



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
GRADO EN INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA
Especialidad Mecánica

**CREACIÓN DE UN BANCO DE ENSAYOS PARA
EL ANÁLISIS DEL RUIDO QUE GENERAN LOS
SISTEMAS DE FRENADO Y VALORACIÓN DEL
IMPACTO DE LA HUMEDAD EN EL ESTUDIO DE
ESTE FENÓMENO**

Autor: Fernando Quintanilla Pastor

Director: Yannick Desplanques

Madrid

Agosto 2018

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título *Creación de un banco de ensayos para el análisis del ruido que generan los sistemas de frenado y valoración del impacto de la humedad en el estudio de este fenómeno.*

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2017-2018 es de mi autoría, original e inédito y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Fernando Quintanilla Pastor Fecha: 31/ 08/2018



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Yannick Desplanques Fecha: 31/08/ 2018



AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESINAS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. Fernando Quintanilla Pastor DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra:

Creación de un banco de pruebas para el análisis del ruido generado por los sistemas de frenado y valoración del impacto de la humedad en el estudio de este fenómeno, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducir la en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.
- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos

derivada de las obras objeto de la cesión.

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 31 de agosto de 2018

ACEPTA

Fdo.: Fernando Quintanilla Pastor



Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
GRADO EN INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA
Especialidad Mecánica

**CREACIÓN DE UN BANCO DE ENSAYOS PARA
EL ANÁLISIS DEL RUIDO QUE GENERAN LOS
SISTEMAS DE FRENADO Y VALORACIÓN DEL
IMPACTO DE LA HUMEDAD EN EL ESTUDIO DE
ESTE FENÓMENO**

Autor: Fernando Quintanilla Pastor

Director: Yannick Desplanques

Madrid

Agosto 2018

CREACIÓN DE UN BANCO DE ENSAYOS PARA EL ANÁLISIS DEL RUIDO QUE GENERAN LOS SISTEMAS DE FRENADO Y VALORACIÓN DEL IMPACTO DE LA HUMEDAD EN EL ESTUDIO DE ESTE FENÓMENO

Autor: Quintanilla Pastor, Fernando.

Director: Desplanques, Yannick.

Entidad colaboradora: École Centrale de Lille.

RESUMEN DEL PROYECTO

Introducción

Los sistemas de frenado de hoy en día generan ruido debido a las vibraciones inducidas por el frotamiento del disco de freno con la pastilla de freno. Normalmente, estas vibraciones se clasifican en función de su frecuencia. Este trabajo se centra en el estudio de las frecuencias entre 1 kHz y 10kHz que se encuentran habitualmente en los sistemas de frenado de automóviles y ferrocarriles. En esta gama de frecuencias encontramos ruidos muy desagradables que pueden llegar hasta los 100 dB, molestando a los pasajeros de estos medios de transporte. Sin embargo, pese a lo desapacibles que son estas emisiones acústicas, no tienen ningún impacto sobre la calidad del frenado.

Este fenómeno representa una pérdida económica importante para los fabricantes de componentes automovilísticos ya que los usuarios se ven obligados a cambiar los sistemas de frenado defectuosos de estos coches antes del vencimiento de su garantía. Es por esto que desde hace unos cuarenta años este fenómeno ha sido objeto de numerosos estudios con el objetivo de encontrar una solución para conseguir atenuarlo o hacerlo desaparecer. A día de hoy, no se comprende completamente este fenómeno y esto limita las soluciones propuestas por los distintos ingenieros.

Desde un punto de vista científico, este fenómeno es muy complejo de estudiar. En el análisis del ruido producido por un freno entran en juego distintos ámbitos: la tribología, la mecánica de estructuras, la ciencia de materiales y la temperatura. Existen diferentes formas de abordar este problema: experimentalmente con medios de ensayo a escala real o reducida, numéricamente con simulaciones o con modelos analíticos. En École Centrale de Lille existe la posibilidad de abordar este problema sirviéndose de un banco de ensayos a escala reducida capaz de acercarse lo máximo posible a un sistema de frenado real. Este banco de ensayos pone en juego las distintas interacciones que se encuentran en un freno y hace que el estudio de este fenómeno sea muy complejo. Además, este banco de ensayos no facilita el estudio del tercer cuerpo (responsable de la localización y la dinámica de contacto en la interface entre el disco de freno y el patín) debido a su dispar composición de partículas y a su complejo flujo. Es por esto que este proyecto trata de encontrar la forma de poder analizar lo que ocurre entre los dos elementos principales de un sistema de frenado.

Además de encontrar la forma de saber cuál es el impacto del tercer cuerpo en los sistemas de frenado, también se quiere analizar cómo influyen factores externos sobre el tercer cuerpo. Entre los distintos factores externos, la humedad es uno de los más interesantes ya que sabe que la humedad tiene un impacto en la aparición del ruido pero no se sabe hasta que punto la humedad es un factor a tener en cuenta a la hora de estudiar este fenómeno. Es por esto que es interesante saber si los

resultados variarán de forma considerable en función de la humedad ya que es un factor que fluctúa a lo largo del año con periodos de mayor humedad en invierno que en verano.

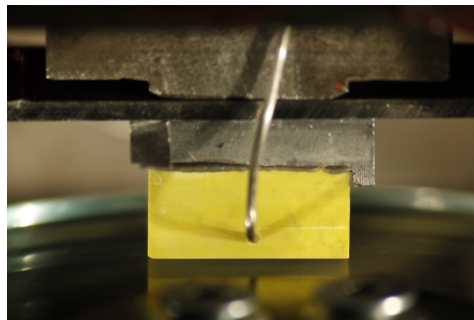
Metodología

Para poder analizar cuál es el impacto que tiene el tercer cuerpo en la aparición de este fenómeno acústico se necesita modificar el banco de ensayos que se encuentra en el École Centrale de Lille de tal forma que, por un lado, se pueda ver lo que ocurre en la superficie de contacto cuando aparece este fenómeno y, por otro lado, se reduzca el número de flujos de partículas que dan lugar al tercer cuerpo.

Para ello, se decide utilizar un disco de cristal que permite ver a través de su superficie lo que sucede cuando entra en contacto con el patín. A diferencia del banco de ensayos disponible en el École Centrale de Lille que consta de una pastilla de freno de hierro, en este caso se utilizará un patín de poliuretano que es un material que es menos duro que el cristal y, por lo tanto, no lo erosiona.

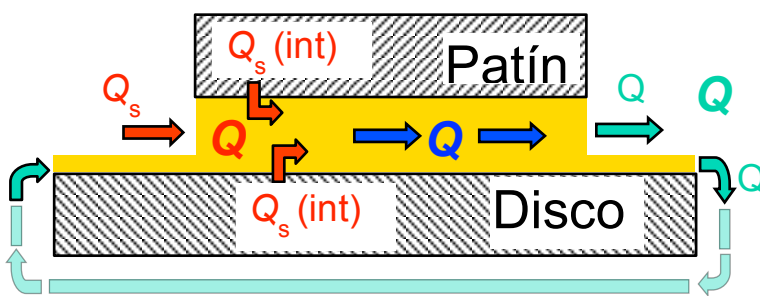


Disco de cristal

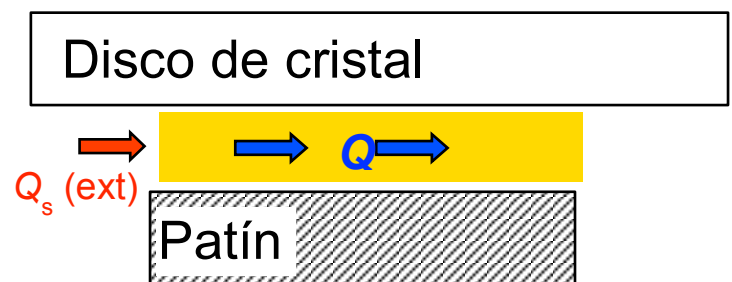


Patín de poliuretano

La combinación de los materiales de estos dos elementos simplifica el estudio de este fenómeno acústico ya que se reduce el número de flujos secundarios que dan lugar al tercer cuerpo. Por ejemplo, desaparecen las oxidaciones de hierro al utilizar un disco de cristal en lugar de uno de acero.



Flujo de partículas previo a las modificaciones



Flujo de partículas posterior a las modificaciones

Para poder analizar el papel que juega el tercer cuerpo en este fenómeno acústico se introduce uno artificial, aluminio en polvo, cuyo tamaño de partículas es muy similar al del tercer cuerpo natural que se encuentra en los sistemas de frenado reales. Además, este tercer cuerpo es un polvo de color blanco que nos permite ver claramente su comportamiento a través del disco de cristal.

Una vez se han introducido estas modificaciones se puede proceder a realizar los distintos experimentos con el nuevo banco de ensayos para así poder comprobar si este nuevo banco de pruebas permite el estudio del impacto del tercer cuerpo en la aparición de este fenómeno acústico.

Como se ha mencionado anteriormente, la humedad es un factor que altera los resultados recogidos a la hora de estudiar el ruido producido por un freno. Por lo tanto, se llevan a cabo estudios reológicos del aluminio en polvo para así poder conocer cuál es la magnitud del impacto de la humedad en la libre circulación de las partículas del tercer cuerpo.

Resultados

Para comprobar que el nuevo banco de ensayos permite que se pueda estudiar cuál es el impacto del tercer cuerpo en la aparición del chirrido, se llevan a cabo dos tipos de experimentos: unos primeros en los que no introducimos el tercer cuerpo artificial y otros posteriores en los que sí lo introducimos.

En la mayor parte de los experimentos realizados en los que no se utiliza el tercer cuerpo, no aparece el chirrido. Sin embargo, en unos pocos de ellos recogemos resultados en los que sí se da lugar a este fenómeno. En estos casos, el área de la superficie de fricción varía.

En los experimentos realizados con el tercer cuerpo se puede apreciar un pequeño flujo de partículas en el patín debido a la evolución de la compactación del tercer cuerpo a lo largo del experimento y a que la zona de carga varía. Este flujo de partículas da lugar a inestabilidades en el tercer cuerpo. En función del tamaño y la localización de las zonas de carga los sensores de sonido captan el chirrido a distintas frecuencias.

Para analizar el impacto que tiene la humedad sobre el tercer cuerpo se llevan a cabo dos experimentos: el primero, un estudio de la evolución de la humedad con distintas cantidades de polvo y, el segundo, una compactación del aluminio en polvo con distintos niveles de humedad.

Con el primero de estos dos experimentos se descubre que la cantidad de aluminio en polvo juega un papel muy significativo en la evolución de la humedad. Cuanto mayor sea la cantidad de polvo utilizada en el experimento, mayor es el tiempo que tarda el polvo en captar la humedad de la habitación.

Con el segundo experimento obtenemos unos resultados que nos muestran que una tasa de humedad baja implica una buena circulación de las partículas y una tasa de humedad alta implica una mayor reorganización de las partículas, es decir, un peor flujo de partículas.

Conclusiones

Con este proyecto se querían conseguir dos objetivos principales. El primero, crear un banco de ensayos que permita analizar la interface de contacto entre el disco y el patín de freno en la que se encuentra el tercer cuerpo cuyo comportamiento esta ligado a la aparición del ruido, y el segundo, valorar cuál es el impacto de la humedad en el estudio de este fenómeno.

El primer objetivo se ha conseguido con creces ya que con el nuevo banco de ensayos se puede filmar a través del disco de cristal la interface de contacto con la ayuda de una cámara y así poder apreciar los cambios en el comportamiento del tercer cuerpo cuando aparece el chirrido. Gracias a los experimentos llevados a cabo con este nuevo banco de ensayos ha quedado comprobado que este

fenómeno acústico es verdaderamente complicado de analizar ya que se parte de la hipótesis de que el chirrido tiene lugar principalmente debido a la presencia del tercer cuerpo y se ha comprobado que el sistema de frenado produce el chirrido (aunque esto no pasa muy a menudo) incluso cuando no hay un tercer cuerpo entre el patín y el disco de freno. También se ha podido mostrar a través de los experimentos que cuando se producen cambios en la localización de las zonas de presión sobre el tercer cuerpo se origina el chirrido. Estos cambios de localización son originados debido al flujo de partículas existente entre el patín y el disco. Además, en función de la localización de estas zonas de presión, el micrófono capta distintas frecuencias de chirrido.

Para poder analizar más en detalle por qué se origina este desagradable sonido se debe proceder a examinar las zonas de mayor y menor presión de contacto para poder sacar conclusiones a cerca de la relación que pueda tener el grado de compactación del tercer cuerpo y la aparición del ruido. Para examinar la profundidad y la porosidad de la muestra del tercer cuerpo atrapada sobre el patín se debe utilizar un instrumento llamado Focused Ion Beam que es un instrumento científico similar a un Microscopio electrónico de barrido.

En cuanto al segundo objetivo, a través de los experimentos llevados a cabo en el Ecole Centrale de Lille se ha podido valorar el impacto de la humedad en el estudio de este fenómeno acústico. Con el primer experimento queda demostrado que en función de la cantidad de aluminio en polvo utilizado en los experimentos la evolución de la humedad atrapada en él varía significativamente. Esto es de vital importancia si se está interesado en mantener una tasa de humedad constante a lo largo del experimento. Cuanto mayor sea la cantidad de tercer cuerpo utilizado más tiempo ha de transcurrir para que el polvo seco adquiera la humedad de la habitación. Los resultados del segundo experimento muestran que una tasa de humedad baja implica una buena circulación de partículas y que una tasa de humedad elevada implica una mayor reorganización de las partículas, es decir, una peor calidad del flujo de partículas. Hay que tener cuidado a la hora de elegir la tasa de humedad ya que si se escoge una tasa muy baja puede ser posible que se pierda la mayor parte del tercer cuerpo una vez se ponga en marcha el motor que hace rotar el disco de cristal.

