

DISEÑO DE DISCOS DE FRENO DESDE UN PUNTO DE VISTA MULTIDISCIPLINAR

Esteban Cañibano
Manuel González
Omar del Amo
Fundación CIDAUT
Parque Tecnológico de
Boecillo, Valladolid

RESUMEN

Este artículo muestra la metodología empleada para el desarrollo de discos de freno, desde el diseño de la geometría hasta la realización de ensayos funcionales y de validación, relacionando entre sí distintas disciplinas.

El desarrollo de discos de freno necesita de un grupo multidisciplinar de trabajo, el cual debe tener necesariamente un profundo conocimiento en disciplinas tan diferentes como Mecánica, Termodinámica, Metalotecnica, Fabricación, Acústica y Vibraciones, Electrónica, etc.

Para poder llevar a cabo lo propuesto en esta metodología de trabajo, se debe contar con un importante número de programas de simulación de diversos campos así como un gran número de medios de ensayo y validación.

El equipo humano necesario para la implementación real de esta metodología es muy amplio y debe ser, depositario de una amplia experiencia en cada una de las disciplinas que se ponen en juego.

ABSTRACT

This paper shows the methodology used in the development of brake rotor, from the geometry design until the realization of functional tests and validations, relating several disciplines.

The brake disc development needs multidisciplinary work equipment. It is necessary a deep knowledge in disciplines as different as Mechanics, Thermodynamics, Metallotechnics,

Tooling, Acoustics and Vibrations, Electronics, etc.

To carry out the proposed methodology it is necessary use a wide number of software to simulate different physical phenomenon, as well as a big number of validation and test equipment.

The human team that the methodology employ for the implementation is wide too, and this must be owner of a great experience in each disciplines.

1. INTRODUCCIÓN

Para los suministradores de componentes en el sector del automóvil, participar en el diseño de las piezas que fabrican significa ser capaces de aportar juicios y mejoras en la fase de diseño, mejorar los productos, simplificar la fabricación y reducir su coste.

Por otro lado, la mayor parte de los suministradores de componentes deben mejorar los servicios que ofrecen a sus clientes con el fin de alcanzar un alto nivel de competitividad, para superar a sus competidores tanto en el contexto regional o nacional como en el internacional.

Para los fabricantes de componentes de seguridad que diseñan y desarrollan sus propios productos los requerimientos a satisfacer son muy severos. Es el caso del diseño de los diversos componentes que forman parte del sistema de frenado.

Durante el diseño de los discos de freno, se hace necesario considerar diferentes aspectos (geometría, peso, material, máxima temperatura de trabajo, resistencia al agrietamiento, deformación térmica, colada, ruido, etc.,...). Todos estos aspectos deben ser incluidos en una apropiada metodología de diseño.

El sistema de frenado de un automóvil debe satisfacer un conjunto

complejo de requerimientos, donde la seguridad es el más importante. Los frenos deben trabajar de forma segura y predecible en cualquier circunstancia, lo cual implica disponer de un nivel estable de fricción bajo cualquier condición de temperatura y factores ambientales.

Este documento se propone mostrar las distintas disciplinas técnicas que deben ser tenidas en cuenta para el correcto diseño de discos de freno y cómo es la interrelación entre ellas.

Los frenos de fricción se emplean para transformar grandes cantidades de energía cinética en calor, en la superficie de contacto entre el disco y las pastillas. El disco absorbe esta energía por medio de la conducción, la cual debe ser disipada rápidamente por conducción y convección al aire circundante. Cuando la temperatura se incrementa hasta valores elevados, el fenómeno de la radiación ayuda también a disipar la energía.

La energía cinética que un disco absorbe durante una frenada satisface la siguiente expresión matemática:

$$E_{kin,brake_disc} = K \cdot \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot \frac{m \cdot (v_o - v_f)^2}{2}, \quad (1)$$

donde

m es la masa del vehículo, en kg.

γ es el coeficiente de distribución de peso por eje ($0 \leq \gamma \leq 1$).

v_o es la velocidad inicial, en m/s.

v_f es la velocidad del vehículo al final de la aplicación del freno, en m/s

K es el porcentaje de la energía cinética que el disco absorbe, aproximadamente 0,90 (90%). El resto va a las pastillas.

