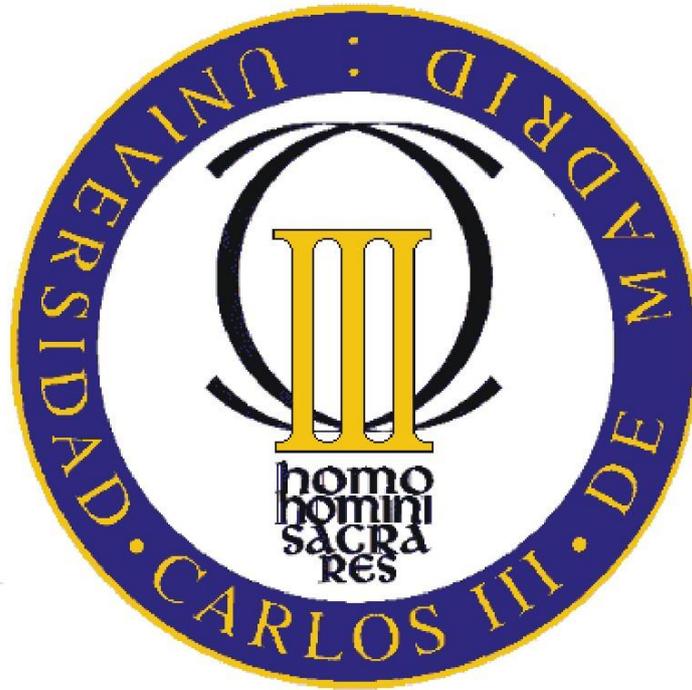


UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA



**ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA
INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO**
TRABAJO FIN DE GRADO
Grado en Ingeniería Mecánica

AUTORA: ANA RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ

TUTORA: MARIÁ BEATRIZ RAMÍREZ BERASATEGUI

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

Resumen

El siguiente proyecto se centra en el estudio de calibración de los frenómetros. Una vez expuestos los principios teóricos necesarios para el estudio, se procede a realizar un análisis de los resultados obtenidos.

El proyecto se divide en 7 capítulos.

En el capítulo 1, introducción y objetivos, se explica la utilidad de los frenómetros, y se desarrollan los objetivos que se quieren alcanzar con la realización de este proyecto.

El capítulo 2 (el frenómetro) describe los componentes principales y secundarios de los frenómetros, así como los diferentes tipos de frenómetros que existen hoy en día.

El tercer capítulo titulado requisitos metrologicos, sea tal vez, el que más se aleje de la finalidad del proyecto, pero el conocimiento de los puntos expuestos dentro del capítulo, es esencial para poder llevar a cabo correctamente su desarrollo.

En el capítulo 4, se definen los conceptos de calibración e incertidumbre (capítulo clave del proyecto)

A lo largo de los capítulos 5 y 6, se detalla cómo se ha de medir y calibrar los frenómetros para vehículos ligeros (capítulo 5) y los frenómetros universales (capítulo 6)

El capítulo 7 define en qué consiste un análisis de sensibilidad, y trata diferentes métodos que se pueden utilizar para realizar dicho análisis.

Por último, el capítulo 8, recoge la interpretación de los resultados, y las conclusiones obtenidas tras realizar el análisis.



ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

Índice

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1 OBJETIVOS	1
1.2 INTRODUCCIÓN	2
1.2.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL FRENADO	6
1.2.1 PARÁMETROS A MEDIR Y VALORAR	6
CAPÍTULO 2: EL FRENÓMETRO	4
2.1 LOS RODILLOS	4
2.2 DISPOSITIVOS PRINCIPALES	5
2.3 FRENÓMETROS PARA VEHÍCULOS ESPECIALES	11
CAPÍTULO 3: REQUISITOS METROLÓGICOS	19
3.1 UNIDADES DE MEDIDA	19
3.2 PATRÓN	21
3.3 CADENA DE MEDIDA	21
3.4 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO	54
3.5 COMPORTAMIENTO ESTÁTICO DEL EQUIPO DE MEDIDA.....	57
CAPÍTULO 4: CALIBRACIÓN Y ERRORES.....	68
4.1 CALIBRACIÓN.....	68
4.2 TIPOS DE ERRORES.....	70
4.3 FUENTES DE INCERTIDUMBRE.....	70
4.4 INCERTIDUMBRE TÍPICA.....	68
4.5 INCERTIDUMBRE TÍPICA COMBINADA.....	70
4.6 INCERTIDUMBRE EXPANDIDA.....	70
CAPÍTULO 5: FRENÓMETRO PARA VEHÍCULOS LIGEROS.....	68
5.1 UTILLAJE UTILIZADO	68
5.2 CONDICIONES AMBIENTALES	68
5.3 PROCEDIMIENTO DE MEDIDA	68
5.4 PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN	68
5.5 TOMA DE MEDIDAS	68
5.6 CÁLCULO DE INCERTIDUMBRES	68
CAPÍTULO 6: FRENÓMETRO UNIVERSAL	68
6.1 UTILLAJE UTILIZADO	68



ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

6.2 CONDICIONES AMBIENTALES	68
6.3 PROCEDIMIENTO DE MEDIDA	68
6.4 PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN	68
6.5 TOMA DE MEDIDAS	68
6.6 CÁLCULO DE INCERTIDUMBRES	68
CAPÍTULO 7: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	77
7.1 MÉTODO TAGUCHI	78
7.2 MÉTODO CLÁSICO DE ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA).....	81
7.2.1 ANÁLISIS SENSIBILIDAD DE EXPRESIONES DEL CÁLCULO DE INCERTIDUMBRE	82
7.2.2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA FUERZA PATRÓN.....	96
CAPÍTULO 8: INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIÓN.....	102
BIBLIOGRAFÍA	105



Índice de figuras

CAPÍTULO 1:

FIGURA 1.1 Representación gráfica de frenado estable.....	5
FIGURA 1.2 Representación gráfica de frenado inestable.....	5

CAPÍTULO 2:

FIGURA 2.1 Frenómetro de placas	10
FIGURA 2.2 Frenómetro de rodillos	10
FIGURA 2.3 Frenómetro de placas (4 placas)	11
FIGURA 2.4 Frenómetro de placas (2 placas)	11
FIGURA 2.5 Pantalla de un frenómetro de dos placas	12
FIGURA 2.6 Pantalla de un frenómetro de cuatro placas	12
FIGURA 2.7 Superficie de un rodillo galvanizado en caliente y con revestimiento de plástico y corindón.....	13
FIGURA 2.8 Superficie de un rodillo realizado con soldadura con gas	13
FIGURA 2.9 Superficie de un rodillo realizado con soldadura sin gas	13
FIGURA 2.10 Esquema de la colocación de los elementos principales de un frenómetro de Rodillos	16
FIGURA 2.11 Frenómetro universal (tractor)	17
FIGURA 2.12 Frenómetro universal (camión)	17
FIGURA 2.13 Frenómetro de rodillos con un único grupo de rodillos	18
FIGURA 2.14 Esquema del funcionamiento de frenómetros con contragiro	19
FIGURA 2.15 Frenómetro de rodillos con dos pares de rodillos	20
FIGURA 2.16 Frenómetro de rodillos con tres pares de rodillos	20

CAPÍTULO 3:

FIGURA 3.1 sistema de medida utilizado en Madrid antiguamente	23
FIGURA 3.2 Instrumento patrón de la magnitud fuerza. (CEM).....	24
FIGURA 3.3 Fases principales de la cadena de medida	27
FIGURA 3.4 Puente de Wheastone	28
FIGURA 3.5 Dispositivo de lectura analógico	28
FIGURA 3.6 Dispositivo de lectura analógico y digital	28
FIGURA 3.7 Colocación de la rueda del vehículo sobre los rodillos del frenómetro	29
FIGURA 3.8 Esquema funcionamiento interno del frenómetro	30
FIGURA 3.9 Esquema simplificado del interior del frenómetro y el dispositivo de lectura	31
FIGURA 3.10 Curva de calibración	32

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

CAPÍTULO 4:

FIGURA 4.1 Distribuciones normal, rectangular y triangular (respectivamente)42

CAPÍTULO 5:

FIGURA 5.1 Esquema sistema de calibración de un frenómetro para vehículos ligeros.....48

FIGURA 5.2 Representación gráfica de los parámetros h , L , d y θ 54

CAPÍTULO 6:

FIGURA 6.1 Esquema sistema de calibración de un frenómetro universal64

CAPÍTULO 7:

FIGURA 7.1 intervalos de aceptación y rechazo del contraste85



Capítulo 1

Introducción y objetivos

1.1 Objetivo

Actualmente, la mayoría de los vehículos tienen la potencia necesaria para alcanzar grandes velocidades en cortos intervalos de tiempo. Dadas estas circunstancias, para poder realizar una conducción segura, es preciso que el sistema de frenada del vehículo ofrezca una respuesta rápida y precisa. Por ello, el sistema de calibración de los frenos juega un papel fundamental.

En este proyecto se lleva a cabo un estudio de los requisitos metrológicos y las condiciones de funcionamiento de los frenómetros de rodillos.

Se realizará una introducción de los diferentes tipos de frenómetros, sus componentes principales, y un estudio de su funcionamiento. También, se incluye una breve introducción del fundamento teórico del principio de frenado, para una mejor comprensión de la utilidad del frenómetro.

El objetivo es conseguir optimizar las fórmulas de cálculo tanto de fuerza de frenado del útil como las de incertidumbre del mismo, siguiendo las pautas que ofrece el método de cálculo de incertidumbres.

Además, se realizará un análisis de sensibilidad de las expresiones de cálculo de la incertidumbre y de la fuerza patrón, para frenómetros de vehículos ligeros, y frenómetros universales.

El proyecto está estructurado en dos grandes bloques. El primero de ellos abarca toda la parte teórica, y el segundo contiene los resultados experimentales.

En el primer bloque se introducen todos los principios, normativa y pautas necesarias para poder aplicar la teoría a los casos concretos que se están estudiando en este proyecto.

En el segundo bloque, se aplican esos conocimientos descritos anteriormente.

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

1.2 introducción

Uno de los principales elementos de seguridad activa de un vehículo son los frenos, y es por ello que se lleva a cabo la verificación de su efectividad de manera regular. Los encargados de poner en práctica esta verificación son los centros de Inspección Técnica de Vehículos (ITV)

Dada la importancia de los frenos, es fundamental que los instrumentos que se utilizan para medir la fuerza de frenado de las ruedas del vehículo sean fiables y lo más exactos posibles. Por este motivo se lleva a cabo la calibración de dichos instrumentos.

El útil utilizado para el proceso de verificación de la fuerza de frenado de un vehículo se denomina frenómetro.

Existen diferentes tipos de frenómetros dependiendo de su forma (de rodillos o de placas) y según la masa máxima admitida (MMA) del vehículo a ensayar (motocicletas, vehículos ligeros o vehículos pesados)

- Frenómetros para vehículos ligeros (MMA hasta 3500 kg).
- Frenómetros para vehículos pesados (MMA superior a 3500 kg).
- Frenómetros universales para vehículos ligeros y pesados.

Los vehículos de dos o tres ruedas tendrán la consideración de vehículos ligeros.

A los frenómetros universales se les aplicará los requisitos metrológicos correspondientes a los vehículos ligeros y a los vehículos pesados.

1.2.1 fundamentos teóricos del frenado

La finalidad principal del equipo de frenos, es detener el vehículo o reducir la velocidad de marcha en el menor tiempo y espacio posible, en cualquier tipo de pavimento y condiciones climatológicas, así como mantenerlo detenido en condiciones de parado. Es decir, lo que se busca, es obtener una capacidad o eficacia de frenado óptima.

Para poder entender a qué hace referencia la eficacia de frenado, previamente se han de introducir algunos aspectos muy ligados a este concepto.



ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

➤ Proceso de frenado

Desde que el conductor pisa el pedal del freno hasta que se detiene el vehículo, se producen una serie de operaciones que conforman el proceso de frenado.

Para que este proceso sea efectivo, se debe cumplir que:

- La adherencia entre los neumáticos y el asfalto sea máxima
- No se bloqueen las ruedas y el vehículo no derrape
- El equipo de frenos funcione correctamente

Si no se cumplen estas condiciones, la eficacia de frenado disminuye y la distancia de frenado aumenta notablemente. Esto sucede, por ejemplo, en superficies resbaladizas donde el coeficiente de adherencia es muy pequeño, o en frenadas bruscas de alta intensidad. En ambos casos se puede producir el bloqueo de las ruedas anulando el control de la dirección del vehículo.

➤ Fuerza de rozamiento

La fuerza de rozamiento (en este caso) se define como la relación entre el peso del vehículo y el coeficiente de rozamiento o adherencia existente entre las superficies de contacto: rueda-asfalto.

$$F_{roz} = P \cdot \mu$$

Siendo μ el coeficiente de rozamiento.

El coeficiente de rozamiento es un valor experimental que define la adhesión en mayor o menor medida, que se produce entre dos cuerpos en contacto.

En el caso de contacto entre rueda y asfalto, el coeficiente de rozamiento se va a ver directamente afectado por el desgaste de los neumáticos y el estado de la superficie de la carretera, obteniendo un coeficiente muy alto si se tienen neumáticos nuevos y un pavimento seco, y obteniendo un coeficiente muy bajo al tener neumáticos desgastado y pavimento deslizante.



ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

➤ Fuerza de frenado

Cuando el conductor pisa el acelerador, se produce un incremento de la velocidad (aceleración), y si pisa el pedal del freno, lo que se produce es un decremento de la velocidad (desaceleración).

La aceleración se define como la variación de velocidad por unidad de tiempo.

Ligado al proceso de aceleración, aparece la fuerza de inercia. Esta fuerza se define como la resistencia que opone el vehículo al cambio de movimiento. Su magnitud depende de la masa del vehículo en función de la aceleración o deceleración aplicada.

$$F_{inercia} = m \cdot a$$

Cuando se quiere detener un vehículo, lo primero que se hace es soltar el acelerador. De esta manera se suprime la fuerza de impulsión y se inicia la deceleración del vehículo.

A partir de este momento, el desplazamiento depende directamente de la fuerza de inercia generada en la desaceleración.

A continuación se pisa el freno. Al no existir ninguna fuerza impulsora, la fuerza de frenado que se debe aplicar para anular el movimiento depende directamente de la oposición que ejerce la fuerza de rozamiento.

$$F_{frenado} = P \cdot \mu = F_{roz}$$

En base a estos conceptos, pueden aparecer dos situaciones:

- Frenado estable

Si la fuerza de frenado aplicada es menor que la fuerza de inercia, la resultante de la fuerza es positiva. Por tanto, en este caso la velocidad del vehículo disminuye de manera progresiva y segura.

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

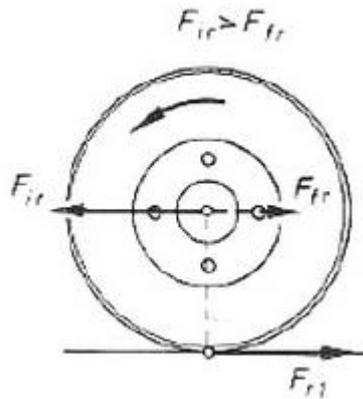


Figura 1.1. Representación gráfica de frenado estable

- Frenado inestable

Si por el contrario la fuerza de frenado aplicada es mayor que la fuerza de inercia, la resultante de la fuerza es negativa. En esta situación el par resistente generado por la fuerza de frenado (contrario al giro de las ruedas), produce el bloqueo de las ruedas y en consecuencia se provoca el deslizamiento de las mismas.

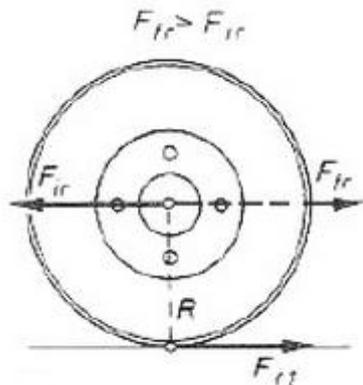


Figura 1.2. Representación gráfica de frenado inestable

Por tanto, la condición que se debe cumplir para que no se produzca el deslizamiento, es que la deceleración generada en la frenada no debe superar el límite de adherencia entre neumático y calzada.

$$F_{inercia} \leq F_{roz} \rightarrow a \leq g \cdot \mu$$

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

➤ Deslizamiento

El deslizamiento se produce en la situación crítica de bloque de las ruedas del vehículo cuando la fuerza de frenado supera la fuerza de inercia.

Para obtener un frenado correcto y que no se produzca el bloqueo de las ruedas, lo que se busca conseguir es que la distancia de frenado sea reducida, es decir, detener el vehículo en el menor tiempo posible.

En este apartado influye notablemente el estado de ambas superficies de contacto. Unos neumáticos muy desgastados, o bien, una calzada con lluvia, barro o hielo, reducen considerablemente la adherencia de contacto, y por tanto, el bloqueo de las ruedas se alcanza para fuerzas de frenado de menor magnitud.

➤ Ovalidad

El concepto de ovalidad hace referencia al alabeo o deformación que se produce en los discos de freno, o en el tambor, debido a diversas causas.

La ovalidad puede provocar una variación excesiva del esfuerzo de frenado ya que aparecen vibraciones que favorecen un comportamiento inestable durante la frenada.

Este alabeo afecta directamente en la frenada ya que aplicando una misma fuerza, la respuesta de frenada varía en función a la posición del disco o tambor.

➤ Eficacia de frenado

Después de analizar los apartados anteriores, puede resumirse que la deceleración y detención de los automóviles es consecuencia de la acción de las fuerzas del sistema de frenos en combinación con la adherencia de los neumáticos al asfalto.

Si no existe adherencia entre la superficie de contacto de los neumáticos y el asfalto, la frenada y deceleración del automóvil es nula y el vehículo no se detiene.

