

## *CAPÍTULO 4*

### *PASTILLAS DE FRENO*

#### *1. BREVE RESEÑA HISTORICA SOBRE LA FRICCIÓN.*

Con la aparición de los vehículos autopropulsados a finales del siglo XIX, surgió la necesidad de dotarlos de un sistema que consiguiese detenerlos cuando el conductor decidiera. Las primeras soluciones aportadas fue la adaptación de los frenos de los coches de caballos en estos primeros automóviles. Esto era posible a que las velocidades que los vehículos de tracción mecánica desarrollaban eran relativamente bajas. Estos sistemas consistían en un accionamiento manual de una palanca que movía una zapata, la cual rozaba contra la banda de rodadura de las ruedas produciendo así la fricción necesaria para decelerar o frenar el vehículo de forma efectiva.

En el año 1887 Herbert Froot, implemento el primer forro de fricción basado en la utilización de fibras de algodón, trenzadas en forma de correa. Esto estaba todo ligado mediante soluciones bituminosas y hilos de latón. Este material no solo fue usado en los frenos de los coches de caballos, sino que además fue empleado en algunos de los automóviles de la época consiguiendo unos resultados aceptables. Lógicamente tenía unas limitaciones ya que el uso de una fibra natural como es el algodón significaba que por encima de 150°C perdía las propiedades de fricción y se rompían. Esta desventaja se hizo palpable enseguida, y tan solo diez años después se introdujo en la formulación las fibras de amianto. Sentando las bases de los materiales de fricción durante las décadas siguientes.

Se eligió la fibra de amianto crisótilo para la mayoría de las aplicaciones. Las fibras de amianto eran fáciles de tejer de la misma forma que el algodón con lo cual fue fácil sustituir las fibras de algodón. Su mayor resistencia mecánica, la resistencia a la temperatura, la flexibilidad, sus excelentes propiedades de fricción y la compatibilidad con las resinas y demás sustancias ligantes, hacían de la fibra de amianto el mejor de los componentes para aplicaciones de fricción. La inclusión de latón y otros alambres en el tejido añadieron resistencia física y modificaron las características friccionales de comportamiento del material.

Durante sesenta años los materiales de fricción de este tipo han contribuido enormemente en la seguridad de los automóviles, camiones y toda clase de vehículos que circulaban por todo el mundo.

A principios de la década de los años 20, los químicos comenzaron el estudio de sustituir los trenzados de los forros de freno por piezas moldeadas. Comenzaron usando fibras cortas de crisotila, las cuales eran muy abundantes y de coste reducido. Uno de los primeros creadores de forros de freno no trenzados fue Mr. Blume, en 1926, su formula presenta unas similitudes muy interesantes con la primera formula de amianto desarrollada. La fórmula original se basaba en

alambres de latón y en un refuerzo de tejido de amianto, unidos por un compuesto de aceite o goma de asfalto. La nueva fórmula moldeada utilizaba el mismo amianto, pero las fibras eran más cortas que las que se utilizaban en el tejido de amianto. El alambre de latón se sustituyó por partículas de latón y el asfalto original por aceite de linaza y un carbón bituminoso especial que aportaba un alto grado de volatilidad y un bajo desprendimiento de cenizas. La mayor parte de los avances posteriores fueron únicamente mejoras que se añadieron a este concepto original.

Durante la década de los 30, los químicos comenzaron a investigar en resinas flexibles con mayor resistencia al calor. Estos nuevos materiales, junto con el proceso de mezclado en seco, abrió el camino a nuevos y muchos más sofisticados componentes y con ello a un nuevo mundo de materiales de fricción que todos conocemos hoy en día.

Al mismo tiempo, otros pioneros en el desarrollo del material de fricción provenían de la industria del caucho. Los trenzados de algodón y posteriormente los trenzados de amianto fueron recubiertos con compuestos de caucho que después iban siendo apilados en capas hasta obtener el espesor requerido, todo ello se conseguía gracias a la ayuda de la maquinaria típica de la industria del caucho. Más tarde se introdujeron compuestos de fibra de amianto y caucho, que podían laminarse y plegarse o extrusionarse, también utilizando la maquinaria convencional del caucho.

Durante la década de los 50 se implementó una nueva formulación que contenía nuevas resinas que ligaban virutas metálicas dando paso así, a la aparición de las pastillas en base metálica. Esta formulación procedía del gran éxito que los materiales de fricción metálicos habían conseguido en aplicaciones industriales y aeronáuticas. Estos nuevos materiales metálicos eran una mezcla de resinas con lana de acero y grafito. Este tipo de fórmulas fueron muy usadas durante la década de los 70 en la fabricación de las pastillas.

En los años 60, a medida que se avanzaban en el diseño de los vehículos y era necesario mejorar los sistemas de frenos, muchas empresas de materiales de fricción comenzaron a buscar alternativas al amianto como principal componente de los frenos de disco. El amianto es un material que posee sus propias limitaciones; es un recurso agotable, de calidad variable y su precio subía. Como alternativa, se contempló el uso de fibras de vidrio, fibras de metal y más recientemente, fibras de carbón sintéticas.

