

Optimización de un Freno de disco mediante la combinación del Método de los Elementos Finitos y Algoritmos Genéticos

Carlos Zurrón-Barragán

Rubén Olarte-Valentín

María Cristina Ramírez-Aragón

Universidad de La Rioja

Pedro Villanueva-Roldán

Universidad Pública de Navarra

Rubén Lostado-Lorza

Universidad de La Rioja

Abstract:

A disc brake is a braking system that acts on the driving wheels of the vehicles. This device transforms all or part of the vehicle's kinetic energy into heat due to movement to stop or reduce the velocity. Any brake disk has one moving part (the disk) and a spinning wheel, and also brake pads. These pads are the elements that exert pressure and grip on the discs.

Today, the design of these devices is based on theoretical studies and in the Finite Element Method (FEM). One of the main disadvantages of this method is the adjustment of the boundary conditions and material parameters of the model. In this paper, is shown the fit and experimental validation of a finite element model of a complete disc brake. This setting and model validation was performed using genetic algorithm techniques.

Keywords: *Finite Element Method (FEM); Optimization; Genetic Algorithms(GA).*

Resumen:

Un freno de disco es un sistema de frenado que actúa sobre las ruedas motrices de los vehículos. Este dispositivo transforma toda o parte de la energía cinética del vehículo debida al movimiento en calor a fin de detenerlo o disminuir su velocidad. Cualquier freno de disco posee una parte móvil (el disco) y una rueda que gira, así como unas pastillas de fricción o de freno. Estas pastillas son los elementos que ejercen la presión y la adherencia sobre los propios discos.

Hoy en día, el diseño de este tipo de dispositivos está basado tanto en estudios teóricos como en el Método de los Elementos Finitos (MEF). Uno de los principales inconvenientes de éste método es el ajuste de las condiciones de contorno del modelo y de los parámetros de material. En este trabajo, se muestra el ajuste y la validación experimental de un modelo de elementos finitos de un freno de disco completo. Este ajuste y validación del modelo se realizó mediante técnicas de Algoritmos Genéticos (GA).

Palabras Clave: *Método de los Elementos Finitos (MEF); Optimización; Algoritmos Genéticos (GA).*

1. Introducción

Desde el comienzo de la industria del automóvil los frenos han sido objeto de estudio e investigación. Las temperaturas y tensiones generadas en la detención de un vehículo han de ser controladas y disipadas con el objetivo de que los vehículos puedan ser más veloces y seguros. El incremento de temperatura en los frenos es un fenómeno que se produce por la conversión de la energía cinética del vehículo en energía calorífica. Todo sistema de frenado requiere de unas condiciones de funcionamiento (velocidad de giro y presión) y unas propiedades de material (acero y material de fricción).

Un número considerable de estas condiciones de funcionamiento y de propiedades de material, conlleva un cierto grado de dificultad para ajustar y optimizar cualquier modelo de Elementos Finitos (modelo FE).

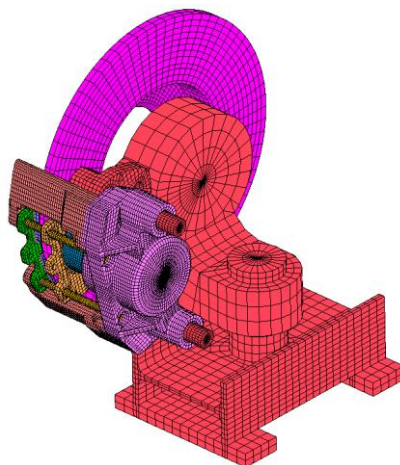
En este artículo, se muestra el proceso de Ajuste y Optimización de un modelo FE de un freno con un número relativamente elevado de condiciones de funcionamiento y de propiedades del material. El ajuste de las propiedades del material se realizó con técnicas basadas en Algoritmos Genéticos (GA).

En primer lugar, se realizó un estudio en base a los trabajos realizados por Grzes (2005) y Baydar (2005) sobre un modelo FE de un disco de freno. De este estudio se pudo fijar un rango ciertas propiedades del material y de las condiciones de funcionamiento válidas. Seguidamente, se realizó una batería de experimentos sobre este rango de condiciones de funcionamiento a diferentes presiones y velocidades. Tras la adquisición de los datos experimentales, se aplicaron técnicas basadas en GA con el objetivo de ajustar el modelo FE. Una vez ajustado el modelo FE, se procedió a una optimización del freno de disco.