CREATION OF A TEST BED FOR THE STUDY OF THE SOUND GENERATED BY BRAKING SYSTEMS & EVALUATION OF THE IMPACT OF HUMIDITY IN THE STUDY OF THIS PHENOMENON

Author: Quintanilla Pastor, Fernando.

Director: Desplanques, Yannick.

Coopering body: École Centrale de Lille.

PROYECT SUMMARY

Introduction

Nowadays braking systems generate sound because of the vibrations induced by the friction of the braking disc and the brake pad. Normally, these vibrations are classified due to their frequency. This project is focused on frequencies in between 1 kHz and 10 kHz, which can be found in cars and trains braking systems. In these frequency ranges we find really annoying sounds, which can reach 100 dB, disturbing the passengers of these means of transportation. However, these acoustic emissions have no impact in the braking quality.

This phenomenon represents a big economical loss for the producers of car components because the car owners are forced to change those braking systems, which do not work correctly before the loss of the guarantee. This is why people have been looking for a solution for forty years. Nowadays, this phenomenon is not completely understood and this limits the proposed solutions from the different engineers.

From a scientific point of view, this phenomenon is really complicated to study. In the analysis of the sound produced by a braking system there are different fields that have to be taken into account: tribology, mechanical structures, materials science and temperature. There are many different ways of approaching the study of this problem. In École Centrale de Lille there is a test bed, which is capable of reproducing the mechanics of a real braking system. This machine does not facilitate the study of the third body (responsible of the location and the contact dynamics in the interface between the disc and the pad) because of its uneven composition and its complicated tribological flow of particles. This is why this project is focused on looking for a way of being able to analyse what goes happens between the two principle elements of the braking systems.

Further finding a way of knowing what is the impact of the third body in the braking systems, is useful to know how external factors influence the behaviour of the third body. Humidity is one of the most interesting external factors because we already know that it has an impact in the generation of sound and because it is a factor that fluctuates during the year with picks in summer and winter. This is why it is exciting to know if the results will change considerably depending on the percentage of humidity.

Methodology

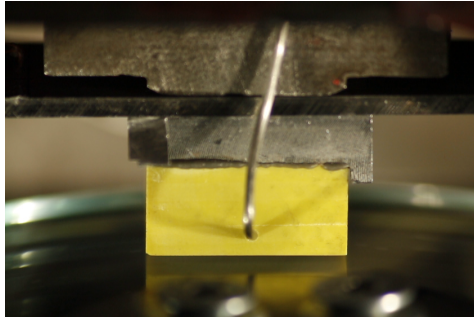
In order to be able to analyse the third body's impact on listening a squeal produced by a braking system, we need to modify the test bed from École Centrale de Lille so that we can see what

happens in the interface between the disc and the pad and so that the number of particle fluxes which lead to the third body is reduced.

To accomplish this mission, a glass disc is used instead of the iron one used before. This new disc allows us to see through it. In contrast to the iron pad used previously, a polyurethane pad will be used which is a material that does not erode the glass surface of the disc.

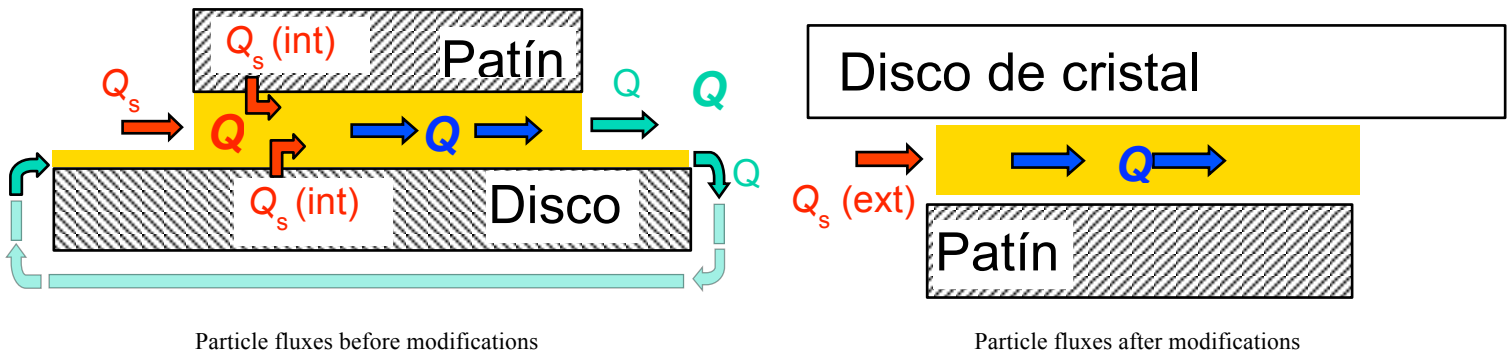


Glass disc



Polyurethane pad

The combination of the materials of these two elements simplifies the study of this acoustic phenomenon because the number of particle fluxes, which lead to the third body, is reduced. For example, there are no more iron oxidations when a glass disc is used.



Particle fluxes before modifications

Particle fluxes after modifications

To be able to analyse the role that the third body plays in the appearance of the squeal, an artificial third body must be introduced, aluminium powder, that has a similar particle size than the natural third body.

Once these modifications are put into place the different experiments can be carried out in order to see if this new test bed helps to analyse the impact of the third boy in the appearance of this noise.

As mentioned before, the humidity is one of the external factors that modify the results collected when studying the noise produced by a braking system. This is why, rheological studies of the aluminium powder are taken into place in order to analyse the magnitude of this impact.

Results

To verify that the new test bed allows you to study the impact of the third body on the appearance of squeal, two types of experiments are carried out: firstly, ones where we do not introduce the artificial third body and, secondly, ones where we do introduce it.

In most of the experiments performed in which the third body is not used, the squeal does not appear. However, in a few of them the results show that this phenomenon does occur. In these cases, the area of the friction surface varies.

In the experiments carried out with the third body, a small flow of particles can be seen on the pad due to the evolution of the compaction of the third body throughout the experiment and to the variation of the loading zone. This flow of particles gives rise to instabilities in the third body. Depending on the size and location of the loading areas, the sound sensors pick up the squeal at different frequencies.

To analyse the impact of moisture on the third body, two experiments are carried out: firstly, a study of the evolution of humidity with different amounts of powder and, secondly, a compaction of aluminium powder with different levels of humidity.

With the first experiment it is discovered that the amount of aluminium powder plays a very significant role in the evolution of humidity. The greater the amount of powder used in the experiment, the longer it takes for the powder to capture the moisture of the room.

With the second experiment we obtain results that show us that a low humidity rate implies a good circulation of particles and a high humidity rate implies more particle reorganization, that is, a worse flow of particles.

Conclusions

There were two main objectives to be achieved. On the one hand, create a test bench that allows us to analyse the contact interface between the disc and the brake pad in which the third body is located whose behaviour is linked to the appearance of noise, and, on the other hand, assessing what is the impact of moisture in the study of this phenomenon.

The first goal has been achieved with great success, since with the new test bed the contact interface can be filmed through the glass disk with the help of a camera and thus be able to appreciate the changes in the behaviour of the third body when the squeal appears. Through the experiments carried out with this new test bed it has been proven that this acoustic phenomenon is truly complicated to analyse since it is based on the hypothesis that the squeal takes place mainly due to the presence of the third body and it has been proven that the braking system produces this noise (although this does not happen very often) even when there is no third body between the pad and the brake disc. It has also been shown through the experiments that when changes occur in the location of the pressure zones on the third body, the squeal is generated. These changes of location are caused by the flow of particles between the pad and the disc. In addition, depending on the location of these pressure zones, the microphone picks up different squeal frequencies.

To be able to analyse in more detail why this unpleasant sound is originated, one should proceed to examine the zones of greater and lesser contact pressure in order to draw conclusions about the relationship between the degree of compaction of the third body and the appearance of the noise. To examine the depth and porosity of the sample of the third body trapped on the pad; an instrument called Focused Ion Beam should be used, which is a scientific instrument similar to a scanning electron microscope.

Regarding the second objective, through the experiments carried out at the École Centrale in Lille it was possible to assess the impact of humidity in the study of this acoustic phenomenon. The first experiment shows that depending on the amount of aluminium powder used in the experiments

the evolution of the moisture trapped in it varies significantly. This is of vital importance if you are interested in maintaining a constant humidity rate throughout the experiment. The greater the amount of third body used, the more time must pass before the dry powder acquires the humidity of the room. The results of the second experiment show that a low humidity rate implies a good particle circulation and that a high humidity rate implies a greater reorganization of the particles, that is, a poorer quality of the particle flow. You have to be careful when choosing the humidity rate because if a very low rate is chosen it may be possible to lose most of the third body once the engine that rotates the glass disc is put on.

Índice

Capítulo 1: Introducción.....	16
Capítulo 2: Estado de la cuestión.....	18
Capítulo 3: Objetivos	23
Capítulo 4: Banco de pruebas de M. Duboc	24
Capítulo 5: Modificaciones llevadas a cabo en el banco de pruebas de M. Duboc.....	28
Capítulo 6: Preparación de los experimentos	32
Capítulo 7: Experimentos en el nuevo banco de ensayos	34
1. Primeros experimentos sin tercer cuerpo.....	34
Resultados	34
Conclusión	35
2. Últimos experimentos sin tercer cuerpo	35
Resultados	35
Conclusión	36
3. Experimentos con tercer cuerpo.....	36
Resultados	36
Conclusión	37
Capítulo 8: Análisis del impacto de la humedad en el estudio de este fenómeno acústico	38
1. Estudio de la evolución de la humedad con distintas cantidades de polvo	39
1.1 Objetivo.....	39
1.2 Método	39
1.3 Desarrollo del experimento	39
1.4 Resultados	40
1.5 Conclusión.....	41
2. Compactación del aluminio en polvo con distintos niveles de humedad.	43
2.1 Objetivo.....	43
2.2 Método	43
2.3 Desarrollo del experimento	44
2.4 Resultados	45
2.5 Conclusión.....	45
Capítulo 9: Creación de un sistema de aislamiento para el banco de ensayos	47
Capítulo 10: Conclusión.....	50
Bibliografía	52
Referencias.....	53
Anexo A: Resultados del estudio de la evolución de la humedad con distintas cantidades de polvo	54

Anexo B: Resultados del test de compactación del polvo con distintos niveles de humedad56

Anexo C: Resultados de la evolución de la humedad dentro del sistema de aislamiento57

Capítulo 1: Introducción

Los sistemas de frenado de hoy en día generan ruido debido a las vibraciones inducidas por el frotamiento del disco de freno con la pastilla de freno. Normalmente, estas vibraciones se clasifican en función de su frecuencia. Este trabajo se centra en el estudio de las frecuencias entre 1 kHz y 10kHz que se encuentran habitualmente en los sistemas de frenado de automóviles y ferrocarriles. En esta gama de frecuencias encontramos ruidos muy desagradables que pueden llegar hasta los 100 dB, molestando a los pasajeros de estos medios de transporte. Sin embargo, pese a lo desagradables que son estas emisiones acústicas, no tienen ningún impacto sobre la calidad del frenado.

Este fenómeno representa una pérdida económica importante para los fabricantes de componentes automovilísticos ya que los usuarios se ven obligados a cambiar los sistemas de frenado defectuosos de estos coches antes del vencimiento de su garantía. Es por esto que desde hace unos cuarenta años este fenómeno ha sido objeto de numerosos estudios con el objetivo de encontrar una solución para conseguir atenuarlo o hacerlo desaparecer. A día de hoy, no se comprende completamente este fenómeno y esto limita las soluciones propuestas por los distintos ingenieros.

Desde un punto de vista científico, este fenómeno es muy complejo de estudiar. En el análisis del ruido producido por un freno entran en juego distintos ámbitos: la tribología, la mecánica de estructuras, la ciencia de materiales y la temperatura. Existen diferentes formas de abordar este problema: experimentalmente con medios de ensayo a escala real o reducida, numéricamente con simulaciones o con modelos analíticos. En École Centrale de Lille existe la posibilidad de abordar este problema sirviéndose de un banco de ensayos a escala reducida capaz de acercarse lo máximo posible a un sistema de frenado real. Este banco de ensayos pone en juego las distintas interacciones que se encuentran en un freno y hace que el estudio de este fenómeno sea muy complejo.

A pesar de usar uno de los sistemas más completos que existen a día de hoy, siempre se topa uno con factores externos de los que se desconoce su impacto en los resultados conseguidos. Entre los distintos factores externos, la humedad es uno de los más desconocidos. Se sabe que la humedad tiene un impacto en la aparición de ruido pero no se sabe hasta que punto la humedad es un factor a tener en cuenta a la hora de estudiar este fenómeno. Es por esto que es interesante

saber si los resultados variarán de forma considerable en función de la humedad ya que es un factor que fluctúa a lo largo del año con periodos de mayor humedad en invierno que en verano.