Al mismo tiempo, comenzó a cuestionarse el efecto sobre la salud del uso del amianto. Muchos fabricantes dejaron de trabajar con este material debido a los problemas que se asociaron con él. Todo esto hizo que los materiales de fricción semi-metálicos llegaran a ser los más utilizados en los años 70 para la fabricación de frenos de disco.

Los semi-metálicos distan de ser materiales ideales para cualquier aplicación. Los materiales de fricción con alto contenido en metales son mejores conductores del calor que los materiales compuestos de amianto, y esto puede ocasionar problemas como por ejemplo, una excesiva transferencia de calor a la pinza y al líquido de frenos que puede entrar en ebullición.

El desarrollo de los nuevos materiales de fricción continuó durante los 80. La aparición de la tracción delantera, la reducción de tamaño de las ruedas y el perfeccionamiento del diseño aerodinámico son sólo algunos aspectos del desarrollo de la industria automovilística que implicaron nuevas exigencias en el mundo de los materiales de fricción durante los últimos 20 años. El incremento de calor generado durante el frenado plantea problemas adicionales para la ingeniería de fricción y para quienes se dedican a formular materiales de fricción. Por esto, se está desarrollando una nueva generación de productos con **una menor conductividad térmica que los semi-metálicos**, que supongan una reducción de la transferencia de calor al líquido de frenos.

Durante los años 90 hace su aparición una nueva tendencia en los programas de desarrollo de los principales fabricantes de vehículos y materiales de fricción con el fin de sustituir los contenidos de metales pesados del material de fricción (trisulfuro de antimonio, sulfuro de plomo o galena, disulfuro de molibdeno, fibras de cobre y componentes del cobre lo mismo que fibras de silicio) por compuestos no tóxicos, a fin de evitar el impacto negativo de dichos materiales sobre el medio ambiente y los seres humanos. Se trabaja en un material orgánico que no se desintegre a altas temperaturas de frenado y mantenga sus características de fricción en un ancho rango de temperaturas. Un material que admita el desgaste sin dañar las otras superficies. Estamos ante la aparición de una nueva generación de materiales de fricción de superiores prestaciones y más respetuosos con el medio ambiente, así como con las personas que cada día están en contacto con estos materiales.

No obstante, todavía quedan en el mercado productos de fricción que contienen amianto, y se recomienda, dadas sus propiedades cancerígenas, su manipulación siguiendo las normas estrictas de seguridad que están claramente definidas en todos los países para la manipulación de productos tóxicos y peligrosos.

## 2. COMPOSICIÓN.

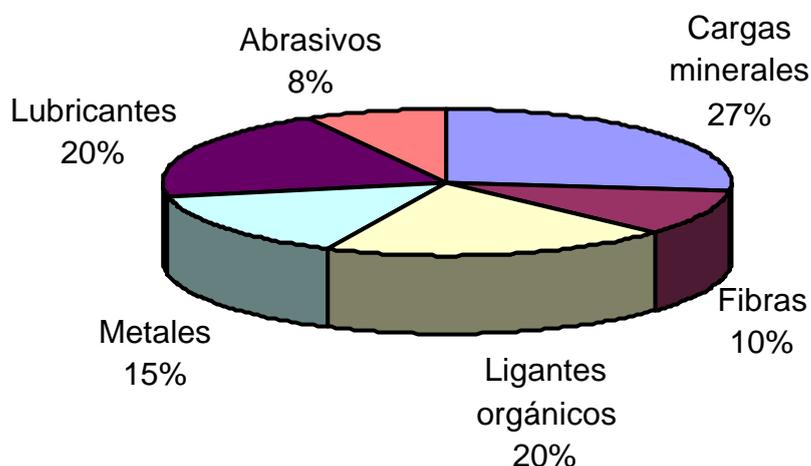
La obligatoriedad de eliminar el amianto supuso un cambio importante dentro de las formulaciones. El amianto era una fibra que constituía la base de cualquier formulación ya que era capaz de aportar las cualidades requeridas a cualquier material de fricción.

No obstante, aunque los primeros materiales “sin amianto” que aparecieron en el mercado eran de prestaciones y duración inferiores a los de “con amianto”,

hoy en día los productos “sin amianto” han superados a aquellos en todos los requisitos exigibles a un material de fricción.

En la actualidad la mayoría de los fabricantes de fricción emplea en mayor o menor medida la base que a continuación se ofrece.