2. Modelo de Elementos Finitos

El modelo FE fue generado con un tamaño de malla lo suficientemente fino como para obtener buenos resultados de desplazamientos y de temperaturas atendiendo también a un tamaño óptimo con el fin de reducir el tiempo de simulación. Este primer modelo FE tenía un total de 54070 Elementos hexaédricos con funciones de forma lineal. El aspect ratio de estos elementos no excedió de un 1% lo que implica que la calidad de la malla fue excelente. El modelo FE fue simulado mediante procesos Térmico-Estructurales en Dinámica Transitoria teniendo en cuenta todos los contactos mecánicos entre las diferentes piezas del conjunto.

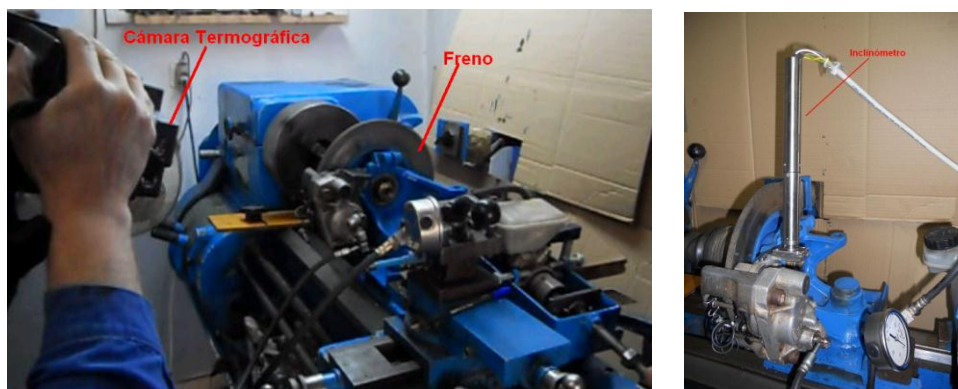
Figura 1: Modelo de Elementos Finitos del disco de freno



3. Datos Experimentales

Para evaluar los resultados en el modelo FE y ajustar las propiedades de material por la técnica de GA, se realizaron dos ensayos. Un ensayo termográfico en el que se registro las temperaturas del disco a diferentes presiones y velocidades, y un ensayo de deformaciones en el que se registro en tiempo real el giro producido en el momento de la frenada mediante un inclinómetro. Este experimento se realizó sobre un modelo de freno comercial Lucas Girling montado en una Citroën C15 1.8D de 1998. La Figura 2 muestra el banco de pruebas en el que se realizó este experimento de ajuste del modelo FE.

Figura 2: Ensayo Termográfico y Ensayo de Deformación



En la Tabla 1 se muestran las temperaturas máximas obtenidas en algunas de las pruebas termográficas realizadas.

Tabla 1: Datos experimentales

	Presión (bar)	Velocidad (rad/s)	ΔT termografías (20s)
Modelo1	6,00	7,00	6,30
Modelo2	5,50	7,00	5,90
Modelo3	2,50	10,00	4,30
Modelo4	2,00	10,00	3,90
Modelo5	1,50	24,00	5,10
Modelo6	1,00	43,00	9,90

4. Ajuste del modelo FE mediante Algoritmos Genéticos

A fin de ajustar las propiedades del acero y el material de las pastillas de fricción se empleó una técnica de optimización (y ajuste en este caso) basada en GA. En primer lugar, se estableció un rango para las propiedades desconocidas acotándolo por los trabajos anteriores de (Grzes, 2005) y (Baydar, 2005). Las propiedades estudiadas dependieron en cada caso del tipo de material. Por un lado en el estudio de las propiedades del acero, se

tuvo en cuenta el coeficiente de conductividad térmica (λ) ya que se consideró como la más representativa e influyente de este material en el proceso. Por otro lado las propiedades a ajustar en el material de fricción fueron módulo de Young (E), el coeficiente de conductividad (λ) y el calor específico (c). Los rangos tomados para estas cuatro variables se establecen en la Tabla 2.

Tabla2. Rangos de las propiedades estudiadas según el tipo de material

ACERO		MATERIAL DE FRICCIÓN	
Propiedad	Rango	Propiedad	Rango
λ	30----58 W/(K*m)	λ	0.5----3 W/(K*m)
		c	0.5----3 KJ/(kg K)
		E	10----20 GPa

El comienzo del ajuste del modelo FE se realizó de la siguiente manera: En primer lugar, se seleccionaron de manera aleatoria entre los rangos establecidos la generación inicial o generación 0. Esta generación estaba formada por individuos (modelos FE) con los parámetros seleccionados de la Tabla 2. Simulados todos los individuos de esta generación, se plantearon dos funciones objetivo. La primera relacionada con las temperaturas máximas alcanzadas en el disco y la otra con las deformaciones angulares del conjunto.