Parte de esta energía es almacenada como calor en el disco. El resto de energía es disipada por conducción, convección y radiación de acuerdo con la expresión:

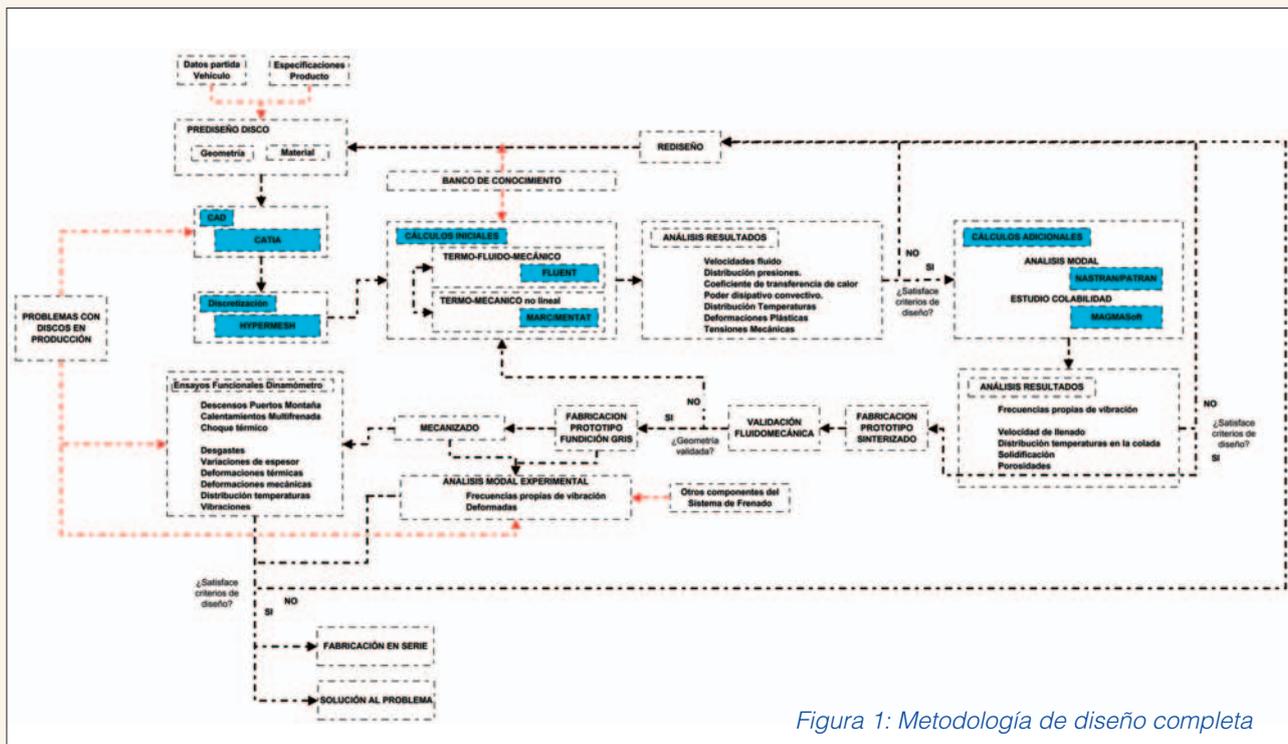


Figura 1: Metodología de diseño completa

$$Q = C_p \cdot m_{disc} \cdot \Delta T + Q_{con} + Q_{rad} + Q_{cond} \quad (2)$$

donde Q es la energía de entrada térmica desde la energía cinética (J), C_p es el calor específico de la fundición gris (J/kg K),

m_{disc} es la masa del disco (kg),

ΔT , es el incremento de la temperatura del disco desde el estado inicial (K).

Q_{con} es la parte del calor disipado por convección (J)

Q_{rad} es la parte del calor disipado por radiación (J)

Q_{cond} es la parte del calor disipado por conducción (J), hacia el resto de componentes del sistema.

Es deseable, en la fase de prototipo, poder analizar las distintas alternativas de diseños y materiales, empleando modelos virtuales que reproduzcan el comportamiento térmico y mecánico del freno.

Sin embargo, cualquier nuevo diseño debe ser validado bien en banco de ensayos, bien en vehículo. Ambos modos de estudio, simulación y experimentación deben estar incorporados en la metodología de diseño de discos de freno si se quiere que sea realmente válida.