Cuanto más elevada sea la adherencia entre la superficie de contacto de los neumáticos y la calzada, mayor fuerza de rozamiento de los neumáticos, mayor deceleración y menor tiempo y espacio recorrido en la frenada.



ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

Como se ha explicado en apartados anteriores, la deceleración depende básicamente de la adherencia de las superficies de contacto y su valor debe medirse de forma experimental. Es por este motivo que para medir el grado de deceleración en el frenado se recurre a valorar el rendimiento o eficacia de frenado de los automóviles.

La eficacia de frenado de un automóvil se mide de forma porcentual, en función del peso que gravita sobre las ruedas y la fuerza de frenado aplicada a las cuatro ruedas. En realidad, lo que da a conocer la eficacia de frenado de un automóvil es el grado de deceleración que se produce en el vehículo al frenar.

$$Eficacia\ de\ frenado = \frac{\sum F_{frenos}}{P} \cdot 100\ (\%)$$

➤ Distancia de frenado

La distancia de frenado es el espacio recorrido por el vehículo automóvil desde el momento que se acciona el pedal del freno hasta que el vehículo se detiene por completo.

Esta distancia depende de diversos factores como la fuerza de frenado aplicada, el grado de adherencia entre los neumáticos y el asfalto, la velocidad del automóvil, etc.

Estos parámetros son variables y de difícil determinación. Por este motivo, no se puede precisar un cálculo determinante para valorar la magnitud del espacio recorrido en el proceso de frenado.

No obstante, a efectos de cálculo, el valor orientativo de la distancia recorrida durante una frenada se determina en función de la siguiente ecuación:

$$distancia\ de\ frenado = \frac{v^2}{2a}$$

Como puede observarse, este cálculo no depende de las características del propio automóvil, sino que relaciona únicamente la velocidad del vehículo y la deceleración o eficacia de frenado, por lo cual, se trata de un cálculo genérico para todos los vehículos.

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

1.2.2 Parámetros a medir y valorar

Las averías del sistema de frenos de un vehículo no suelen ser muy frecuentes si se lleva a cabo el adecuado mantenimiento de los mismos. Por ello, es importante efectuar los controles pertinentes mediante un ensayo de frenado en frenómetros.

Al final del ensayo podrán valorarse los siguientes parámetros:

➤ Eficacia de frenado

Este parámetro se calcula tanto para el freno de servicio (pisando el pedal del freno), como para el freno de mano (tirando de la palanca).

El valor de la eficacia admisible recomendable debe ser igual o superior al 60% para el sistema de frenos de servicio, e igual o superior al 20% para el freno de estacionamiento.

➤ Simetría de la frenada

El ensayo se realiza simultáneamente para las dos ruedas de un eje, de manera que el equipo recoge dos lecturas de fuerza (una por cada rueda). Si ambos valores son similares, el sistema ensayado está equilibrado. Si se recoge una diferencia superior al 10% en la lectura, significa que existen anomalías en la frenada.

➤ fuerza aplicada al pedal de freno por el conductor

Mediante un dinamómetro (también denominado pisómetro) colocado en el pedal de freno, se puede registrar la fuerza máxima que se aplica hasta que se bloquean los rodillos.

Además de los parámetros descritos, podrán ser medidos y evaluados otros parámetros que se consideren necesarios para la evaluación del sistema de frenada. Entre ellos, se destaca la ovalidad.

Capítulo 2

El frenómetro

A la hora de pasar la ITV, lo habitual es que el frenómetro existente en la línea de inspección sea un frenómetro de rodillos, ya que su uso es el más extendido y fiable en Europa.

Los frenómetros de rodillos son instrumentos de medida o ensayo utilizados en las inspecciones técnicas de vehículos (ITV) que sirven para evaluar la fuerza longitudinal de frenada (resistencia a la rodadura) en la rueda o ruedas de un mismo eje.

La principal diferencia entre un frenómetro de rodillos frente a un frenómetro de placas es el espacio que ocupan, siendo el de rodillos mucho más compacto.

Utilizar un frenómetro de rodillos durante un ensayo de frenada, permite accionar el pedal de freno tantas veces como se quiera, lo que implica una buena repetibilidad.

La principal ventaja de este equipo frente a los frenómetros de placas es que permite realizar mediciones repetitivas controlando muchos otros parámetros. Además, este sistema permite despreocuparse de la resistencia aerodinámica.

Sin embargo, con un frenómetro de rodillos no se puede analizar el reparto de cargas que se produce entre el eje delantero y trasero en un caso de frenada real.

Por el contrario, el ensayo de frenada mediante el frenómetro de placas sí tiene en cuenta este reparto, pero para utilizar este dispositivo, se requiere mucha más precisión para obtener una buena medida, además de necesitar mucho más espacio para su montaje.

Por estos motivos, y dado que son los más integrados, se procederá a realizar el estudio sobre los frenómetros de rodillos.

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO



Figura 2.1. Frenómetro de placas

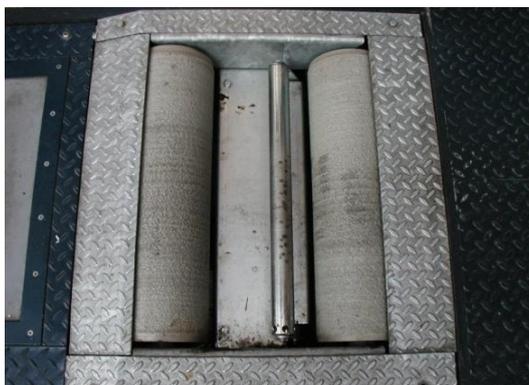


Figura 2.2. Frenómetro de rodillos

A pesar de que este proyecto se centra en el estudio de los frenómetros de rodillos, a continuación se realiza una breve explicación del funcionamiento de los frenómetros de placas ya que a pesar de no ser el método más utilizado para evaluar la fuerza de frenado, existen muchos fabricantes que también comercializan este producto, y su estudio resulta interesante.

Los frenómetros de placas analizan los frenos de un vehículo bajo condiciones dinámicas de cada rueda y del freno de mano.

La instalación de este equipo puede estar empotrada bajo el suelo, pero también puede instalarse superficialmente, por lo que no se requiere ningún tipo de obra para su instalación.

El equipo consiste en un juego de placas de libre deslizamiento conectadas a unos dinamómetros de precisión capaces de medir todas las fuerzas generadas en una frenada bajo cualquier condición, y de forma independiente en cada rueda.

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

Puede constar de dos o cuatro placas. Cada par de placas mide la fuerza de frenado de un eje, por tanto, para la instalación de dos placas, sólo se podrá medir un eje por ensayo, mientras que en el montaje de cuatro placas, se podrán medir los dos ejes del vehículo simultáneamente.



Figura 2.3. Frenómetro de placas (4 placas)



Figura 2.4. Frenómetro de placas (2 placas)

Para realizar el ensayo, un técnico conduce el vehículo entrando en las placas a una velocidad de 5 a 10 kilómetros por hora, y frena suave y progresivamente intentando abarcar el máximo posible de placa durante la operación.

Se recomienda mantener el freno pisado durante un segundo aproximadamente después de pararse el vehículo por completo, para que los sensores puedan registrar todos los datos. También es importante no mantener el pedal pisado durante mucho tiempo, para que los dinamómetros sean capaces de encontrar la posición de reposo.

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

Algunas veces se sitúan galgas extensométricas en el pedal de freno para que la prueba sea más efectiva.

Como se muestra en las figuras 2.5 y 2.6 , con este ensayo se permite tener en cuenta el reparto de cargas que se produce durante la frenada.

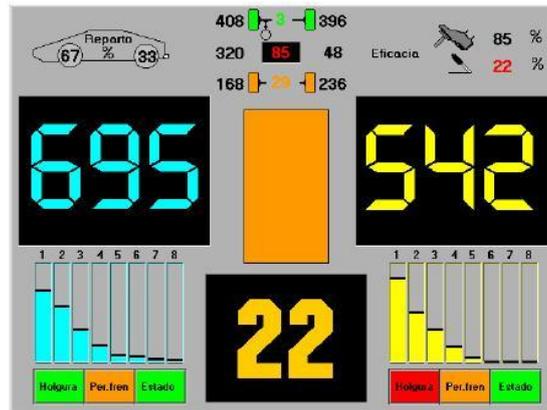


Figura 2.5. Pantalla de un frenómetro de dos placas. Indica la lectura solamente de un eje

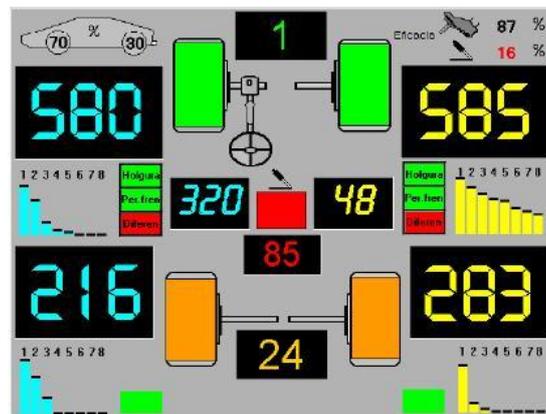


Figura 2.6. Pantalla frenómetro de cuatro placas. Indica la lectura de los dos ejes del vehículo

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

2.1 los rodillos

Como se muestra a continuación, los rodillos pueden tener diferentes acabados, pero el proceso más utilizado es el de galvanizado en caliente y revestimiento de plástico y corindón (figura 9). Este tratamiento permite la obtención de rodillos resistentes y de larga duración, además de proporcionar el acabo adecuado para un buen cuidado de los neumáticos.



Figura 2.7. Superficie de un rodillo galvanizado en caliente y con revestimiento de plástico y corindón

Otros acabados diferentes son los de las figuras 10 y 11 (soldadura con gas, y sin gas respectivamente)



Figura 2.8. Superficie de un rodillo realizado con soldadura con gas



Figura 2.9. Superficie de un rodillo realizado con soldadura sin gas

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

El diámetro de los rodillos, medido respecto a su periferia, debe ser como mínimo de 150 mm. Los órganos de rodamiento deben estar protegidos de salpicaduras y de la suciedad.

El estado de la superficie debe ser tal que:

- La relación entre la fuerza longitudinal de frenada y la fuerza vertical aplicada por la rueda debe ser superior a 0,5 con neumático mojado y superior a 0,7 con neumático seco, con un inflado del neumático a presión normal y desgaste máximo acuerdo a la normativa vigente.
- La suciedad que puedan llevar las ruedas del vehículo (barro, grasa, etc.) se adhiera lo menos posible a los rodillos y pueda ser eliminada fácilmente.

La disposición de los rodillos, uno con respecto al otro, así como su distanciamiento debe ser de forma que la distancia entre las generatrices próximas ha de estar comprendida entre 160 y 315 mm.

Durante la medición de la fuerza longitudinal de frenada, la velocidad tangencial de rotación de los rodillos debe ser constante, con una tolerancia de $\pm 0,7$ km/h, y estar comprendida entre 2 y 6 km/h (incluida la tolerancia citada).

2.2 Dispositivos principales

➤ Dispositivo receptor

Estará formado como mínimo por un par de rodillos de arrastre sobre los cuales se colocan la o las ruedas de un mismo lado del eje del vehículo, y por un rodillo palpador.

El rodillo de arrastre se mueve mediante un motor eléctrico que genera energía. Su función es hacer girar las ruedas del vehículo hasta llegar a un porcentaje de deslizamiento rodillo-rueda.

Para verificar la eficacia de la prueba el deslizamiento debe situarse entre el 10% y el 28%.

Este dispositivo está diseñado con una cierta rugosidad y en el frenómetro se coloca por pares.



ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

El rodillo palpador mide la velocidad tangencial de la rueda o las ruedas.

- Dispositivo de transmisión

Parte del instrumento que une los rodillos de arrastre con el motor (normalmente una cadena).

- Dispositivo medidor de la fuerza longitudinal de frenada

Sirve para medir la fuerza longitudinal de la frenada con ayuda de un transductor de fuerza, un contador de impulsos y un indicador.

El dispositivo indicador es el lugar en el que se obtiene una lectura directa del resultado. Con este dispositivo se podrán centralizar, visualizar o registrar los resultados de la medición efectuada.

El contador de impulsos es un dispositivo electrónico que cuenta los impulsos a partir de una señal eléctrica.

Un transductor de Fuerza es un instrumento de medida que aprovechando un principio físico, relaciona la magnitud de entrada (fuerza) con la de salida.

- Dispositivo medidor de la fuerza vertical

Sirve para determinar la fuerza vertical transmitida a los rodillos por una o varias ruedas de un mismo eje.

2.3 Dispositivos complementarios

- Dispositivo de puesta a cero

Permite poner a cero la indicación cuando no existe sobre el receptor ninguna rueda. Éste puede ser no automático (el operador es el encargado de poner a cero el dispositivo), semiautomático (la puesta a cero se efectúa mediante un mando manual), o automático (la indicación a cero se pone automáticamente sin la intervención de un operario).



ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

Es necesario un dispositivo inicial para poder poner la indicación a cero en el momento de encender el equipo, y un dispositivo de mantenimiento y seguimiento del cero que mantiene su indicación dentro de ciertos límites.

- Dispositivo de bloqueo

Inmoviliza todo o parte del mecanismo.

- Dispositivo auxiliar de verificación

Permite verificar por separado uno o varios dispositivos principales del instrumento.

A continuación se muestra un esquema de cómo están situados los diferentes elementos dentro del frenómetro.

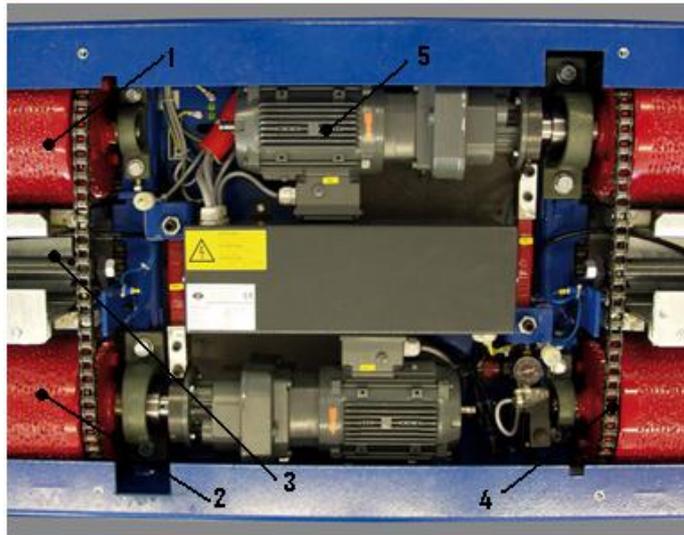


Figura 2.10. Esquema de la colocación de los elementos principales de un frenómetro de rodillos

El frenómetro de rodillos está formado por dos plataformas alineadas entre sí. Cada plataforma contiene tres rodillos (dos rodillos de arrastre -1 y 2-, y un rodillo palpador -3-) sobre los que se colocan las ruedas del vehículo.

Según la figura 2.10, sobre el conjunto de rodillos derecho se sitúa la rueda derecha del vehículo, y sobre el conjunto de rodillos izquierdo, se sitúa la rueda izquierda (ambas del mismo eje)

El elemento -4- muestra la carcasa que cubre al motor trifásico. La unión de los rodillos con el motor es posible gracias a una cadena -5- que actúa como elemento de transmisión.

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

A simple vista, la figura 2.10 puede corresponder tanto a un frenómetro para vehículos ligeros, como a uno universal (en ambos casos la disposición de los rodillos es la misma). Lo que diferencia a los frenómetros universales del resto, es la longitud de los rodillos.

Dado que la separación entre ambos grupos de rodillos es pequeña (considerando que se quiere ensayar un vehículo grande), la solución que ofrecen los frenómetros universales es aumentar la longitud de dichos rodillos de manera que puedan ensayarse vehículos con las ruedas de un mismo eje muy separadas entre sí (por ejemplo, camiones), y vehículos con ruedas muy grandes (por ejemplo, vehículos agrícolas)

Esta disposición hace que este tipo de frenómetros sirva para cualquier tipo de vehículo, de ahí que reciba el nombre de frenómetro universal.



Figura 2.11. Frenómetro universal (tractor)



Figura 2.12. Frenómetro universal (camión)

2.4 Frenómetros para vehículos especiales

Dentro de la clasificación de frenómetros de rodillos, existen varios casos especiales que cumplen con todas las características de los frenómetros de rodillos normales, pero que tienen alguna característica particular.

El primer caso especial, es el frenómetro de rodillos para motocicletas. La particularidad de este dispositivo, es que sólo tiene un grupo de rodillos en lugar de dos, ya que estos vehículos solamente tienen una rueda por eje.

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO



Figura 2.13. Frenómetro de rodillos con un único grupo de rodillos

A pesar de existir un diseño especial para estos vehículos, éstos pueden ser ensayados sin ningún problema en los frenómetros de rodillos para vehículos ligeros, anotando únicamente el valor obtenido en el grupo de rodillos sobre el que se coloca la motocicleta.

El segundo caso de vehículos especiales son los vehículos de tracción a las cuatro ruedas, también llamados de tracción total o 4x4.

Lo que caracteriza a estos vehículos, es que en el sistema de tracción total todas las ruedas (de ambos ejes) pueden recibir simultáneamente la potencia del motor, mientras que en los vehículos convencionales de tracción delantera o trasera, sólo recibe la potencia uno de los dos ejes.

Multitud de test han demostrado que el ensayo de vehículos de tracción a las cuatro ruedas en un frenómetro de rodillos convencional, sólo se puede realizar de forma limitada o no se puede realizar. Esto es debido a que el motor transmite potencia a las cuatro ruedas lo que origina fuerzas de frenado en las ruedas del eje que no está siendo ensayado (el eje que no está sobre los rodillos), y estas afectarían al ensayo de frenado.