La función objetivo para las temperaturas se definió acorde a la ecuación 1. Los valores de Y_{nTFE} representan los valores máximos de las temperaturas registradas en el disco por el modelo FE y los valores Y_{nTTH} son las temperaturas máximas registradas por las termografías.

$$J_T = |Y_{nTFE} - Y_{nTTH}| \quad (1)$$

De manera análoga la función objetivo de deformaciones angulares se definió según la ecuación 2. En este caso, los valores de Y_{nRFE} hacen referencia a la deformación angular del modelo FE y Y_{nRIN} son los valores medios de deformación angular registrados por el inclinómetro.

$$J_R = |Y_{nRFE} - Y_{nRIN}| \quad (2)$$

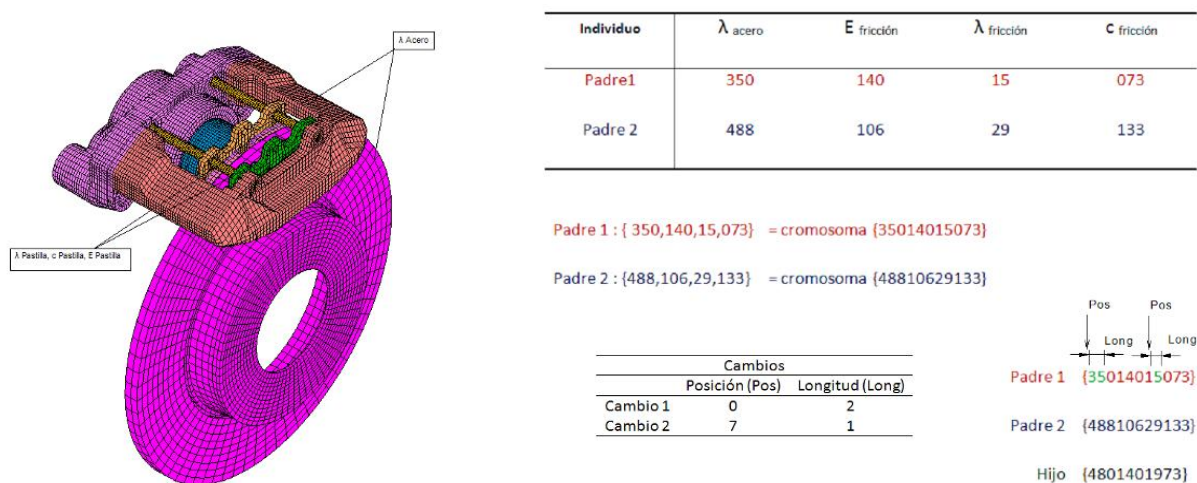
Una vez obtenidos los resultados para cada uno de los individuos (modelos FE simulados), se seleccionaron de la población inicial los mejores, es decir, aquellos que tuviesen una función objetivo menor. A partir de la primera generación o generación 0, se crearon las siguientes generaciones (generación 1, 2, ..) mediante cruces y mutaciones.

La nueva generación se formó por:

- Un 25% de los mejores individuos de la anterior generación (padres de la nueva generación).
- Un 60% de individuos obtenidos por cruzamiento de los padres seleccionados. El proceso de cruzamiento se realizó mediante el cambio de varios dígitos de los cromosomas de las variables a modificar. Los cromosomas se constituyen con los dígitos de las variables eliminados los puntos decimales y unidos todos en un solo conjunto. La posición y número de los dígitos a cambiar se eligió aleatoriamente.
- El restante 15% se obtuvo por mutación mediante la creación aleatoria de los cromosomas dentro de los rangos establecidos. El objetivo de esta parte fue la búsqueda de nuevas soluciones dentro de zonas no exploradas previamente.