Capítulo 2: Estado de la cuestión

Debido a que en este proyecto se tratan dos temas distintos, el estado de la cuestión quedará dividido en dos; por un lado, se tratarán las soluciones existentes para el estudio del chirrido ocasionado al frenar y, por otro lado, se analizarán los distintos métodos existentes para el análisis del impacto de la humedad en el tercer cuerpo¹.

1. Existen diversos bancos de ensayos desarrollados para el estudio de este fenómeno acústico:

- a. Banco de ensayos desarrollado por O. Giannini: "Este banco permite abordar este fenómeno de una manera global. Está constituido por dos pastillas de freno, una a cada lado del disco. Los estudios realizados sobre él consisten en variar parámetros como la velocidad angular o el ángulo de inclinación con el que la pastilla ataca al disco. Debido a su estructura compleja es complicado llevar a cabo estudios sobre los fenómenos locales de contacto."¹

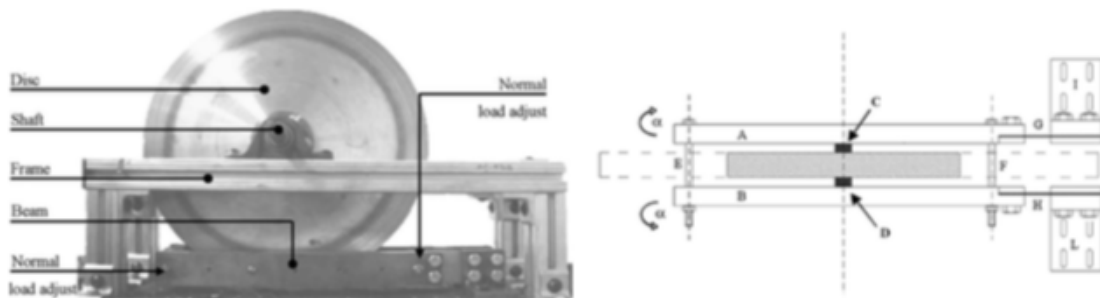


Figura 1: Banco de pruebas de O. Giannini

- b. Banco de ensayos desarrollado por Y. Oura: "Compuesto por un disco y una pastilla de freno. Se estudia la influencia que tiene la presión ejercida sobre la pastilla y a su vez, sobre el disco. Los resultados muestran frecuencias de chirrido próximas a la frecuencia propia del disco y que estas frecuencias aumentan con el aumento del esfuerzo aplicado sobre el disco y el grosor del disco."¹

¹ Tercer cuerpo: Interface que se encuentra entre el disco y la pastilla de freno. Esta interface está formada por partículas que se encuentran en el aire y por pequeñas partículas que se liberan debido al frotamiento y al desgaste de los dos cuerpos.

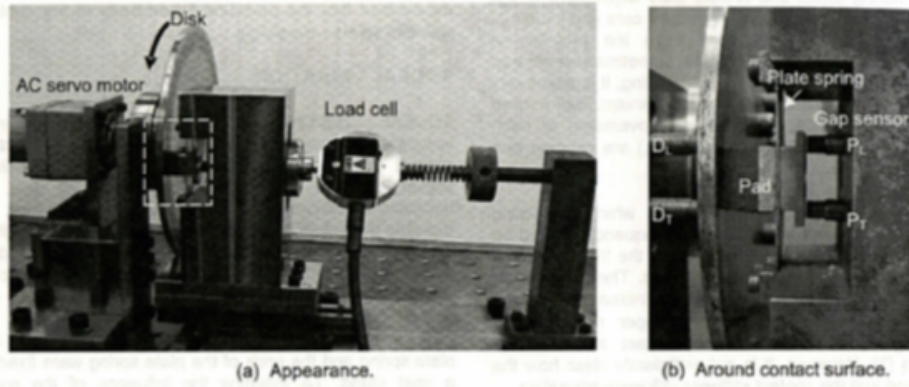


Figura 2: Banco de pruebas de Y. Oura

- c. Banco de ensayos desarrollado por F. Massi: "Este sistema cuenta con un disco de acero en rotación sobre el cual vamos a frotar una pastilla de freno. Con este sistema se puede cambiar el esfuerzo aplicado sobre él y así, cambiar las frecuencias propias del disco y la pastilla de freno. Gracias a los estudios realizados sobre este banco de ensayos, sabemos que el chirrido está relacionado con el "modo lock-in" en el que las frecuencias propias del disco y la pastilla de freno son la misma." 1

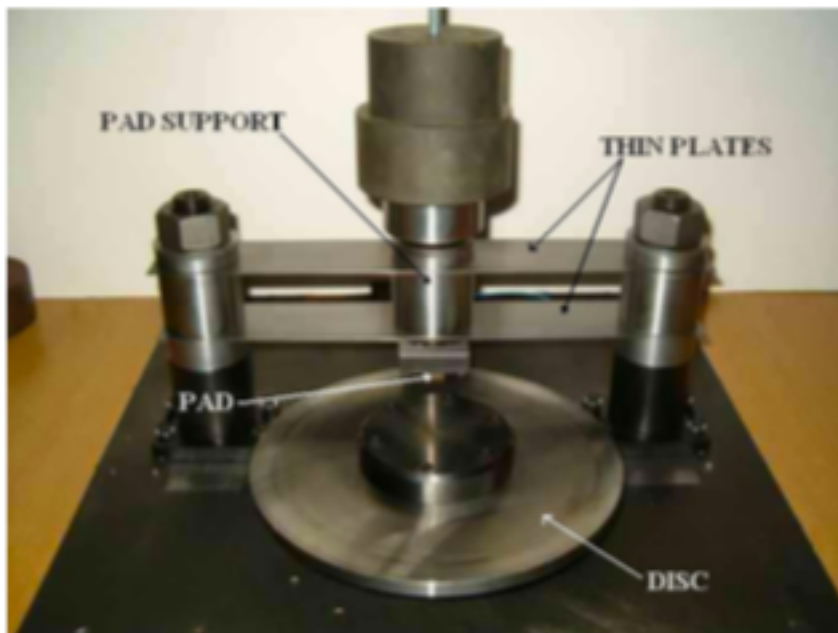
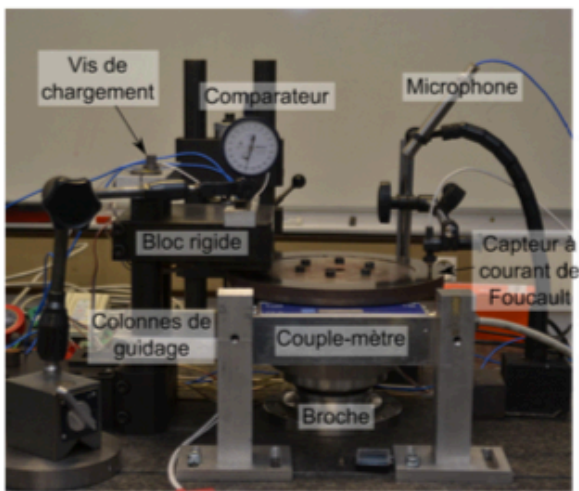


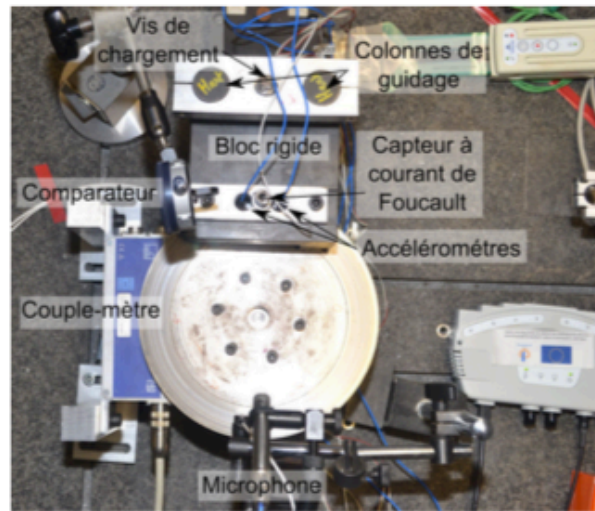
Figura 3: Banco de pruebas de F. Massi

- d. Banco de ensayos desarrollado por M. Duboc: "Sistema de frenado con un comportamiento dinámico cercano al de un freno real pero con dimensiones reducidas

con el objetivo de facilitar las observaciones. Este banco de ensayos consta de un disco de acero conectado a un motor eléctrico y una pastilla de freno unida a una máquina controlada por ordenador con la que se pueden modificar los distintos parámetros de los ensayos. Se le puede aplicar una fuerza entre 50N y 500N. Nos permite medir la ondulación del disco, el nivel de ruido, el desplazamiento de la pastilla de freno y las fuerzas normal y tangencial en el contacto para determinar el coeficiente de rozamiento.”¹



(a) Vue de profil du banc d'essais



(b) Vue du dessus du banc d'essais

Figura 4: Banco de pruebas de M. Duboc

2. Para analizar el impacto que tiene la humedad sobre el tercer cuerpo (es importante precisar que se utilizará un tercer cuerpo artificial en forma de polvo) se pueden llevar a cabo varios experimentos. Entre todos ellos, existen unos que nos permiten conocer las propiedades reológicas² del polvo:

- Ángulo de reposo

“Consiste en verter la muestra de polvo sobre un recipiente plano. El ángulo entre la horizontal y la pendiente formada por las partículas es medido con un medidor de ángulos. Este ángulo nos indica la capacidad de estas partículas de fluir libremente.”²

² Reología: Rama de la mecánica de medios continuos que se dedica al estudio de la deformación y el fluir de la materia.

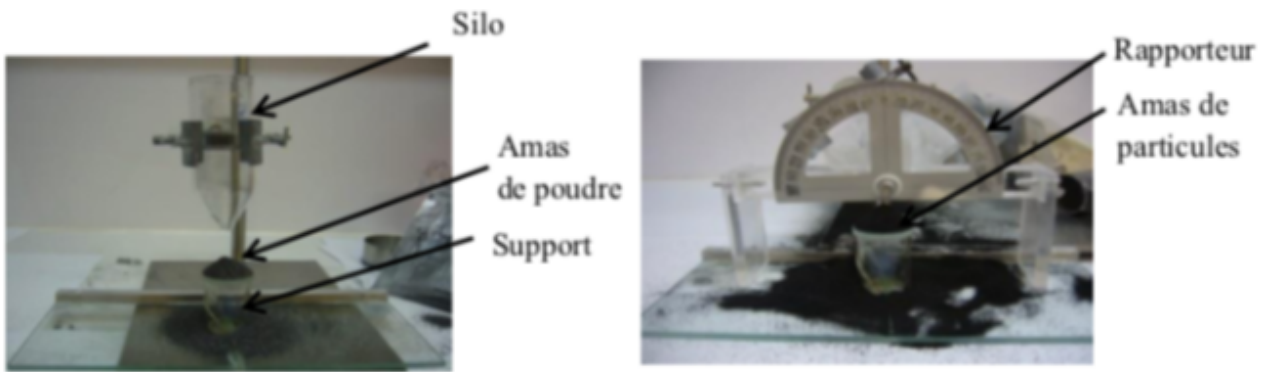


Figura 5: Test del ángulo de reposo

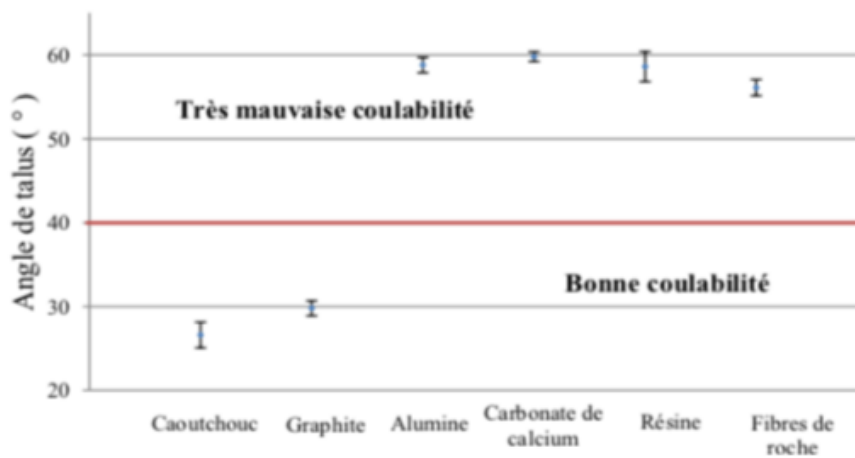


Figura 6: Resultado del test del ángulo de reposo

Si los resultados obtenidos del polvo utilizado están por debajo de línea roja (ángulo = 40°) quiere decir que el polvo fluye de una manera regular y constante.