- **LAS FIBRAS:** Las fibras son los elementos encargados de aglutinar y ligar el resto de los elementos. Es decir, las fibras son el “armazón” de las pastillas de freno, a través de sus múltiples ramificaciones van uniendo el resto de los elementos. Existen dos tipos principales de fibras las sintéticas y las minerales. Las más usuales en el campo de la fricción son: fibras de vidrio, fibras de aramida, lana de roca...
- **LAS CARGAS MINERALES:** Las cargas minerales son las encargadas de dar consistencia mecánica al conjunto, es decir, le aportan resistencia a la abrasión, resistencia a cortadura... Están encargadas también, de aportar resistencia a las altas temperaturas. Las más usuales son: barita, magnesita, talco, mica, carbonato, feldespato y otros.
- **COMPONENTES METÁLICOS:** Se añaden en forma de polvo o viruta para conseguir homogeneizar el coeficiente de fricción así como la transferencia de calor de la pastilla al caliper. Los más usuales son, latón, cobre, bronce entre otros.  
No obstante una gran parte de los componentes metálicos usados en los materiales de fricción, tienen efectos nocivos sobre la salud por lo que se recomienda seguir estrictamente la legislación referente a los productos que contengan tales metales pesados.
- **LOS LUBRICANTES O MODIFICADORES DE COEFICIENTE:** Son los encargados de hacer variar el coeficiente de fricción normalmente a la baja, dependiendo del rango de temperatura de funcionamiento. Son empleados en forma de polvo suelen ser grafitos, coques, sulfuros, antracitas, etc.
- **LOS MATERIALES ORGÁNICOS:** Son los encargados de aglomerar el resto de los materiales. Cuando alcanzan una determinada temperatura fluyen y ligan el resto de componentes, hasta que se polimerizan. Las más importantes son las resinas fenólicas termoendurecibles, aunque también son empleados diferentes tipos de cauchos, ceras, aceites...
- **LOS ABRASIVOS:** Cumplen principalmente la misión de incrementar el coeficiente de fricción y también renuevan y limpian la superficie del disco permitiendo la formación de la capa intermedia o también conocida como **tercera capa**.



Composición del material de fricción

### 3. FABRICACIÓN.

La fabricación de material de fricción es un proceso bastante estandarizado. Las variables del proceso son las que cada fabricante define en función del tipo de materiales que emplea, es decir, de la composición que defina. A grandes rasgos los pasos fundamentales que se deben de seguir a la hora de fabricar son:

- ◆ **EL PROCESO DE MEZCLADO:** Es uno de los principales pasos dentro del proceso de fabricación, ya que su misión es la de mezclar todos los componentes de forma homogénea. Para conseguir una buena homogeneización de la mezcla, el mezclador está provisto de un eje central que hace girar los componentes en forma de ochos y en otro eje dos cuchillas batidoras que son las que van homogeneizando la mezcla. En este proceso, uno de los factores críticos es el tiempo que los diferentes materiales pasen en el mezclador, ya que este periodo debe estar definido dependiendo del tipo de fibras que se vayan a mezclar. Cada fibra tiene un tiempo de apertura, es decir, un periodo en el cual su longitud es la mayor posible, a partir de ahí lo que sucede es que las fibras se van acortando con lo cual no realizaran la función anteriormente descrita.
- ◆ **PRENSADO EN CALIENTE:** La misión del prensado en caliente es la de aglutinar los diferentes componentes. Por una parte, con la presión que

se realiza se consiguen una reducción del volumen, pero a su vez con la temperatura lo que se hace es fundir las resinas para que estas fluyan por todo el material ligando los diferentes elementos. Este proceso lleva asociado unos ciclos de prensado, es decir, que la prensa actuará sobre las pastillas durante un determinado tiempo, para a continuación permitir la salida de los gases. En esta etapa es en la que los soportes son pegados al material de fricción. Esto se produce por dos motivos principales, uno de ellos es que el soporte lleva impregnado una resina que consigue la adhesión del material y por otro lado, existen unos huecos pasantes en los soportes cuya función es la de alojar el material de fricción que fluye para conseguir una completa fijación del material de fricción al soporte. El tiempo típico de prensado varía de 10 a 12 minutos según la fórmula empleada para permitir el curado en prensa de las resinas.

- ◆ **CURADO:** El proceso de curado se realiza en hornos, su misión principal es la completa polimerización de las resinas, para conseguir una perfecta compactación del material además de ir perdiendo el contenido todavía existente de volátiles. Este proceso también es función del tiempo y de la temperatura que se va alcanzando en las diferentes etapas. Esto significa que las pastillas van sufriendo un ciclo de diferentes temperaturas, en las cuales van pasando durante un periodo determinado.
- ◆ **SCORCHADO:** En esta última fase, el material de fricción se sube a temperaturas de 500°C o superiores bajo la acción de una placa caliente o bajo el efecto de una llama. En este último proceso se elimina una gran parte de materiales orgánicos aún existentes, el polímero (resina) se grafitiza y la pastilla de freno adquiere sus características definitivas. Este es un proceso caro y delicado por lo que muy pocos fabricantes lo incorporan a sus procesos de fabricación.
- ◆ **OPERACIONES DE MECANIZADO:** En esta etapa las pastillas sufren diferentes procesos de mecanización para adaptarlas a las características dimensionales requeridas por cada aplicación. Es decir, por un lado se rectifican para conseguir el espesor de material de fricción necesario. Otro de los procesos que pueden sufrir es la realización de catas o ranuras, al igual que los chaflanes.
- ◆ **PUESTA DE ACCESORIOS:** Durante esta etapa se le añaden a las pastillas todos los elementos complementarios tales como los muelles, resortes, avisadores...
- ◆ **MARCADO Y ESTUCHADO:** Las pastillas están finalizadas solo queda marcarlas y estucharlas para poderlas servir a los diferentes clientes.