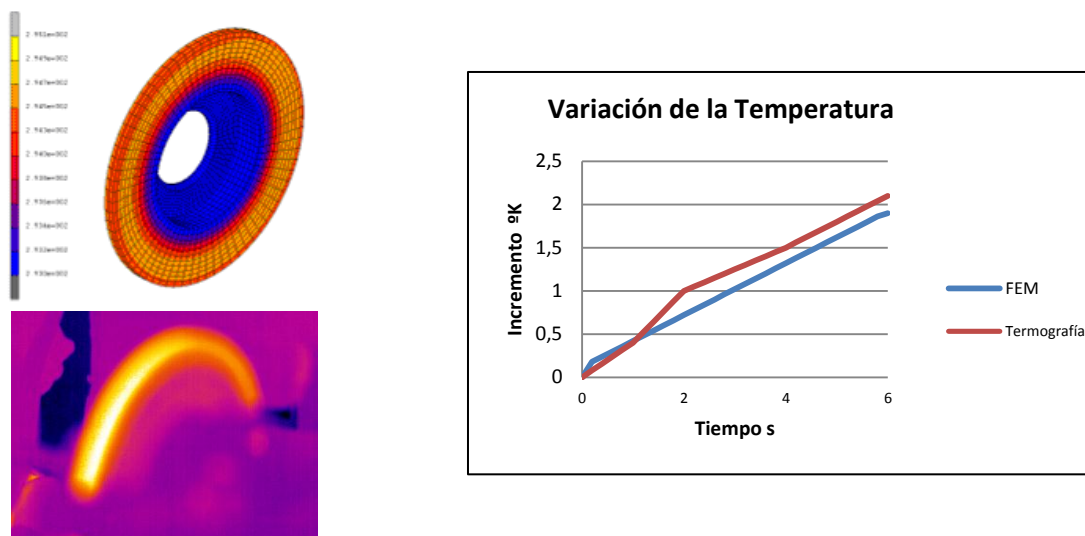
En la figura 3 se muestra el proceso de cruce de una manera ilustrativa.

Figura 3 Aplicación de los Algoritmos Genéticos.



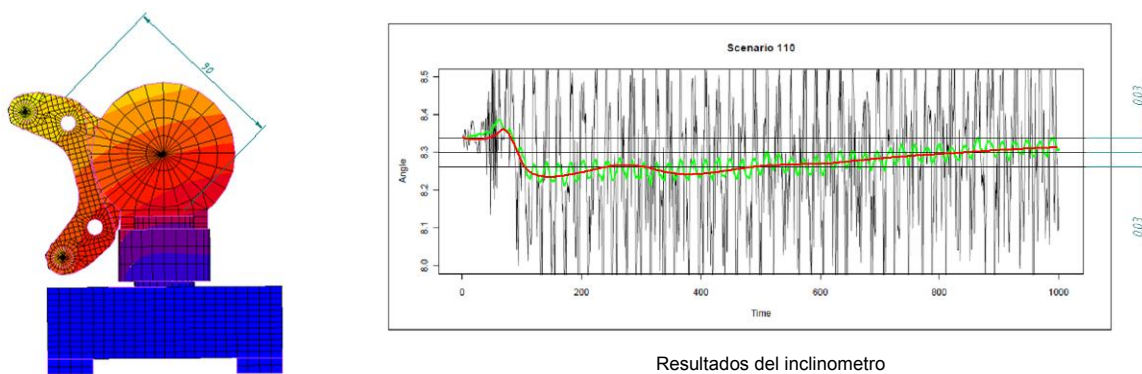
Este proceso sería repetido durante varias generaciones hasta que las funciones objetivos presentasen un valor mínimo sin evolucionar. A pesar de haber sido formulado el ajuste mediante GA de las temperaturas y los desplazamientos angulares, no fue necesario la aplicación de esta técnica en la deformación angular debido a que la función objetivo JR alcanzaba valores muy pequeños en la primera generación. En la Figura 4 y figura 5 se muestran los resultados entre el modelo FE y los datos experimentales de las termografías y de los desplazamientos angulares para un modelo FE cualquiera.

Figura 4 Resultados del Ajuste por GA de las Temperaturas



La Figura 4 muestra los resultados obtenidos del modelo FE y los obtenidos de las termografías correspondiente al modelo (individuo) 5.

Figura 5 Resultados del Ajuste por AG de las Deformaciones Angulares



Deformaciones del modelo

Ensayo		Modelo FE
Mínima deformación angular	Máxima deformación angular	Deformación angular
2.61E-4 rad	1.62E-3 rad	4E-4 rad

La Figura 5 muestra el ángulo girado por el punto del conjunto sobre el que se situó el inclinómetro a una presión de 4 bar y 10 rad/s.

5. Optimización y mejora del freno

Una vez validado el modelo FE mediante GA, fue el momento de analizar el conjunto y proponer mejoras sobre el mismo:

- Reducir el peso del conjunto.
- Mejorar la evacuación del calor.