- Test de compactación

“Este test nos permite medir la variación de volumen de partículas en un recipiente después de haberla compactado. Esta variación está ligada a la capacidad de reorganización de las partículas. Para llevar a cabo este experimento, se obtiene una altura inicial del volumen que ocupan las partículas sin haberlas compactado y otra final tras ser compactadas. Con estas dos medidas se obtiene el índice de Hausner. En función del valor obtenido como índice podemos determinar si la muestra es capaz de fluir bien o mal. Este índice se obtiene dividiendo el volumen inicial por el volumen final.”³

“Si el índice de Hausner está cerca de 1 quiere decir que las partículas no necesitan mucha reorganización, es decir, fluyen bien. Sin embargo, si el índice está cerca de 1,7 quiere decir todo lo contrario.”³

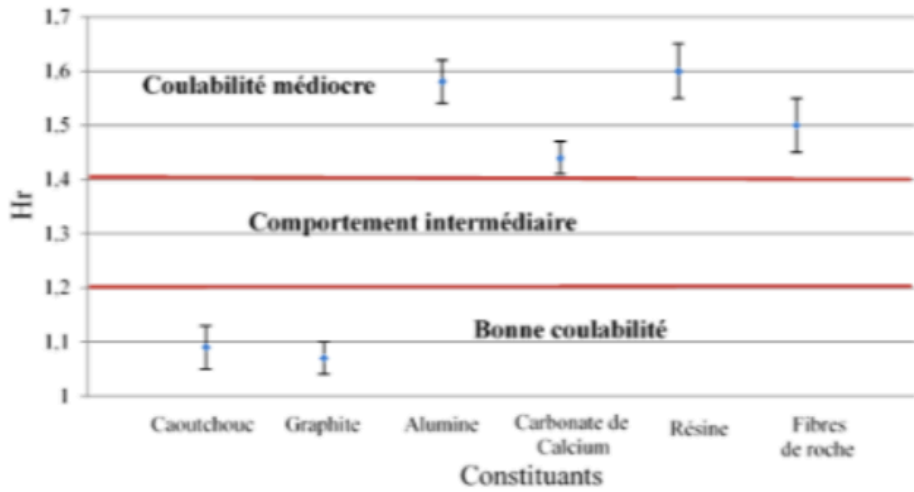


Figura 7: Tabla de resultados del test de compactación

Capítulo 3: Objetivos

- Modificación del banco de ensayos de M. Duboc para poder analizar el comportamiento del tercer cuerpo. Utilización de materiales y elementos distintos a los existentes.
- Sustitución del tercer cuerpo natural por uno artificial que cumple una serie de premisas. Este tercer cuerpo artificial tendrá forma de polvo.
- Realizar pruebas con el nuevo banco de ensayos y analizar los resultados.
- Llevar a cabo pruebas con el tercer cuerpo artificial que nos permitan conocer cuál es el impacto de la humedad en él. Especial interés en saber cómo evoluciona la humedad en función de la cantidad de polvo que utilizemos.
- Medir las propiedades reológicas del polvo con distintas tasas de humedad. Conocer cuál es el impacto que tiene la humedad en el flujo del polvo.
- Creación de un sistema de aislamiento para el banco de ensayos utilizado y análisis del comportamiento vibratorio para las distintas tasas de humedad en las que se aprecie un cambio en el comportamiento del polvo. Estos análisis se llevarán a cabo con el banco de ensayos modificado. Supeditado a la disponibilidad del laboratorio.

Los cuatro primeros objetivos se llevarán a cabo en colaboración con Narinder Singla, ingeniero que realiza su tesis doctoral en École Centrale de Lille, mientras que los dos últimos se realizarán de forma individual.

Capítulo 4: Banco de pruebas de M. Duboc

De todos los bancos de pruebas creados hasta la fecha, el sistema creado por M. Duboc es el que mejor consigue recrear un sistema de frenado real con un comportamiento dinámico muy próximo al de un verdadero freno. Además, el trabajo llevado a cabo por este ingeniero se basa en la teoría del emparejamiento de modos que es una teoría que explica la aparición del chirrido. Esta teoría muestra que cuando dos cuerpos entran en contacto bajo la influencia de una determinada fuerza normal y por lo menos uno de los dos roza contra el otro, el par de fricción se convierte en un sistema emparejado. Bajo estas condiciones, se desarrollan inestabilidades y normalmente dan lugar a un estado llamado “mode lock-in” en el que el sistema responde con una de las frecuencias fundamentales. El chirrido aparece en frecuencias próximas a las frecuencias fundamentales del sistema cuando está en un modo emparejado.

Para poder comprender mejor este fenómeno, la estrategia adoptada frecuentemente en el estado del arte es simplificar el banco de pruebas. De esta manera, se puede controlar la dinámica del sistema, así como el número de parámetros que tienen un impacto sobre las pruebas.

La razón por la que se quiere simplificar su estudio es porque el análisis de este fenómeno acústico es muy complejo ya que está fuertemente influenciado por distintos parámetros:

- La estructura del sistema (fenómeno de acoplamiento de modos, la condición del montaje...)
- Los materiales de contacto (rigidez...)
- La superficie de contacto (tercer cuerpo, radio de contacto...)

A diferencia del resto de bancos desarrollados, el de M. Duboc permite llevar a cabo un estudio detallado del fenómeno pudiendo controlar las variables del ensayo (fuerza aplicada, velocidad, temperatura).

Este banco de ensayos a escala reducida nos permite:

- Obtener un chirrido en un rango de 1 a 10kHz.

- Reducir al máximo el número de elementos que componen este dispositivo con el fin de controlar de la mejor manera posible la dinámica del sistema.
- Aplicar una fuerza de la pastilla de freno contra el disco de 50 a 500N para quedarse dentro del rango admisible del sistema existente (limitación del emparejamiento de modos).
- Modelar el sistema a nuestro gusto para poder modificar el comportamiento dinámico.
- Utilizar pastillas de freno rectangulares de una dimensión inferior a 40mm x 20mm para la superficie de contacto con el fin de controlar la geometría de contacto y las observaciones de las superficies.
- Acceder a las medidas de una manera más sencilla. La información que se desea obtener es:
 - La fuerza normal y tangencial en el contacto con el fin de determinar el coeficiente de rozamiento.
 - El desplazamiento de la pastilla de freno en la dirección normal al contacto.
 - La ondulación del disco.
 - La aceleración de la pastilla de freno
 - El nivel de ruido.

El banco de pruebas de M. Duboc cuenta, entre otros, con un sistema de sensores laser con los que se analiza la ondulación del disco, un micrófono con el que se capta el ruido y un sistema que incorpora una lamina flexible que permite que la pastilla de freno se pueda desplazar verticalmente en función del contacto entre esta y el disco.

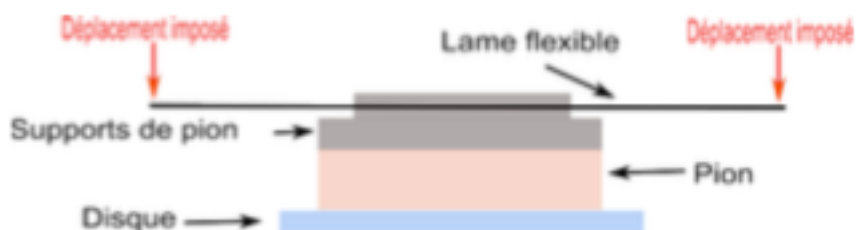


Figura 8: Arquitectura del sistema disco de freno – disco con la lámina flexible

Debido a la exactitud con la que este sistema recrea un sistema de frenado real y al éxito conseguido por M. Duboc a la hora de reproducir este fenómeno acústico en su banco de ensayos (el chirrido no aparece en todas las pruebas que se llevan a cabo en los bancos de ensayos, se deben cumplir una serie de características que no siempre son conocidas). Este trabajo tomará como base el trabajo realizado por M. Duboc y llevará a cabo una serie de modificaciones en su banco de pruebas para abordar el problema desde otra perspectiva.

Capítulo 5: Modificaciones llevadas a cabo en el banco de pruebas de M. Duboc

En todo sistema de frenado, el tercer cuerpo es el responsable de la localización y la dinámica de contacto en la interface entre el disco y el patín. También, soporta la fuerza normal, acomoda las velocidades de los dos primeros cuerpos y disipa la energía en el contacto en forma de calor. Debido a todo esto, si se quiere estudiar la aparición del chirrido al frenar es importante estudiar qué está ocurriendo con este tercer cuerpo cuando surge este fenómeno. Sin embargo, en el banco de pruebas de M. Duboc el estudio de este tercer cuerpo es muy complicado debido a dos factores:

1. Su dispar composición de partículas (polvo, óxido de hierro, fragmentos desgarrados, fibras quemadas...).

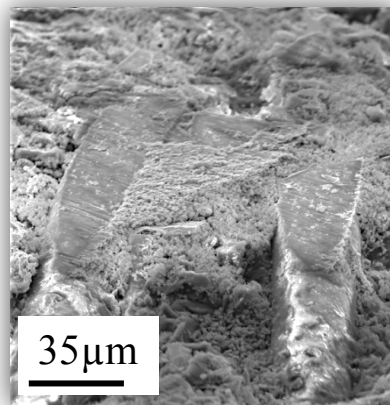
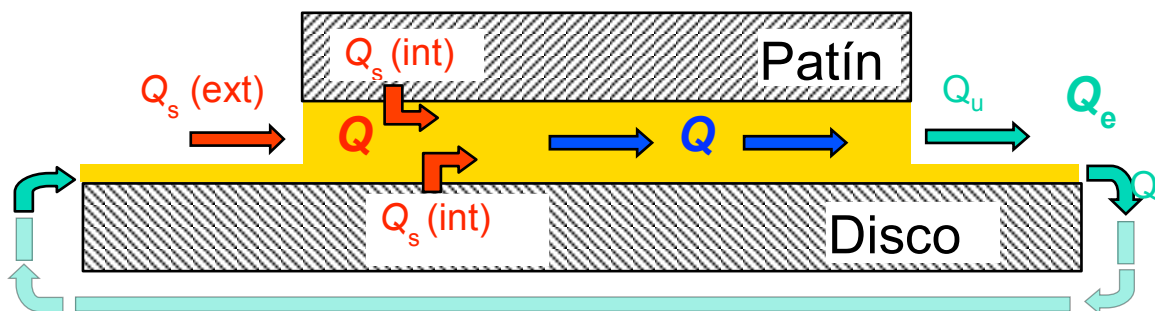


Figura 12: Tercer cuerpo atrapado entre las fibras de hierro del disco del patín de freno

2. Su complejo flujo.



Q_s (ext) – Fuente de flujo externa;

Q_s (int) – Fuente de flujo interna;

Q_e – Partículas generadas por desgaste

Q_r – Partículas de recirculación

Figura 13: Circuito tribológico del banco de pruebas de M. Duboc

Además, el posicionamiento de los distintos elementos en el banco de pruebas dificulta enormemente su estudio ya que bloquean el campo de visión hacia la interface de contacto y por lo tanto, no se puede apreciar en vivo lo que ocurre. Es por esto que surge la iniciativa de modificar este banco de pruebas y así poder simplificar su estudio.

Para poder simplificar el estudio de este tercer cuerpo y poder analizar mejor su impacto en la aparición de este fenómeno acústico, se necesita modificar el banco de ensayos de M. Duboc de tal forma que, por un lado, se pueda ver que ocurre en la superficie de contacto cuando aparece este fenómeno y, por otro lado, se reduzca el número de flujos de partículas que dan lugar al tercer cuerpo.

Para ello, se decide utilizar un disco de cristal que permite ver a través de su superficie lo que sucede cuando entra en contacto con el patín. La complejidad de utilizar un disco de cristal a la hora de preparar los experimentos es la fragilidad de este material. Debido a las características del cristal, no se puede apretar con mucha fuerza el disco a la máquina porque es posible que el material se resquebraje. Tampoco se le puede aplicar la misma fuerza que se aplicaba anteriormente sobre el disco de acero porque esto también podría dañar el disco.



Figura 14: Disco de cristal

A diferencia del experimento de M. Duboc en el que utiliza una pastilla de freno de hierro, en este caso se utilizará un patín de poliuretano que es un material que es menos duro que el cristal y, por lo tanto, no lo erosiona.

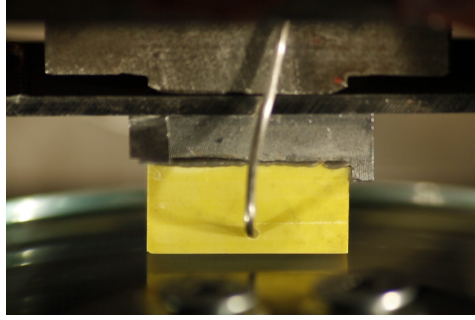


Figura 15: Patín de poliuretano

La combinación de los materiales de estos dos elementos simplifica el estudio de este fenómeno acústico ya que se reduce el número de flujos secundarios que dan lugar al tercer cuerpo. Por ejemplo, desaparecen las oxidaciones de hierro al utilizar un disco de cristal en lugar de uno de acero.