Debido a este efecto, los valores que se obtienen pueden estar distorsionados, o incluso puede llegar a dañarse la transmisión ya que sólo se pone a girar un eje del vehículo.

Para salvar este problema se ofrecen dos alternativas: el contragiro, o el ensayo simultaneo de las cuatro ruedas.

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

El contragiro consiste en colocar las ruedas de uno de los ejes del vehículo, en un conjunto de rodillos en el que cada par de rodillos de arrastre gira en sentido contrario con respecto al otro. Si los rodillos de arrastre correspondientes a la rueda izquierda -1-, giran en sentido horario, los correspondientes a la rueda derecha -2- lo harán en sentido antihorario.

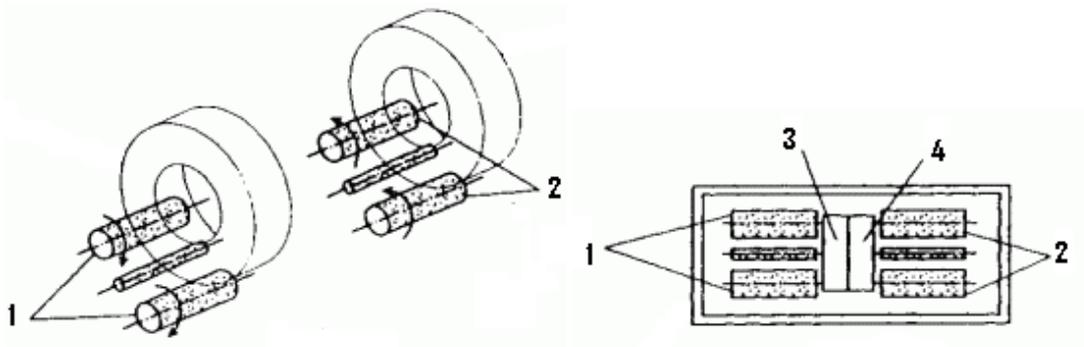


Figura 2.14. Esquema del funcionamiento de frenómetros con contragiro

De este modo, las otras dos ruedas (las del eje que no está siendo ensayado) pueden apoyar en el suelo sin que el vehículo sufra ningún problema o se alteren los resultados.

Por tanto, la única diferencia que ofrece este tipo de frenómetros con respecto al de rodillos convencional, es que cada par de rodillos posee un motor independiente -3 y 4- que proporcionan velocidades de giro iguales pero de sentido contrario.

La otra solución existente para ensayar vehículos 4x4, es la de realizar el análisis de frenado, en ambos ejes a la vez. Para ello, lo único que se requiere, es instalar cuatro conjuntos de rodillos en lugar de dos (una pareja por eje).

Ahora bien, no todos los vehículos tienen la misma batalla, por tanto, para salvar este problema, lo que se hace es instalar varios pares de rodillos de arrastre como muestra las figuras 2.13 y 2.14.

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO



Figura 2.15. Frenómetro de rodillos con dos pares de rodillos



Figura 2.16. Frenómetro de rodillos con tres pares de rodillos

Capítulo 3

Requisitos metrológicos

Para poder realizar correctamente una medición, previamente se ha de conocer algunos conceptos indispensables para poder llevar a cabo el procedimiento con éxito.

El principio de medición es el fundamento científico usado para tomar una medida. El conocimiento de este principio, permite al metrólogo dominar la medición (modificarla, diseñar otra, evaluar su conveniencia, etc.). Además, es indispensable para estimar su incertidumbre.

El método de medición y el procedimiento de medición son descripciones de la manera de llevar a cabo la toma de medida, siendo el método el concepto general, y el procedimiento la aplicación específica.

El principio, el método y el procedimiento de medición, son determinantes en el valor de la incertidumbre. Un conocimiento insuficiente de ellos, conducirá a una estimación equivocada o incompleta de dicha incertidumbre de medición.

3.1 Unidades de medida

Un frenómetro de rodillos es un instrumento que mide la fuerza longitudinal de frenada en la rueda o ruedas del mismo eje de los vehículos a motor y sus remolques.

La unidad de medida utilizada para la magnitud fuerza es el newton (N)

El Sistema Internacional de Unidades (SI) recoge las siete magnitudes primarias de las cuales derivan todas las demás. Éstas son:

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

MAGNITUD	UNIDAD
Longitud (L)	Metro [m]
Masa (M)	Kilogramo [kg]
Tiempo (T)	Segundo [s]
Intensidad luminosa (J)	Candela [cd]
Temperatura (θ)	Kelvin [K]
Intensidad de corriente eléctrica (I)	Amperio [A]
Cantidad de sustancia (N)	Mol [mol]

Sabiendo que la fuerza es:

$$F = m \cdot a \text{ [kg} \cdot \text{m/s}^2\text{]}$$

Y que la aceleración es una magnitud derivada del espacio con respecto del tiempo, la expresión queda de la siguiente manera:

$$F = m \cdot \frac{d^2u}{dt^2} \text{ [kg} \cdot \text{m/s}^2\text{]}$$

Se puede observar que la fuerza depende de la masa, de la distancia y del tiempo (parámetros que serán útiles a la hora de calcular las incertidumbres en la obtención de datos a partir de medidas realizadas con este instrumento).

De esta manera se puede dar un valor en newton (N) sabiendo que es una unidad derivada del Sistema Internacional de medida.

Se podrán utilizar múltiplos y submúltiplos de dicha magnitud.

A día de hoy, gracias al sistema métrico decimal existe un sistema internacional de unidades que permite conocer la magnitud de una medida en cualquier lugar del mundo. Sin embargo esto no ha sido así siempre.



ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

Como curiosidad se adjunta una imagen obtenida del CEM (Centro Español de Metrología) en la que se muestra el sistema de medida que se usaba en Madrid antiguamente (no consta fecha).

MADRID.	
VARA..... <i>Val.</i>	0,843 metros.
METRO.....	1,18624 varas, ó 1 vara, 0 pies, 6 pulgadas, 8 líneas, 456 milésimas de línea.
VARA CUADRADA.....	0,710649 metros cuadrados.
METRO CUADRADO.....	1,407164437 varas cuadradas, ó 1 vara cuadrada, 3 pies cuadrados, 95 pulgadas cuadradas, 98 líneas cuadradas, 656 milésimas de línea cuadrada.
VARA CÚBICA.....	0,599077107 metros cúbicos.
METRO CÚBICO.....	1,66923420761 varas cúbicas, ó 1 vara cúbica, 18 pies cúbicos, 119 pulgadas cúbicas, 1367 líneas cúbicas, 177 milésimas de línea cúbica.
LIBRA.....	0,460093 kilogramos.
KILOGRAMO.....	2,173474 libras, ó 2 libras, 2 onzas, 12 adarmes, 409 milésimas de adarme.
MEDIA ARROBA PARA LÍQUIDOS.....	8,15 litros.
LITRO.....	1,963 cuartillos, ó 1 cuartillo, 963 milésimas de cuartillo.
MEDIA FANEGA PARA ÁRIDOS.....	27,67 litros.
LITRO DE GRANO.....	0,867 cuartillos, ó 0 cuartillos, 867 milésimas de cuartillo.
FANEGA SUPERFICIAL, LLAMADA MARCO DE MADRID, DE 4900 VARAS CUADRADAS DE BURGOS.....	34,238121 áreas.
FANEGA SUPERFICIAL DE 4900 VARAS CUADRADAS, MEDIDAS CON LA VARA DE MADRID.....	34,821801 áreas.
ÁREA.....	140,7164 varas cuadradas, ó 140 varas cuadradas, 6 pies cuadrados, 448 milésimas de pie cuadrado.
LEGUA DE 6666 $\frac{2}{3}$ VARAS CASTELLANAS.....	5,572699 kilómetros.
KILÓMETRO.....	1186,2396 varas, ó 1186 varas, 0 pies, 719 milésimas de pie.

Figura 3.1. sistema de medida utilizado en Madrid antiguamente

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

3.2 Patrón

La unidad de medida de la magnitud fuerza adoptada por los países firmantes de la Convención del Metro y de uso legal en España, es el newton (N), unidad derivada del S.I.

Este patrón se obtiene a través del Patrón Nacional de la unidad de Masa y de la medida de la aceleración de la gravedad local.

El principio de funcionamiento de los patrones nacionales de referencia de la magnitud fuerza, está basado en la acción directa de masas en el campo gravitatorio local, según la fórmula:

$$F = m \cdot g_l \cdot (1 - \rho_a / \rho_m)$$

donde :

F = fuerza generada

m = valor de masa del (los) elemento(s) de carga que genera(n) la fuerza F

g_l = valor de la gravedad local

ρ_a = densidad del aire

ρ_m = densidad media del material del elemento o elementos de carga que generan la fuerza F.

La equivalencia de las fuerzas y de las masas de origen inercial y gravitacional permite asegurar que las fuerzas desarrolladas por las máquinas de carga directa (regidas por la ley de atracción universal) satisfacen la definición de la unidad de fuerza (regida por el postulado fundamental de la dinámica).

La unidad de fuerza, desde el año 1996, está desarrollada en el Centro Español de Metrología por medio de tres máquinas patrones de fuerza de carga directa, con alcances nominales de 500 kN, 20 kN y 1 kN que permiten generar fuerzas tanto a compresión como a tracción desde 10 N a 500 kN.

La incertidumbre típica relativa de medida (para $k=1$) en el campo de generación de fuerza de 10 N a 500 kN es de $1 \cdot 10^{-5}$ F. Esta incertidumbre es constatada a través de la



ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

participación en diversas comparaciones internacionales y puede ser consultada en las tablas de de la base de datos del BIPM.

El rango de generación de fuerza se complementa con una máquina patrón hidráulica del tipo comparador para la generación de fuerzas hasta 2 MN a compresión con incertidumbre relativa (para $k=1$) de $1 \cdot 10^{-4}$ F.



Figura 3.2. Instrumento patrón de la magnitud fuerza. (CEM)

Actualmente se está en fase de caracterización de una máquina patrón de fuerza de 10 MN, así como la instalación de un sistema adecuado para la colocación de los transductores en la máquina para su calibración.

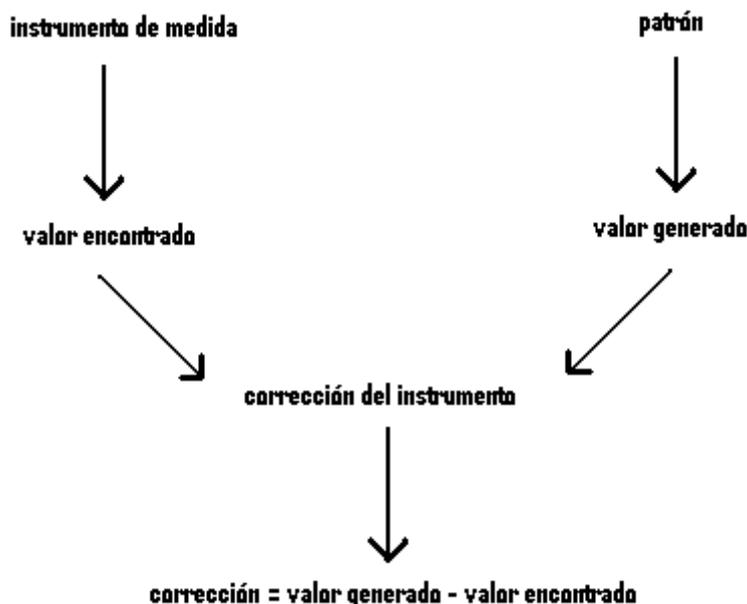
El sistema de referencia patrón de fuerza de la máquina está compuesto por dos transductores de fuerza extensométricos, uno de 1500 kN y otro de 10 MN, que estarán montados uno encima del otro a través de un dispositivo de transmisión de fuerza, que permite la introducción de la fuerza a través de los mismos, sin necesidad de desmontarlos de la máquina con independencia de la fuerza generada.

La operación de la máquina se realiza manualmente vía cuadro de mandos o automáticamente vía PC por sistemas basados en PLC.

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

3.3 Cadena de medida

Para calcular la corrección que se debe aplicar a las mediciones, se debe comparar la medición obtenida del equipo, con la medida patrón. La propiedad de relacionar ambas medidas, se denomina trazabilidad.



Según la definición del Vocabulario Internacional de Metrología, la trazabilidad es la propiedad que relaciona el resultado con la referencia utilizada. Es decir, la propiedad mediante la cual aseguramos la comparabilidad y fiabilidad de los resultados.

El proceso para asegurar la trazabilidad en una medida es la calibración a través de la llamada cadena de medida.

A la hora de caracterizar una magnitud física hay que tomar en cuenta tres premisas:

- Cuánto vale
- En un momento dado
- En un lugar dado

Es decir, se ha de cuantificar para unas condiciones específicas en un instante de tiempo específico. Esto es lo que se denomina sistema de medida.

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

Un sistema de medida depende del equipo de medida, del procedimiento de medida y del técnico que realice la medición. En este apartado el estudio se centrará en el equipo de medida también denominado cadena de medida.

Una cadena de medida es el instrumento o conjunto de instrumentos capaz de cuantificar una magnitud física. En este caso el instrumento en cuestión es el frenómetro.

Sus fases principales son:

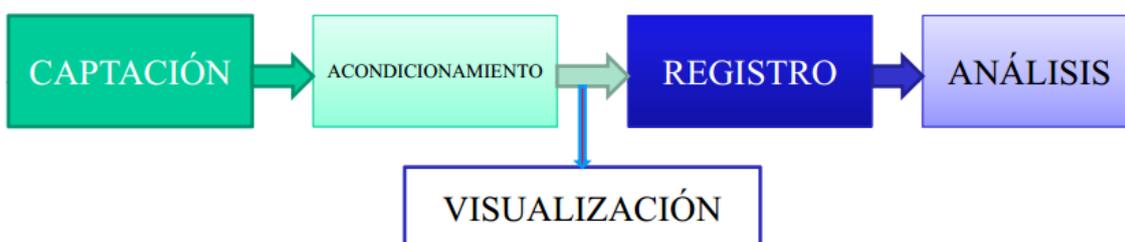


Figura 3.3. Fases principales de la cadena de medida

Concepto de captación: transformar la fuerza longitudinal de frenada en otra magnitud física diferente.

La conversión de unas magnitudes a otras se realiza en el proceso de transducción. El encargado de llevar a cabo este fenómeno es el transductor.

El transductor posee un sensor, es decir, un lugar físico donde se verifica el proceso, cuyos parámetros varían con la magnitud a medir.

En el caso del frenómetro, este proceso, como se verá a continuación, se realiza de manera muy indirecta.

La carcasa del motor del frenómetro está conectada a un transductor extensométrico. Cuando se acciona el sistema de frenado, la resistencia al giro de la rueda del vehículo hace que la carcasa del motor gire sobre su propio eje.

El transductor utiliza un circuito eléctrico conocido como puente de Wheastone que registra la variación de resistencia eléctrica que a su vez provoca una variación de tensión.

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

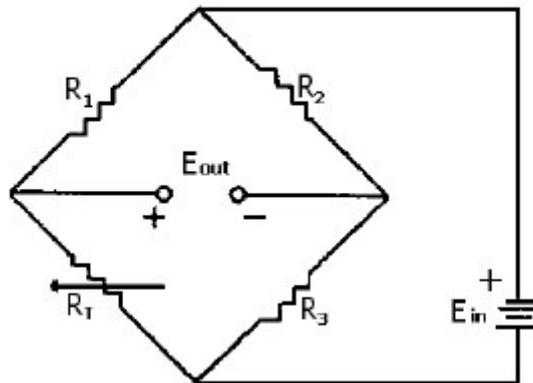


Figura 3.4. Puente de Wheastone

La señal que emite el transductor es muy pequeña (milivoltios), y es aquí donde entra en juego la fase de acondicionamiento amplificando la señal y transformándola de milivoltios a voltios.

Para la fase de visualización de los datos obtenidos, se pueden utilizar dos dispositivos diferentes: analógicos o digitales.

Hoy en día, los dispositivos analógicos están obsoletos ya que en estos dispositivos las mediciones no quedan registradas y se han de hacer a ojo lo que conlleva a una toma de medidas poco precisas y con un gran rango de error.

Actualmente en todas las inspecciones se utilizan dispositivos digitales que siguen manteniendo la estética de los analógicos, pero disponen de la capacidad de almacenar los datos electrónicamente.

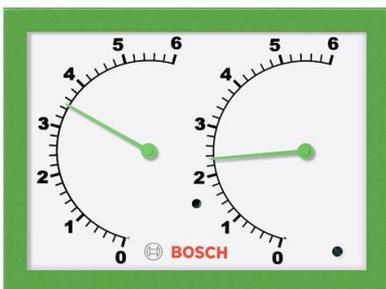


Figura 3.5. Dispositivo de lectura analógico

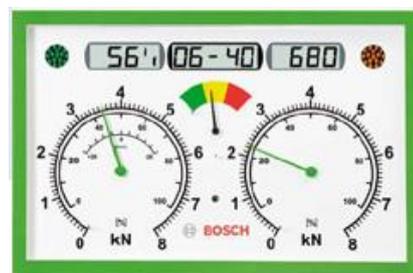


Figura 3.6. Dispositivo de lectura analógico y digital

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

3.4 Principio de funcionamiento

Al situarse las ruedas del vehículo sobre los rodillos de arrastre (figura 25), éstas presionan el rodillo palpador que inicialmente se encuentra en una posición más elevada que el resto del equipo. Al ser presionado, se cierra el circuito eléctrico que pone en funcionamiento el motor.



Figura 3.7. Colocación de la rueda del vehículo sobre los rodillos del frenómetro

El motor (unido a los rodillos de arrastre por medio de una cadena) comienza a girar a una velocidad de giro constante. Los rodillos a su vez, por fricción, hacen girar la rueda.