Esta optimización y mejora del freno, no podía realizarse indiscriminadamente sobre el modelo FE completo. En este caso, se debían de establecer una serie de restricciones ya que el nuevo freno mejorado y optimizado se podría instalar al igual que el freno de partida. Por este motivo, se determinaron las zonas o partes fundamentales que quedaban fuera de cualquier cambio o modificación como pueden ser:

- Las pastillas debían de ser las mismas lo cual impedía modificar los diámetros de los pasadores y todas las piezas dependientes de ellas como la anchura interna del caliper.
- La cámara hidráulica no debía ser modificada por mantener las relaciones con los elementos de conexión del freno original.
- Las dimensiones fundamentales entre los pernos guía no debían de ser cambiadas.

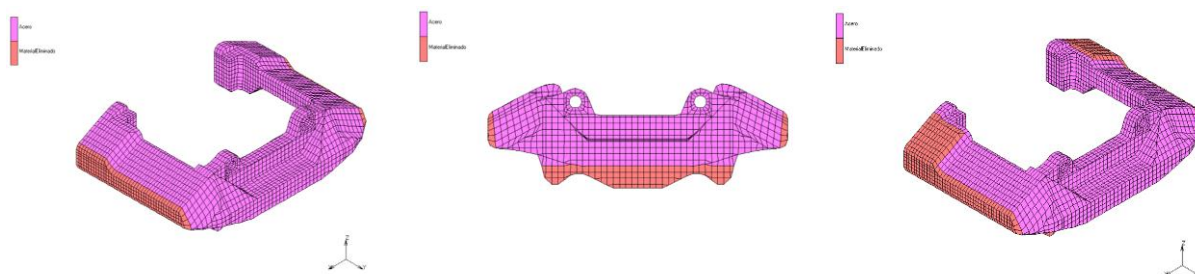
5.1 Reducción en peso.

En este apartado se desarrollan las posibles reducciones de material en cada una de las piezas que forman el conjunto.

- **Punta del Cáliper**

Esta pieza debe ejercer presión sobre cada una de las pastillas del freno. Presenta una geometría compleja y está sujeta a varias restricciones impuestas. Las tensiones iniciales de esta pieza estaban entorno a los 190 Mpa. en los puntos más desfavorables. Por lo tanto esta pieza admitía una reducción de material. En la figura 6 se muestra la eliminación futura del material (en un color más oscuro).

Figura 6 Secuencia de reducción de material en la Punta del Cáliper



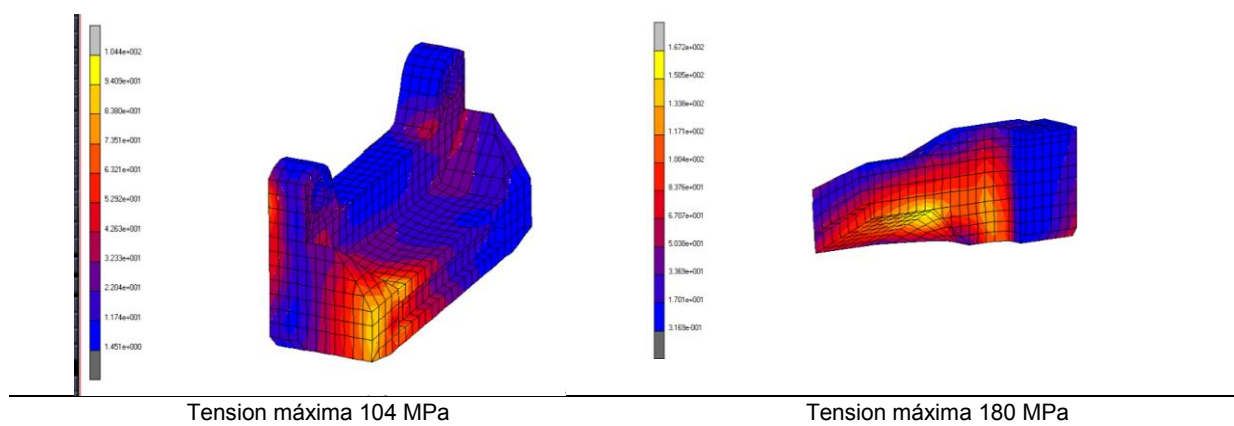
Tras una primera iteración se optó por eliminar en primer lugar el material de la parte exterior ya que en la zona interna, donde se encontraban los pasadores, no se podía realizar ninguna modificación por depender del ancho de las pastillas. La eliminación de esta fila de

material mostrada en la figura 6 no incrementó en gran medida las tensiones en esas zonas por lo que se generó el siguiente modelo que reducía más material.