Se posiciona el patín por debajo del disco para poder apreciar el comportamiento del tercer cuerpo a través del disco de cristal. El nuevo circuito tribológico queda simplificado de la siguiente manera:

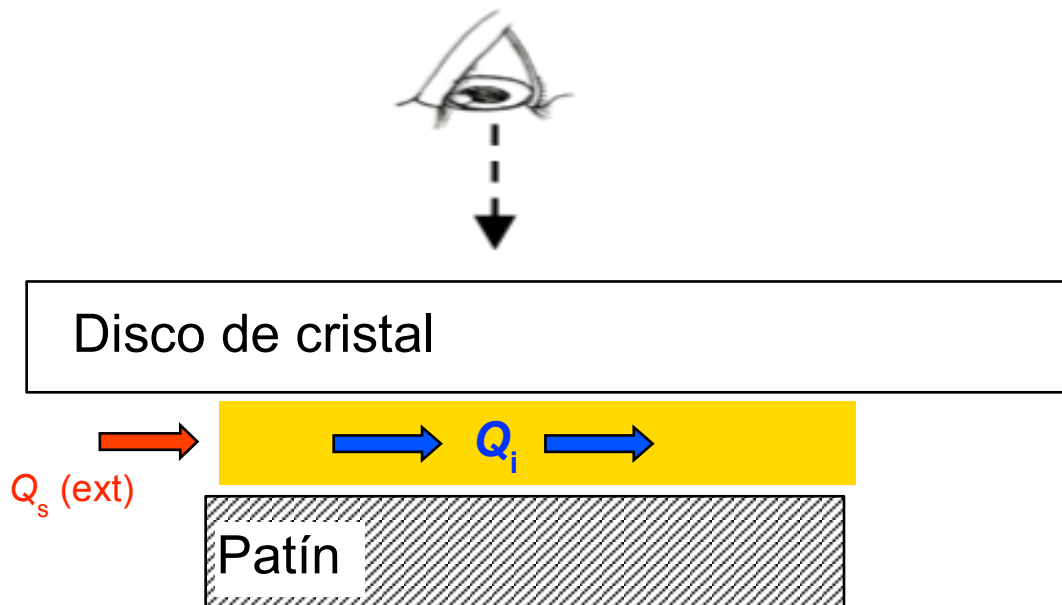


Figura 16: Nuevo circuito tribológico

Para poder analizar el papel que juega el tercer cuerpo en este fenómeno acústico se introduce uno artificial, aluminio en polvo, cuyo tamaño de partículas es muy similar al del tercer cuerpo natural que se encuentra en los sistemas de frenado reales. Además, este tercer cuerpo es

un polvo de color blanco que nos permite ver claramente como su comportamiento a través del disco de cristal.



Figura 17: Aluminio en polvo

Gracias a la incorporación de estas tres modificaciones en el dispositivo de M. Duboc se consigue simplificar el circuito tribológico y, como consecuencia, simplificar el estudio del tercer cuerpo.

Para analizar los resultados de los experimentos se añade una cámara de alta definición al banco de ensayos con la que se filman los distintas pruebas para analizar con precisión los cambios que se den lugar en el tercer cuerpo. Enfocando hacia la zona en la que la cámara está filmando se añade un foco de luz para poder apreciar con mayor claridad todo cambio que su produzca en la interface.

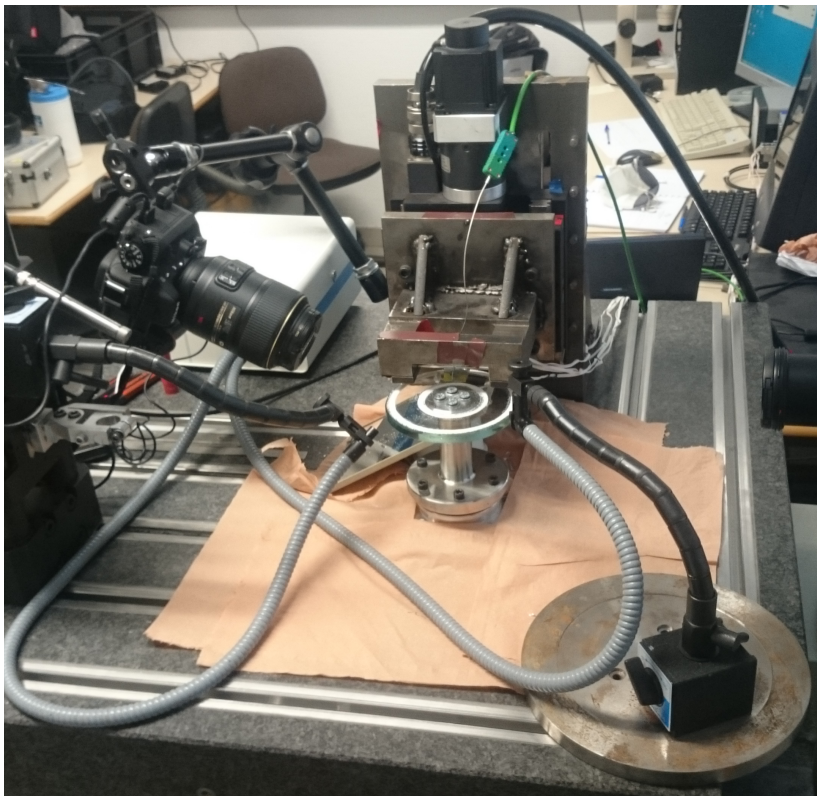


Figura 18: Banco de ensayos con las distintas modificaciones

Capítulo 6: Preparación de los experimentos

Llevar a cabo uno de estos experimentos requiere largas horas de preparación previa del banco de ensayos.

Esta preparación comienza con el posicionamiento del disco de cristal de tal forma que la superficie que entra en contacto con la superficie del patín se encuentre situada paralelamente a la de este último. Para ello, se utilizan sensores de desplazamiento con los que se mide la posición de esta superficie con respecto a dos puntos fijos de la estructura dónde se encuentran estos sensores. Seguidamente, se realiza el mismo procedimiento con los sensores de desplazamiento del patín.

Es importante llevar a cabo este primer paso de la manera más exacta posible ya que el disco no se mueve en único plano paralelo a su superficie circular sino que se mueve en distintos planos siguiendo un movimiento que dibuja un ocho en el aire.

Una vez el disco y el patín se encuentran posicionados de forma correcta se procede a posicionar el tercer cuerpo sobre el patín. Para ello:

1. Se posiciona el tercer cuerpo artificial sobre el patín, se inclina entre 5 y 6 grados el patín y, con el disco en rotación, se acerca el patín al disco hasta tener un espacio aparente entre disco y patín de $350\ \mu\text{m}$.
2. Con el disco sin rotación, se aproxima el patín hacia al disco hasta tener un espacio aparente de $125\ \mu\text{m}$.
3. Se vuelve a poner en rotación al disco y se reduce la distancia aparente hasta los $100\ \mu\text{m}$.

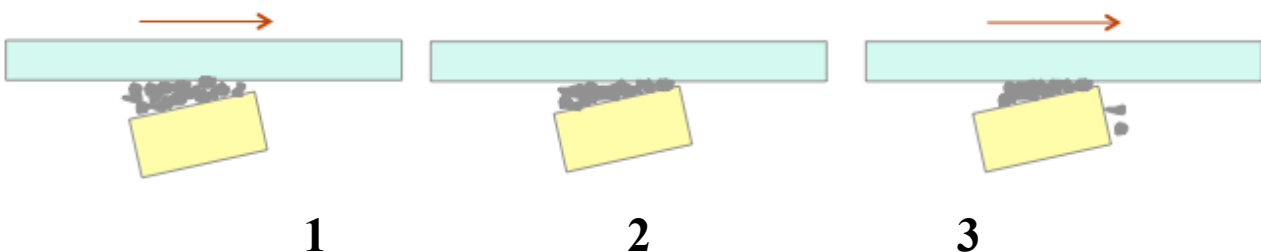


Figura 19: Los tres pasos a seguir para posicionar el tercer cuerpo sobre el patín

Después de posicionar correctamente el tercer cuerpo sobre el patín, se debe revisar que los aparatos de medida se comunican de manera correcta al ordenador de tal forma que este reciba toda información recopilada por los distintos sensores y que esta información esté bien relacionada. Por ejemplo que el sensor de sonido envíe los datos al mismo tiempo que los sensores de desplazamiento del disco y el patín.

Capítulo 7: Experimentos en el nuevo banco de ensayos

Se llevan a cabo dos tipos de experimentos, unos iniciales sin tercer cuerpo artificial para analizar cómo reacciona el sistema sin este elemento y otros posteriores con el aluminio en polvo entre el patín y el disco de cristal para simular un sistema de frenado real y poder estudiar cuál es el impacto del tercer cuerpo cuando aparece este fenómeno acústico.

1. Primeros experimentos sin tercer cuerpo

Se dispone del banco de ensayos explicado anteriormente con las nuevas modificaciones. En estos primeros ensayos se analiza el comportamiento del sistema sin el tercer cuerpo artificial. El objetivo de estos primeros ensayos es ver si el sistema es capaz de producir chirridos sin que se encuentre el aluminio en polvo entre el patín y el disco. Para ello, se pone en marcha el motor que hace girar el disco y se aplica una fuerza normal de 100N sobre el disco a través del patín.

Resultados

Experimento sin tercer cuerpo

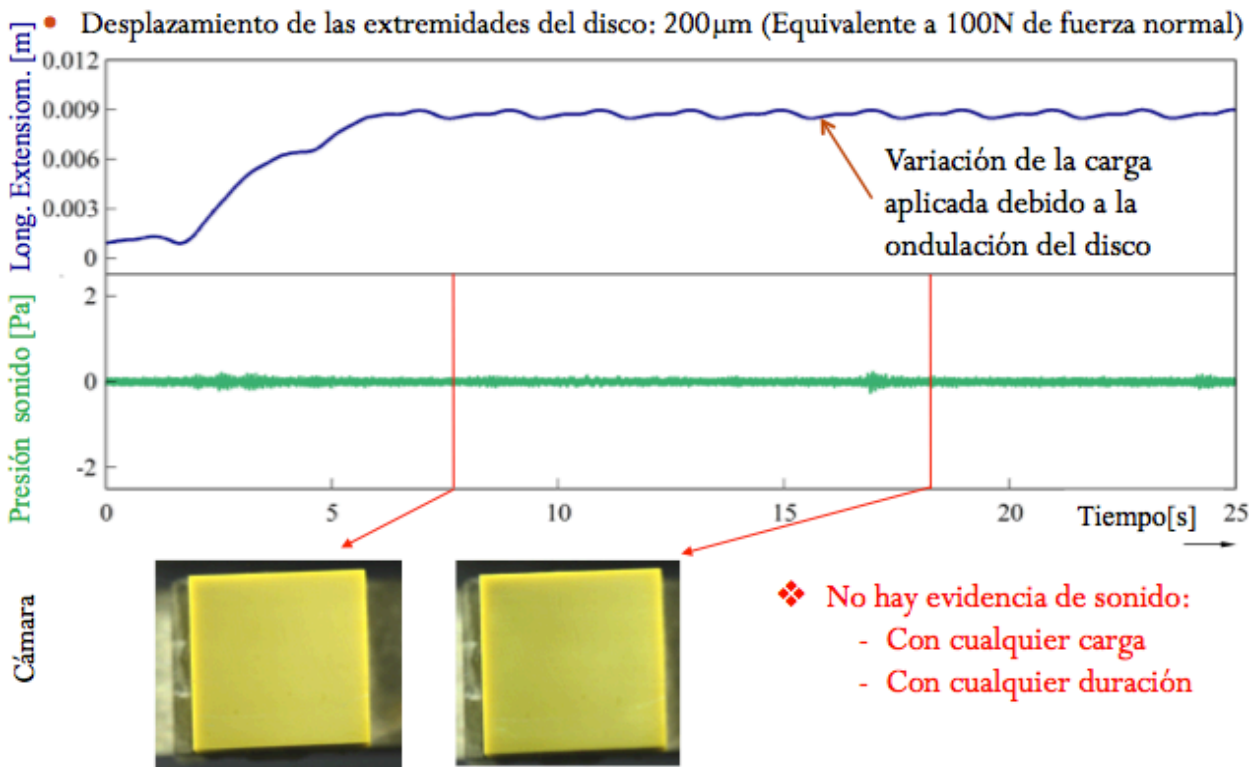


Figura 20: Resultados de uno de los primeros experimentos sin tercer cuerpo

Estos resultados muestran que aunque se le aplique una fuerza de 100N al disco a través del patín, no se puede apreciar la aparición del chirrido. Además, la superficie de contacto del patín permanece intacta.

Conclusión

El hecho de no contar con el tercer cuerpo en este experimento da lugar a la ausencia de sonido ya que, como se ha explicado anteriormente, el tercer cuerpo es el responsable de la localización y la dinámica de contacto en la interface que da lugar a la aparición del chirrido.