## 4. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE LAS PASTILLAS DE FRENO.

Los requerimientos básicos del material de fricción son los que establece la propia aplicación del producto. Los más relevantes son:



Pastilla de freno

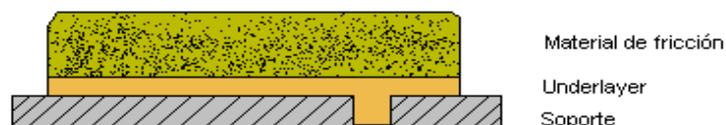
- ✓ **Presentar un coeficiente de fricción adecuado y estable a cualquier rango de temperatura y presión.**
- ✓ **Mantener un equilibrio entre abrasión y resistencia al desgaste.**
- ✓ **Una cierta compresibilidad, tanto en frío como en caliente, que haga que el material absorba vibraciones e irregularidades de la otra superficie con la que entra en contacto.**
- ✓ **Una buena resistencia al choque y al cizallamiento.**

Para conseguir satisfacer todos estos requerimientos, cada fabricante implementa sus propias formulaciones, las cuales ensaya una y otra vez hasta conseguir los resultados que le aportan la calidad que buscaban.

A continuación vamos a ver los diferentes componentes que pueden llevar consigo las pastillas de freno.

### UNDERLAYER (Subcapa):

El underlayer es una capa de material cuya función es la de fijar el material de fricción en el soporte además de reducir la temperatura que llega al caliper. Esta capa de material tiene su propia formulación, ya que no tiene los requerimientos que del material de fricción se esperan sino que sus funciones son las de unir la capa de material de fricción al soporte además de variar la conductividad térmica del material de fricción para que el calor no pase a través de ella y no se caliente el líquido de frenos en el caso de materiales de fricción con una alta conductividad térmica.



Dibujo de una pastilla de freno con UNDERLAYER.

En definitiva, es un elemento añadido que puede implicar riesgos adicionales por lo que si puede ser evitado en el proceso, es conveniente evitar el tener que usar este elemento.

#### EL SOPORTE:



Soporte metálico

El soporte es el elemento metálico cuya función es la de mantener el material de fricción en el porta pastillas de las pinzas. La característica principal es que debe de ser lo más plano posible para evitar que durante en proceso de prensado en caliente y posterior curado de las pastillas surjan fisuras entre el soporte y el material de fricción.

Los soportes se fabrican por estampación a partir de un fleje del espesor requerido. Dependiendo de la complejidad del soporte se fabrican en varios pasos, aunque es uno de los procesos más automatizados de la fabricación de las pastillas.

Los soportes son pintados con un barniz de alta resistencia para prevenir la corrosión con el paso del tiempo. La impregnación del soporte metálico con una resina de gran adherencia es una fase crítica del proceso de fabricación, ya que se debe de garantizar una correcta adherencia del material de fricción al soporte.

#### ANTIRRUIDOS.

Las láminas antirruido son accesorios cuya función principal es la de absorber las vibraciones que se producen en el contacto entre la pastilla y el disco, evitando la aparición de ruido. Existen diferentes materiales, como son láminas de fibra de vidrio, láminas metálicas... cada aplicación lleva definida un tipo de lámina diferente dependiendo del tipo de vehículo en el cual va montada la pastilla.

La forma de fijarlas al soporte suele variar dependiendo del tipo de material de la lámina antirruido. Existen láminas que van pegadas por medio de una resina fenólica las cuales tienen que ser comprimidas contra el soporte sometido el conjunto a una temperatura de unos 150°C. Otras láminas van remachadas a los tetones del soporte. Existe otra posibilidad de que la lámina vaya fijada al soporte por medio de patillas y embutida en dos tetones del soporte, para impedir su movimiento.



Láminas antirruido

Dichas láminas permiten aumentar la compresibilidad de la pastilla de freno en frío con el consiguiente efecto positivo sobre los chirridos sin aumentar sensiblemente la compresibilidad de la pastilla de freno en caliente que pudiera dar lugar a carreras del pedal excesivas.

#### OTROS ACCESORIOS.

Las pastillas para absorber las vibraciones a las que son sometidas en el caliper cuando se frena, llevan una serie de accesorios que se denominan muelles. Estos muelles están fabricados a partir de flejes. Este tipo de elementos depende de la geometría de la pastilla, del sistema de anclaje... Existen otro tipo de muelles que van situados en el propio caliper pero cuya función es la misma que los que van situados en las pastillas. En definitiva, permiten un leve movimiento de las pastillas cuando se encuentran frenando lo que hace que las vibraciones que se producen sean absorbidas.

Otro tipo de accesorios que van incluidas en las pastillas son los avisadores de desgaste. La función de estos elementos es la de alertar al usuario del vehículo de que sus pastillas están al límite de su vida útil y debe de ser sustituidas. Existen varios tipos:

**SONOROS:** Los avisadores sonoros son pequeños flejes que van alojados en los laterales del soporte, sobresalen unos dos milímetros de la superficie de fricción. Lo que produce que cuando la pastilla se ha desgastado y tan solo quedan 2 mm. de material de fricción este pequeño fleje roce contra el disco y se produzca un chirrido constante que avisa al conductor de que sus pastillas deben de ser sustituidas.