En esta segunda iteración se eliminó la parte frontal. Se puede decir que esta eliminación que tiene un doble fin debido a que es posible conseguir un diseño con menos coste de material a la vez que es posible reducir la superficie de acción sobre las pastillas. Esta reducción de la superficie de acción sobre las pastillas consigue equilibrar las temperaturas en las dos partes del disco evitando problemas de rotura como se especificara en el apartado 4.2.

Para finalizar, se realizó una última reducción de material eliminando la parte superior de la zona de apoyo. Esta zona eliminada no es excesivamente grande ya que existen los tornillos de sujeción entre la Carcasa y la Punta Caliper. Los resultados obtenidos para las zonas más desfavorables aparecen en la Figura 7.

Figura 7 Tensiones en la Punta del Cáliper después de la Eliminación de Material



En esta figura se observa como las tensiones son reducidas en esta pieza, pese haber eliminado material, pasando de 190 MPa a 180 MPa. Esto se explica debido a que la presión ejercida sobre la pastilla exterior es menor en la segunda reducción de material propuesta.

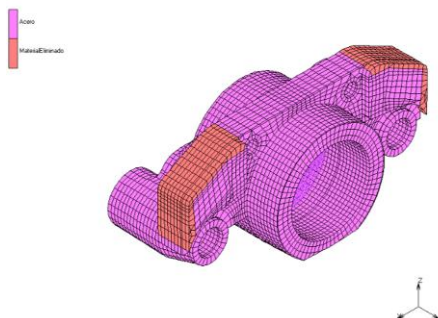
Las deformaciones producidas en la pieza propuesta son inapreciables a simple vista, con valores entorno a las 2 décimas de mm en los puntos más desfavorables. Se puede decir que el proceso de optimización ha mantenido los valores iniciales de deformación, lo que significa que sigue cumpliendo con las disposiciones impuestas en la normativa de diseño vigente.

- **Carcasa**

Esta pieza albergaba la geometría más compleja del conjunto además de depender de ella la mayor parte de las piezas del conjunto así como las conexiones adyacentes por lo que existían muchas zonas que no se podían modificar. Sobre esta pieza se descartó reducir la zona del cilindro al igual que la zona de los pasadores y los orificios donde se alojaban los pernos guía.

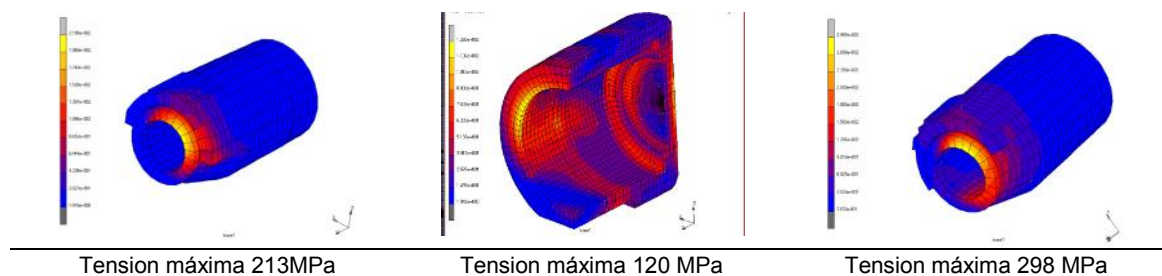
En ningún punto de la pieza se alcanzó inicialmente la tensión de límite elástico del acero empleado, llegando a ser aproximadamente de 300 MPa. Además se producían dos zonas de concentración de tensiones las cuales eran perfectamente lógicas con el modelo y se debían al contacto de los pernos guías y los orificios. Sobre esta pieza, se optó por eliminar la parte superior tal y como se muestra en la Figura 8.

Figura 8 Reducción de material en la Carcasa



La Figura 9 muestra las tensiones máximas que aparecen en la pieza denominada carcasa.