En cuanto la rueda comienza a girar, el rodillo palpador percibe dicho movimiento y por medio de un contador de impulsos, controla el deslizamiento entre los rodillos y las ruedas. Para garantizar la eficacia de la prueba, dicho deslizamiento debe situarse entre el 10% y el 28%.

A continuación se procede a frenar progresivamente y poco a poco, la rueda va ofreciendo más resistencia al giro y como consecuencia el par en el motor va aumentando.

A medida que crece la fuerza longitudinal de frenada (F_f), también lo hace la fuerza de arrastre (F_a) hasta que la fuerza longitudinal de frenada alcanza el límite de adherencia (momento en el que la rueda comienza a deslizarse sobre los rodillos). Justo antes de que se produzca este fenómeno, se produce una disminución de la velocidad de giro de la rueda que es detectada por el rodillo palpador el cual envía una señal, por medio del sistema electrónico del frenómetro, para que se pare el motor que acciona los rodillos.

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

Según se muestra en la figura 3.8, el motor bascula sobre el eje sin más sujeción que el de una palanca biapoyada cuyo extremo se encuentra sujeto rígidamente a un dispositivo de medida de fuerza (transductor)

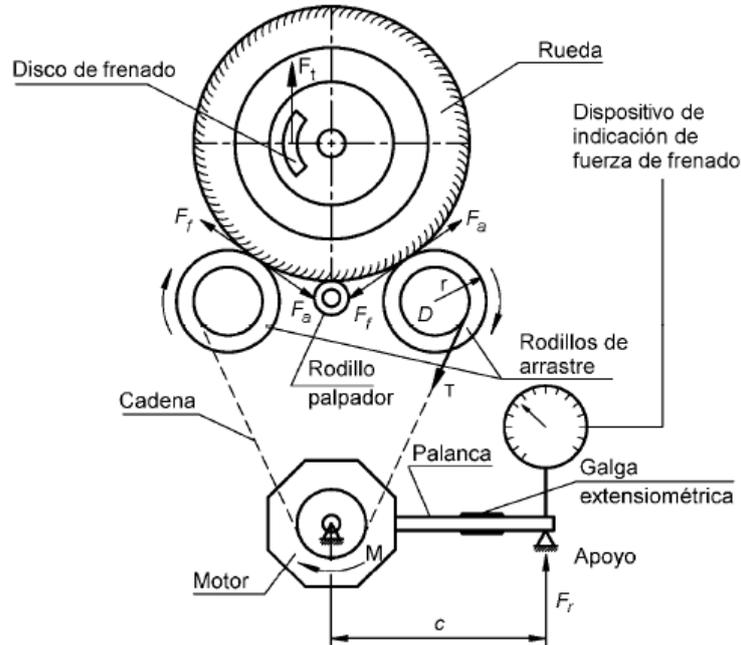


Figura 3.8. Esquema funcionamiento interno del frenómetro

El transductor registra la fuerza necesaria para evitar que la carcasa del motor gire, siendo proporcional a la resistencia longitudinal de arrastre de los rodillos, o lo que es igual, a la fuerza longitudinal de frenada. De esta forma se establece que:

$$F_a \cdot D = F_r \cdot c$$

$$F_f = F_a = F_r \cdot \frac{c}{D}$$

Siendo:

F_a = fuerza de arrastre del rodillo (acción del rodillo sobre la rueda)

F_f = fuerza longitudinal de frenada de la rueda (acción de la rueda sobre el rodillo)

F_r = fuerza de reacción que se produce en el brazo de palanca (debido al momento torsor) en el punto donde se sitúa el transductor de fuerza

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

D = diámetro del rodillo de arrastre

c = distancia entre el eje del motor y el punto donde se mide la fuerza.

Es decir que la fuerza longitudinal de frenada es proporcional a la fuerza de la palanca, cuya constante de proporcionalidad es

$$K = \frac{c}{D}$$

Lo que permite determinar la fuerza longitudinal de frenada equivalente a la correspondiente reacción. Estos valores medidos podrán visualizarse directamente en la consola del frenómetro, o bien registrarse.

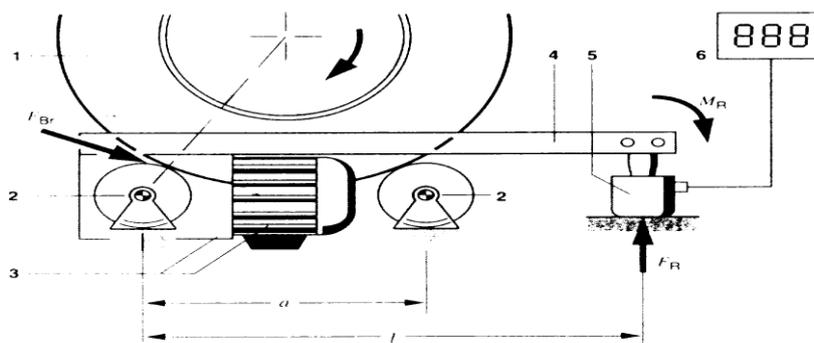


Figura 3.9. Esquema simplificado del interior del frenómetro y el dispositivo de lectura

2.5 Comportamiento estático del equipo de medida

➤ Curva de calibración

Como se verá más adelante, existe un patrón a partir del cual se calibran los instrumentos de medida. Comparando de forma experimental el valor que proporciona el instrumento y el que proporciona el patrón, se traza la denominada curva de calibración.

Si dicha curva fuese una recta, implicaría que el instrumento de ensayo y el patrón ofrecen la misma medida siempre. Este fenómeno es imposible ya que toda medida ha de expresarse como el valor de la magnitud \pm una incertidumbre. Por tanto, en casos reales se ha de calcular la linealidad del sistema (normalmente 98 o 99%)

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

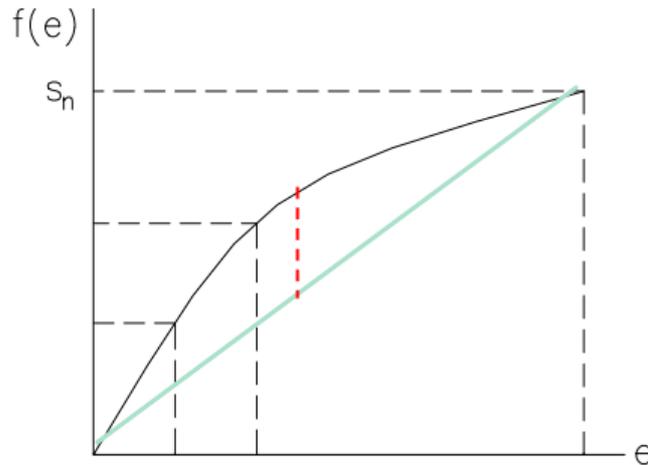


Figura 3.10. Curva de calibración

➤ Sensibilidad

La pendiente de la curva de calibración proporciona la sensibilidad del equipo. Cuanto mayor sea dicha pendiente más sensible será el instrumento.

➤ Estabilidad

También es importante que un sistema sea estable. Es decir, que su curva de calibración permanezca invariante en el tiempo. Cuando el equipo presenta irregularidades se ha de volver a calibrar.

➤ Resolución

Existe otro parámetro significativo que se denomina resolución. La resolución es la menor diferencia de indicación que ofrece el equipo. A mayor resolución menor incertidumbre de medida. Como es de esperar, los instrumentos digitales ofrecen mayor resolución que los instrumentos analógicos.

➤ Repetibilidad

La repetibilidad es la aptitud del instrumento para proporcionar resultados similares cuando la magnitud de entrada se aplica repetidas veces, de forma prácticamente idéntica, y bajo condiciones de ensayo constantes.

➤ Durabilidad

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

Capacidad del equipo para conservar sus características de funcionamiento durante su periodo de utilización.

➤ Precisión

Por último, se busca que un equipo de medida sea preciso. Esto significa que el mismo equipo, bajo las mismas condiciones, con un mismo operario y en diferentes instantes de tiempo, repita los resultados.



Capítulo 4

Calibración y errores

4.1 Calibración

Los parámetros a medir y valorar durante la calibración son los siguientes:

- Fuerza vertical por cada rueda o eje
- Fuerza longitudinal de frenada por eje y por cada lado del eje, medido durante todo el ensayo, hasta obtener la fuerza máxima de frenado.
- Desequilibrio de frenada por cada lado del eje, expresado en porcentaje, medido durante todo el ensayo, hasta obtener la fuerza máxima de frenado.
- Eficacia de frenada por eje, y del conjunto del vehículo.

Existen dos métodos de calibración en función del tipo de frenómetro que se utilice.

Los frenómetros para vehículos ligeros y motocicletas se calibran mediante el método de palanca sencilla.

Los frenómetros para vehículos pesados y frenómetros universales, utilizan el método de doble palanca.

A través de la calibración se pretende ofrecer una estimación de la desviación máxima que comete un instrumento de medida, con un nivel de confianza dado, y con respecto al valor verdadero.

Es decir, comparar el valor de salida del instrumento de medida, con la de un instrumento estándar de exactitud conocida (patrón), cuando se aplica la misma magnitud de entrada a ambos equipos de medida.

La calibración comprende las operaciones para determinar el error y la incertidumbre de indicación de los instrumentos en todo su rango de medida.

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

Para comprobar si el error evaluado durante la calibración cumple o no unos límites de aceptación especificados, posteriormente se realiza una verificación de los resultados.

Pasos a seguir para llevar a cabo la calibración:

- Comprobación de las condiciones ambientales
- Desconexión del frenómetro
- Retirada de la cubierta metálica
- Instalación y fijación de la barra de calibración
- Conexión del frenómetro y ajuste del cero
- Toma de medidas
- Cálculo de incertidumbres

4.2 Tipos de errores

Todo sistema de medida presenta errores de medida ya que ninguna es exacta. Como el valor medido y el valor real no es el mismo, sólo se puede aspirar a estimar su grado de incertidumbre. Por tanto, para que una medición sea completa, se ha de expresar como el valor atribuido (medido) \pm incertidumbre asociada.

$$Y = y \pm u$$

Se denomina error de una medida a la diferencia entre el valor verdadero de la magnitud, y el valor medido.

Existen diferentes tipos de errores:

- Error sistemático

Se expresa como:

$$E_s = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X)}{n}$$



ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

Siendo:

X = valor verdadero

x = valor de la medición

n = número de mediciones

El error sistemático es un valor constante que se puede estimar, controlar o corregir.

La corrección no será exacta. Siempre quedará un error similar al error aleatorio.

Estos errores se deben a averías del equipo, una mala calibración, variable ambiental influyente de manera conocida, etc.

- Error aleatorio

Se expresa como:

$$E_i = x_i - \bar{x} \quad \text{con} \quad \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Se trata de una variable aleatoria cuyo valor esperado es cero. Su varianza es constante y puede estimarse.

Este error aparece por ejemplo cuando se repite una medida un cierto número de veces. Su valor varía, no se obtiene siempre el mismo resultado.

Una vez obtenido el error E, se puede calcular la corrección necesaria C expresada como $C = -E$.

$$C = F_0 - \bar{F} + \sum \delta$$

Siendo:

C = corrección final de la calibración

F_0 = valor nominal del patrón

\bar{F} = valor de lectura del instrumento de medida

δ = corrección debida a los diferentes errores



ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

4.3 fuentes de incertidumbre

La incertidumbre del resultado de una medición refleja la falta de un conocimiento completo del valor del mensurado. Un conocimiento completo exigiría una cantidad infinita de información. Los fenómenos que contribuyen a la incertidumbre, y por tanto, al hecho de que el resultado de la medición no pueda ser caracterizado con un valor único, se denominan fuentes de incertidumbre.

En la práctica pueden existir muchas fuentes de incertidumbre en una medición. Algunas de ellas son:

- Realización imperfecta de la definición del mensurado.
- Muestreo no representativo del mensurado definido.
- Límite en la resolución del instrumento de medida.
- Efectos desconocidos de las condiciones ambientales.
- Desviaciones personales en la lectura de instrumentos analógicos.
- Valores inexactos de los patrones y materiales de referencia utilizados.
- Aproximaciones e hipótesis incorporadas en el método y el procedimiento.
- Definición incompleta del mensurado o magnitud de medida.
- Valores inexactos de constantes y otros parámetros de fuentes externas

4.4 Incertidumbre típica

Es la incertidumbre del resultado de una medición, expresada en forma de desviación típica.

En la mayor parte de los casos, el mensurado no se mide directamente sino que se determina a partir de otras N magnitudes:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$$



ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

Siendo:

Y = magnitud de salida del mensurado (medida a determinar)

f = función de transferencia

X_i = magnitudes de entrada que permiten obtener el valor del mensurado

Utilizando estimaciones de las variables de entrada, se obtiene una estimación del mensurado:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$$

Siendo:

y = estimador de de Y

x = estimador de X

Como los valores x_i no pueden determinarse exactamente, el valor resultante de la medida, tampoco es exacto y entran en juego las incertidumbres.

Las incertidumbres de las variables de entrada y la función modelo permiten determinar la incertidumbre del valor resultante.

La incertidumbre típica es por tanto, la desviación típica asociada a cada estimación de entrada (x_i), y se representa como $u(x_i)$.

$$u(y) = f[u(x_1), u(x_2), \dots, u(x_N)]$$

Cada estimación de entrada x_i así como su incertidumbre asociada $u(x_i)$ se obtienen a partir de una distribución de valores posibles de la magnitud de entrada X_i .

Esta distribución de probabilidades puede basarse en una distribución de frecuencias (evaluaciones de TIPO A), o puede tratarse de una distribución supuesta a priori (evaluaciones de TIPO B).

El resultado de una medición es sólo una aproximación (estimación) del valor del mensurado. Éste sólo se haya completo cuando está acompañado de una incertidumbre.

Incertidumbre típica TIPO A



ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

Se utiliza cuando se han realizado N observaciones independientes de una de las magnitudes de entrada bajo las mismas condiciones de medida.

Cuando una medida se repite en las mismas condiciones, puede observarse una dispersión o fluctuación, siempre que el procedimiento de medida disponga de resolución suficiente.

La incertidumbre de una magnitud de entrada se estima en base a la dispersión de los resultados individuales.

Generalmente, cuando el número n de mediciones repetidas es pequeño ($n < 10$), la evaluación TIPO A de la incertidumbre típica, expresada con la desviación típica puede no ser fiable ya que la distribución que se obtiene, difiere notablemente de una distribución normal.

Métodos de obtención:

- ANOVA (análisis de la varianza):

El análisis de la varianza puede definirse como un conjunto de situaciones experimentales y procedimientos estadísticos para el análisis de respuestas cuantitativas de unidades experimentales.

- Mínimos cuadrados:

Consiste en ajustar una curva a partir de datos experimentales. La varianza y la incertidumbre típica de los parámetros, caracterizan la curva y cualquier punto predicho.

- Método general:

Para una serie de medidas, efectuadas en condiciones de repetitividad, compuesta de n medidas ($n > 1$) independientes, el valor estimado del valor verdadero de una magnitud, viene dado por la media aritmética de los valores individuales medidos x_i ($i = 1; 2; \dots; n$):

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

La varianza experimental de las observaciones se define como la dispersión de los resultados de la medición para la magnitud de entrada. Se determina según la siguiente ecuación:

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

$$s^2(x) = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n - 1}$$

La varianza del promedio es un estimador sesgado de la varianza de la media de las muestras, y se determina según la siguiente ecuación:

$$s^2(\bar{x}) = \frac{s^2(x)}{n}$$

La desviación estándar del promedio es la raíz cuadrada positiva de la varianza del promedio:

$$s(\bar{x}) = + \frac{s(x)}{\sqrt{n}}$$

La desviación estándar experimental del promedio es la estadística utilizada para la cuantificación de la incertidumbre estándar de la medición:

$$u(X) = s(\bar{x})$$

Siendo:

$u(X)$ = incertidumbre típica “verdadera” o teórica de TIPO A

Incertidumbre típica TIPO B

Se utiliza cuando los datos solamente pueden basarse en la experiencia y en conocimientos generales, ya que corresponden a errores de tipo sistemático.

La información disponible sobre la variable puede ser:

- Resultado de mediciones anteriores
- Experiencia o conocimiento general acerca del comportamiento y las propiedades de los materiales e instrumentos utilizados.
- Especificaciones del fabricante.
- Datos suministrados por certificados de calibración u otros certificados.



ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

- Incertidumbres asignadas a datos de referencia tomados de manuales.

La cuantificación de una fuente de incertidumbre incluye la asignación de un valor y la determinación de la distribución a la cual se requiere este valor. Las distribuciones que aparecen más frecuentemente son:

- Distribución normal:

Siguen esta distribución los resultados de una medición repetida afectada por una o más magnitudes de influencia que varían aleatoriamente. También la sigue generalmente, la incertidumbre indicada en certificados de calibración.

- Distribución rectangular

Es una distribución rectangular cada valor en un intervalo dado que tiene la misma probabilidad. Es decir, la función de densidad de probabilidad es constante en ese intervalo.

Son ejemplos típicos, la resolución de un instrumento digital, o la información técnica sobre tolerancias de un instrumento. En general, cuando exclusivamente hay conocimiento de los límites superior e inferior del intervalo de variabilidad de la magnitud de entrada, lo más conservador es suponer una distribución rectangular.

- Distribución triangular

Si además del conocimiento de los límites superior e inferior hay evidencia de que la probabilidad es más alta para valores en el centro del intervalo y se reduce hacia los límites, puede ser más adecuado basar la estimación de la incertidumbre en una distribución triangular.

- Otras distribuciones

Pueden encontrarse también distribuciones como la U, en la cual los extremos del intervalos presentan los valores con probabilidad máxima (típicamente cuando hay comportamiento oscilatorio).

También se encuentran distribuciones triangulares con el valor máximo en un extremo como las asociadas a los “errores de coseno”.