Otro aspecto interesante es conocer cómo será el proceso de colada del disco de freno antes de realizar la construcción de los útiles de moldeo

necesarios para esta tarea. Con este estudio previo será posible evitar problemas durante la colada del nuevo diseño del disco.

Este artículo intenta mostrar la metodología multidisciplinar desarrollada en la **Fundación CIDAUT**, por el Área de Seguridad Activa, la cual recoge todos los puntos mostrados y que se recogen en la figura 1.

2. METODOLOGÍA

Con la metodología desarrollada es posible abordar las dos necesidades más frecuentes. Por un lado, se puede abarcar el desarrollo completo de un disco de freno desde su concepción hasta su lanzamiento al mercado. Por otro lado, esta metodología podría resolver problemas particulares de un determinado modelo de disco. El problema podría aparecer en cualquier fase de la metodología mostrada.

2.1. Base de conocimiento

Esta base de conocimiento o saber hacer está fundada en conocimientos de Materiales, Simulación asistida por ordenador y Ensayos.

2.1.1. Materiales

El conocimiento de las propiedades físicas, tales como las térmicas y las mecánicas, es un importante punto

para el diseño de los discos de freno. El rango de temperaturas de trabajo en los discos es muy amplio y ésta es la razón para conocer las variaciones de las propiedades frente a la temperatura.

Propiedades como la conductividad térmica, calor específico, expansión térmica y resistencia a la tracción, etc., cambian significativamente sus valores con la temperatura.

2.1.2. Simulación

Es bastante aconsejable tener un profundo conocimiento acerca de lo que se quiere simular con los diversos programas. Por el momento no existe ningún *software* que sea capaz de resolver de forma conjunta los problemas fluidomecánicos y los termomecánicos no lineales. Esto hace que en la metodología propuesta se deban emplear diferentes programas para cada disciplina, teniéndose que desarrollar aplicaciones informáticas para la transferencia de los datos de salida del *software* de fluidodinámica hasta el modelo termomecánico.

2.1.3. Ensayos

Durante la puesta a punto de la metodología, fue un importante objetivo la correlación de resultados entre la simulación y la experimentación. En esta fase, es necesario contar con

equipos adecuados para medir las variables de control definidas en las simulaciones.

2.2. Datos de entrada

Como punto de partida es necesario conocer algunos datos técnicos del vehículo que montará el disco de frenado que se va a diseñar (masa del vehículo, distribución de pesos por eje, Máxima velocidad, radio dinámico de la rueda, etc...).

Adicionalmente, es aconsejable disponer de un cuaderno de carga o unas especificaciones del producto suministradas por el cliente, donde es posible encontrar más información, también importante, sobre la composición química, peso máximo del disco permisible, características mecánicas límite, mecanizado, etc.

Desde el cliente es muy interesante, además, reunir los diferentes procedimientos de ensayo que los discos deben cumplir para así conocer cuáles son los ensayos funcionales que deben tenerse en cuenta (calentamiento, enfriamiento, descenso alpino, agrietamiento térmico, desgaste, pares residuales, etc.).

2.3.-Diseño previo

Con los datos de entrada y la experiencia del equipo de trabajo, se pondrán algunos pre-diseños de discos eligiendo las geometrías y composiciones de material más adecuadas de acuerdo al vehículo que empleará el disco diseñado.

Durante esta fase, debe seleccionarse la geometría general del disco (retroventilado o ventilado normal) y la geometría de los álabes (rectos, curvados o con forma de pilares).

La configuración de los álabes se modifica para maximizar el flujo de aire para conseguir una eliminación eficiente del calor durante la aplicación del freno.

Durante esta fase de prediseño es necesario seleccionar qué tipo de fundición gris es la mejor opción, de acuerdo con los datos de entrada. Actualmente, es común un alto contenido de carbono por sus buenas características termo-mecánicas, aunque es posible usar un contenido medio de carbono. La elección del material

es un paso muy importante dada su influencia en el comportamiento del disco durante su vida útil.

2.4. Generación del mallado

El mallado es una fase crítica en la metodología pues la bondad de los resultados obtenidos en la simulación dependerá de la calidad y de las características del mallado. Cada simulación (CFD o FEM) necesita una forma especial de mallado, la cual nos fuerza a usar dos diferentes condiciones de mallado, a realizar con dos diferentes programas informáticos. El tipo de mallado deberá ser, además, el más adecuado a cada caso.

