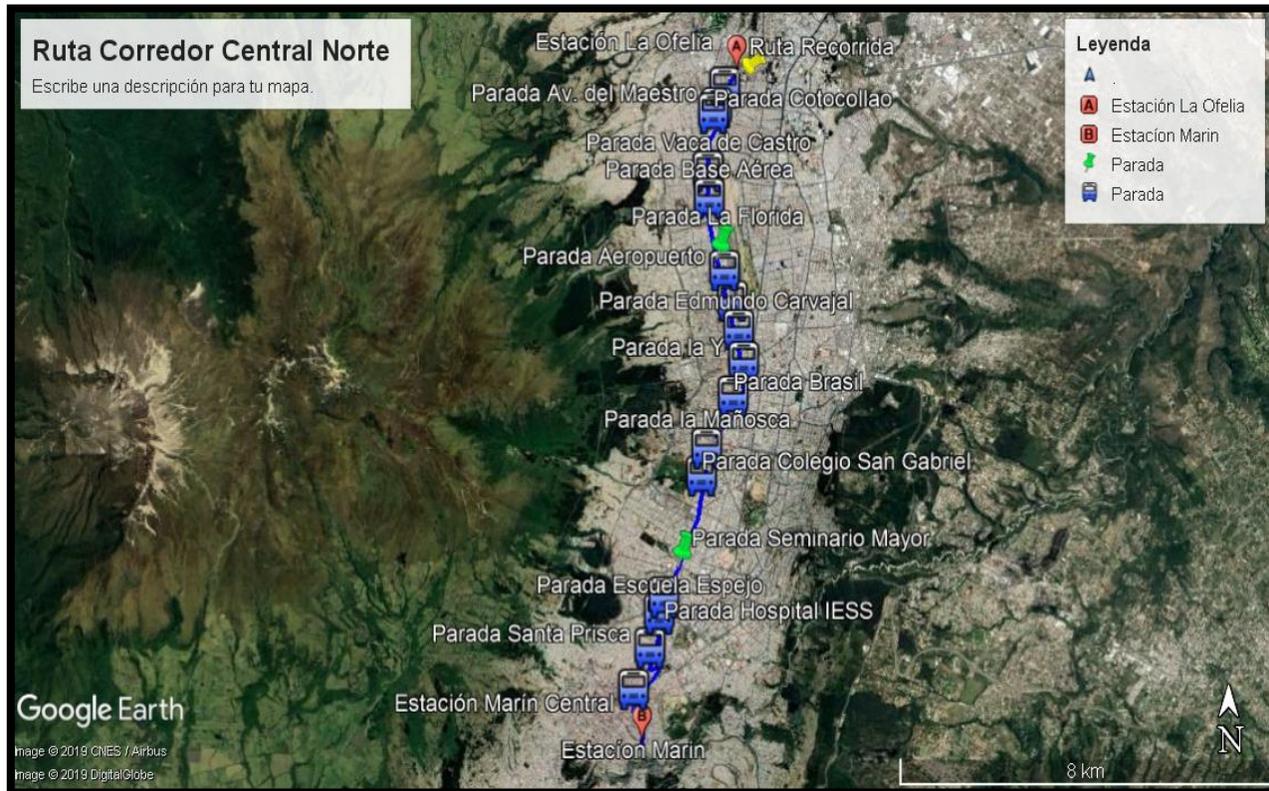
VALORES DE CARGA Y DISTRIBUCIÓN DE CARGA POR EJES

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



RUTA DE OPERACIÓN DEL BUS BYD K11A



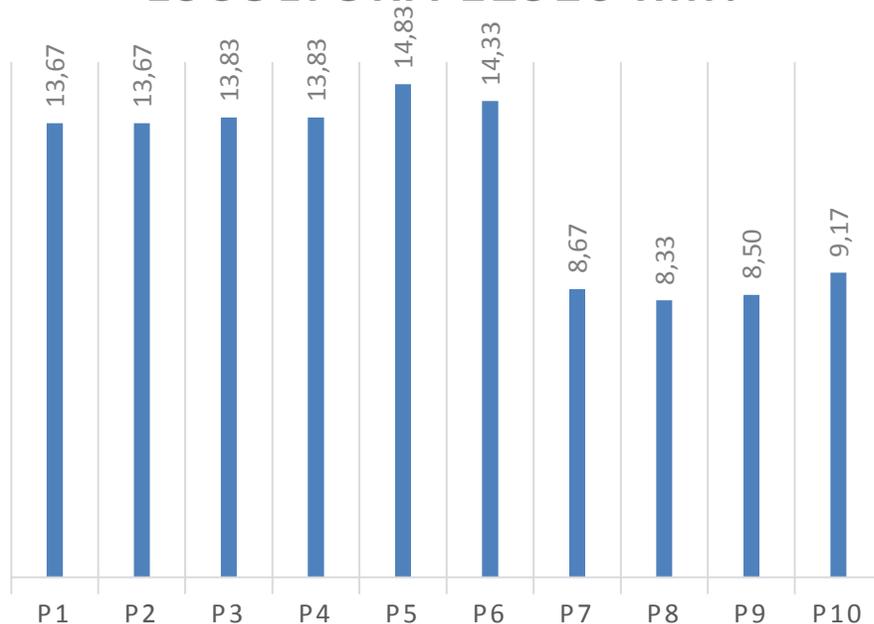
- De lunes a viernes.
- Ocho vueltas diarias
- Terminal “La Ofelia” estación “Playón de la Marín” .
- El marcador de color verde. en las paradas donde se registraron las medidas.