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

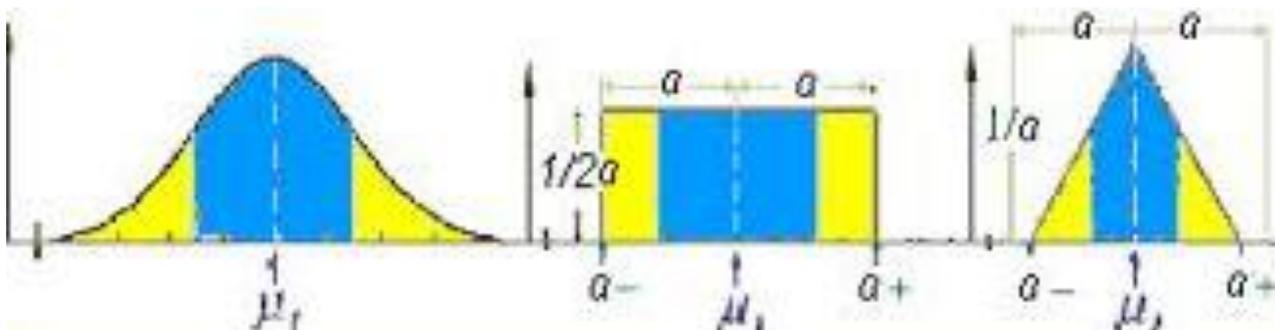


Figura 4.1. Distribuciones normal, rectangular y triangular (respectivamente)

Reducción

Antes de comparar contribuciones de la incertidumbre que tienen distribuciones diferentes, es necesario representar los valores de las incertidumbres originales como incertidumbres estándar. Para ello se determina la desviación estándar de la distribución asignada a cada fuente:

➤ Distribución normal

La desviación estándar experimental de la medida calculada a partir de los resultados de una medición repetida según la expresión \bar{x} , ya representa la incertidumbre estándar.

$$u(X) = \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}}$$

Cuando se dispone de valores de una incertidumbre expandida U , como los representados por ejemplo en certificados de calibración, se divide U entre el factor de cobertura k , obtenido ya sea directamente, o a partir de un nivel de confianza dado.

$$u(x_i) = \frac{U}{k}$$

➤ Distribución rectangular

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

Si la magnitud de entrada X_i tiene una distribución rectangular con el límite superior a_+ y el límite inferior a_- , el mejor estimador para el valor de X_i está dado por:

$$x_i = \frac{a_+ + a_-}{2}$$

Y la incertidumbre estándar se calcula por:

$$u(x_i) = \frac{a_+ - a_-}{\sqrt{12}}$$

O por:

$$u(x_i) = \frac{a/2}{\sqrt{3}} \text{ (Donde } a/2 \text{ es el semiancho del intervalo } a = a_+ - a_-)$$

Una aplicación típica es la resolución de un instrumento digital. También la incertidumbre relacionada con el número finito de cifras significativas de datos tomados de la literatura puede ser tratada con esta distribución (siempre y cuando no haya indicios de que la incertidumbre en realidad es mayor que la incertidumbre relacionada con la última cifra significativa).

Si se aplica a la resolución o a los datos tomados de la literatura, “a” corresponde al último dígito significativo o a la última cifra significativa respectivamente.

➤ Distribución triangular

Como en una distribución rectangular, para una magnitud de entrada X_i que tiene una distribución triangular con los límites a_+ y a_- , el mejor estimador para el valor de X_i está dado por:

$$x_i = \frac{a_+ + a_-}{2}$$

La incertidumbre estándar se calcula en este caso por:

$$u(x_i) = \frac{a_+ - a_-}{\sqrt{24}} = \frac{a/2}{\sqrt{6}}$$

4.5 Incertidumbre típica combinada

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

La desviación típica asociada al resultado de una medida, se denominada incertidumbre típica combinada, se representa por $u_c(y)$ y se determina a partir de la incertidumbre típica $u(x_i)$

➤ Datos no correlacionados

La incertidumbre del caso a estudiar se puede expresar como una combinación de las incertidumbres individuales de cada variable, es decir, una suma de la incertidumbre inicial multiplicada por un coeficiente de sensibilidad c . El método más extendido para el cálculo de la incertidumbre es el conocido por propagación de errores.

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{df}{dx_i}\right)^2 \cdot u^2(x_i)} \quad \left. \begin{array}{l} \\ c_i = \sum_{i=1}^n \left(\frac{df}{dx_i}\right) \end{array} \right\} \rightarrow u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n [c_i \cdot u(x_i)]^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2(y)}$$

➤ Datos correlacionados

Cuando los valores de medida guardan una relación entre ellos, el cálculo se hace más complicado.

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{df}{dx_i}\right)^2 \cdot u^2(x_i) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{df}{dx_i} \frac{df}{dx_j} u^2(x_i) u^2(x_j) \cdot r(x_i, x_j)}$$

Donde:

$r(x_i, x_j)$ = correlación entre ambos valores

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

4.6 incertidumbre expandida

Para los casos en los que se necesita un nivel de confianza mayor que el proporciona la incertidumbre combinada, se utiliza la incertidumbre expandida.

Para ello se aplica un coeficiente k en función del nivel de confianza que se requiera y del origen de los datos.

$$U = k \cdot u_c(y)$$

Los casos más habituales son:

Para una distribución normal de los datos al 95% $k=2$, al 99% $k=3$, y al 68% $k=1$.

Para una distribución cuadrada, $k=1$ corresponde al 57,7%



Capítulo 5

Frenómetro para vehículos ligeros

5.1 Utillaje utilizado

Para poder llevar a cabo la correcta calibración de un frenómetro para vehículos ligeros, se necesitan los siguientes instrumentos:

- Barra de calibración. Esta barra se acopla al frenómetro por uno de sus extremos mediante tornillos, y del otro extremo se apoyan una serie de masas calibradas. Las masas se sitúan sobre unas muescas situadas en la parte superior de la barra.
- Juego de masas patrón. Éstas contienen la geometría conveniente para poder ser apoyadas en la barra de calibración, y su valor nominal es de 1,5 kg, 5 kg, 15 kg y 30 kg.
- Calibre pie de rey. Con él se medirá el diámetro de los rodillos.
- Equipo de medida de condiciones ambientales (temperatura, humedad y presión).
- Inclínómetro digital. Se utiliza para medir la máxima flexión de la barra al colocar la masa en su extremo.
- Nivel

La geometría y disposición de los elementos en algunos frenómetros, impide el acceso a los rodillos con un pie de rey. En este caso, además de los instrumentos de medida mencionados, será necesario el uso de:

- Sonda de profundidad
- Circómetro (cinta de trazos flexible)

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

5.2 Condiciones ambientales

Los ensayos deben efectuarse en condiciones estables, por lo general a la temperatura, presión y humedad normales de la sala, salvo que se especifique de otra manera.

Como el proceso de calibración se realiza en la propia ITV, las condiciones ambientales presentes a la hora de utilizar el frenómetro, serán aproximadas a las encontradas a la hora de calibrarlo.

Se considera despreciable la influencia de dichas condiciones ambientales siempre y cuando se encuentren dentro de los siguientes rangos:

- Temperatura: entre 0 °C y 44 °C
- Presión atmosférica: entre 700 hPa y 1060 hPa
- Humedad: entre 0% y 90%

Si durante la calibración alguno de estos parámetros no cumple con las especificaciones, la calibración se pospondrá hasta que esté dentro de dichos rangos.

5.3 Procedimiento de medida

Durante el procedimiento de medida, lo que se busca es obtener el momento de accionamiento que se produce en el frenómetro, y compararlo con el momento de accionamiento que produce el sistema de calibración.

El frenómetro ofrece un momento (M_f) igual al producto de la fuerza de frenado del vehículo, por el radio del rodillo de arrastre.

$$M_f = F_f \cdot D/2$$

El sistema de calibración formado por la barra de calibración y el juego de masas patrón, produce un momento (M_f) que es el producto de la masa por la distancia (d) existente entre dicha masa y el motor.

$$M_f = m \cdot g \cdot d$$

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

Como se puede observar, ambos momentos han sido denominados con la misma nomenclatura, ya que en principio, ambos deberían ser iguales al tratarse de un mismo ensayo.

Igualando las expresiones anteriores, se deduce que:

$$F_f = \frac{2 \cdot m \cdot g \cdot d}{D}$$

Siendo:

m = masa del patrón de referencia (calibrada externamente)

d = distancia del patrón de referencia (calibrada externamente)

D = diámetro del rodillo de arrastre

g = 9,8 m/s² (valor de la gravedad)

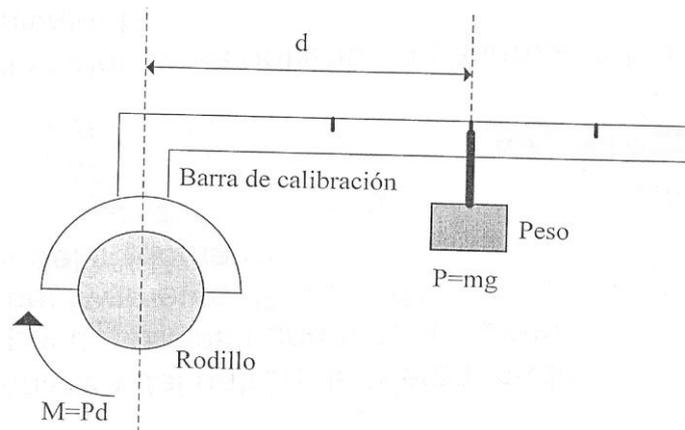


Figura 5.1. Esquema sistema de calibración de un frenómetro para vehículos ligeros

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

5.4 Procedimiento de calibración

Del procedimiento de medida se saca como conclusión, que las magnitudes a calibrar son la fuerza de frenado, y el diámetro de los rodillos, ya que el resto de parámetros que intervienen en el cálculo, son calibrados externamente antes de realizar dicha medida.

Para calibrar el diámetro de los rodillos, se utiliza un pie de rey. Se toman 5 medidas en tres puntos diferentes del rodillo (en ambos extremos y en el centro). Además, para considerar la posible falta de redondez del mismo, se irá girando el rodillo a medida que se toman las medidas.

En total se tomarán 15 medidas en cada rodillo.

Nota: en aquellos casos en los que sea imposible acceder a los rodillos con el pie de rey, se utilizará un circómetro. El circómetro es una cinta métrica flexible, que se coloca alrededor del rodillo y se ajusta a su superficie proporcionando la longitud de su perímetro.

Una vez calibrados los rodillos se procede a realizar el montaje del sistema para poder obtener la magnitud de la fuerza de frenado.

Primero se acopla la barra de calibración al frenómetro y se nivela para conseguir que quede en posición horizontal. Para evitar que el peso de la barra contribuya en la toma de medidas, se coloca un contrapeso para contrarrestarlo.

Se ha de medir la distancia (h) existente entre el centro de rotación del conjunto motor-rodillo y la parte superior de la barra de calibración. Esta medida se obtiene como suma del diámetro del rodillo dividido entre dos, y la altura de la barra.

Por último, se mide el mayor ángulo de inclinación del sistema. Éste se obtiene comparando el ángulo que se forma cuando la masa de mayor peso se coloca sobre la muesca más alejada del rodillo, con el ángulo que se tiene cuando no se aplica ningún peso.

5.5 Toma de medidas



ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

El ensayo debe consistir en aplicar al menos cinco cargas de ensayo repartidas en el rango de medida uniformemente, incluyéndose el valor máximo y el mínimo. Todas las indicaciones obtenidas han de estar dentro de los errores máximos permitidos.

Se ha de repetir el proceso al menos 5 veces asegurándonos de que la diferencia entre los valores extremos de las 5 medidas debe ser menor o igual que la fuerza de frenada.

La toma de medidas se realiza de forma ascendente la primera vez, y una vez alcanzado el máximo se procede a realizar la segunda toma de manera descendente, y así sucesivamente hasta completar las cinco pasadas.

Antes de comenzar cada pasada, se anota el valor del cero del equipo sin aplicar ninguna masa.

Cada medida se anota en una hoja de toma de datos, para poder realizar posteriormente el cálculo de incertidumbre del equipo.

A la hora de anotar las medidas, se ha de distinguir en dos casos. Si el frenómetro es analógico, el técnico juega un papel importante, ya que debe anotar el valor que considere que está más próximo a la aguja. Si el frenómetro es digital, la lectura a registrar será aquella que permanezca constante en la pantalla del equipo.

5.6 Calculo de incertidumbres

Lo primero que se ha de hacer antes de iniciar el montaje, es desconectar los motores de los rodillos para evitar cualquier tipo de contratiempo por una puesta en marcha en marcha accidental.

Antes del inicio de la verificación se revisará el correcto estado de conservación y mantenimiento del frenómetro. Los asientos de los cojinetes de los rodillos, el anclaje de los motores, la cadena de transmisión, y demás elementos del equipo, no deben presentar anomalías que puedan influir en los valores obtenidos.

Asimismo, se ha de comprobar que el utillaje utilizado para llevar a cabo la calibración, está limpio y no presentan desgastes ni deformaciones significativas que puedan influir en los resultados.



ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

La expresión utilizada para corregir la contribución de las incertidumbres en un frenómetro de rodillos para vehículos ligeros es la siguiente:

$$C_j = F_{0j} - \bar{F}_j + \delta_{montaje} + \delta_{resolución} + \delta_{flexión} + \delta_{acoplamiento} + \delta_{rozamiento}$$

Donde:

C_j = corrección final de la calibración

F_{0j} = valor nominal del patrón

\bar{F}_j = valor de la lectura del frenómetro

$\delta_{montaje}$ = corrección debida a la falta de horizontalidad de la barra de calibración

$\delta_{resolución}$ = corrección debida a la resolución del frenómetro

$\delta_{flexión}$ = corrección debida a la flexión de la barra de calibración

$\delta_{acoplamiento}$ = corrección debida a las holguras que existen en el acoplamiento, y a la falta de axialidad entre centros (barra-taladros)

$\delta_{rozamiento}$ = corrección debida al rozamiento del rodillo del frenómetro en sus apoyos.

Nota: el subíndice j indica un punto genérico de la calibración.

Una vez identificadas las diferentes fuentes de incertidumbre, se procede a cuantificar la variabilidad de cada fuente.

Componentes de la incertidumbre:

- Incertidumbre asociada al patrón, u_{0F} (TIPO B):

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

Siendo $F_f = \frac{2 \cdot m \cdot g \cdot d}{D}$ la fuerza de frenado, su incertidumbre puede calcularse como:
(fórmula general del cálculo de propagación de incertidumbres)

$$u_{0F}^2 = \left(\frac{\delta F}{\delta m}\right)^2 \cdot u_m^2 + \left(\frac{\delta F}{\delta g}\right)^2 \cdot u_g^2 + \left(\frac{\delta F}{\delta d}\right)^2 \cdot u_d^2 + \left(\frac{\delta F}{\delta D}\right)^2 \cdot u_D^2$$

Siendo:

u_m = incertidumbre típica de la masa patrón

u_g = incertidumbre típica de la gravedad

u_d = incertidumbre típica de la distancia patrón

u_D = incertidumbre típica del diámetro del rodillo de arrastre

Por tanto, para poder conocer la incertidumbre del patrón, se han de calcular primero las incertidumbres típicas asociadas a esta magnitud.

a) Incertidumbre típica de la masa patrón

El peso de la masa patrón es un dato calibrado externamente (no se calibra durante el ensayo), por tanto su incertidumbre viene dada por conocimientos generales externos al mismo.

Dado que existe mayor probabilidad de obtener valores próximos al dato registrado, la distribución que sigue este parámetro será una distribución normal.

$$u_m^2 = u_{m0}^2 + u_{m,deriva}^2$$

Donde:

u_{m0} = incertidumbre debida a la trazabilidad del patrón

$u_{m0} = \frac{U_m}{k}$ (Siendo U_m el valor de la incertidumbre expandida de la masa patrón con $k=2$)

$u_{m,deriva}$ = incertidumbre debida a la deriva temporal del patrón

$$u_{m,deriva} = \frac{u_m}{\sqrt{3}}$$

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

Nota: esta expresión se utiliza únicamente cuando no se dispone de datos experimentales. Una vez se realicen varios ensayos y se disponga de un histórico de calibraciones, la expresión a utilizar será:

$$u_{m,deriva} = \frac{\delta u_m}{\sqrt{3}}$$

Siendo δu_m la diferencia entre incertidumbres de las dos últimas calibraciones.

b) Incertidumbre típica de la gravedad

El valor de la gravedad terrestre en España está acotado entre un máximo y un mínimo registrados por el Centro Nacional de Información Geográfica.

Dado que todos los valores recogidos entre el máximo y el mínimo tienen la misma probabilidad, la distribución seguida será una distribución rectangular

La incertidumbre asociada a este parámetro se calcula como:

$$u_g = \frac{g_{\max} - g_{\min}}{\sqrt{12}}$$

c) Incertidumbre típica de la distancia patrón

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

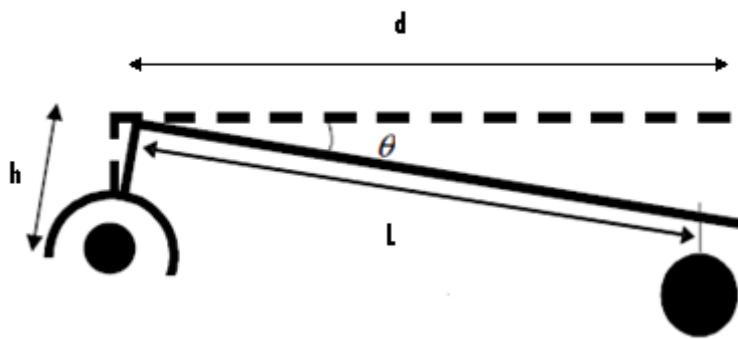


Figura 5.2. Representación gráfica de los parámetros h, L, d y θ

La distancia d total, se calcula como:

$$d = h \cdot \text{sen}\theta + L \cdot \text{cos}\theta$$

Por tanto la incertidumbre asociada a este parámetro se calcula como: (fórmula general del cálculo de propagación de incertidumbres)

$$u_d^2 = \left(\frac{\delta d}{\delta h}\right)^2 \cdot u_h^2 + \left(\frac{\delta d}{\delta L}\right)^2 \cdot u_L^2 = (\text{sen}\theta)^2 \cdot u_h^2 + (\text{cos}\theta)^2 \cdot u_L^2$$

Nota: la incertidumbre debida al ángulo θ se considera despreciable.