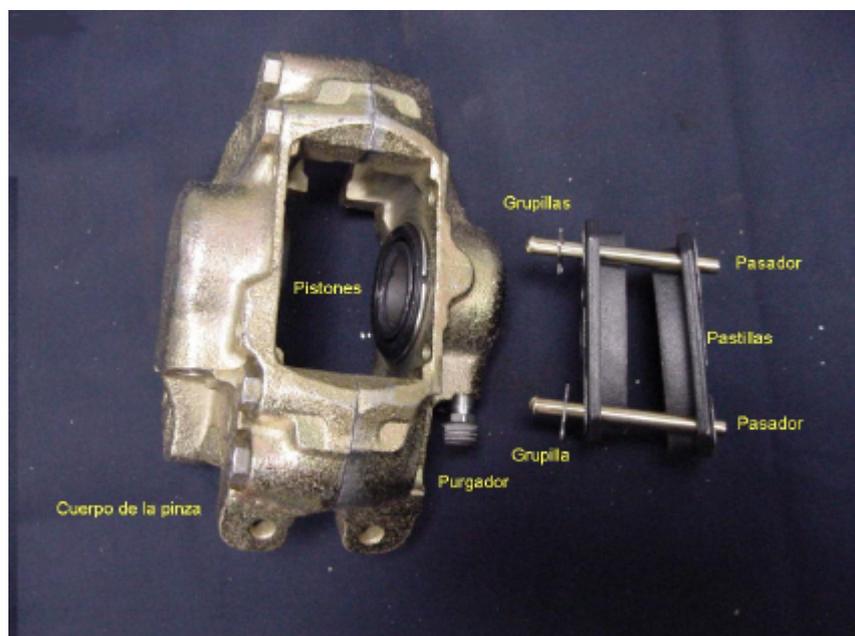


Pastilla con avisador luminoso

**LUMINOSO:** Los avisadores luminosos se componen de un cable conductor con una cabeza de polímero. Cuando este dispositivo va rozando con el disco, se debe a que a las pastillas solamente les quedan 3 mm. de superficie de fricción. El roce con el disco provoca su desgaste hasta que el cable llega a tener contacto con el disco, con lo cual hace masa, cerrando el circuito. Esto produce que se encienda un testigo en el cuadro que nos indica que debemos de pasar por el taller para cambiar las pastillas.

## 5. CONJUNTO PINZA – PASTILLA.

En el conjunto que presentamos a continuación veremos más claramente todos los elementos que componen el conjunto pinza – pastillas.



Despiece de pinza de doble pistón

1. *Cuerpo de la pinza. Da rigidez y soporta las pastillas.*
2. *Pistones. Empujan las pastillas contra el disco.*
3. *Purgador. Abre el sistema para permitir la salida del aire del circuito.*
4. *Grupillas. Retienen e impiden que se salgan los pasadores.*
5. *Pasadores. Mantienen las pastillas y les sirven de guías.*
6. *Pastillas. Friccionan contra el disco.*

## 6. PARAMETROS QUE DEFINEN EL MATERIAL DE FRICCIÓN.

El parámetro básico que define cualquier material de fricción es su coeficiente de fricción ( $\mu$ ). Durante el desarrollo de nuevas formulaciones, el coeficiente de fricción es ensayado en los dinamómetros de inercia, así como en la máquina de presión constante o dinamómetros Krauss. Una vez pasada esta fase se ensayan directamente en vehículos equipados para la adquisición de los datos que el ensayo produzca.

La herramienta fundamental sigue siendo el dinamómetro de inercia. Estos son bancos de ensayos completamente sensorizados, en los cuales se acopla el sistema de freno que se desee ensayar. Los dinamómetros están comandados por potentes sistemas informáticos que son capaces de medir cualquier parámetro durante el ensayo, desde la temperatura del disco, el coeficiente de fricción, la presión del circuito, la velocidad de giro, la deceleración, etc. Los dinamómetros



Dinamómetro de inercia

de inercia en esencia son máquinas capaces de reproducir las fuerzas que se generan en un vehículo durante el proceso de frenado. Esto implica que se consiguen simular fielmente las condiciones de trabajo del sistema de frenos, especialmente del material de fricción durante su vida en servicio.

El fundamento del dinamómetro de inercia es la conversión de la energía cinética del vehículo en energía cinética de rotación. Con lo cual, cuando se producen las frenadas se transforma la misma energía

cinética que llevaría el vehículo en energía calorífica, con lo que se reproducen las condiciones energéticas que el vehículo lleva asociadas.

$$\text{Energía cinética del vehículo} \quad E_c = \frac{1}{2} M \cdot v^2 \quad \text{Unidades [Kg]} \cdot \left[ \frac{m}{s} \right]^2$$

$$\text{Energía cinética del dinamómetro} \quad E_c = \frac{1}{2} I \cdot \omega^2 = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{2} \cdot M \cdot R^2 \right] \cdot \omega^2 \quad \text{Unidades [Kg]} \cdot \left[ \frac{m}{s} \right]^2$$

Siendo:

$M$  = Masa del vehículo (kg).

