

TRANSFERENCIA DE CALOR DE ESTADO INESTABLE EN FORROS PARA FRENOS

RESUMEN

Este artículo presenta una metodología para analizar el comportamiento térmico de forros para frenos, elementos que operan bajo procesos de transferencia de calor inestable. Se establecen la teoría y las pruebas experimentales necesarias para calcular la difusividad térmica, determinar los perfiles de temperatura y calcular el flujo de calor. Se realiza la comparación de resultados con las recomendaciones de la literatura del sector automotriz, planteando a la industria técnicas cuantitativas para evaluar el desempeño térmico de los elementos de frenado. Esta metodología puede ser aplicada para el análisis de cualquier material sólido con conducción de calor en estado inestable.

PALABRAS CLAVES: Frenos, Calor, Estado Inestable, Difusividad Térmica.

ABSTRACT

This article presents a methodology to analyze the thermal performance of the brakes lining, elements which operates under transient heat-transfer process. The necessary theory and experimental tests for the thermal diffusivity calculation, temperature profiles determination and heat flow calculation are established. Results are compared with the automotive literature recommendations in order to carry out in the industry quantitative techniques to evaluate the thermal performance of the brakes elements. This methodology may be applied to analyze any solid material with conduction of heat in the unsteady state.

KEYWORDS: Brakes, Heat, Unsteady State, Thermal Diffusivity.

1. INTRODUCCIÓN

Los forros para freno (pastilla, banda o bloque) deben ser lo suficientemente permeables al calor, ya que durante el frenado se presentan exigencias de origen térmico que se manifiestan como deformaciones en los elementos metálicos del sistema y riesgos de cristalización y falla en los forros, debido a las altas temperaturas que se pueden generar.

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

En este artículo, resultado de un trabajo de investigación de maestría, se plantea la metodología teórica para el cálculo de la difusividad térmica y la determinación del calor disipado en un lapso de tiempo típico de frenado. Seguidamente, se aplica la metodología a dos composiciones de pastillas (*MM1-02* y *MA-102*) de una

YAMID ALBERTO CARRANZA SANCHEZ

Ingeniero Mecánico, Universidad Tecnológica de Pereira.
Magíster en Ingeniería Mecánica, Universidad de los Andes.

Profesor Tiempo Completo
Universidad de Pamplona.
ycarranza@unipamplona.edu.co

RAFAEL BELTRAN PULIDO

Ingeniero Mecánico, Universidad de los Andes.
M. Sc. In Mechanical and Aerospace Engineering, University of Delaware, USA.

Profesor Titular
Universidad de los Andes.
rbeltran@uniandes.edu.co

marca en particular¹ arrojando resultados útiles para la predicción de mejoras y el fortalecimiento del pilar de desarrollo de nuevos productos por parte de las empresas fabricantes.

2. MODELOS TEORICOS PARA LA DETERMINACION DE LA DIFUSIVIDAD TERMICA Y LA TRANSFERENCIA DE CALOR

2.1 Modelo Teorico para la Determinacion de la Difusividad Termica

La medición de la difusividad térmica α es realizada aplicando la teoría desarrollada por los ingenieros Yoshihiro Iida y Haruhiko Shigeta [3]. Esta teoría se fundamenta en el método de la transformada de Laplace para solucionar la ecuación de conducción de calor y presenta la ventaja de satisfacer variadas condiciones de frontera.

El principio de medición se describe a continuación, siendo aplicado a una probeta de espesor L del material de interés. La ecuación de conducción está dada por:

¹ Las composiciones analizadas son de la empresa Renosa S.A., Santa fe de Bogotá.

$$\frac{\partial^2 \theta(x,t)}{\partial x^2} - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta(x,t)}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

Donde: $\theta(x,t) = T(x,t) - T(x,0)$

Aplicando la transformada de Laplace a (1) se obtiene (2):

$$\frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial x^2} - \frac{s}{\alpha} \bar{\theta} = 0 \quad (2)$$

Donde:

$$\bar{\theta} = \int_0^\infty e^{-st} \theta(x,t) dt \quad (3)$$

es la integral de Laplace.