2.5. Simulación fluido-dinámica (CFD)

En el análisis CFD, el flujo a través de disco de freno es considerado como un flujo estacionario, incompresible y turbulento, acorde a un modelo de turbulencia k-ε.

El fenómeno de la convección se expresa por la ecuación:

$$q_{conv} = h \cdot A_{disc} \cdot (T_{disc} - T_{air}) \quad (3)$$

donde q_{conv} es el flujo de calor por convección (W),

h es el coeficiente de transferencia de calor (W/m²K), A_{disc} es la superficie libre del disco de freno (m²), T_{disc} es la temperatura del disco (K), y

T_{air} es la temperatura del aire circundante (K).

Después de varias investigaciones, es correcto aceptar que el coeficiente de transferencia de calor ("h") es sólo dependiente del flujo de aire.

Como la temperatura del disco podría superar los 400 °C, no debe despreciarse la pérdida de calor por radiación. El fenómeno de la radiación se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$q_{rad} = \epsilon \cdot \sigma \cdot A_{disc} \cdot (T_{disc}^4 - T_{\infty}^4) \quad (4)$$

donde

$q_{radiation}$ es el flujo de calor por radiación (W),

ϵ es la emisividad infrarroja del disco de freno,

σ es la constante de Stefan Boltzmann (W/m²K)

A_{disc} es la superficie libre del disco (m²)

T_{disc} es la temperatura del disco (K), y

T_{∞} es la temperatura del aire circundante (K).

Como se ha dicho, la refrigeración del freno es un objetivo importante. La optimización del freno es un criterio esencial para mejorar la eficiencia del sistema de frenado. El objetivo final de la optimización de la refrigeración del freno es alcanzar el mayor coeficiente de transferencia de calor por convección posible e incrementar la transferencia de energía térmica de freno al aire de refrigeración.

La efectividad de la refrigeración depende del flujo másico a través del interior de los canales y del coeficiente de transferencia de calor por convección medio que se tiene en su superficie.

Al final de esta etapa, se conocerán los coeficientes de transferencia de calor locales sobre la superficie del modelo CFD para cada una de las geometrías, a diferentes velocidades de giro. Estos datos serán parte de los datos de entrada para los siguientes análisis, los termo-mecánicos.

2.6. Análisis termo-mecánico

El propósito de este análisis es predecir las temperaturas y los correspondientes esfuerzos de origen térmico en el disco.

Como hipótesis de partida para este análisis, el calor generado por fricción por las pastillas de fricción se distribuye uniformemente sobre toda la superficie exterior de las pistas

del disco. El flujo de entrada de calor (Q), se calcula a partir de la velocidad de rotación y de la fuerza de fricción para unas condiciones particulares de ensayo.

En una frenada inercial (con deceleración), la energía instantánea de entrada (W/m²) se calcula empleando la siguiente expresión. En este caso, el valor de Q_{input} es variable en el tiempo.

$$Q_{input} = C \cdot \Omega = I \cdot \alpha \cdot \Omega \quad (5)$$

Q_{input} es la energía instantánea de entrada (W/m²),

C es el par de frenado (Nm)

Ω es la velocidad de rotación (rad/s),

I es la inercia a detener por el disco de freno (kg m^2), y

α es la deceleración angular (rad/s^2).

En una frenada no inercial (manteniendo una velocidad constante, sin deceleración), la energía instantánea de entrada (\dot{Q}), se calcula haciendo uso de la siguiente expresión. En este caso, el valor de Q_{input} es constante en el tiempo.

$$\dot{Q}_{\text{input}} = C \cdot \Omega = F_{\mu} \cdot R_{\text{eq}} \cdot \Omega \quad (6)$$

donde

\dot{Q}_{input} es la energía instantánea de entrada (W/m^2),

C es el par de frenado (Nm)

F_{μ} es la fuerza de frenado aplicada en la superficie disco-pastillas (N),

R_{eq} es el radio equivalente de frenada donde la fuerza

F_{μ} se aplica (m), y

Ω es la velocidad de rotación (rad/s).

En la metodología, las simulaciones termo-mecánicas cumplen con las condiciones de ensayo reflejadas en los procedimientos de ensayos recopilados en la base de Conocimiento.