$v$  = Velocidad del vehículo (m/s)

$I$  = Momento de inercia de las masas de inercia del dinamómetro (kg · m<sup>2</sup>).

$\omega$  = Velocidad angular del dinamómetro (1/s).

Al poder igualar las dos expresiones de energía (ya que se miden en las mismas unidades) podemos calcular la inercia necesaria en el dinamómetro para simular fielmente cualquier tipo de vehículo, así como cualquier tipo de situación en carretera. Aprovechando así todas las ventajas que reporta el trabajar sobre dinamómetro.

Los dinamómetros de inercia están compuestos por un *motor eléctrico* que es el encargado de dar la velocidad necesaria a las inercias, la potencia del motor necesaria es la que determina la inercia que es capaz de mover. Las *masas de inercia* son discos de diferentes diámetros que determinan las características dimensionales del vehículo a ensayar, es decir, un vehículo con una determinada masa cuando se encuentra en movimiento lleva una energía que es la que hay que disipar al frenar, con lo cual, la masas de inercia son las que acumulan la misma energía que el vehículo que se desea simular. Lógicamente las inercias están unidas al motor eléctrico mediante un eje. En el extremo de dicho eje, se

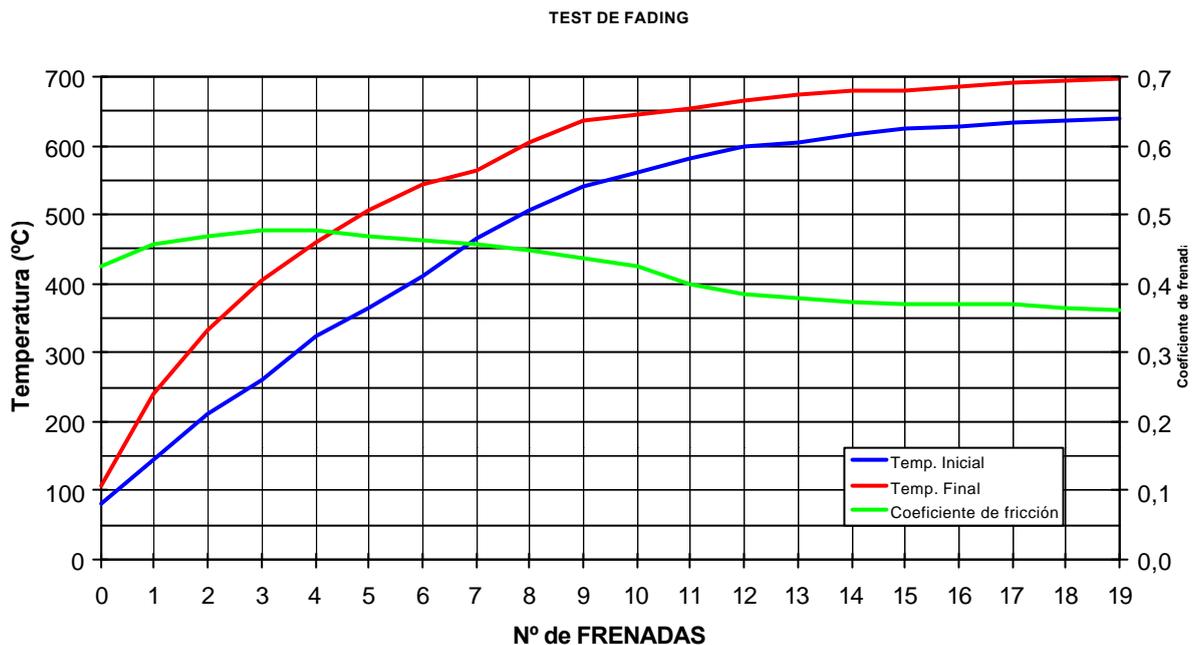
encuentra una brida donde va colocado el disco de freno. En el cabezal fijo se coloca la pinza que se desea ensayar, así como la bomba de freno, y el sistema hidráulico que comanda la bomba.

Los ensayos que se pueden realizar en el dinamómetro son muy variados ya que software que controla el banco, puede ser programado de modo que se realice el ensayo que se desee. Existen una serie de ensayos que están reconocidos a escala internacional y que a las diferentes compañías les sirve como niveles estándar de ensayo.