La solución de la ecuación diferencial (2) es:

$$\bar{\theta} = Ae^{\sqrt{\frac{s}{\alpha}}x} + Be^{-\sqrt{\frac{s}{\alpha}}x} \quad (4)$$

Por lo tanto, está definida la integral de Laplace $\bar{\theta}_i$ de dos maneras: ecuación (3) y ecuación (4). La ecuación (3) tiene la particularidad de estar expresada en términos de una respuesta de temperatura en función del tiempo $\theta_i(x,t)$, la cual puede ser medida experimentalmente en cualquier punto del material analizado, ver figura 1. Tiene como incógnita el parámetro de Laplace s , el cálculo de su correspondiente valor es explicado más adelante. La ecuación (4) tiene como incógnitas los coeficientes A y B , el parámetro de Laplace s y la difusividad térmica α . El valor de x no se considera incógnita ya que es la distancia del punto i (en donde se medirá la respuesta de temperatura $\theta_i(x,t)$) respecto a una referencia.

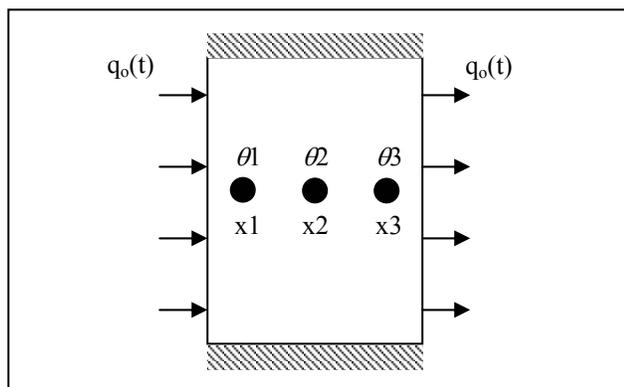


Figura 1. Principio de medición de las respuestas de temperatura sobre una probeta.

Por consiguiente, al tomar tres puntos de medición sobre la probeta, como lo indica la figura 1, se tendrán teóricamente las tres integrales de Laplace definidas por las ecuaciones (5.a), obtenidas a partir de la ecuación (4),

y experimentalmente se tendrán las respuestas $\theta_i(x,t)$, que al ser reemplazadas una a una en la ecuación (3) determinan las ecuaciones (5.b).

$$\begin{aligned} \bar{\theta}_1 &= Ae^{\sqrt{\frac{s}{\alpha}}x_1} + Be^{-\sqrt{\frac{s}{\alpha}}x_1} \\ \bar{\theta}_2 &= Ae^{\sqrt{\frac{s}{\alpha}}x_2} + Be^{-\sqrt{\frac{s}{\alpha}}x_2} \\ \bar{\theta}_3 &= Ae^{\sqrt{\frac{s}{\alpha}}x_3} + Be^{-\sqrt{\frac{s}{\alpha}}x_3} \end{aligned} \quad (5.a)$$

$$\begin{aligned} \bar{\theta}_1 &= \int_0^\infty e^{-st} \theta_1(x,t) dt \\ \bar{\theta}_2 &= \int_0^\infty e^{-st} \theta_2(x,t) dt \\ \bar{\theta}_3 &= \int_0^\infty e^{-st} \theta_3(x,t) dt \end{aligned} \quad (5.b)$$

De las ecuaciones (5.a) es posible eliminar las incógnitas A y B mediante manipulación algebraica, permitiendo relacionar estas mediante la siguiente:

$$\bar{\theta}_1 \left[\frac{X_2}{X_3} - \frac{X_3}{X_2} \right] + \bar{\theta}_2 \left[\frac{X_3}{X_1} - \frac{X_1}{X_3} \right] + \bar{\theta}_3 \left[\frac{X_1}{X_2} - \frac{X_2}{X_1} \right] = 0 \quad (6)$$

Donde:

$$X_1 = e^{\sqrt{\frac{s}{\alpha}}x_1}, \quad X_2 = e^{\sqrt{\frac{s}{\alpha}}x_2}, \quad X_3 = e^{\sqrt{\frac{s}{\alpha}}x_3}$$