Siendo:

u_L = incertidumbre asociada a la longitud de la barra patrón.

u_h = incertidumbre asociada a la distancia que separa el centro de rotación del rodillo con la parte superior de la barra de calibración.

- Incertidumbre u_L

Esta longitud es un parámetro calibrado externamente al ensayo que sigue una distribución normal, por tanto se calcula como:

$$u_L^2 = u_{L0}^2 + u_{L,deriva}^2$$

Donde:

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

u_{L0} = incertidumbre debida a la trazabilidad del patrón

$u_{L0} = \frac{U_L}{k}$ (Siendo U_L el valor de la incertidumbre expandida de la longitud de la barra patrón con $k=2$)

$u_{L,deriva}$ = incertidumbre debida a la deriva temporal del patrón

$$u_{L,deriva} = \frac{u_L}{\sqrt{3}}$$

Nota: esta expresión se utiliza únicamente cuando no se dispone de datos experimentales. Una vez se realicen varios ensayos y se disponga de un histórico de calibraciones, la expresión a utilizar será:

$$u_{L,deriva} = \frac{\delta u_L}{\sqrt{3}}$$

Siendo δu_L la diferencia entre incertidumbres de las dos últimas calibraciones.

- Incertidumbre u_h

La distancia h , es una medida que se toma durante el ensayo. Se mide con un pie de rey, por tanto su incertidumbre será la incertidumbre del instrumento de medida, el pie de rey.

- d) Incertidumbre típica del diámetro del rodillo de arrastre

El diámetro de los rodillos es un dato medido durante el ensayo. Para tener en cuenta la posible falta de redondez del rodillo, se realizan varias mediciones del diámetro. (Incertidumbre TIPOA. Obtención por el método general)

El valor medio del diámetro del rodillo se calcula como:

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^{n_c} D_i}{n_c}$$

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

Y su desviación típica:

$$S_D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_c} (D_i - \bar{D})^2}{n_c - 1}}$$

El valor de la incertidumbre típica del rodillo es:

$$u_D = \sqrt{u_0^2 + \frac{S_D^2}{n_c}}$$

Siendo u_0 la incertidumbre típica del instrumento patrón con el que se mide el rodillo (pie de rey) dividida por el factor $k=2$. ($u_0 = \frac{u}{k}$)

Nota: en ocasiones debido al montaje del frenómetro, es imposible acceder a los rodillos con un calibre pie de rey para realizar las mediciones del diámetro. En estos casos se mide el perímetro del mismo con un circómetro.

$$D = \frac{\text{perímetro}}{\pi}$$

En este caso la incertidumbre se calcula como:

$$u_0 = \frac{u_{\text{perím}}}{\pi}$$

Donde $u_{\text{perím}}$ es la incertidumbre del instrumento patrón (cinta métrica)

- Incertidumbre asociada a la repetibilidad de las medidas, u_{repetib} (TIPO A)

Para obtener un resultado fiable, se ha de realizar el ensayo repetidas veces, lo que conlleva la obtención de varios valores de la fuerza de frenado. Para realizar el cálculo de su incertidumbre, se aplica el método general:

Valor medio de la fuerza de frenado:

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

$$\bar{F}_j = \frac{\sum_{i=1}^{n_c} F_{ji}}{n_c}$$

Desviación típica:

$$S_F = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_c} (F_{ji} - \bar{F}_j)^2}{n_c - 1}}$$

Por tanto, la incertidumbre típica de la fuerza es:

$$u_{\text{repetibilidad}} = \sqrt{\frac{S_F^2}{n_c}}$$

➤ Incertidumbre asociada al montaje, u_{montaje} (TIPO B)

Dado que la barra de calibración es anclada al frenómetro mediante unos taladros, es posible que éstos no estén alineados y que durante el montaje la barra no quede en posición completamente horizontal.

También contribuye a dicha falta de horizontalidad la colocación de las masas en las muescas.

Para calcular esta incertidumbre, se considera el caso más desfavorable posible, es decir, cuando se coloca la mayor masa patrón sobre la muesca más alejada del rodillo.

Para estas condiciones se obtiene una variación de distancia ($\delta_{\text{distancia}}$) que conlleva a una variación de la fuerza (δ_{fuerza}).

$$\delta_{\text{distancia}} = d - d \cdot \cos\theta$$

$$\delta_{\text{fuerza}} = \frac{2 \cdot m \cdot g \cdot \delta_{\text{distancia}}}{D}$$

Considerando que la fuerza sólo puede variar entre cero y este valor, la incertidumbre se asocia a una distribución rectangular de expresión:

$$u_{\text{montaje}} = \frac{\delta_F}{\sqrt{12}}$$

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

- Incertidumbre asociada a la resolución, $u_{resolución}$ (TIPO B)

Esta incertidumbre se asocia a una distribución rectangular con una resolución expresada como división de escala.

$$u_{resolución} = \sqrt{2} \cdot \frac{resolución}{2\sqrt{3}}$$

- Incertidumbre asociada a la flexión de la barra de calibración $u_{flexión}$

La expresión utilizada para realizar el cálculo teórico de la fuerza de frenado, no considera la flexión que sufre la barra en el ensayo real. Esto genera una diferencia en el valor obtenido de manera teórica y de manera experimental.

Para corregir la contribución de este fenómeno, se calcula la incertidumbre de flexión, que se puede expresar como:

$$u_{flexión} = \frac{F_{teórica} - F_{experimental}}{\sqrt{3}}$$

El estudio histórico y la evolución en el tiempo han permitido establecer un valor de:

$$u_{flexión} = 3 N$$

- Incertidumbre asociada al acoplamiento $u_{acoplamiento}$

Al atornillar la barra de calibración al frenómetro, aparecen holguras debidas a la falta de axialidad entre el centro de los taladros y el centro de giro de la barra, y también debidas a las tolerancias típicas de fabricación.

Teniendo en cuenta estos factores, puede asumirse una desviación total de ± 4 mm entre el eje de rotación de la barra y el eje de rotación del rodillo. Esta desviación produce alteraciones de ± 12 N en la fuerza de frenado calculada teóricamente.

Dado que todos los valores dentro del intervalo son igual de probables, a esta incertidumbre se le asocia una distribución rectangular de expresión:

$$u_{acoplamiento} = \frac{24}{2\sqrt{3}} \approx 7 N$$

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

➤ Incertidumbre asociada al rozamiento $u_{rozamiento}$

Esta incertidumbre es debida al rozamiento que se produce entre la superficie del rodillo y los apoyos, así como el rozamiento que se produce entre el rodillo y la rueda del vehículo.

Al apoyarse el vehículo sobre el rodillo, se genera una carga vertical P que provoca el rozamiento entre rueda y rodillo. Suponiendo un coeficiente de rozamiento $\mu_{rueda-rodillo}$, y que la fuerza de rozamiento es equivalente a la fuerza de frenado F_f :

$$P = \frac{F_f}{\mu_{rueda-rodillo}}$$

La carga vertical provoca a su vez, que el rodillo friccione con el cojinete donde se apoya, con un coeficiente de rozamiento $\mu_{rodillo-cojinete}$, generando una fuerza de rozamiento igual a:

$$rozamiento = \mu_{rodillo-cojinete} \cdot P = \frac{\mu_{rodillo-cojinete} \cdot F_f}{\mu_{rueda-rodillo}}$$

Dado que el valor del coeficiente de rozamiento entre el rodillo y el cojinete varía entre 0,001 y 0,002 en función de la lubricación entre ambos elementos, se puede asociar dicha incertidumbre a una distribución rectangular en la que cualquier valor dentro de dicho intervalo es igual de probable, por tanto:

$$u_{rozamiento} = \frac{rozamiento}{2 \cdot \sqrt{3}}$$

Cálculo de la incertidumbre combinada

El valor de la incertidumbre combinada de datos no correlacionados se expresa como:

$$u = \sqrt{\sum u_i^2(y)}$$

Es decir:

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

$$u = \sqrt{u_{0F}^2 + u_{repetibilidad}^2 + u_{montaje}^2 + u_{resolución}^2 + u_{flexión}^2 + u_{acoplamiento}^2 + u_{rozamiento}^2}$$

Cálculo de incertidumbre expandida con factor de cobertura k=2

Considerando que todas las variables son independientes, se tiene la expresión:

$$U = k \cdot u(C_i) = k \cdot \sqrt{u_{0F}^2 + u_{repet}^2 + u_{montaje}^2 + u_{resol}^2 + u_{flexión}^2 + u_{acopl}^2 + u_{roz}^2}$$

No es recomendable desechar alguna de las fuentes de incertidumbre por la suposición de ser poco significativa con respecto a las demás, sin haber realizado una cuantificación previa de su contribución. Siempre es preferible obtener un exceso de fuentes, que ignorar alguna que pudiera resultar importante.

Sin embargo, siempre están presentes los efectos que proporcionan la experiencia, los conocimientos del metrologo, las características del equipo, etc.

Bajo estos criterios el resto de contribuciones a la incertidumbre (la temperatura, el empuje del aire, la presión, etc.) se consideran despreciables ya que son irrelevantes para el cálculo de incertidumbre.



ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

Magnitud de entrada X_i	F_{0j}	\bar{F}_j	$\delta_{montaje}$	$\delta_{resolución}$	$\delta_{flexión}$	$\delta_{acoplamiento}$	$\delta_{rozamiento}$
Incertidumbre típica x_i	u_{0F}	$u_{repetib}$	$u_{montaje}$	$u_{resolución}$	$u_{flexión}$	u_{acopl}	u_{roz}
Distribución de probabilidad	Normal	Normal	Rectang.	Rectangular	Rectang.	Rectangular	Rectang.
Contrib. a la incertidumbre $u_i(y)$	$u_{0F}^2 = \left(\frac{2dg}{D}\right)^2 \cdot u_m^2 + \left(\frac{2md}{D}\right)^2 \cdot u_g^2 + \left(\frac{2mg}{D}\right)^2 \cdot u_d^2 + \left(\frac{-2mgd}{D^2}\right)^2 \cdot u_b^2$	$u_{repetib} = \sqrt{\frac{S_F^2}{n_c}}$	$u_{montaje} = \frac{\delta_F}{\sqrt{12}}$	$u_{resolución} = \sqrt{2} \cdot \frac{resolución}{2\sqrt{3}}$	$u_{flexión} = 3 N$	$u_{acopl} = \frac{24}{2\sqrt{3}} \approx 7 N$	$u_{roz} = \frac{r_{0z}}{2 \cdot \sqrt{3}}$

Capítulo 6

Frenómetro universal

6.1 Utillaje utilizado

Los instrumentos utilizados para poder llevar a cabo la calibración del instrumento son:

- Barra de calibración de doble palanca. Un eje de rotación separa esta barra en dos partes. Una parte más corta que contiene una muesca para colocar un tirante y poder anclarlo al frenómetro, y una parte más larga sobre la que se apoyan las masas calibradas.
- Juego de masas patrón. Éstas contienen la geometría conveniente para poder ser apoyadas en la barra de calibración, y su valor nominal es de 5 kg, 15 kg, 30 kg y 45 kg.
- Calibre pie de rey. Con él se medirá el diámetro de los rodillos.
- Equipo de medida de condiciones ambientales (temperatura, humedad y presión).
- Inclinómetro digital. Se utiliza para medir la máxima flexión de la barra al colocar la masa en su extremo.
- Nivel

La geometría y disposición de los elementos en algunos frenómetros, impide el acceso a los rodillos con un pie de rey. En este caso, además de los instrumentos de medida mencionados, será necesario el uso de:

- Sonda de profundidad
- Circómetro (cinta de trazos flexible)

Los frenómetros universales tienen tres posiciones de funcionamiento. Pueden funcionar en posición de ligeros, en posición de pesados o en modo único.

Para el funcionamiento en posición de ligeros, en lugar de utilizar la barra de calibración de doble palanca, se utiliza una barra de calibración de palanca sencilla.

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

- Barra de calibración de palanca sencilla. Esta barra se acopla al frenómetro por uno de sus extremos mediante tornillos, y del otro extremo se apoyan una serie de masas calibradas. Las masas se sitúan sobre unas muescas situadas en la parte superior de la barra.

6.2 Condiciones ambientales

Los ensayos deben efectuarse en condiciones estables, por lo general a la temperatura, presión y humedad normales de la sala, salvo que se especifique de otra manera.

Como el proceso de calibración se realiza en la propia ITV, las condiciones ambientales presentes a la hora de utilizar el frenómetro, serán aproximadas a las encontradas a la hora de calibrarlo.

Se considera despreciable la influencia de dichas condiciones ambientales siempre y cuando se encuentren dentro de los siguientes rangos:

- Temperatura: entre 0 °C y 44 °C
- Presión atmosférica: entre 700 hPa y 1060 hPa
- Humedad: entre 0% y 90%

Si durante la calibración alguno de estos parámetros no cumple con las especificaciones, la calibración se pospondrá hasta que esté dentro de dichos rangos.

6.3 Procedimiento de medida

Durante el procedimiento de medida, lo que se busca es obtener el momento de accionamiento que se produce en el frenómetro, y compararlo con el momento de accionamiento que produce el sistema de calibración.

El frenómetro ofrece un momento (M_f) igual al producto de la fuerza de frenado del vehículo, por el radio del rodillo de arrastre.

$$M_f = F_f \cdot D/2$$



ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

Observando el montaje del sistema de calibración, y realizando equilibrio, se obtiene la siguiente expresión:

$$M_f = m \cdot g \cdot \frac{L_1}{L_2} \cdot L_3$$

Como ambos momentos han de ser iguales, se deduce que:

$$F_f = \frac{2 \cdot L_1 \cdot L_3 \cdot m \cdot g}{D \cdot L_2}$$

Siendo:

m = masa del patrón de referencia (calibrada externamente)

d = distancia del patrón de referencia (calibrada externamente)

D = diámetro del rodillo de arrastre

$g = 9,8 \text{ m/s}^2$ (valor de la gravedad)

L_1 = longitud de la parte larga de la barra

L_2 = longitud de la parte corta de la barra

L_3 = distancia entre rodillos (característica del equipo fijada por el fabricante)

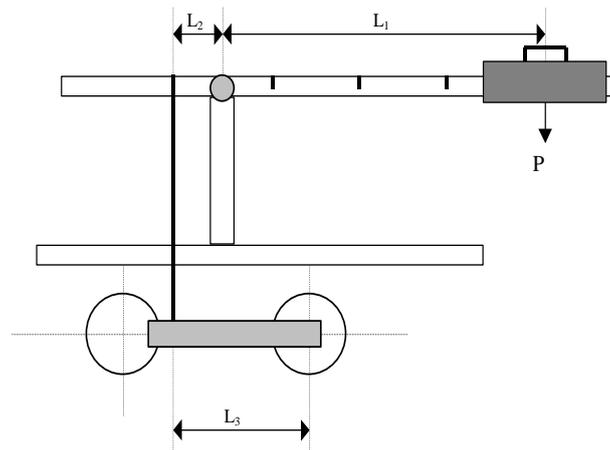


Figura 6.1. Esquema sistema de calibración de un frenómetro universal

6.4 Procedimiento de calibración

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

Del procedimiento de medida se saca como conclusión, que las magnitudes a calibrar son la fuerza de frenado, el diámetro de los rodillos, y las distancias L_1 y L_2 ya que el resto de parámetros que intervienen en el cálculo, son calibrados externamente antes de realizar dicha medida.

Para calibrar el diámetro de los rodillos, se utiliza un pie de rey. Se toman 5 medidas en tres puntos diferentes del rodillo (en ambos extremos y en el centro). Además, para considerar la posible falta de redondez del mismo, se irá girando el rodillo a medida que se toman las medidas.

En total se tomarán 15 medidas en cada rodillo.

Nota: en aquellos casos en los que sea imposible acceder a los rodillos con el pie de rey, se utilizará un circómetro. El circómetro es una cinta métrica flexible, que se coloca alrededor del rodillo y se ajusta a su superficie proporcionando la longitud de su perímetro.

Una vez calibrados los rodillos se procede a realizar el montaje del sistema para poder obtener la magnitud de la fuerza de frenado.

A continuación se acopla la barra de calibración al frenómetro y se nivela para conseguir que quede en posición horizontal. Para evitar que el peso de la barra contribuya en la toma de medidas, se coloca un contrapeso para contrarrestar dicha contribución.

6.5 Toma de medidas

El ensayo se ha de realizar en siete puntos. Tres en la posición de ligeros, y cuatro en la posición de pesados.

En cada punto se deben aplicar al menos cinco cargas de ensayo repartidas en el rango de medida uniformemente, incluyéndose el valor máximo y el mínimo. Todas las indicaciones obtenidas han de estar dentro de los errores máximos permitidos.

Se ha de repetir el proceso al menos 5 veces asegurándonos de que la diferencia entre los valores extremos de las 5 medidas debe ser menos o igual que la fuerza de frenada.



ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

La toma de medidas se realiza de forma ascendente la primera vez, y una vez alcanzado el máximo se procede a realizar la segunda toma de manera descendente, y así sucesivamente hasta completar las cinco pasadas.