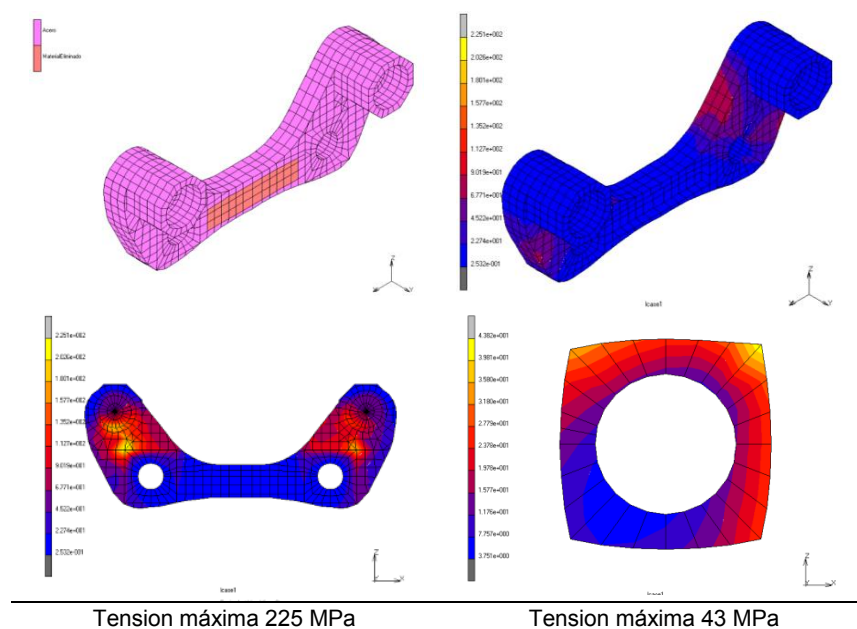
Figura 9 Tensiones en la Carcasa después de la Eliminación de Material



- **Soporte Cáliper**

Esta pieza sujeta el conjunto freno al resto del vehículo. En las primeras simulaciones se observó que la parte central no presentaba apenas tensiones por lo que se dedujo que podría reducirse de material. En primer lugar, se optó por hacer un vaciado en el centro de la pieza. En la Figura 10 se muestra la pieza con el vaciado propuesto así como con los resultados obtenidos.

Figura 10 Reducción de material y Tensiones después de la Eliminación de Material en el Soporte

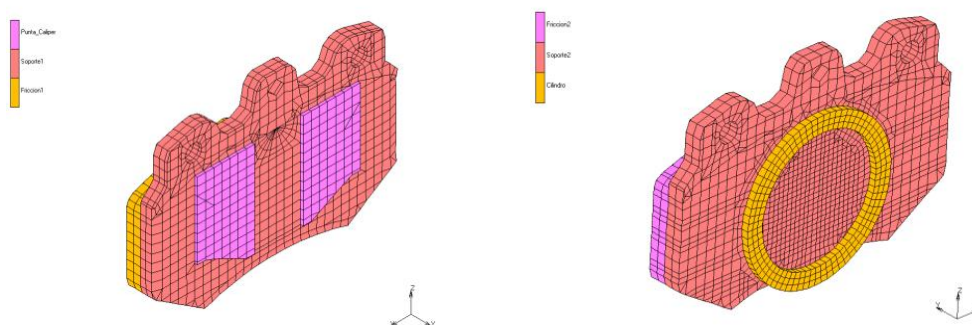


Al igual que en el resto de piezas, en esta también se apreció una reducción de los valores de tensiones por los cambio producidos en la Punta del cáliper.

5.2 Mejorar de la evacuación del calor.

Uno de los problemas observados en el estudio inicial fue la diferencia de temperaturas que se producía entre las dos superficies del disco. Este fenómeno se producía en gran medida debido a que las superficies sobre la que se ejercía presión en las pastillas eran diferentes.

Figura 11 Superficie sobre la que se actúa en cada pastilla



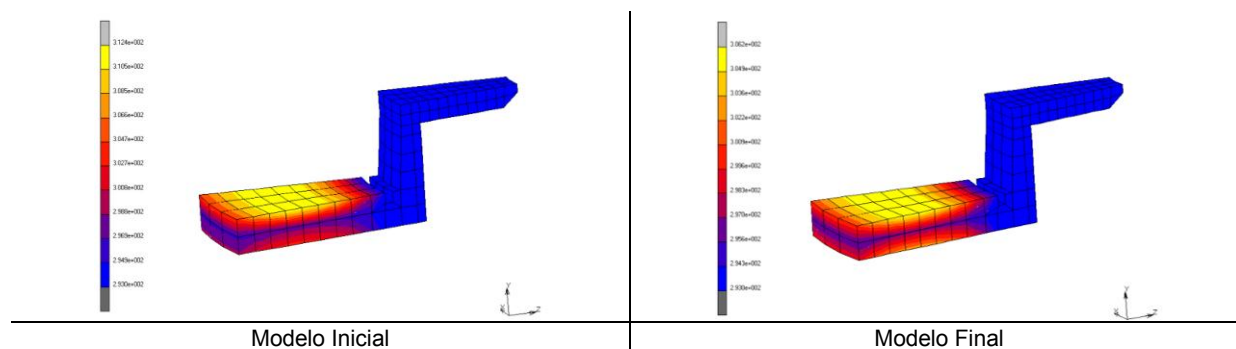
La solución a este problema consistió en reducir la superficie de contacto entre la primera pastilla y la punta del cáliper ya que la superficie del cilindro no podía modificarse debido a la restricción del diseño. La Figura 11 de la izquierda muestra presentaba una zona de presión con la Punta cáliper de unos 1000 mm² y la de la derecha muestra superficie de contacto del cilindro de unos 700 mm².