Fuente: Corredor Central

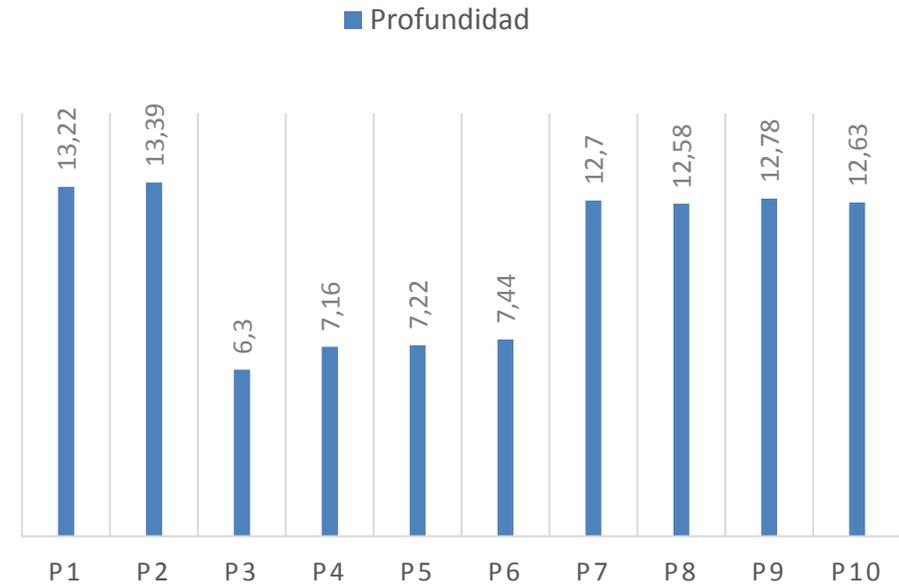
Resultados del análisis del desgaste de neumáticos

Desgaste con carga muerta con 5966 Km. recorridos

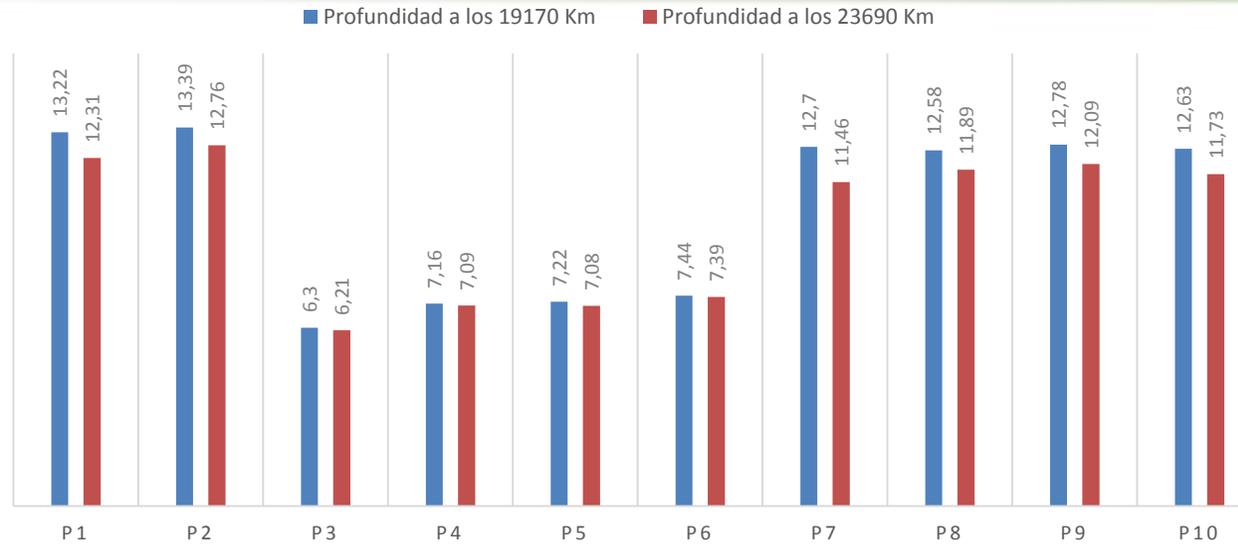
**PROFUNDIDAD DE LA
ESCULTURA 12920 KM.**



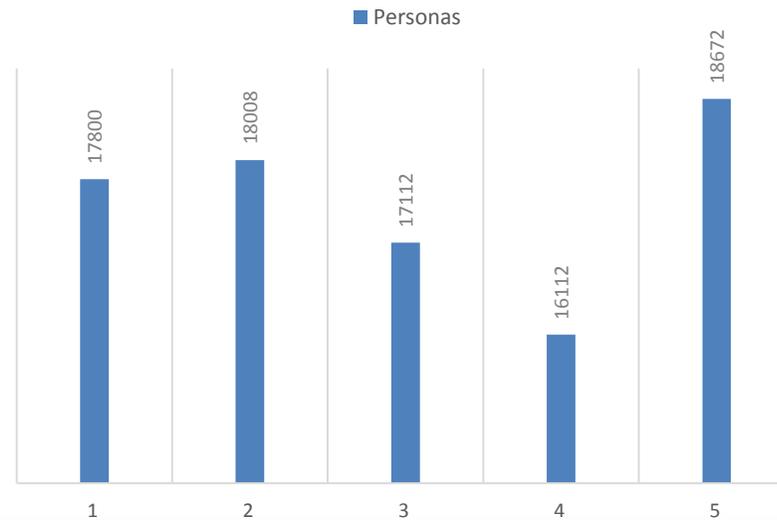
**PROFUNDIDAD DE LA
ESCULTURA 18886 KM.**



TOTAL DESGASTE EN EL PERÍODO DE ESTUDIO



NÚMERO DE PASAJEROS MENSUAL



CONCLUSIONES

- 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 $8,63 \text{ m/s}^2$, 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.

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.



ESPE
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
CAMINO A LA EXCELENCIA

GRACIAS