Antes de comenzar cada pasada, se anota el valor del cero del equipo sin aplicar ninguna masa.

Cada medida se anota en una hoja de toma de datos, para poder realizar posteriormente el cálculo de incertidumbre del equipo.

A la hora de anotar las medidas, se ha de distinguir en dos casos. Si el frenómetro es analógico, el técnico juega un papel importante, ya que debe anotar el valor que considere que está más próximo a la aguja. Si el frenómetro es digital, la lectura a registrar será aquella que permanezca constante en la pantalla del equipo.

6.6 cálculo de incertidumbres

Lo primero que se ha de hacer antes de iniciar el montaje, es desconectar los motores de los rodillos para evitar cualquier tipo de contratiempo por una puesta en marcha en marcha accidental.

Antes del inicio de la verificación se revisará el correcto estado de conservación y mantenimiento del frenómetro. Los asientos de los cojinetes de los rodillos, el anclaje de los motores, la cadena de transmisión, y demás elementos del equipo, no deben presentar anomalías que puedan influir en los valores obtenidos.

Asimismo, se ha de comprobar que el utillaje utilizado para llevar a cabo la calibración, está limpio y no presentan desgastes ni deformaciones significativas que puedan influir en los resultados.

La expresión utilizada para corregir la contribución de las incertidumbres en un frenómetro de rodillos universal es la siguiente:

$$C_j = F_{0j} - \bar{F}_j + \delta_{montaje} + \delta_{resolución} + \delta_{flexión} + \delta_{rozamiento}$$

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

Donde:

C_j = corrección final de la calibración

F_{0j} = valor nominal del patrón

\bar{F}_j = valor de la lectura del frenómetro

$\delta_{montaje}$ = corrección debida a la falta de horizontalidad de la barra de calibración

$\delta_{resolución}$ = corrección debida a la resolución del frenómetro

$\delta_{flexión}$ = corrección debida a la flexión de la barra de calibración

$\delta_{rozamiento}$ = corrección debida al rozamiento del rodillo del frenómetro en sus apoyos.

Nota: el subíndice j indica un punto genérico de la calibración.

Una vez identificadas las diferentes fuentes de incertidumbre, se procede a cuantificar la variabilidad de cada fuente.

Componentes de la incertidumbre:

- Incertidumbre asociada al patrón, u_{0F} (TIPO B):

Siendo $F_f = \frac{2 \cdot L_1 \cdot L_3 \cdot m \cdot g}{D \cdot L_2}$ la fuerza de frenado, su incertidumbre puede calcularse como:

(fórmula general del cálculo de propagación de incertidumbres)

$$u_{0F}^2 = \left(\frac{\delta F}{\delta m}\right)^2 \cdot u_m^2 + \left(\frac{\delta F}{\delta g}\right)^2 \cdot u_g^2 + \left[\left(\frac{\delta F}{\delta L_1}\right) \cdot u_{L_1}^2 + \left(\frac{\delta F}{\delta L_2}\right) \cdot u_{L_2}^2\right]^2 + \left(\frac{\delta F}{\delta L_3}\right)^2 \cdot u_{L_3}^2 + \left(\frac{\delta F}{\delta D}\right)^2 \cdot u_D^2$$

Siendo:

u_m = incertidumbre típica de la masa patrón

u_g = incertidumbre típica de la gravedad

u_{L_1} = incertidumbre típica de la longitud L1

u_{L_2} = incertidumbre típica de la longitud L2

u_{L_3} = incertidumbre típica de la longitud L3

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

u_D = incertidumbre típica del diámetro del rodillo de arrastre

Por tanto, para poder conocer la incertidumbre del patrón, se han de calcular primero las incertidumbres típicas asociadas a esta magnitud.

Nota: se ha de tener en cuenta que las distancias L1 y L2 están correlacionadas ya que han sido medidas con el mismo patrón.

a) Incertidumbre típica de la masa patrón

El peso de la masa patrón es un dato calibrado externamente (no se calibra durante el ensayo), por tanto su incertidumbre viene dada por conocimientos generales externos al mismo.

Dado que existe mayor probabilidad de obtener valores próximos al dato registrado, la distribución que sigue este parámetro será una distribución normal.

$$u_m^2 = u_{m0}^2 + u_{m,deriva}^2$$

Donde:

u_{m0} = incertidumbre debida a la trazabilidad del patrón

$$u_{m0} = \frac{U_m}{k}$$

Siendo U_m el valor de la incertidumbre expandida de la masa patrón con $k=2$

$u_{m,deriva}$ = incertidumbre debida a la deriva temporal del patrón

$$u_{m,deriva} = \frac{u_m}{\sqrt{3}}$$

Nota: esta expresión se utiliza únicamente cuando no se dispone de datos experimentales. Una vez se realicen varios ensayos y se disponga de un histórico de calibraciones, la expresión a utilizar será:

$$u_{m,deriva} = \frac{\delta u_m}{\sqrt{3}}$$

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

Siendo δu_m la diferencia entre incertidumbres de las dos últimas calibraciones.

b) Incertidumbre típica de la gravedad

El valor de la gravedad terrestre en España está acotado entre un máximo y un mínimo registrados por el Centro Nacional de Información Geográfica.

Dado que todos los valores recogidos entre el máximo y el mínimo tienen la misma probabilidad, la distribución seguida será una distribución rectangular

La incertidumbre asociada a este parámetro se calcula como:

$$u_g = \frac{g_{\text{máx}} - g_{\text{mín}}}{\sqrt{12}}$$

c) Incertidumbre típica de la longitud L1

Esta longitud es un parámetro calibrado externamente al ensayo que sigue una distribución normal, por tanto se calcula como:

$$u_{L1}^2 = u_{L01}^2 + u_{L1,deriva}^2$$

Donde:

u_{L01} = incertidumbre debida a la trazabilidad del patrón

$$u_{L01} = \frac{U_{L1}}{k}$$

Siendo U_{L1} el valor de la incertidumbre expandida de la longitud de la barra patrón con $k=2$

$u_{L1,deriva}$ = incertidumbre debida a la deriva temporal del patrón

$$u_{L1,deriva} = \frac{u_{L1}}{\sqrt{3}}$$

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

Nota: esta expresión se utiliza únicamente cuando no se dispone de datos experimentales. Una vez se realicen varios ensayos y se disponga de un histórico de calibraciones, la expresión a utilizar será:

$$u_{L1,deriva} = \frac{\delta u_{L1}}{\sqrt{3}}$$

Siendo δu_{L1} la diferencia entre incertidumbres de las dos últimas calibraciones.

d) Incertidumbre típica de la longitud L2

Esta longitud es un parámetro calibrado externamente al ensayo que sigue una distribución normal, por tanto se calcula como:

$$u_{L2}^2 = u_{L02}^2 + u_{L2,deriva}^2$$

Donde:

u_{L02} = incertidumbre debida a la trazabilidad del patrón

$$u_{L02} = \frac{U_{L2}}{k}$$

Siendo U_{L2} el valor de la incertidumbre expandida de la longitud de la barra patrón con $k=2$

$u_{L2,deriva}$ = incertidumbre debida a la deriva temporal del patrón

$$u_{L2,deriva} = \frac{u_{L2}}{\sqrt{3}}$$

Nota: esta expresión se utiliza únicamente cuando no se dispone de datos experimentales. Una vez se realicen varios ensayos y se disponga de un histórico de calibraciones, la expresión a utilizar será:

$$u_{L2,deriva} = \frac{\delta u_{L2}}{\sqrt{3}}$$

Siendo δu_{L2} la diferencia entre incertidumbres de las dos últimas calibraciones.

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

e) Incertidumbre típica de la longitud L_3

Esta longitud es un dato proporcionado por el fabricante. Por tanto puede asociarse a una distribución rectangular acotada por los valores máximo y mínimo. En este caso el valor mínimo del intervalo coincide con el cero, de manera que la expresión de la incertidumbre es:

$$u_{L3} = \frac{lmáx}{2\sqrt{3}}$$

f) Incertidumbre típica del diámetro del rodillo de arrastre

El diámetro de los rodillos es un dato medido durante el ensayo. Para tener en cuenta la posible falta de redondez del rodillo, se realizan varias mediciones del diámetro. (Incertidumbre TIPOA. Obtención por el método general)

El valor medio del diámetro del rodillo se calcula como:

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^{n_c} D_i}{n_c}$$

Y su desviación típica:

$$S_D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_c} (D_i - \bar{D})^2}{n_c - 1}}$$

El valor de la incertidumbre típica del rodillo es:

$$u_D = \sqrt{u_0^2 + \frac{S_D^2}{n_c}}$$

Siendo u_0 la incertidumbre típica del instrumento patrón con el que se mide el rodillo (pie de rey) dividida por el factor $k=2$. ($u_0 = \frac{U}{k}$)

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

Nota: en ocasiones debido al montaje del frenómetro, es imposible acceder a los rodillos con un calibre pie de rey para realizar las mediciones del diámetro. En estos casos se mide el perímetro del mismo con una cinta métrica.

$$D = \frac{\text{perímetro}}{\pi}$$

En este caso la incertidumbre se calcula como:

$$u_0 = \frac{u_{\text{perím}}}{\pi}$$

Donde $u_{\text{perím}}$ es la incertidumbre del instrumento patrón (cinta métrica)

➤ Incertidumbre asociada a la repetibilidad de las medidas, u_{repetib} (TIPO A)

Para obtener un resultado fiable, se ha de realizar el ensayo repetidas veces, lo que conlleva la obtención de varios valores de la fuerza de frenado. Para realizar el cálculo de su incertidumbre, se aplica el método general:

Valor medio de la fuerza de frenado:

$$\bar{F}_j = \frac{\sum_{i=1}^{n_c} F_{ji}}{n_c}$$

Desviación típica:

$$S_F = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_c} (F_{ji} - \bar{F}_j)^2}{n_c - 1}}$$

Por tanto, la incertidumbre típica de la fuerza es:

$$u_{\text{repetibilidad}} = \sqrt{\frac{S_F^2}{n_c}}$$

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

➤ Incertidumbre asociada al montaje, $u_{montaje}$ (TIPO B)

Debido a la posible falta de verticalidad del tirante que une L1 y L2 con L3, y a su vez, a la posible falta de horizontalidad de L3, aparece una incertidumbre de montaje.

Dado que la barra de calibración L3 está anclada al frenómetro mediante unos taladros, es posible que éstos no estén alineados y que durante el montaje la barra no quede en posición completamente horizontal.

También contribuye a dicha falta de horizontalidad la colocación del tirante.

Para calcular esta incertidumbre, se considera el caso más desfavorable posible, es decir, cuando la inclinación del tirante sea máxima (forme un ángulo θ con la vertical), y por tanto la barra de longitud L3 también esté inclinada con respecto a la horizontal el mismo ángulo θ .

Para estas condiciones se obtiene una variación de longitud que conlleva a una variación de la fuerza:

$$\delta_L = \frac{L_1}{L_2 \cdot \cos\theta} \cdot \frac{L_3}{\cos\theta}$$

$$\delta_{fuerza} = \frac{2 \cdot m \cdot g \cdot \delta_L}{D}$$

Considerando que la fuerza sólo puede variar entre cero y este valor, la incertidumbre se asocia a una distribución rectangular de expresión:

$$u_{montaje} = \frac{\delta_F}{\sqrt{12}}$$

➤ Incertidumbre asociada a la resolución, $u_{resolución}$ (TIPO B)

Esta incertidumbre se asocia a una distribución rectangular con una resolución expresada como división de escala.

$$u_{resolución} = \sqrt{2} \cdot \frac{resolución}{2\sqrt{3}}$$

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

- Incertidumbre asociada a la flexión de la barra de calibración $u_{flexión}$

La expresión utilizada para realizar el cálculo teórico de la fuerza de frenado, no considera la flexión que sufre la barra en el ensayo real. Esto genera una diferencia en el valor obtenido de manera teórica y de manera experimental.

Para corregir la contribución de este fenómeno, se calcula la incertidumbre de flexión, que se puede expresar como:

$$u_{flexión} = \frac{F_{teórica} - F_{experimental}}{\sqrt{3}}$$

Siendo la fuerza experimental:

$$F_{experimental} = \frac{2m \cdot g}{D} \cdot \frac{L_1}{L_2} \cdot L_3$$

- Incertidumbre asociada al rozamiento $u_{rozamiento}$

Esta incertidumbre es debida al rozamiento que se produce entre la superficie del rodillo y los apoyos, así como el rozamiento que se produce entre el rodillo y la rueda del vehículo.

Al apoyarse el vehículo sobre el rodillo, se genera una carga vertical P que provoca el rozamiento entre rueda y rodillo. Suponiendo un coeficiente de rozamiento $\mu_{rueda-rodillo}$, y que la fuerza de rozamiento es equivalente a la fuerza de frenado F_f :

$$P = \frac{F_f}{\mu_{rueda-rodillo}}$$

La carga vertical provoca a su vez, que el rodillo friccion con el cojinete donde se apoya, con un coeficiente de rozamiento $\mu_{rodillo-cojinete}$, generando una fuerza de rozamiento igual a:

$$rozamiento = \mu_{rodillo-cojinete} \cdot P = \frac{\mu_{rodillo-cojinete} \cdot F_f}{\mu_{rueda-rodillo}}$$

Dado que el valor del coeficiente de rozamiento entre el rodillo y el cojinete varía entre 0,001 y 0,002 en función de la lubricación entre ambos elementos, se puede asociar

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

dicha incertidumbre a una distribución rectangular en la que cualquier valor dentro de dicho intervalo es igual de probable, por tanto:

$$u_{rozamiento} = \frac{\text{rozamiento}}{2 \cdot \sqrt{3}}$$

Cálculo de la incertidumbre combinada

El valor de la incertidumbre combinada de datos no correlacionados se expresa como:

$$u = \sqrt{\sum u_i^2(y)}$$

Es decir:

$$u = \sqrt{u_{0F}^2 + u_{repetibilidad}^2 + u_{montaje}^2 + u_{resolución}^2 + u_{flexión}^2 + u_{rozamiento}^2}$$

Cálculo de incertidumbre expandida con factor de cobertura k=2

Considerando que todas las variables son independientes, se tiene la expresión:

$$U = k \cdot u(C_i) = k \cdot \sqrt{u_{0F}^2 + u_{repet}^2 + u_{montaje}^2 + u_{resol}^2 + u_{flexión}^2 + u_{roz}^2}$$

No es recomendable desechar alguna de las fuentes de incertidumbre por la suposición de ser poco significativa con respecto a las demás, sin haber realizado una cuantificación previa de su contribución. Siempre es preferible obtener un exceso de fuentes, que ignorar alguna que pudiera resultar importante.

Sin embargo, siempre están presentes los efectos que proporcionan la experiencia, los conocimientos del metrologo, las características del equipo, etc.

Bajo estos criterios el resto de contribuciones a la incertidumbre (la temperatura, el empuje del aire, la presión, etc.) se consideran despreciables ya que son irrelevantes para el cálculo de incertidumbre.



ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

Magnitud de entrada X_i	F_{0j}	\bar{F}_j	$\delta_{montaje}$	$\delta_{resolución}$	$\delta_{flexión}$	$\delta_{rozamiento}$
Incertidumbre típica x_i	u_{0F}	$u_{repetib}$	$u_{montaje}$	$u_{resolución}$	$u_{flexión}$	u_{roz}
Distribución de probabilidad	Normal	Normal	Rectang.	Rectangular	Rectangular	Rectang.
Contrib. a la incertidumbre $u_i(Y)$	$u_{0F}^2 = \left(\frac{2g_{L_1}L_3}{DL_2}\right)^2 \cdot u_m^2 + \left(\frac{2m_{L_1}L_3}{DL_2}\right)^2 \cdot u_g^2$ $+ \left(\frac{2mg_{L_3}}{DL_2}\right)^2 \cdot u_{L_1}^2 + \left(-\frac{2mg_{L_1}L_3}{DL_2^2}\right)^2 \cdot u_{L_2}^2 + \left(\frac{2mg_{L_1}}{DL_2}\right)^2 \cdot u_{L_3}^2 + \left(-\frac{2mg_{L_1}L_3}{D^2L_2}\right)^2 \cdot u_D^2$	$u_{repetib} = \sqrt{\frac{S_F^2}{n_c}}$	$u_{montaje} = \frac{\delta_F}{\sqrt{12}}$	$u_{resolución} = \frac{\sqrt{2}}{2\sqrt{3}} \cdot \frac{resolución}{2\sqrt{3}}$	$u_{flexión} = \frac{F_{te} - F_{exp}}{\sqrt{3}}$	$u_{roz} = \frac{r_{0Z}}{2 \cdot \sqrt{3}}$

Capítulo 7

Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad permite determinar qué parámetros pueden ser modificados, y cuánto pueden variar, para que la solución siga siendo óptima. Es decir, realiza un estudio de los parámetros que influyen significativamente, y de los que son debidos al azar.

Para realizar este análisis, existen diferentes métodos que se pueden clasificar en métodos matemáticos, estadísticos y gráficos. Generalmente, el método gráfico se utiliza para complementar cualquiera de los otros dos métodos, y así dar una solución más clara y completa.

En este proyecto se ha optado por realizar un análisis estadístico para ver qué parámetros son los más influyentes a la hora de calibrar el frenómetro, y cuales se podrían despreciar debido a su irrelevancia.

Dentro del campo estadístico, existen diversos métodos con los que realizar el análisis. El más conocido es el método Monte Carlo. Este método se utiliza como referencia en las técnicas de análisis estadístico ya que a pesar de ser el más fiable, los tiempos de cálculo son muy elevados lo que supone además un gran coste.

Otras técnicas utilizadas son las aproximaciones de Taylor, el método de Taguchi, o el método ANOVA (análisis de la varianza)

Se ha decidido centrar el estudio en el método de análisis de la varianza ya que es el más extendido y utilizado por los programas estadísticos (como el Statgraphics).