2. Últimos experimentos sin tercer cuerpo

Resultados

Experimento sin tercer cuerpo

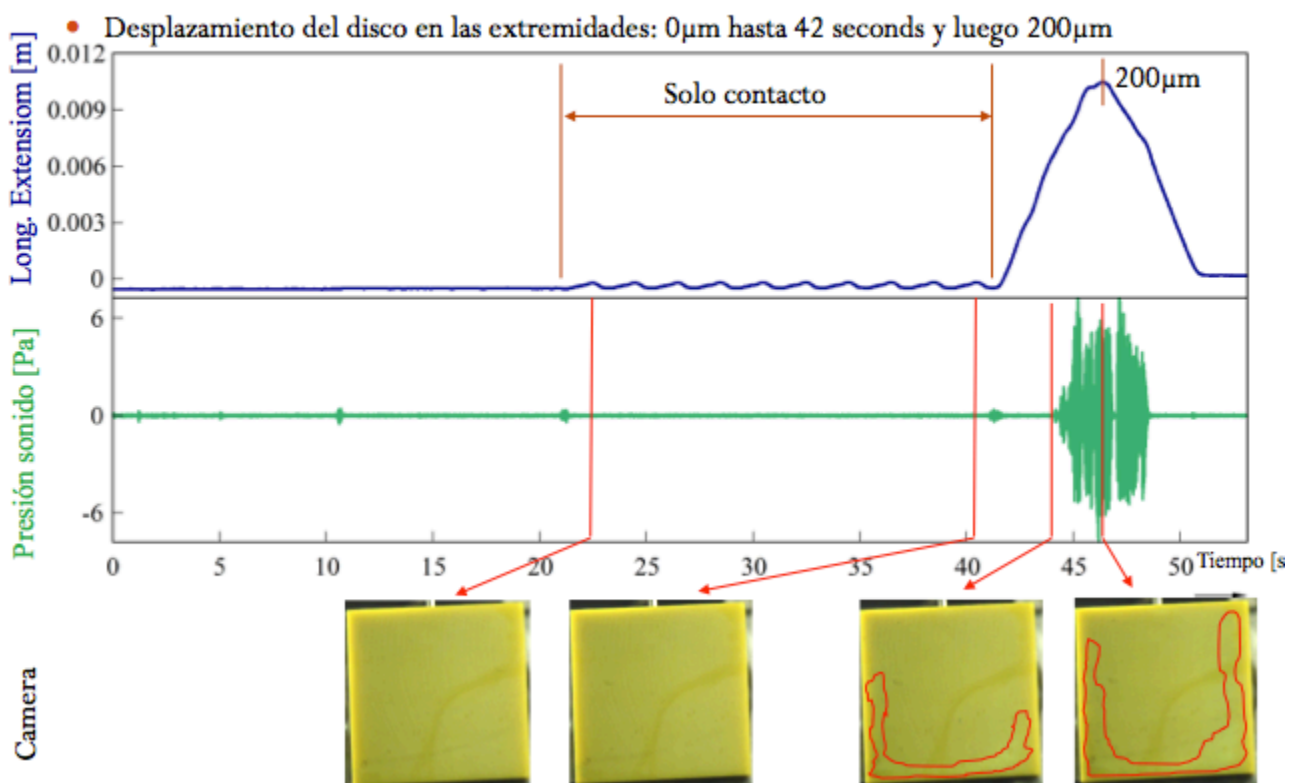


Figura 21: Resultados de uno de los últimos experimentos sin el tercer cuerpo

Estos resultados muestran la aparición de sonido realizando el experimento sin tercer cuerpo.

Conclusión

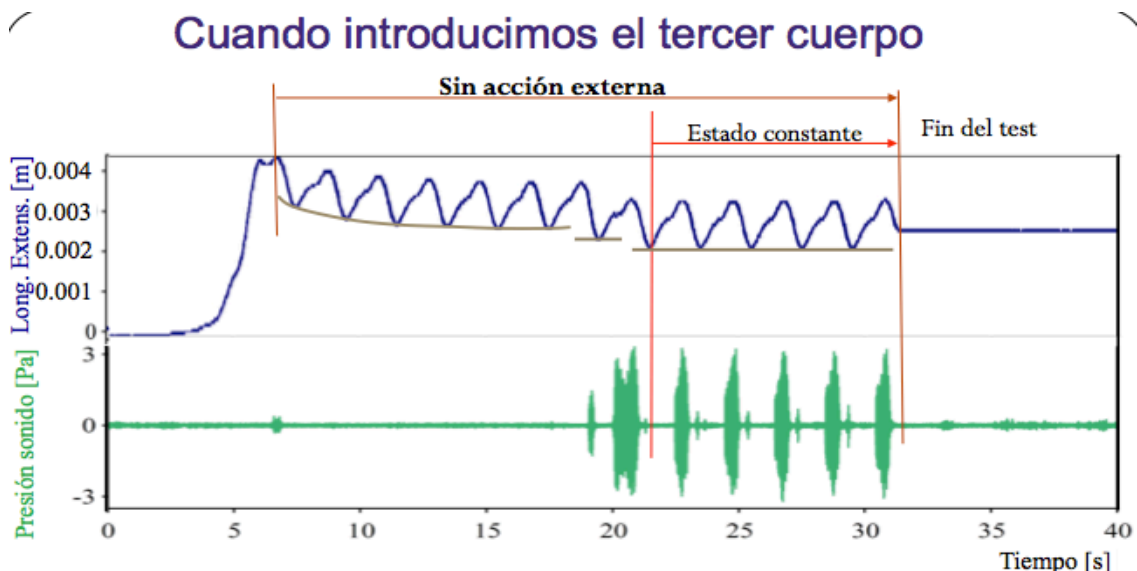
El hecho de que aparezca el chirrido en este último experimento indica lo complejo que es el estudio de este fenómeno ya que es realmente complicado predecir lo que va a ocurrir. Teóricamente no debería producirse este fenómeno acústico sin la presencia del tercer cuerpo.

A diferencia de experimentos anteriores dónde no aparece el chirrido y dónde la superficie de contacto permanece constante, en estos últimos experimentos se puede apreciar que en el momento en el que aparece el chirrido el área de la superficie de fricción varía. A pesar de que esta variación sea difícil de interpretar y de cuantificar, se puede concluir que los cambios en las áreas de contacto están relacionados con la generación del chirrido.

3. Experimentos con tercer cuerpo

En los experimentos con el tercer cuerpo se espera encontrar sonido entre las frecuencias de 1kHz y 10kHz cuando el patín entra en contacto con el disco. Además, se espera encontrar una manera de relacionar la aparición del sonido con la presencia del tercer cuerpo. De ser así, el experimento sería todo un éxito ya que la comunidad de ingenieros que se dedica al estudio de este fenómeno podría utilizar este banco de ensayos para analizar el chirrido y todo lo que ocurre en la interface de contacto.

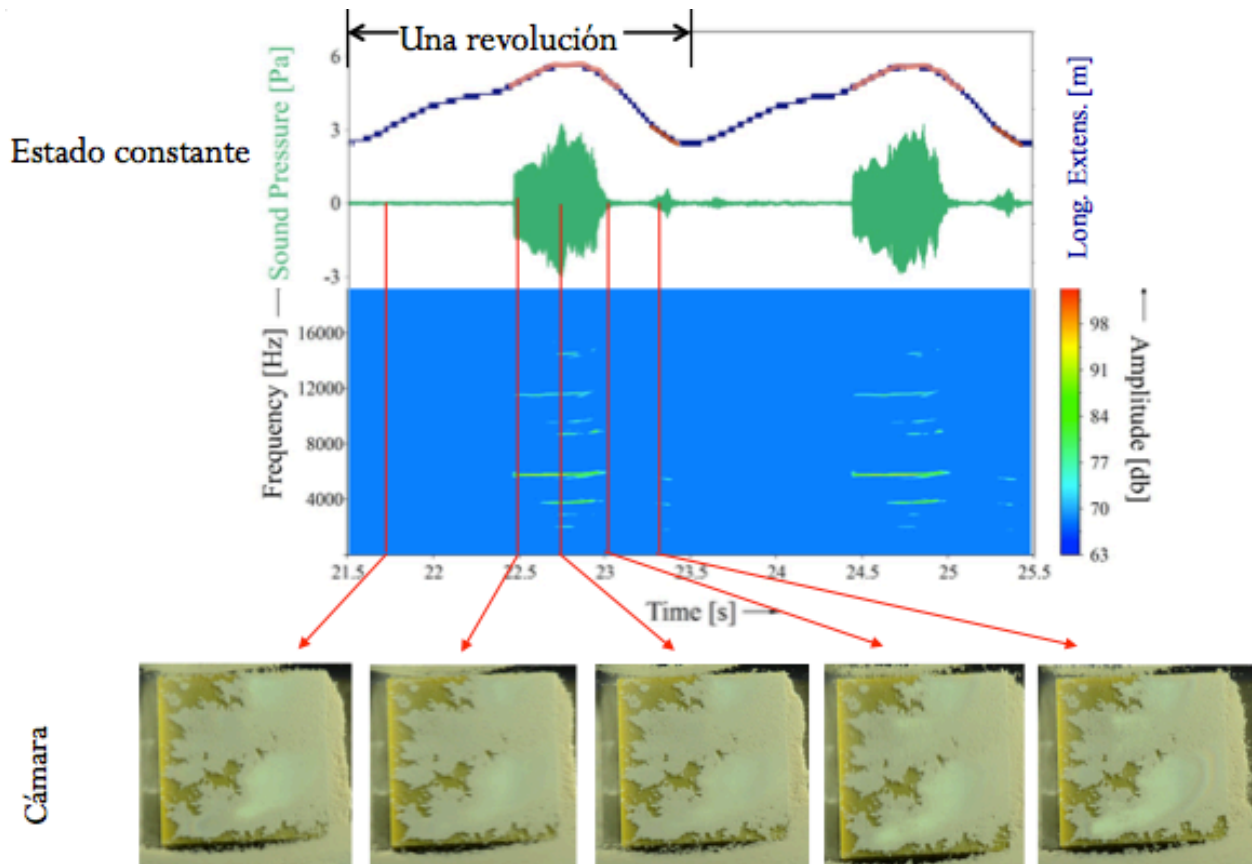
Resultados



La expansión y compactación del tercer cuerpo cambia la zona de carga en la interface que hace que el circuito tribológico cambie y dé lugar al chirrido.

Figura 22: Resultados de no de los experimentos realizados con el tercer cuerpo

Imagen de los resultados al detalle cuando captamos la aparición del chirrido:



❖ Cambio en la frecuencia del chirrido dependiendo de las zonas de carga.

Figura 23: Detalle de los resultados con el tercer cuerpo

Conclusión

Se puede apreciar un pequeño flujo de partículas en el patín debido a la evolución de la compactación del tercer cuerpo a lo largo del experimento y a que la zona de carga se mueve hacia el lado derecho (lado que se encuentra en continuo contacto con el patín y el disco). Este flujo de partículas da lugar a inestabilidades en el tercer cuerpo.

En función del tamaño y la localización de las zonas de carga (las zonas con un tono más claro que aparecen en las imágenes tomadas por la cámara) los sensores de sonido captan el chirrido a distintas frecuencias. Por lo tanto, el estudio de este fenómeno debe ir orientado hacia el análisis de las zonas en las que el tercer cuerpo es compactado en un grado mayor ya que estas zonas de carga son las que, a priori, parecen estar más relacionadas con la aparición del chirrido.

Capítulo 8: Análisis del impacto de la humedad en el estudio de este fenómeno acústico

El estudio del chirrido es verdaderamente complicado ya que es un fenómeno que depende de numerosos factores entre los que se pueden destacar: el mal alineamiento de la pastilla y el disco de freno, la suciedad, la temperatura y la humedad. Este último es el factor del que más se es consciente ya que en días de lluvia es bastante probable que uno perciba el chirrido proveniente del sistema de frenado de su coche. Esto ocurre debido a la formación de una capa de óxido en la superficie del disco de freno que al entrar en contacto con la pastilla de freno produce unas vibraciones que dan lugar al desagradable sonido.

Ya que la humedad tiene un impacto en la aparición de este fenómeno, se tiene interés en estudiar cuál es el impacto que tiene la humedad sobre el tercer cuerpo. Para ello se llevan a cabo estudios reológicos del aluminio en polvo y así poder conocer cómo afecta la humedad a la libre circulación de las partículas del tercer cuerpo. Este flujo de partículas es el que previamente se ha demostrado que da lugar a las inestabilidades en el tercer cuerpo.

Para estudiar el impacto de la humedad se llevan a cabo dos experimentos:

1. Estudio de la evolución de la humedad con distintas cantidades de polvo.
2. Compactación del aluminio en polvo con distintos niveles de humedad.

1. Estudio de la evolución de la humedad con distintas cantidades de polvo

1.1 Objetivo

Por un lado se quiere encontrar una manera de controlar la humedad del aluminio en polvo en un recipiente y por otro lado, se quiere saber cómo evoluciona la humedad presente en el polvo en función de la cantidad utilizada. Es importante conocer cómo varía el comportamiento del aluminio en polvo en función de la cantidad utilizada del mismo ya que hay que elegir una cantidad precisa para los ensayos con el banco de pruebas.

1.2 Método

Se llevan a cabo dos experimentos en paralelo, uno al aire libre y otro aislado. Para cada uno de estos dos experimentos se utilizan dos recipientes, uno con cuatro gramos de aluminio en polvo y otro con doce (se eligen estas cantidades de tal forma que uno de los recipientes tenga tres veces la cantidad de aluminio en polvo que el otro y así asegurarse que se puedan apreciar diferencias en los resultados). El aluminio se calienta en un horno a 110°C (temperatura más elevada que la temperatura de ebullición del agua) durante una hora para asegurarse de evaporar la totalidad del agua que contenga el polvo. Después de esa hora dentro del horno, el polvo se mete dentro de los distintos recipientes con sus respectivas cantidades. Dos recipientes serán aislados con un film de plástico y los otros dos serán analizados al aire libre.

La manipulación del polvo una vez es sacado del horno debe ser lo más corta posible ya que sino capta rápidamente humedad.

Las medidas de la humedad son hechas con un sensor Aginova iCelcius que se conecta a un iPhone 6.

1.3 Desarrollo del experimento

Procedimiento:

1. Se precalienta el horno a 110°C durante una hora.

2. Se calienta entorno a 20 gramos de aluminio en un recipiente grande durante una hora.
3. Se ponen 4 gramos en el recipiente 1 y 12 en el recipiente 2.
4. Se pone un film de plástico sobre el recipiente 1 y se comienza a medir la humedad en el recipiente 2 (al aire libre).
5. Después de una hora y veinte minutos se retira el film del recipiente 1 y se comienza a medir su humedad.
6. En el mismo instante, se meten otros 20 gramos de polvo a calentar en el horno.
7. Pasada una hora, se ponen 12 gramos en el recipiente 3 y 4 gramos en el 4.
8. Se cierran con un film de plástico los dos recipientes 3 y 4.
9. Se hace un agujero en el film de plástico del recipiente 3 del tamaño del sensor y se comienza a medir la humedad.
10. Se lleva a cabo el mismo procedimiento con el recipiente 4.