La ecuación (6) es la expresión clave de este método de solución. Si se tiene un valor del parámetro de Laplace s , es posible calcular el valor de las integrales de Laplace definidas por las ecuaciones (5.b), y el valor de la difusividad térmica α puede ser entonces determinado a partir de la ecuación (6) mediante algún método de solución numérica de una ecuación. Existe una importante relación entre la integral de Laplace, ecuación (3), y el tiempo de duración de la prueba o medición experimental de las respuestas $\theta_i(x,t)$. Debido a que la parte significativa de las respuestas $\theta_i(x,t)$ está en su comportamiento transitorio, existe un valor de tiempo t_{max} tal que, en el intervalo de tiempo 0 y t_{max} , la respuesta tiene importancia transitoria, y para valores de tiempo mayores a t_{max} la respuesta se considera estable y pierde su valor experimental. La influencia de t_{max} en la integral de Laplace es que para valores mayores a t_{max} la integral de dicho rango converge a cero, debido a que la función exponencial tiende a cero a medida que el tiempo aumenta, sumándose a esto el carácter estable que toma la respuesta $\theta_i(x,t)$. Por consiguiente, dado que el área de

la integral de Laplace es despreciable para valores de tiempo entre t_{max} e ∞ , es posible expresar una aproximación de las integrales de Laplace (5.b), mediante:

$$\begin{aligned} \bar{\theta}_1 &= \int_0^{t_{max}} e^{-st} \theta_1(x,t) dt \\ \bar{\theta}_2 &= \int_0^{t_{max}} e^{-st} \theta_2(x,t) dt \\ \bar{\theta}_3 &= \int_0^{t_{max}} e^{-st} \theta_3(x,t) dt \end{aligned} \quad (7)$$

Una vez se tiene el valor t_{max} (por estimación a partir de pruebas), el parámetro de Laplace se determina mediante uno de los aportes esbozados en los análisis de Iida y Shigeta, la relación entre el parámetro de Laplace s y el tiempo máximo de medición experimental t_{max} :

$$8 \leq s * t_{max} \leq 12 \quad (8)$$

Por lo tanto, teniendo el valor de t_{max} y s se procede a evaluar las integrales de Laplace (7) y a solucionar la ecuación (6) para el cálculo de α .

2.2 Modelo Teorico Para la Determinacion el Flujo de Calor

Una cuantificación aproximada del flujo de calor que se disipa a través del forro para frenos ha sido planteada para evaluar de esta manera el desempeño térmico del mismo. La transferencia de calor en el forro para frenos ha sido calculada mediante la siguiente ecuación [1]:

$$Q = KA \int_0^t \left[\frac{\partial \theta}{\partial x} \right]_{x=0} dt \quad (9)$$

Donde K es la conductividad térmica del material y es hallada a partir de la difusividad térmica, A es el área de la superficie de contacto del forro y varía con el tipo de automóvil, t es el tiempo durante el cual ocurre el flujo de calor y el argumento de la integral representa el gradiente de temperatura en un punto de referencia θ .

Ha sido aplicada la solución para flujo lineal de calor en un sólido limitado por dos planos paralelos con condiciones de frontera dependientes del tiempo ϕ_1 y ϕ_2 , ver figura 2. La solución $\theta(x,t)$ y el flujo de calor Q se presentan en las ecuaciones (10) y (11), respectivamente [1].

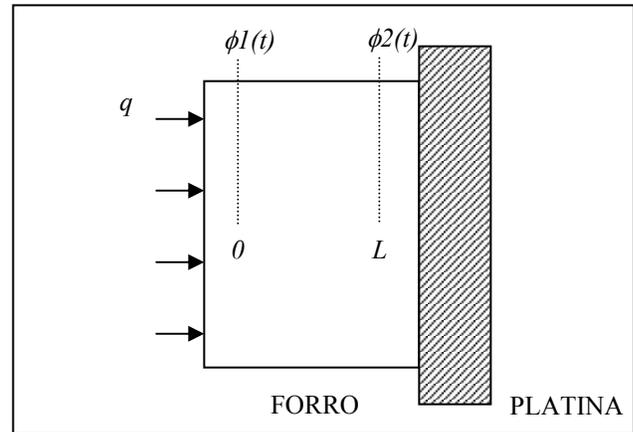


Figura 2. Flujo lineal de calor a través del forro.

La respuesta de temperatura está dada por:

$$\theta = \frac{2}{L} \sum_1^\infty \left[e^{-\alpha n^2 \pi^2 t / L^2} * \text{sen} \left(\frac{n\pi x}{L} \right) * (\beta + \mu) \right] \quad (10)$$

donde β es:

$$\beta = \int_0^L f(x') \text{sen} \frac{n\pi x'}{L} dx' \quad (10.a)$$

$f(x')$ es el perfil inicial y μ es:

$$\mu = \frac{n\alpha\pi}{L} \int_0^t e^{-\alpha n^2 \pi^2 \lambda / L^2} \left[\phi_1(\lambda) - (-1)^n \phi_2(\lambda) \right] d\lambda \quad (10.b)$$