Los coeficientes de película calculados ("h") en el anterior paso (análisis CFD) se usarán como condiciones de contorno térmicas.

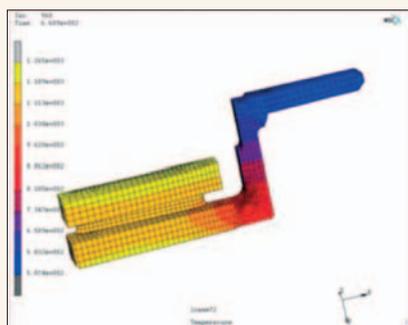


Figura 2: Distribución de esfuerzos y temperatura obtenida en un análisis acoplado.

La pérdida de calor en el disco durante el frenado y los siguientes periodos de refrigeración vienen dados por la convección y la radiación desde las superficies libres. La convección en el modelo de elementos finitos ha sido impuesta a través de los

resultados obtenidos previamente en FLUENT. La radiación debe imponerse en MARC usando el modelo de radiación implementado.

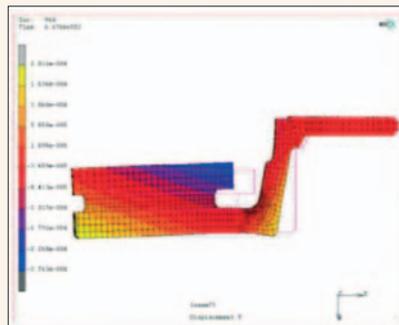


Figura 3: Conicidad térmica, resultado de una simulación termo-mecánica acoplada.

En MARC el análisis termo-mecánico se lleva a cabo de una forma acoplada. Para cada paso temporal, MARC calcula los campos térmico y mecánico.

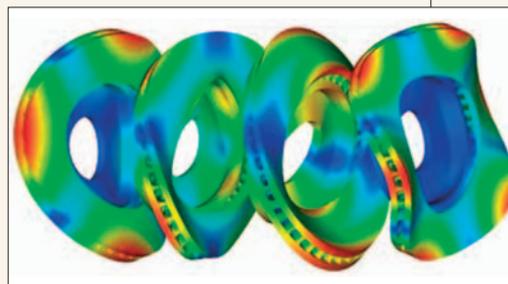
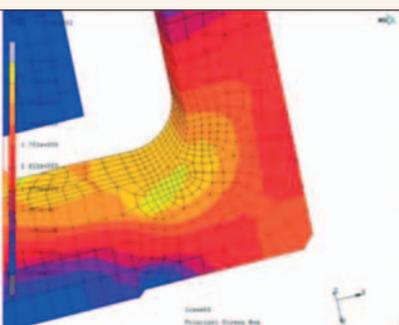


Figura 4: Modos del tipo "fuera del plano" obtenidos mediante simulación.



En un disco de freno, las deformaciones y esfuerzos de origen térmico son causados por una expansión térmica no uniforme y por unas restricciones mecánicas. Con la distribución calculada de temperaturas no uniforme, se realiza un análisis no lineal de tensiones para cada paso temporal del cálculo térmico, esti-

mando la magnitud y dirección de las tensiones térmicas.

Una conicidad menor (Fig. 2) significa una variación menor del par de frenado y un riesgo menor de que aparezcan problemas del tipo de puntos calientes.

2.7. Análisis modal teórico

Durante la aplicación del frenado, parte de la energía cinética se transforma en energía de vibración. Cuando el sistema de frenado tiene algún componente que puede almacenar este tipo de energía hasta cierto nivel, puede aparecer el ruido de "squeal".

Los modos de vibración y las frecuencias naturales suelen estar asociados con las frecuencias a las que se produce el problema acústico y hay fuertes evidencias que sugieren que las frecuencias de ruido de los sistemas de frenado son debidas a unos modos específicos y frecuencias naturales del disco.

Para evitar el acoplamiento modal entre los distintos elementos, durante la fase de diseño se pueden desplazar las frecuencias de vibración modificando la geometría, número de álabes o la composición del material.

En la metodología propuesta, es posible emplear simulaciones de elementos finitos para conocer la variación de las frecuencias naturales y las deformadas asociadas, frente a cambios del módulo de Young (dado por la composición), la geometría del disco, el número de álabes y su geometría, etc.,...