Este experimento se lleva a cabo en dos días distintos: el 9 y el 21 de marzo.

1.4 Resultados

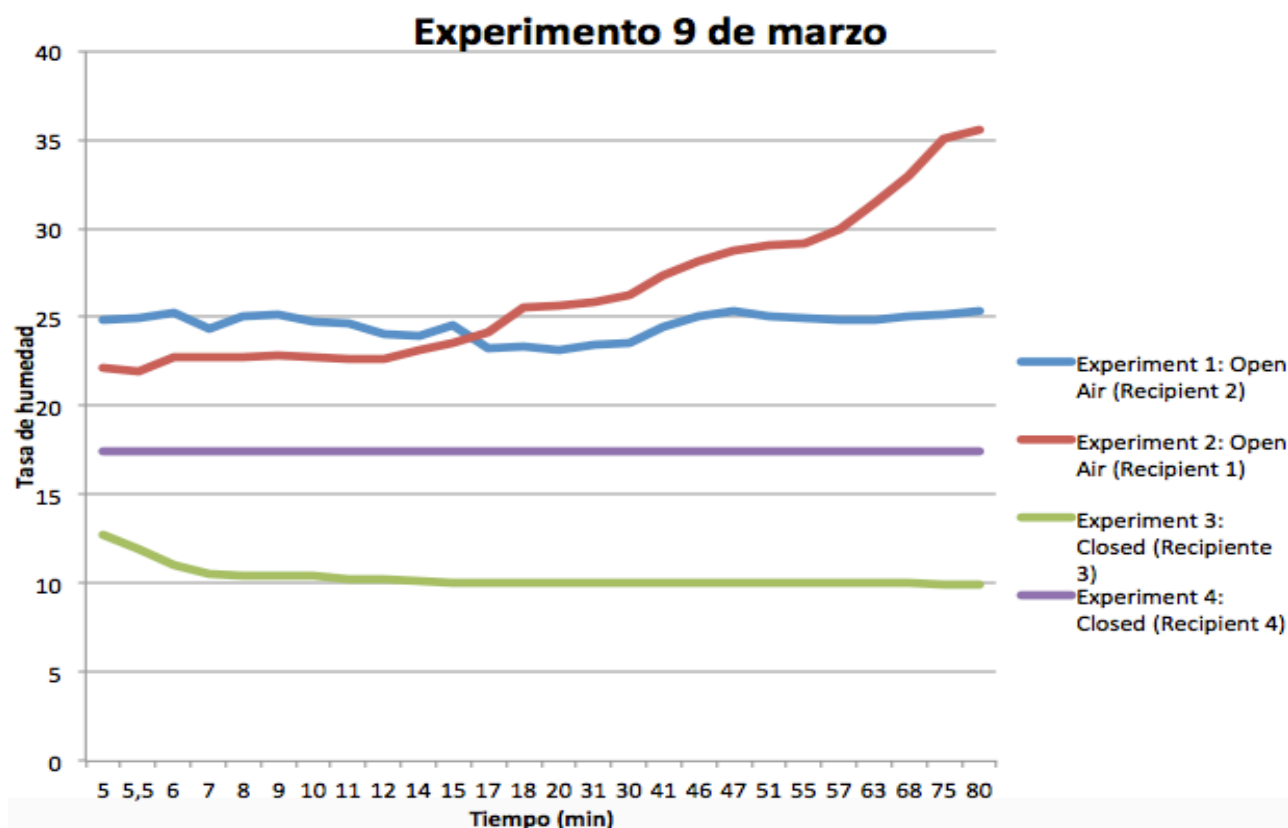


Figura 24: Resultados del experimento del día 9 de marzo

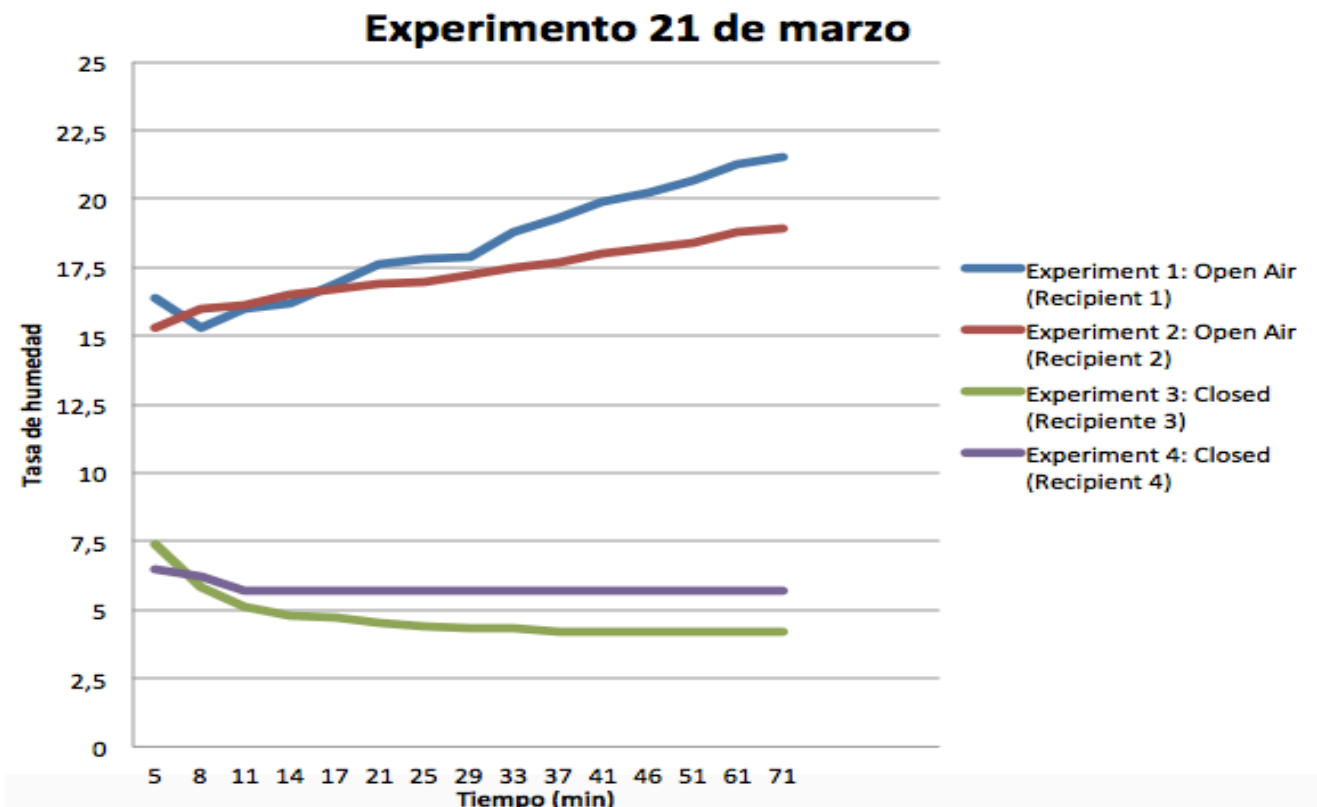


Figura 25: Resultados del experimento del día 21 de marzo

Se puede apreciar un error en las medidas del 9 de marzo dónde la humedad del recipiente 1 no evoluciona. Posiblemente sea debido a haber conectado mal el sensor al móvil.

Se puede constatar en ambos días que los recipientes que contienen más cantidad de polvo (9 de marzo: recipiente 3, 21 de marzo: recipientes 2 y 3) tienen una evolución más lenta de la humedad que aquellos que tienen menos.

1.5 Conclusión

La cantidad de aluminio en polvo juega un papel muy significativo en la evolución de la humedad. Cuanto mayor sea la cantidad de polvo utilizada en el experimento, mayor es el tiempo que tarda el polvo en captar la humedad de la habitación. Esto queda muy bien reflejado en los experimentos al aire libre, en el que la humedad del recipiente 3 de ambos experimentos evoluciona de una manera más lenta que la del recipiente 4.

Se observa además que es posible mantener constante la humedad en un recipiente cubriéndolo con un film de plástico. Extrapolando esto a futuros experimentos en el banco de

ensayos, si queremos mantener la humedad constante a lo largo de los experimentos debemos cubrir el banco de pruebas de alguna manera.

2. Compactación del aluminio en polvo con distintos niveles de humedad.

2.1 Objetivo

La compresibilidad de un medio granulado está ligada a sus propiedades de circulación. A través de este experimento se desea conocer el impacto que tiene la humedad en la circulación del tercer cuerpo y así poder aportar pruebas para un futuro análisis de la aparición de inestabilidades en el tercer cuerpo.

2.2 Método

Se llevan a cabo los experimentos con dos tasas diferentes de humedad (6-8% y 28-30%). Para cada tasa de humedad se dispone de cuatro recipientes con 6 gramos de aluminio en polvo. Se escoge la cantidad de 6 gramos debido al límite de material disponible.

Una vez se tiene el aluminio en polvo separado en cada uno de los recipientes se vierte el contenido en una probeta de un radio de 2 centímetros que es un radio muy superior con respecto al tamaño de las partículas y por lo tanto no altera los resultados. Después de verter el contenido en la probeta se mide la altura de éste dentro del recipiente y se comienza el test de compactación. Finalmente, cuando el test de compactación se da por terminado se vuelve a medir la altura.

Con las dos medidas de la altura se calcula el índice de Hausner para cada recipiente y una vez que se tienen los cuatro índices, se hace la media para cada tasa de humedad. Tras el cálculo de esa media se clasifica el polvo en función de su capacidad y calidad de circulación libre.

Como se ha explicado previamente en el “Estado del Arte”, si el índice de Hausner está cerca de 1 quiere decir que las partículas no necesitan mucha reorganización, es decir, fluyen bien. Sin embargo, si el índice está cerca de 1,7 quiere decir todo lo contrario.

Debido al material utilizado se tiene una precisión de: $\pm 0,03$ en el índice de Hausner.

2.3 Desarrollo del experimento

Procedimiento para los cuatro recipientes con 6-8% de humedad:

1. Se precalienta el horno a 110°C durante una hora.
2. Se calientan en el horno alrededor de 30 gramos de aluminio en polvo durante 1 hora.
3. Se ponen 6 gramos en cada uno de los cuatro recipientes.
4. Se pone un film de plástico sobre cada uno de los recipientes y se mide la humedad en cada uno de los recipientes haciendo un pequeño agujero en el film de plástico e introduciendo por él el sensor de humedad.
5. Se coge uno de los recipientes y se vierte rápidamente el contenido en la probeta milimetrada.
6. Se mide la altura inicial que ocupa el polvo dentro de la probeta.
7. Se lleva a cabo el test de compactación: se imponen alrededor de 500 golpes.
8. Se mide altura final.
9. Se calcula el índice de Hausner.
10. Se sigue el mismo procedimiento con los otros tres recipientes.
11. Se calcula la media de los cuatro índices de Hausner.

Procedimiento para los cuatro recipientes con 28-30% de humedad:

1. Se prepara un recipiente con 30 gramos de aluminio en polvo al aire libre.
2. Se mide la humedad de la sala y dentro del recipiente.
3. Se ponen 6 gramos en cada uno de los cuatro recipientes.
4. Se coge uno de los recipientes y se vierte el contenido en la probeta milimetrada.
5. Se mide la altura inicial que ocupa el polvo dentro de la probeta.
6. Se lleva a cabo el test de compactación: se imponen alrededor de 500 golpes.
7. Se mide altura final.
8. Se calcula el índice de Hausner.
9. Se sigue el mismo procedimiento con los otros tres recipientes.
10. Se calcula la media de los cuatro índices de Hausner.