El flujo de calor esta dado por:

$$Q = KA \sum_1^\infty \left[\frac{-2}{\alpha n \pi} e^{-\alpha n^2 \pi^2 t / L^2} * (\beta + \mu) \right] \quad (11)$$

2.3 RESULTADOS EXPERIMENTALES PARA EL CÁLCULO DEL FLUJO DE CALOR EN LOS FORROS PARA FRENO

2.3.1 Determinacion de la Difusividad Térmica

El cálculo de la difusividad se realiza mediante la ecuación (6). Se realizaron 40 pruebas sobre muestras de dos composiciones de forros: MA2-102 utilizada para la elaboración de banda para freno y MMI-02 utilizada para la elaboración de pastilla para freno. Cada muestra tiene como dimensiones 98mm (lado) x 98mm (lado) x 17 mm (espesor). Las tres respuestas de temperatura $\theta_i(x,t)$ en cada muestra se midieron con termocuplas tipo J aproximadamente a 0 mm, 8.5 mm y 17 mm,

respectivamente en el espesor, y con una profundidad en la muestra de aproximadamente 25 mm.

Esta medición fue realizada en un equipo experimental que proporciona las condiciones térmicas para producir un flujo de calor lo suficientemente unidimensional, ver figura 3.

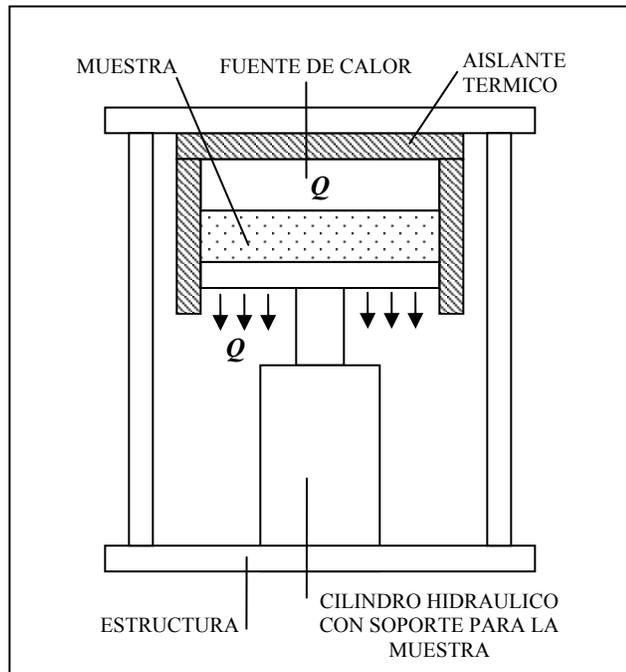


Figura 3. Esquema del equipo experimental utilizado para medir las tres respuestas de temperatura transitorias.

Para la adquisición de las tres respuestas de temperatura se utilizó el *Fluke Helios I*, el cual es un equipo para llevar a cabo la adquisición de señales y el registro de los datos correspondientes, en este caso las temperaturas a través de termocuplas tipo J. El análisis de la información, cálculo de las ecuaciones (7), fue llevado a cabo mediante el método del Trapecio con el lenguaje de programación *Matlab*. Pruebas previas se realizaron sobre una muestra de cinco probetas para las dos composiciones, con el fin de determinar el tiempo de medición experimental t_{max} , obteniendo:

$$t_{max} = 15 \text{ minutos}$$

Con t_{max} definido y asumiendo un valor de la relación $s \cdot t_{max} = 10$, se determina $s = 10/15$ de manera que la ecuación (6). La estimación del valor de difusividad térmica para cada composición se presenta en la tabla a continuación.

Tabla 1. Mejor estimador de la difusividad térmica. Probabilidad: 95%.

Difusividad Térmica de la composición MMI-02 [m ² /h]
0,0039478 ± 0.00045885
Difusividad Térmica de la composición MA2-102 [m ² /h]
0,0014733 ± 0.00011367

2.3.2 Deteminacion de las condiciones de frontera e iniciales para la evaluacion del flujo de calor

Las condiciones de frontera $\phi 1$ y $\phi 2$ fueron determinadas experimentalmente mediante pruebas de carretera, ver la figura 4. Las curvas experimentales se ajustaron mediante polinomios de tercer grado y de esta manera poder utilizarlas en las ecuaciones (10) y (11).

$$\phi 1(\lambda) = 9.323 \times 10^6 \lambda^3 - 0.0036 \lambda^2 + 0.438 \lambda + 76.53 \quad (12)$$

$$\phi 2(\lambda) = -3.036 \times 10^6 \lambda^3 + 4.421 \times 10^{-4} \lambda^2 + 0.083 \lambda + 67.99 \quad (13)$$

donde $\lambda[s]$ y $\phi[C]$.