2.8. Validación fluido-dinámica

Lo más importante en la validación del diseño (así como en su funcionamiento) es el proceso de la refrigeración. Por esta razón, el primer paso en la validación de un nuevo modelo de disco es comprobar su comportamiento fluidodinámico.

En esta fase de la metodología se pueden comparar los resultados obtenidos de la simulación para un determinado modelo de disco, frente a los datos experimentales. Como los resultados fluido-dinámicos son muy

importantes para la metodología propuesta (son la base principal en el diseño de discos), antes de proseguir con la construcción de los prototipos de fundición gris es muy deseable comprobar que las nuevas geometrías satisfacen lo esperado

2.9. Simulación de la colada

Una vez seleccionada la geometría más adecuada para su fabricación, el siguiente paso es comprobar cómo sería su proceso de fundición. Usando un programa informático para la optimización del proceso de colada, la metodología encuentra una buena herramienta para conocer cómo sería el proceso de colada del modelo seleccionado (Fig. 5).

Para una geometría de disco determinada es posible diseñar los utillajes de fabricación de tal modo que se obtenga la velocidad de llenado adecuada con ausencia de poros y puntos fríos, con un adecuado índice de solidificación.

2.10. Colada y mecanizado de los nuevos discos

Después de comprobar que el nuevo modelo de disco puede producirse sin problemas, el siguiente paso es fundir la geometría o geometrías propuestas.

Esta fase se lleva a cabo en la mayor parte por lingotes especiales (fundición, a partir de ahora), una fundición que suministra discos de freno a los principales fabricantes de vehículos en el ámbito europeo (PSA, General Motors, Renault, Ford, VW, etc.). Esta última empresa tiene una amplia experiencia en la colada y mecanizado de discos. Es una fase com-

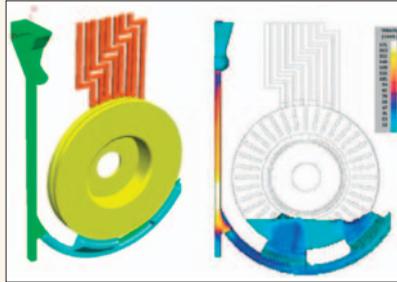


Figura 5: Modelo de colada de un disco de freno y los resultados de velocidad de llenado.

plicada que sólo los fabricantes de moldes experimentados están capacitados para llevar a cabo.

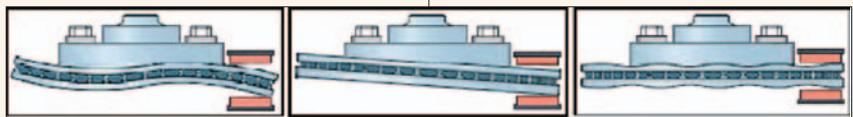


Figura 6: Fenómenos de ondulación, run out y DTV en discos de freno.

El proceso de la colada es muy importante para el comportamiento posterior del disco. Algunos aspectos tales como las variables de la colada, velocidades de refrigeración, contenido de inoculantes o la microestructura de la fundición tienen una influencia importante sobre la dureza, el desgaste, la ondulación superficial, el judder o el agrietamiento térmico, entre otros.

El mecanizado final influye sobre los valores del alabeo, las variaciones de espesor y la ondulación (Fig. 6). Para evitar problemas futuros durante el funcionamiento del freno, tales como el judder, desgastes no homogéneos, vibraciones, etc. deben controlarse los valores numéricos de estos defectos de mecanizado.

2.11. Ensayos funcionales en banco de pruebas

Dentro de la metodología propuesta, una de las fases de obligado cumplimiento es llevar a cabo un conjunto de ensayos funcionales. Estos ensayos deben seleccionarse buscando diversidad, es decir, procurando ensayar los discos en diferentes condiciones para tratar de reproducir las diferentes condiciones de funcionamiento real del disco (Fig 7).

La mayoría de estos ensayos pueden ser realizados en banco dinámico de ensayos. Este banco especial es una herramienta muy útil para

estudiar el funcionamiento de sistemas de frenado bajo diferentes condi-



Figura 8: Detalle del dinamómetro empleado en las investigaciones de CIDAUT.

ciones de ensayo. Los ensayos con dinamómetro son una opción alternativa para la realización de ensayos frente a los ensayos en vehículo.