Finalmente se redujo la superficie de la primera de las pastillas a los 800 mm² por lo que se consiguió aproximar la temperatura en las dos caras del disco.

- **Distribución de temperaturas en una sección del disco**

En la Figura 12 se muestran los resultados de las simulaciones pertenecientes al modelo inicial y final planteado. En el modelo inicial, el disco alcanzaba anteriormente una temperatura mayor a la del modelo planteado. Concretamente, las temperaturas presentaban valores de 312 K en la parte de mayor temperatura y de 302K en la superficie opuesta. Sin embargo en el modelo final donde la superficie de actuación de la pastilla había sido previamente modifica adoptó unas temperaturas de 306 K en el lado de mayor temperatura y 302 K en el lado de menor. Se puede deducir que las temperaturas se van aproximando entre los dos lados del disco para un mismo instante de tiempo. Con esta pequeña mejora se pretende disminuir el riesgo de una deformación no uniforme sobre el disco que pudiera ocasionar fracturas indeseadas, así como alabeo y desalineamientos sobre las piezas del conjunto.

Figura 12 Distribución de Temperaturas en el Disco



Así mismo, en la Tabla 3 se muestran los pesos iniciales y finales de las piezas estudiadas en este trabajo. Puede observarse que la reducción de material no es excesiva, pero resulta interesante al tratarse de un producto de automoción que va a ser fabricado masivamente, por lo que el coste de material es importante.

Tabla3. Resumen de las masas del modelo inicial y final en el freno

Pieza Modificada	Masa Inicial (kg)	Masa Final (kg)	Masa total Eliminada (g)
Punta Cáliper	1.1	0.9	150
Carcasa	1.7	1.6	100
Soporte	0.45	0.44	10

6. Resultados

En este artículo se muestra en primer lugar el proceso de ajuste o validación de un modelo FE de un freno de disco, y en segundo lugar, el proceso de optimización del mismo. Inicialmente, se propone un primer modelo FE basado en el freno de un vehículo comercial. De este primer modelo se desconoce un número considerable de variables tanto para el material de las pastillas como para el material del propio caliper. El ajuste de estas variables se realiza mediante la técnica de los GA en base a las temperaturas y al giro del freno de disco obtenidos de una serie de experimentos. A continuación, una vez ajustado este primer modelo FE inicial, se estudian las posibles mejoras y optimizaciones de las que se obtendrá un nuevo modelo de freno de disco. La reducción en peso de este nuevo modelo de freno obtenido es del orden de 260 g. Lo cual representa aproximadamente un 10 % del peso inicial. Se puede afirmar que mediante la técnica de los GA es posible ajustar y validar un modelo FE en la que se desconocen un número considerable de variables de material. Esta técnica, es también aplicable a la mejora y optimización de cualquier modelo FE en el que previamente ha sido parametrizado.

7. Referencias

1. Baydar, E.; Ozmen, Y. (2005) An Experimental And Numerical Investigation on a Confined Impinging air jet at High Reynolds Numbers, Applied Thermal Engineering, Vol. 25, Issues 2-3, 409-421.
2. Bhushan, B. (1999) Modern Tribology Handbook. Ed. Ohio State University, Columbus, USA.
3. Grzes, P. (2009) Finite Element Analysis Of Disc Temperature During Braking Process, Acta mechanica et Automatica, vol.3 n°4.
4. Kennedy, F.E. (1982) Single-pass rub phenomena - Analysis and experiment. Journal of Lubrication and Technology. (Trans. ASME). Vol. 104, n°. 4, pp. 582-588.
5. Kennedy, F.E.; Tian, X. (1994) The effect of interfacial temperature on friction and wear of thermoplastics in the thermal control regime in Dissipative Processes in Tribology. Ed. Elsevier Science, Amsterdam.
6. Lostado R., Sanz A., González A., Pernía A. (2011) Genetic Algorithms Combined with the Finite Elements Method as an Efficient Methodology for the Design of Tapered Roller Bearings, International Conference on Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications, Salamanca, 6-8th.

8. Correspondencia (Para más información contacte con):

Rubén Lostado Lorza
Universidad de La Rioja
Phone: + 34 941299527
E-mail: ruben.lostado@unirioja.es