2.4 Resultados

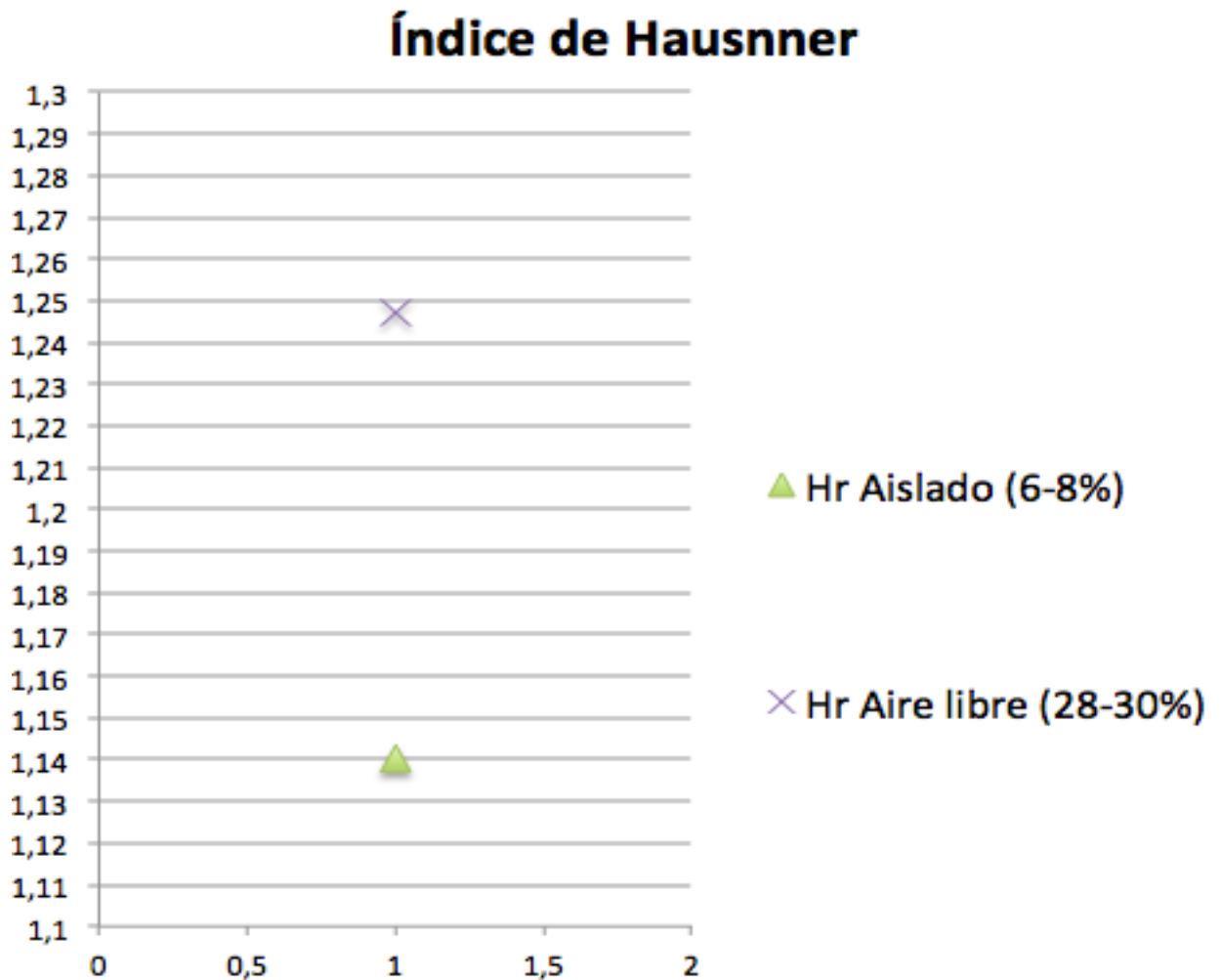


Figura 26: Resultados del test de compactación

Se puede apreciar que la tasa de humedad y la calidad de la circulación de las partículas está ligada.

2.5 Conclusión

Como nos muestran los resultados, una tasa de humedad baja implica una buena circulación de las partículas y una tasa de humedad alta implica una mayor reorganización de las partículas, es decir, un peor flujo de partículas.

Gracias al índice Hausner se puede constatar que el aluminio en polvo seco es más complicado de compactar y por lo tanto, esto puede causar problemas en el momento de posicionar el polvo sobre el patín. Una vez que el disco se pone en movimiento es posible que se pierda la totalidad del polvo.

Si se quieren llevar a cabo experimentos con una tasa de humedad baja dónde el aluminio en polvo tiene una buena capacidad de circulación, seguramente se deba modificar el ángulo de inclinación del patín para así poder retener el tercer cuerpo.

Capítulo 9: Creación de un sistema de aislamiento para el banco de ensayos

La humedad es uno de los factores que influyen en la aparición del chirrido. Por ello, se desea llevar a cabo una serie de experimentos con el banco de ensayos con los que se puede analizar la magnitud del impacto que tiene la humedad en la aparición de este fenómeno. Para poder cumplir este objetivo se necesita crear un sistema de aislamiento que permita mantener una humedad constante a lo largo del experimento.

Debido a las limitaciones de material, se decide crear un sistema a base de madera a la que se aplica un barniz a modo de aislante. Además se forra el interior con plástico y se añade silicona a todas las uniones de la madera. Se crean tres ventanas con plástico transparente para poder ver lo que ocurre en el interior de la caja y se realizan dos agujeros para poder insertar la cámara y para que mientras se introduce el aire seco se pueda escapar el aire húmedo. Este aire seco es introducido para poder conseguir humedades en un rango del 4% al 6% dentro de la caja. Finalmente, al sistema se le añaden unos cierres herméticos que se ajustan a los cierres que tiene la plataforma utilizada por M. Duboc.

Características del sistema de aislamiento creado:

1. Aísla el experimento del exterior.
2. Permite que la cámara pueda grabar los ensayos.
3. Permite que se pueda ver el ensayo desde exterior.
4. Es fácil de manejar y transportar.
5. Puede acoplarse a la plataforma utilizada por M. Duboc.
6. Cuenta con una apertura por la que puede escapar el aire húmedo.



1

Figura 27: Sistema de aislamiento para el banco de ensayos

Este sistema de aislamiento permite a todo aquel que quiera estudiar (con la ayuda del banco de ensayos de M. Duboc) el impacto que tiene la humedad en la aparición del chirrido hacerlo de una manera precisa ya que se ha comprobado que las tasas de humedad en su interior se mantienen estables por lo menos durante treinta y cinco minutos.

Evolución de la humedad

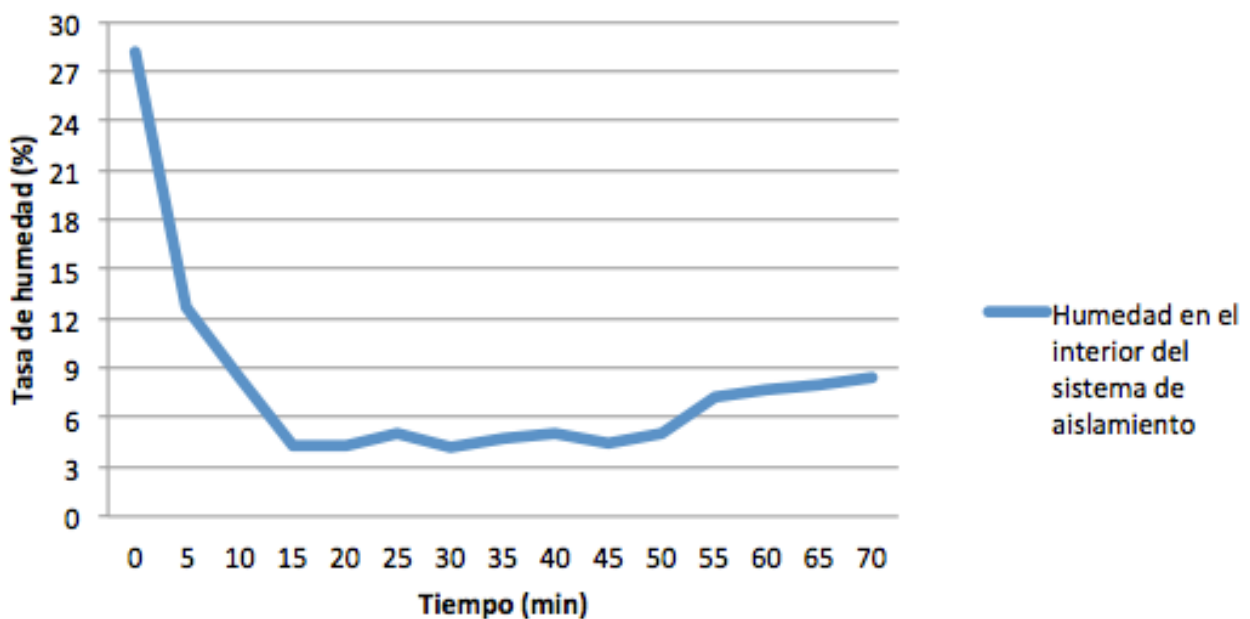


Figura 28: Resultados de la evolución de la humedad dentro del sistema de aislamiento

En los primeros minutos se introduce el aire seco por una apertura en la plataforma de M. Duboc y, como el aire seco es más denso que el aire húmedo, expulsa al aire húmedo por la apertura en la parte superior del sistema. Una vez que el sensor de humedad comienza a recoger humedades próximas al 5% se cierra la apertura superior y la inferior por la que se introducía el aire seco.

En estos resultados queda reflejado que la humedad varía entre el 4% y el 6% desde alrededor del minuto quince hasta alrededor del minuto cincuenta.

Capítulo 10: Conclusión

Con este proyecto se querían conseguir dos objetivos principales. El primero, crear un banco de ensayos que permita analizar la interface de contacto entre el disco y el patín de freno en la que se encuentra el tercer cuerpo cuyo comportamiento esta ligado a la aparición del ruido, y el segundo, valorar cuál es el impacto de la humedad en el estudio de este fenómeno.

El primer objetivo se ha conseguido con creces ya que con el nuevo banco de ensayos se puede filmar a través del disco de cristal la interface de contacto con la ayuda de una cámara y así poder apreciar los cambios en el comportamiento del tercer cuerpo cuando aparece el chirrido. Gracias a los experimentos llevados a cabo con este nuevo banco de ensayos ha quedado comprobado que este fenómeno acústico es verdaderamente complicado de analizar ya que se parte de la hipótesis de que el chirrido tiene lugar principalmente debido a la presencia del tercer cuerpo y se ha comprobado que el sistema de frenado produce el chirrido (aunque esto no pasa muy a menudo) incluso cuando no hay un tercer cuerpo entre el patín y el disco de freno. También se ha podido mostrar a través de los experimentos que cuando se producen cambios en la localización de las zonas de presión sobre el tercer cuerpo se origina el chirrido. Estos cambios de localización son originados debido al flujo de partículas existente entre el patín y el disco. Además, en función de la localización de estas zonas de presión, el micrófono capta distintas frecuencias de chirrido.

Para poder analizar más en detalle por qué se origina este desagradable sonido se debe proceder a examinar las zonas de mayor y menor presión de contacto para poder sacar conclusiones a cerca de la relación que pueda tener el grado de compactación del tercer cuerpo y la aparición del ruido. Para examinar la profundidad y la porosidad de la muestra del tercer cuerpo atrapada sobre el patín se debe utilizar un instrumento llamado Focused Ion Beam que es un instrumento científico similar a un Microscopio electrónico de barrido.

En cuanto al segundo objetivo, a través de los experimentos llevados a cabo en el Ecole Centrale de Lille se ha podido valorar el impacto de la humedad en el estudio de este fenómeno acústico. Con el primer experimento queda demostrado que en función de la cantidad de aluminio en polvo utilizado en los experimentos la evolución de la humedad atrapada en él varía

significativamente. Esto es de vital importancia si se está interesado en mantener una tasa de humedad constante a lo largo del experimento. Cuanto mayor sea la cantidad de tercer cuerpo utilizado más tiempo ha de transcurrir para que el polvo seco adquiera la humedad de la habitación. Los resultados del segundo experimento muestran que una tasa de humedad baja implica una buena circulación de partículas y que una tasa de humedad elevada implica una mayor reorganización de las partículas, es decir, una peor calidad del flujo de partículas. Hay que tener cuidado a la hora de elegir la tasa de humedad ya que si se escoge una tasa muy baja puede ser posible que se pierda la mayor parte del tercer cuerpo una vez se ponga en marcha el motor que hace rotar el disco de cristal.

Para experimentos futuros en los que se quiera estudiar el impacto de la humedad en la aparición de ruido se deberá utilizar un sistema de aislamiento como el que se muestra en este trabajo que mantiene la tasa de humedad constante durante al menos treinta y cinco minutos. Este intervalo de tiempo es muy superior al tiempo mínimo requerido para poder obtener resultados fiables de los experimentos realizados con el nuevo banco de ensayos y poder sacar conclusiones.

Bibliografía

- Memoria de la tesis de Fatma Makni Fini: “Heterogeneite microestructurales de garnitures de frein: Lien avec les propietes thermo physiques et mecaniques et le comportement tribologique”
- Memoria de la tesis de Marin Duboc: “Etude multi-échelle du crissement : Dispositif expérimental et éléments de compréhension”

Referencias

1. Memoria de la tesis de Martin Duboc: Estado del arte.
2. Memoria de la tesis de Fatma Makni Fini: Propiedades reológicas de los constituyentes:
Ángulo de reposo
3. Memoria de la tesis de Fatma Makni Fini: Propiedades reológicas de los constituyentes:
Test de compactación

Anexo B: Resultados del test de compactación del polvo con distintos niveles de humedad

Open Air	Polvo (g)	Humedad	H1	H2	Hr	OPEN AIR	
Réipient 1	6g	30,1	6,3	5,1	1,235	HUMEDAD	27,7/30
Réipient 2	6g	30,3	6,4	5,2	1,231	Hr Open air (28-30%)	1,24151584
Réipient 3	6g	28,7	6,4	5	1,280		
Réipient 4	6g	27,7	6,1	5	1,220		
Pesos	Sin polvo	Con polvo					
Recipiente 1	36,32	42,32					
Recipiente 2	34,24	40,24					
Recipiente 3	35,02	41,02					
Recipiente 4	35,2	41,2					
Closed	Polvo (g)	Humedad	H1	H2	Hr	AISLADO	
Recipiente 1	6g	6,6	5,9	5,4	1,093	HUMEDAD	6/8,5
Recipiente 2	6g	8,5	6,3	5,5	1,145	Hr Aislado (6-8%)	1,13557311
Recipiente 3	6g	8,5	6,25	5,3	1,179		
Recipiente 4	6g	6,4	6,3	5,6	1,125		
Humedad de la sala	33,60%						

Anexo C: Resultados de la evolución de la humedad dentro del sistema de aislamiento

Humedad en el interior del sistema de aislamiento	28,2	12,7	8,5	4,3	4,3	5,1	4,2	4,7	5	4,5	5,1	7,2	7,7	8	8,4
Tiempo (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70