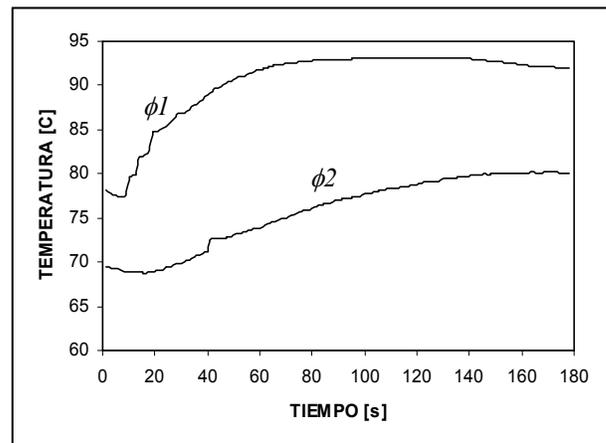


Figura 4. Condiciones de frontera obtenidas experimentalmente

El perfil inicial de temperatura de asume lineal e igual a:

$$f(x') = -853.46 x' + 79.0693 \quad (14)$$

En la siguiente tabla se presentan otros para la evaluación de la ecuación (11). Para la determinación de la conductividad se utilizan los datos de densidad y calor específico determinados para las composiciones y el área es información suministrada por el fabricante.

Tabla 2. Propiedades para la evaluación de la ecuación (11)

PROPIEDAD	VALOR		UNIDAD
	MMI-02	MA2-102	
K Conductividad	3.5264	1.0162	[J/s-m-h]

térmica			
α Difusividad térmica	0.0039478	0.001587	[m ² /h]
A Area del forro	0.00335	0.00684	[m ²]

El valor del flujo de calor Q es calculado, mediante el software *MathCad*, para varios tiempos con el fin de verificar la rapidez con la cual puede disiparse el calor a través del forro.

Tabla 3. Calor a través del forro para diferentes valores de tiempo.

TIEMPO [s]	Q [J]	
	Pastilla MM1-02	Banda MA2-102
3	3949	5792
5	3956	5798
10	3991	5835
20	4083	5941
30	4170	6066
40	4250	6181
50	4334	6302

3. DESEMPEÑO TERMICO DE LOS FORROS PARA FRENOS SEGUN LA LITERATURA AUTOMOTRIZ

Para un vehículo desacelerándose sobre una superficie plana, caso del terreno sobre el cual se realizaron las pruebas de campo, la energía disipada como calor durante la frenada E_f para llevarlo desde una velocidad $V1$ hasta llegar completamente a la parada, está dada por [2]:

$$E_f = k m V1^2 / 2 \quad (15)$$

Donde:

k : factor de corrección para masas rodantes, para automóviles $1,05 \leq k \leq 1,5$

m : masa del vehículo [kg]

$V1$: velocidad al inicio del frenado [m/s]

Para el vehículo de prueba:

$k=1,15$ asumido para vehículo a alta velocidad.

$m=1100$ kg

$V1=80$ km/h

Por lo tanto: $E_f = 312346$ J

El tiempo de frenada o de parada fue aproximadamente 3 segundos. La transferencia de carga o reparto de peso, en condiciones dinámicas, a los ejes para el tipo de vehículo utilizado en las pruebas, motor y tracción delanteros, es aproximadamente:

Eje delantero: 75% del peso total
Eje trasero: 25% del peso total

La distribución de calor a los ejes se realiza en la misma proporción a la transferencia de carga. De acuerdo a la energía disipada como calor E_f , la tabla 4 presenta el calor disipado por cada eje, por cada freno de disco en las ruedas delanteras (dos pastillas y disco) y por cada freno de tambor en las ruedas delanteras (dos bandas y tambor).