2.12. Validación térmica

Durante el desarrollo de la metodología, fueron llevados a cabo diferentes tipos de validaciones. La validación principal fue comprobar que los resultados térmicos eran los mismos tanto en las simulaciones como en los ensayos experimentales con dinamómetro. Si se obtienen buenos resultados, se considerarán apropiadas la simulación combinada con CFD y FEA.

En la validación térmica, la evolución de la temperatura es analizada durante los ensayos de frenado seleccionados. En nuestro caso, se conoce

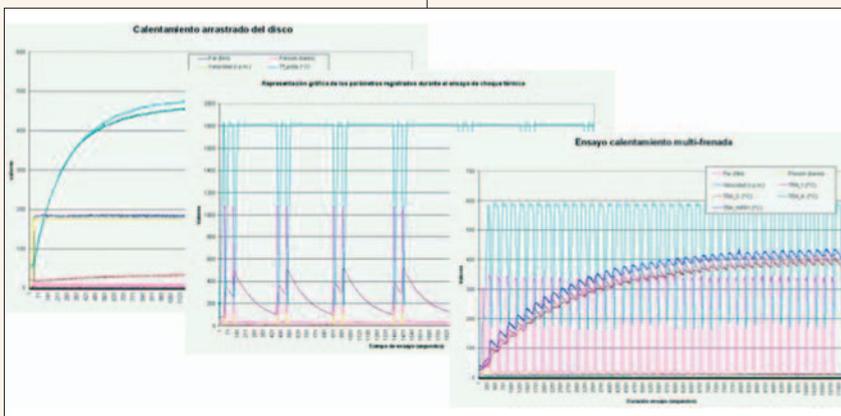


Figura 7: Resultados de ensayos en banco de ensayos.

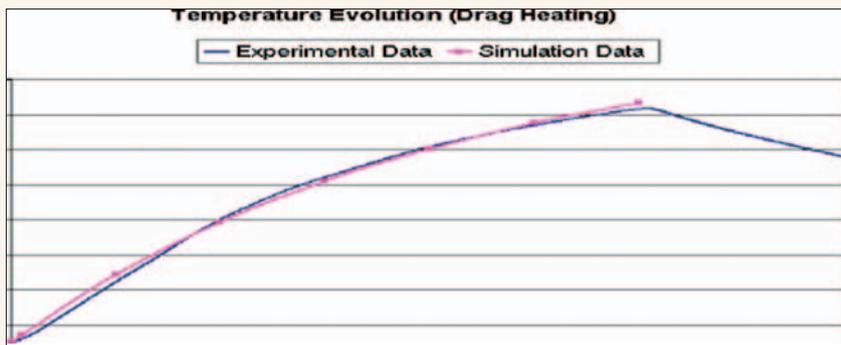


Figura 9: Ensayo de calentamiento arrastrado, tanto por medio de FEA como en Dino.

de forma continua la temperatura en un punto interior de la pista de fricción del disco tanto en la simulación como en los ensayos funcionales. En cualquier caso, la posición del punto de medida es la misma. Este punto está ubicado en el radio medio de fricción, en el centro del espesor de las pistas de fricción.

En una fase inicial, se llevó a cabo una validación de acuerdo a un ensayo sencillo, calentando el disco mientras gira a una velocidad constante (Fig. 8). Mostrando los resultados de este tipo de ensayo, la variación de los valores de la temperatura entre los ensayos experimentales y las simulaciones de elementos finitos son menores al 2% durante prácticamente la duración total del ensayo. Además, esta pequeña desviación es registrada en un amplio rango de valores de la temperatura (Desde 50 °C hasta más allá de los 700 °C).

Con este modelo se lleva a cabo la simulación de un nuevo ensayo, en este caso un calentamiento multi-frenada (Fig. 10) con una velocidad de giro variable. Esto hace que el análisis de elementos finitos sea más complejo. Incluso en este caso, el resultado final es completamente satis-

factorio. La desviación es inapreciable dándose la circunstancia de que ésta tiene un valor inferior al 1%.

3. SUMARIO Y CONCLUSIONES

Este artículo muestra las diferentes tareas que deben considerarse en el diseño y desarrollo de discos de freno, recopiladas todas ellas en una metodología de trabajo. Los autores pretenden mostrar la necesidad de incorporar una amplia cantidad de disciplinas diferentes en el diseño y desarrollo de estos discos.