Los ensayos se encuentran divididos en diferentes etapas, en las cuales se prueba el material de fricción, bajo diferentes condiciones de funcionamiento. Se puede considerar que un ensayo básico está compuesto por las siguientes etapas en un programa estándar de pruebas (AK - Master):

- *Etapas de asentamiento.* La necesidad del asentamiento se hace patente en los ensayos que se realizan, al igual que nosotros debemos de hacer el asentamiento cuando cambiamos las pastillas a nuestros vehículos. El asentamiento se realiza a temperaturas inferiores a 100 °C, la presión varía desde 15 a 45 bar, el rango de velocidades es de 100 a 30 km/h. Durante toda la etapa lo que se mide es el coeficiente de fricción para ver el comportamiento del material durante las primeras frenadas. Esta etapa esta compuesta por 100 frenadas.
- *Etapas de sensibilidad a la presión.* Variando la presión del circuito se van comprobando a diferentes velocidades el coeficiente de fricción que el material es capaz de aportar. En una primera sub-etapa se realizan frenadas a 40 km/h en un rango de presiones que va desde 10 a 80 bares. En las siguientes sub-etapas la velocidad es de 80, 120, 160 y 180 km/h manteniendo el rango de presiones así como el número de frenadas.
- *Etapas de fading.* Esta etapa se suele repetir un par de veces durante el proceso, para comprobar que sucede con el coeficiente si se producen dos fading. El test de fading está compuesto de 20 frenadas en las cuales el requerimiento es alcanzar una deceleración media de  $4\text{m/s}^2$  durante diferentes temperaturas que van desde los 100°C de la primera frenada hasta los 550°C de la última frenada. Cada una de las 20 frenadas se realiza cuando se alcanza la temperatura establecida. Dichas temperaturas van incrementándose de 30°C en 30°C aproximadamente en cada frenada. La presión en el circuito es la necesaria para alcanzar una deceleración media de  $4\text{ m/s}^2$ .
- *Etapas de sensibilidad a la presión a alta temperatura.* Es igual que la etapa de sensibilidad a la presión pero con una temperatura inicial del sistema de 500°C.

- *Etapas de análisis de características.* Estas etapas lo que hacen la medición del coeficiente de fricción en condiciones de frenada normal, es decir, a una presión de 30 bar, a una temperatura inicial de 100°C y en un intervalo de velocidad de 80 a 30 km/h. Se realizan 18 frenadas durante las cuales se mide el coeficiente de fricción. Se realizan después de cada etapa descrita anteriormente.



Gráfica obtenida en la etapa de fading

Lo ideal para un buen material de fricción sería que su coeficiente de fricción se mantuviese constante en  $\mu=0,4$  durante cualquier rango de utilización, ya sea en temperatura, de presión o de cualquier otro parámetro. Además debiera de desgastarse poco y no dañar la otra superficie contra la que entra en contacto, pero esto es una utopía ya que el material de fricción está sujeto a muchos cambios como ya hemos visto.

El material de fricción no se caracteriza solo por el coeficiente de fricción sino que además existen otras características intrínsecas al material. Dichas características deben de mantenerse dentro de unos límites para que el material cumpla su función primaria.

### DENSIDAD.

La densidad ( $\rho$ ) del material de las pastillas es la relación entre la masa del material de fricción dividido del volumen que ocupa. Es un dato importante porque

puede darnos idea como estamos prensando durante el proceso de fabricación, y también como pueden ser las expectativas de vida en ser vicio.

### ***POROSIDAD.***

La porosidad es entendida como el volumen relativo de la proporción de cavidades en el material. Esto incluye poros, ampollas de aire y cualquier cavidad que presente el material. La proporción de cavidades debe de ser menor al 5% de la superficie de la pastilla y no afectar a su perfil para que así no sea rechazada la pastilla. Una porosidad elevada puede provocar desgastes prematuros y una porosidad reducida puede dar lugar a chirridos.

### ***FUERZA DE CIZALLADURA.***

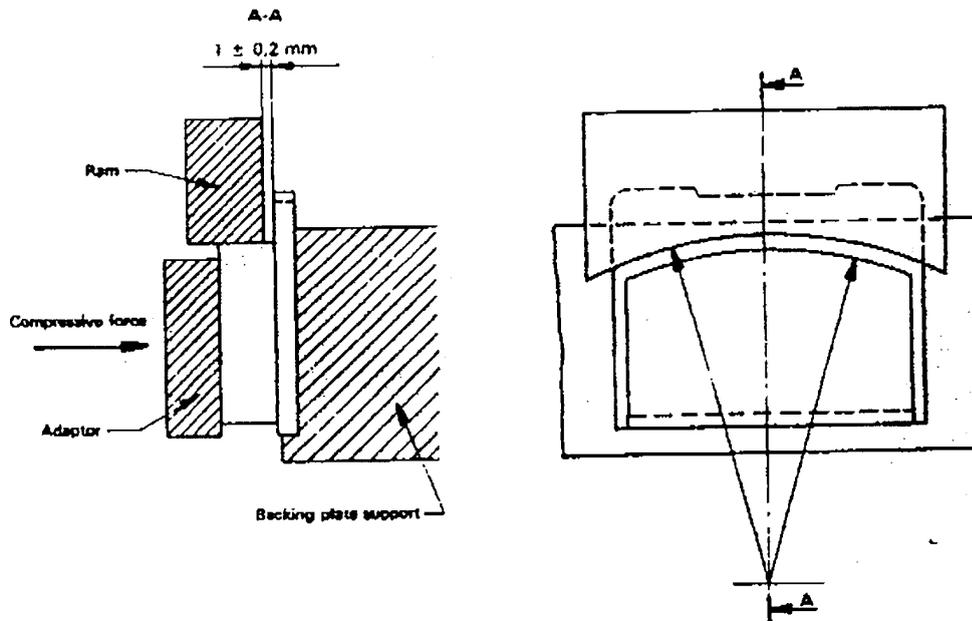
La fuerza de cizalladura es la resistencia que presenta el material de fricción a ser separado del soporte cuando sobre el actúa una fuerza tangencial. Este valor es de los más importantes ya que las pastillas de freno cuando se encuentran frenando están sometidas no solo a las fuerzas normales contra el disco sino también a grandes esfuerzos tangenciales que son los que realiza el disco al intentar arrastrar las pastillas en el sentido de su giro.