Tabla 4. Distribución del calor disipado durante el frenado del automóvil de prueba (según las consideraciones de la literatura automotriz)

ELEMENTO	CALOR [J]
Eje delantero: 75% de E_f	234260
Freno de disco	117130
Eje trasero: 25% de E_f	78087
Freno de tambor	39043

Alrededor del 90% del calor producido durante el frenado es acumulado por el disco y el tambor, y el 10% es acumulado por las pastillas y bandas. La siguiente tabla presenta la cantidad de calor que se disipa por cada juego de pastillas (dos pastillas) en el freno de disco y por cada pastilla, valores obtenidos a partir de la tabla 4. Similar cuantificación se realiza para el freno de tambor.

Tabla 5. Distribución del calor en los forros del automóvil de prueba (según las consideraciones de la literatura automotriz)

ELEMENTO	CALOR [J]
Juego de pastillas	11713
Pastilla	5857
Juego de bandas	3904
Banda	1952

4. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

La tabla 6 presenta la comparación entre el calor disipado en el frenado hallado de manera teórica en la tabla 3 y el determinado a partir de la literatura en la tabla 5.

Se observa que la pastilla opera con un desempeño térmico inferior al sugerido y la banda opera con un desempeño térmico superior. Es posible plantear diversas inquietudes acerca de estos resultados en relación con los criterios técnicos de operación de los elementos de frenado. En el caso del freno de disco un defecto en el calor disipado a través del forro somete a mayores exigencias térmicas al disco metálico (es una de las razones por la cual se diseñan los discos para operar ventilados). Si los elementos de frenado no aportan una adecuada disipación del calor puede suceder que en una frenada sucesiva la temperatura se incremente progresivamente con el riesgo de cristalizar los forros y disminuir su capacidad de frenado. De manera contraria, un flujo de calor excesivo a través de las pastillas puede ocasionar que el aceite del sistema hidráulico se caliente y produzca la formación de burbujas reduciendo la presión en el sistema de frenos.

En el caso de las bandas para freno un flujo de calor excesivo repercute en la dilatación térmica de las zapatas que soportan las bandas, pero debido a que la dilatación es radial, es preferible que exista dilatación en las zapatas y no en el tambor, ya que si el diámetro de este último aumenta, la distancia de contacto entre las bandas y el tambor aumenta, reduciendo la capacidad de frenado.

Cabe resaltar que actualmente en la industria fabricante colombiana se tienen establecidas dos pruebas para el análisis de los forros: la prueba para evaluar el coeficiente de fricción y la prueba para evaluar la rata de desgaste. Acorde a los resultados obtenidos se plantea a la industria fabricante la opción de implantar una prueba técnica más para evaluar el comportamiento de los forros: la prueba térmica.

Tabla 6. Comparación entre el calor determinado teóricamente y el calculado según las consideraciones de la literatura automotriz.

PASTILLA	CALOR [J] <i>Teórico</i>	CALOR [J] <i>Según Literatura</i>
Pastilla	3949	5857
Juego de pastillas	7898	11713
% respecto al calor a disipar por el freno de disco según literatura	6.7	10
BANDA		
BANDA	CALOR [J] <i>Teórico</i>	CALOR [J] <i>Según Literatura</i>
Banda	5792	1952
Juego de bandas	11584	3904
% respecto al calor disipado por el freno de tambor según literatura	29.6	10

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Un modelo teórico, de relativa facilidad de implantación y evaluación, ha sido aplicado para determinar la difusividad térmica de las composiciones de forros para freno *MM1-02* y *MA2-102*, y para cuantificar el flujo de calor disipado durante una operación de frenado.

Para la evaluación de algunos requerimientos en los modelos teóricos fueron realizadas pruebas experimentales y de campo, las cuales a manera de recomendación, deben ser rigurosamente evaluadas y perfeccionadas con el fin de brindar mejores resultados.

Se comparan los resultados calculados mediante los modelos teóricos con las sugerencias de la literatura automotriz. Dichos resultados permitieron plantear inquietudes acerca de las características de los materiales de los forros empleados.

Se plantea a la industria fabricante la inclusión de la *prueba térmica* como una prueba técnica adicional a las ya existentes para evaluar el desempeño de los forros para frenos.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] CARSLAW, H.S. y JAEGER, J. C. *Conduction of Heat in Solids*. Oxford University Press. 1959. pp. 102-104, 297-311.
- [2] CHARLOTEAUX, M. y DUCHENE, M. Frenos: serie "Técnica del Automóvil". Marcombo Boixareu Editores.
- [3] IIDA, Y. y SHIGETA, H. *Measurement of Thermophysical Properties of Solids by Arbitrary Heating*. Bulletin of the JSME, Vol 24, No. 197, November 1981.