Para la geometría, el análisis combinado con los programas CFD y FEM da muy buenos resultados frente a los ensayos realizados en el banco de pruebas. La desviación del valor de la temperatura para ambas simulaciones de calentamiento del disco es muy pequeña: su valor se puede estimar en 1,5% del valor de la temperatura. Esta tendencia se registra en un amplio rango de temperaturas.

Estos resultados se pueden alcanzar independientemente de la composición de la fundición gris empleada, de la geometría del disco, de la geometría de los álabes, del tipo de ensayo, etc., debido a la robustez de la metodología de diseño.

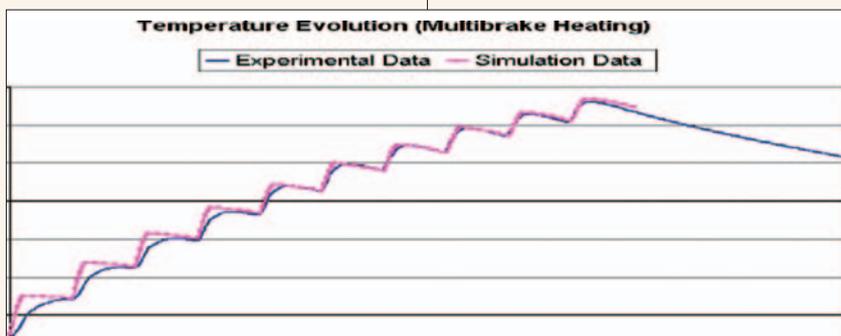


Figura 10: Ensayo de calentamiento multifrenada, tanto por medio de FEA como en Dino.

4. REFERENCIAS

1. **G. Voller** y **M. Tirovic** (Department of Mech. Engineering, Brunel University, Uxbridge, U.K.), **R. Morris** y **P. Gibbens** (Arvin Meritor Heavy Vehicle Braking Systems (U.K.) Limited, Cwmbarn), "Analysis of automotive disc brake cooling characteristics", Braking 2002, Professional Engineering Publishing, (2002).
2. **D. C. Barton** et al. (School of Mech. Eng., University of Leeds, U.K.) **M. Nishiwaki** (Toyota Corporation, Shizuoka, Japan), "Brake system noise and vibration - A review", Braking 2002, Professional Engineering Publishing, (2002).
3. **S. Eppler** y **T. Klenk** (Robert Bosch GmbH), **J. Wiedemann** (FKFS Research Inst. for Automotive Engine and Vehicle Engines), "Thermal Simulation within the Brake System Design Process", SAE Papers 2002-01-2587, (2002).
4. **T. Okamura** y **M. Imasaki** (Kiri Corporation), "A Study on relationship between Disc thickness Variation and Casting Material Properties", SAE Papers 2003-01-3347, (2003).
5. **F. Chen** y **R.L. Quaglia** (NAE, Ford Motor Company) y **C.A. Tan** (Department of Mechanical Engineering, Wyne State University), "On Automotive Disc Brake Squeal Part I: Mechanisms and Causes", SAE Papers 2003-01-0683, (2003).
6. **D. Phan** y **D. Kondyles** (Continental Teves, NA), "Rotor Design and Analysis; A technique using Computational Fluid Dynamics (CFD) and Heat transfer Analysis", SAE Papers 2003-01-3303, (2003).
7. **Manuel González, Esteban Cañibano et al.** (Fundación CIDAUT, España), "Sistema de análisis vibroacústico de piezas de fundición en Automoción", www.digital.ni.com/worldwide/spain.nsf/webcustsol (National Instrument España, 2003).
8. **Esteban Cañibano, Manuel González, Omar del Amo** (Fundación CIDAUT, España), "Development of A Multidisciplinary Methodology for Brake Disc Design", F2004F181, FISITA World Automotive Congress, (2004)

5. AGRADECIMIENTOS

A los autores les gustaría dar gracias a **Lingotes especiales**, S. L. por apoyarnos con material de ensayo durante la puesta a punto de esta metodología y compartir nuestro interés por el diseño de discos de freno.

Los siguientes departamentos de **CIDAUT**, "Cálculo fluido-mecánico", "Aleaciones ligeras" y "Acústica y vibraciones", también merecen nuestro agradecimiento por su inestimable ayuda y colaboración. ■