El valor mínimo aceptable para un test de cizallamiento es de 250 N/cm<sup>2</sup>, según Reglamento 90, esta presión equivale a desarrollar una fuerza de 1250 kg. en una pastilla de tipo medio, con un área de 50 cm<sup>2</sup>. Si esta característica no se cumple es necesario el tomar medidas correctivas que consigan una mayor adherencia entre el soporte y el material de fricción. Las principales acciones encaminadas a corregir este defecto son el empleo de un adhesivo diferente, incluso variar el material de fricción para que fluya mejor por los huecos del soporte y su adhesión al mismo sea mejor.

Es importante destacar no solo el valor de rotura o presión máxima de cizalladura que soporta el material, sino la adhesión que este presenta sobre el soporte metálico, ya que una vez separado el material de fricción del soporte debe de quedar material adherido al soporte en cantidad superior al 80 % de la superficie del mismo. Si esto no fuese así sería necesario tomar las medidas oportunas, descritas anteriormente.

En la figura se puede ver como se debe aplicar la fuerza de rotura en la máquina, es importante que el radio del útil que empujará a la superficie de fricción tenga el mismo radio que la pastilla para cumplir con lo estipulado según el Reglamento 90.

El ensayo descrito anteriormente, se utiliza como ensayo de control, tanto en el desarrollo de nuevos materiales como en el control normal de Calidad que se realiza durante todo el proceso productivo.



Esquema del ensayo de cizalladura.

## COMPRESIBILIDAD.

La compresibilidad es el cambio de espesor en las pastillas por la aplicación de una fuerza normal a la superficie de las pastillas. Este ensayo se realiza en dos condiciones diferentes, en un principio se realiza a temperatura ambiente, lo que se conoce como compresibilidad en frío y en posteriormente se realiza colocando la pastilla por el lado del material de fricción contra una superficie que se encuentra a  $400^{\circ}\text{C}$  durante 10 minutos, es el conocido como test de compresibilidad en caliente.

Cuando el valor de la compresibilidad en frío es mayor a un 2% del espesor de la pastilla, se debería de modificar el material de fricción para que no se produzca una reducción tan grande en el espesor del material. Durante el



Máquina de compresibilidad

ensayo en caliente el valor máximo de compresibilidad debe ser menor al 5%. Si se sobrepasase este valor de nuevo deberían de tomarse medidas correctivas ya que ambos límites máximos tanto para frío como para caliente están definidos según Reglamento 90.

Es importante destacar que la compresibilidad de las pastillas de freno es una de sus características básicas ya que con una cierta compresibilidad se absorben vibraciones entre disco y pastilla reduciendo así los efectos nefastos que las vibraciones presentan en el sistema de freno y que normalmente se traducen en ruido. Por otro lado, una compresibilidad excesivamente alta puede dar lugar a carreras de pedal muy largas.

## ***CONDUCTIVIDAD TÉRMICA***

La conductividad térmica de los materiales de fricción es la propiedad física por la cual tienen la capacidad de transmitir el calor hacia su interior. Para el caso de las pastillas de freno es muy importante que la conductividad térmica sea capaz de evacuar el calor hacia el exterior de la pastilla pero se debe controlar ya que si ese calor pasase a través del soporte metálico hasta la pinza, llegaría hasta el líquido de freno. Dicho calor puede provocar que el líquido entre en ebullición con las consecuentes pérdidas de eficacia de frenada. Los síntomas claros de esta ebullición es el aumento de la carrera de pedal, que se iría al fondo, con la consiguiente pérdida de eficacia de frenado.

Los valores de conductividad térmica son muy variables con la formulación de material de fricción, ya que si las pastillas son semi-metálicas (aquellas que tienen alto contenido en lana de acero, de cobre, latón u otros), su conductividad térmica será mayor ya que los metales son mejores conductores de la temperatura. Por ello en formulaciones semi-metálicas es muy importante colocar un underlayer que evite la transferencia de calor al líquido de freno para evitar que el líquido de freno, eventualmente, entre en ebullición. En materiales de fricción de base orgánica la conductividad térmica será menor de forma que no tendrán, en la mayoría de los casos, la necesidad de usar underlayer.

## ***7. RESUMEN.***

Los factores descritos anteriormente pueden ser incluso contradictorios entre ellos mismos y en definitiva, el éxito para desarrollar una pastilla de freno de calidad, depende del criterio del fabricante en cuanto a como valorar y ponderar los efectos de dichos factores para poder ofrecer al usuario el mejor producto posible según las expectativas de los usuarios.