Pero antes de comenzar con el método ANOVA, se realizará una breve descripción del Método Taguchi, ya que supuso una revolución de los sistemas de calidad tradicionales.

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

7.1 Método Taguchi

Taguchi fue un ingeniero y estadístico japonés de la década de los 50 que desarrolló una metodología para mejorar la calidad de los productos manufacturados.

Este método se ayuda de técnicas estadísticas para realizar experimentos que determinen las mejores combinaciones de variables para fabricar un producto.

Es frecuente a la hora de diseñar un producto que se tengan múltiples **variables (FACTORES)** que deban ser tenidas en cuenta. Además, cada uno de estos factores puede tomar distintos **valores (NIVELES)** y es necesario elegir la combinación más adecuada que de la solución óptima. Sin embargo, cuando el número de factores y niveles es elevado, las combinaciones posibles son muchas, y el número de experimentos a realizar sería muy grande.

El método que propone Taguchi se basa en la utilización de matrices ortogonales. Estas matrices indican qué y cuántos experimentos deben realizarse para un número de factores y de niveles determinado.

No obstante, este análisis resulta ingenuo, siendo lo más razonable aplicar tests estadísticos que permitan saber si las diferencias obtenidas son significativas o debidas al azar. Por ello, se completa utilizando el test de análisis de la varianza (ANOVA).

- Características de la metodología de Taguchi:

Supone que los usuarios de estos métodos poseen cierto entendimiento del proceso estudiado.

Fue inventado por ingenieros y para ingenieros

Algunas variables están bajo control, y otras no (factores de ruido). Uno de los primeros pasos es la identificación de los factores controlables y de ruido más significativos.

Debe establecerse un ratio señal-ruido para representar la robustez (aunque bastaría con un análisis de la varianza)

En contraste con el diseño de experimentos clásico, Taguchi sugiere una ronda final de experimentos de confirmación.



ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

Mientras que el diseño de experimentos clásico puede ignorar o no considerar explícitamente los factores de ruido, Taguchi los usa para contrastar la robustez del sistema así como para encontrar las entradas óptimas.

- Robustez de las hipótesis del modelo. Diseño robusto

Es conveniente estudiar si las hipótesis básicas del modelo son razonables, y ver hasta qué punto los resultados obtenidos son válidos si no se cumple alguna de ellas.

Hipótesis:

- 1) Distribución normal $N(\mu, \sigma)$

La falta de normalidad en los residuos tiene poca influencia en los resultados, ya que por el teorema central del límite, la distribución de las medias muestrales de los distintos niveles se aproxima a la normal. Por tanto, el método es robusto frente a cambios en la hipótesis de normalidad.

Nota: el teorema central del límite (TCL) dice que si la muestra es grande, se puede aproximar a una distribución normal con:

$$X \sim N\left(\sum \mu_i, \sqrt{\sum \sigma_i^2}\right)$$

- 2) Igualdad de varianzas

Si no se cumple la hipótesis de igualdad de varianzas, los resultados se modifican significativamente en el caso de que los tamaños de las muestras de los distintos niveles sean muy diferentes, y de que las diferencias entre varianzas sean muy acusadas. Por tanto, el método es robusto frente a cambios en la hipótesis de igualdad de varianzas, siempre que los tamaños muestrales sean similares.

- 3) Observaciones independientes



ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

Los resultados que se obtienen al realizar el análisis de sensibilidad, son más exactos cuando se aplica a un modelo lineal. En estos casos es posible clasificar la importancia relativa de cada entrada, en función de la sensibilidad de la magnitud de salida.

Sin embargo, para un modelo no lineal, la sensibilidad de la salida debido a una entrada dada, puede depender de interacciones con otras entradas que no se están considerando, y por tanto los resultados obtenidos pueden ser potencialmente engañosos para modelos no lineales.

Como se ha visto, el efecto de dependencia de las observaciones puede ser muy importante, por lo que el método no es robusto frente a cambios en la hipótesis de independencia. La posible dependencia se puede evitar asignando aleatoriamente los elementos muestrales a los distintos niveles, ya que de esta forma se consigue el objetivo de distribuir uniformemente (entre los niveles del factor) los riesgos provocados por la heterogeneidad de las unidades experimentales.



ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

7.2 Método clásico de análisis de la varianza (ANOVA)

Este método se basa observar cómo afecta la influencia de varios factores en una variable respuesta.

A grandes rasgos, consiste en contrastar dos hipótesis contrapuestas:

H_0 : todas las medias son iguales

H_1 : no todas las medias son iguales

Comparando las medias de cada factor, se puede decidir si estos son significativos o no.

- Requisitos para la aplicación del método:
 - Los datos correspondientes a cada tratamiento han de ser independientes
 - Las poblaciones han de seguir una distribución normal
 - La varianza de todas las poblaciones ha de ser la misma

Es decir, poblaciones iguales en todo, salvo (quizás) en su media.

- Notación:
 - Factores: cada una de las variables que afectan al parámetro de salida. En este caso, los factores son las expresiones de las incertidumbres, y el parámetro de salida, el valor de la fuerza de frenado que proporciona el frenómetro.

FACTORES	u_{0F}	$u_{\text{repetibilidad}}$	u_{montaje}	$u_{\text{rozamiento}}$...
-----------------	----------	----------------------------	----------------------	-------------------------	-----

- Niveles: cada uno de los valores que proporciona el parámetro de salida para cada uno de los factores.

FACTORES	u_{0F}	$u_{\text{repetibilidad}}$	u_{montaje}	$u_{\text{rozamiento}}$...
NIVELES	350				
	330				
	290				
	

- K: número de factores o tratamientos. En la tabla utilizada como ejemplo, K tomaría el valor 4



ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

- t : subíndice utilizado para denotar un factor genérico. Por ejemplo, el factor $U_{\text{repetibilidad}}$ tomaría el valor $t=2$
- cada factor o tratamiento tiene n_t observaciones.
- A la media general de todos los datos de le denomina \bar{y} .

7.2.1 Análisis de sensibilidad de las expresiones del cálculo de la incertidumbre

En este apartado, lo que se desea conocer es cuál o cuáles de las incertidumbres asociadas a la obtención de la fuerza de frenado, es la más relevante, y si alguna de ellas puede ser despreciada.

Para aplicar el método ANOVA se han utilizado los resultados de diferentes frenómetros (tanto para vehículos ligeros, como universales). A continuación se expone como han de tratarse los datos para conseguir obtener una buena conclusión de éstos.

El estudio se ha realizado en 4 frenómetros diferentes (dos para vehículos ligeros, y dos universales). Éstos serán denominados Frenómetro1 y Frenómetro2 (en el estudio de vehículos ligeros) y Frenómetro3 y Frenómetro4 (en el estudio de frenómetros universales).

La variable de salida en todos los casos es la fuerza de frenado. Se recuerda, que lo que se busca es averiguar qué parámetros influyen significativamente en la variable respuesta.

Los parámetros a estudiar son las incertidumbres asociadas a la fuerza de frenado. Estos parámetros se denominan factores. Éstos son:

Factor 1: incertidumbre asociada a la resolución del frenómetro ($U_{\text{resolución}}$)

Factor 2: incertidumbre asociada a la flexión de la barra de calibración ($U_{\text{flexión}}$)

Factor 3: incertidumbre asociada a las holguras que existen en el acoplamiento, y a la falta de axialidad entre centros barra-taladros ($U_{\text{acoplamiento}}$)

Factor 4: incertidumbre asociada a la falta de horizontalidad de la barra de calibración (U_{montaje})

Factor 5: incertidumbre asociada a la falta de repetibilidad en diferentes ensayos ($U_{\text{repetibilidad}}$)



ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

Factor 6: incertidumbre asociada al rozamiento del rodillo del frenómetro en sus apoyos. Urozamiento

Nota: En el estudio de frenómetros universales, hay un factor menos, ya que en estos no se contempla la incertidumbre debida a al acoplamiento.

Cada uno de los valores que toman los factores, se denomina nivel. En este caso, cada frenómetro se ensaya 10 veces. Por tanto, existen 10 niveles para cada factor.

Para poder llevar a cabo el método, se han de cumplir las siguientes condiciones:

- Los datos correspondientes a cada tratamiento han de ser independientes

Esta premisa se cumple, ya que las variables Frenómetro1 y Frenómetro2, corresponden a 2 ensayos diferentes, realizados en frenómetros diferentes. Por tanto, no existe dependencia entre ellas (lo mismo para frenómetro universal).

- Las poblaciones han de seguir una distribución normal

Para comprobar la normalidad de las variables, se realizará un contraste de hipótesis:

H0: el Factor(i) sigue una distribución normal

H1: el Factor(i) no sigue una distribución normal

Realmente, la comprobación de normalidad, no es algo necesario ya que por el Teorema Central del Límite, se comprueba que si la muestra es grande ($N \geq 10$), puede aproximarse a una distribución normal.

- La varianza de todas las poblaciones ha de ser la misma

A priori no puede conocerse si todos los factores van a cumplir esta hipótesis. Lo que sí se sabe, es que un único factor tiene la misma varianza para todos los ensayos. Es decir, el Factor1, tiene la misma varianza para el Frenómetro1 y Frenómetro2, y así con cada uno de los factores. Por tanto, el método ANOVA se aplicará factor a factor, para asegurar que cumple todas las hipótesis.



ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

El contraste de hipótesis a utilizar para la comprobación de homogeneidad de varianza es.

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$$

$$H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$$

En principio, lo que se debería obtener al realizar los contrastes de normalidad y homogeneidad, es que en ambos casos se acepta la hipótesis nula, y se obtiene que las muestras son normales y de igual varianza.

Una vez llegados a este punto, se realiza un contraste bilateral de medias. Este es el punto clave del desarrollo del método. El contraste a aplicar es:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$$

Ahora bien, si se rechaza la hipótesis nula (se acepta la hipótesis alternativa), significa que existen diferencias significativas entre los distintos ensayos, es decir, la variable que se está estudiando influye significativamente en los resultados obtenidos.

Si por el contrario se acepta H_0 , no existen diferencias significativas entre los dos ensayos, es decir, la incertidumbre en cuestión no influye de manera significativa en la fuerza de frenado.

El intervalo de confianza se ha de realizar bajo un nivel de confianza dado. Como para el cálculo de la incertidumbre combinada se ha tomado como coeficiente $k=2$ (que corresponde a un 95% de confianza), aquí se tomará un nivel de significación $\alpha=0,05$ (que también corresponde a un nivel del 95%)

Para realizar el contraste, primero se ha de conocer las zonas de aceptación y rechazo. Para ello, se hace uso de las graficas de la distribución normal.

Nota: es importante saber que cuando se habla de aceptación y rechazo, siempre está referido a la hipótesis nula (aceptación de la hipótesis nula, o rechazo de la hipótesis nula).



ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

Se trata de un contraste bilateral, cuyo intervalo de aceptación y rechazo se representa como:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$$

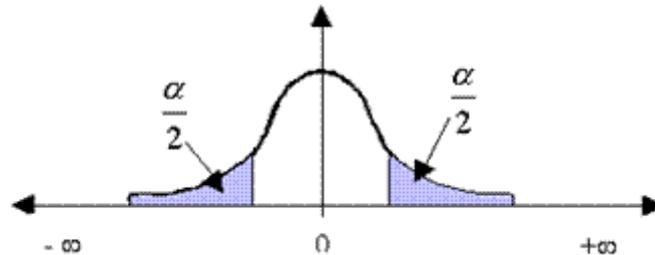


Figura 7.1. Intervalos de aceptación y rechazo del contraste

Siendo las regiones sombreadas, las regiones de rechazo, y la región sin sombrear, la zona de aceptación.

Para saber en qué zona se encuentra el estadístico del contraste, primero se calculan las abscisas de la distribución, y a continuación se calcula el estadístico de la muestra y se comparan.

El nivel de significación α indica la probabilidad de que el intervalo contenga el parámetro a estudiar (el estadístico de la muestra).

La probabilidad de encontrarnos dentro de la distribución es del 100% (suma de las regiones sombreadas y sin sombrear). En este caso, el nivel de confianza ($1 - \alpha$) es del 95%, $\alpha = 0,05$, y $\alpha/2 = 0,025$.

El estadístico que corresponde a este valor se denomina $z_{0,025}$, y se obtiene a partir de la siguiente tabla:

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

z	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	0,5000	0,5040	0,5080	0,5120	0,5160	0,5199	0,5239	0,5279	0,5319	0,5359
0,1	0,5398	0,5438	0,5478	0,5517	0,5557	0,5596	0,5636	0,5675	0,5714	0,5753
0,2	0,5793	0,5832	0,5871	0,5910	0,5948	0,5987	0,6026	0,6064	0,6103	0,6141
0,3	0,6179	0,6217	0,6255	0,6293	0,6331	0,6368	0,6406	0,6443	0,6480	0,6517
0,4	0,6554	0,6591	0,6628	0,6664	0,6700	0,6736	0,6772	0,6808	0,6844	0,6879
0,5	0,6915	0,6950	0,6985	0,7019	0,7054	0,7088	0,7123	0,7157	0,7190	0,7224
0,6	0,7257	0,7291	0,7324	0,7357	0,7389	0,7422	0,7454	0,7486	0,7517	0,7549
0,7	0,7580	0,7611	0,7642	0,7673	0,7703	0,7734	0,7764	0,7794	0,7823	0,7852
0,8	0,7881	0,7910	0,7939	0,7967	0,7995	0,8023	0,8051	0,8078	0,8106	0,8133
0,9	0,8159	0,8186	0,8212	0,8238	0,8264	0,8289	0,8315	0,8340	0,8365	0,8389
1,0	0,8413	0,8438	0,8461	0,8485	0,8508	0,8531	0,8554	0,8577	0,8599	0,8621
1,1	0,8643	0,8665	0,8686	0,8708	0,8729	0,8749	0,8770	0,8790	0,8810	0,8830
1,2	0,8849	0,8869	0,8888	0,8907	0,8925	0,8944	0,8962	0,8980	0,8997	0,9015
1,3	0,9032	0,9049	0,9066	0,9082	0,9099	0,9115	0,9131	0,9147	0,9162	0,9177
1,4	0,9192	0,9207	0,9222	0,9236	0,9251	0,9265	0,9279	0,9292	0,9306	0,9319
1,5	0,9332	0,9345	0,9357	0,9370	0,9382	0,9394	0,9406	0,9418	0,9429	0,9441
1,6	0,9452	0,9463	0,9474	0,9484	0,9495	0,9505	0,9515	0,9525	0,9535	0,9545
1,7	0,9554	0,9561	0,9573	0,9582	0,9591	0,9599	0,9608	0,9616	0,9625	0,9633
1,8	0,9641	0,9649	0,9656	0,9664	0,9671	0,9678	0,9686	0,9693	0,9699	0,9706
1,9	0,9713	0,9719	0,9726	0,9732	0,9738	0,9744	0,9750	0,9756	0,9761	0,9767
2,0	0,9772	0,9778	0,9783	0,9788	0,9793	0,9798	0,9803	0,9808	0,9812	0,9817
2,1	0,9821	0,9826	0,9830	0,9834	0,9838	0,9842	0,9846	0,9850	0,9854	0,9857
2,2	0,9861	0,9864	0,9868	0,9871	0,9875	0,9878	0,9881	0,9884	0,9887	0,9890
2,3	0,9893	0,9896	0,9898	0,9901	0,9901	0,9906	0,9909	0,9911	0,9913	0,9916

Las abscisas correspondientes a un nivel de confianza del 95%, son $\pm 1,96$.

Por tanto, la zona de aceptación abarca todos los valores comprendidos entre -1,96 y +1,96. Cualquier valor del estadístico que este fuera de esos límites, indicará que se rechaza la hipótesis nula, es decir, las medias son distintas.

Una vez que se han acotado todas las zonas, se procede a calcular el estadístico de la muestra.

$$Z = \frac{(\bar{x} - \bar{y}) - (\bar{\mu}_1 - \bar{\mu}_2)}{\hat{S}_t \cdot \sqrt{\frac{1}{n_1} - \frac{1}{n_2}}} \sim N(0,1)$$

Este valor se calculará para cada par de incertidumbres, y se comparará con el intervalo de aceptación y rechazo calculado anteriormente.

A continuación se adjuntan los ensayos obtenidos en cada uno de los 4 frenómetros, con todos los parámetros necesarios, para su estudio:



ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

Nota1: El valor de la fuerza de frenado teórica presente en los 4 ensayos que se detallan a continuación, está calculado para las mismas condiciones de masa y distancia patrón para cada pareja de frenómetros. También se ha medido en el mismo rodillo (rodillo izquierdo) en los cuatro frenómetros.



ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

- Frenómetro 1:

Fuerza de frenado teórica = 193 N

Fuerza de frenado experimental = 200 N

Uresolución = 4,1

Uflexión = 3

Uacoplamiento = 7

Umontaje = 2,13

Urepetibilidad = 0

Urozamiento = 0,07

El valor total de la incertidumbre es 16,3 N

La fuerza de frenado se expresa como: $193 \pm 16,3$ N

Como se puede observar, los datos que proporciona el documento son las incertidumbres asociadas a las diferentes fuentes de error. Lo que se ha hecho, es generar una variable aleatoria para cada incertidumbre de valor nominal la fuerza de frenado teórica, \pm el error.

Es decir, en el caso de la incertidumbre debida a la flexión, la variable generada tomará valores comprendidos entre $193-3= 190$ N, y $193+3= 196$ N (y así para todas las incertidumbres).

También se observa, que la incertidumbre Urepetibilidad es 0. Por lo tanto, no procede incluirla en el estudio ya que su varianza es 0. Es decir, no genera error significativo.

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

	Uresolución	Uflexión	Umontaje	Uacoplamiento	Urozamiento
	190,8	194,23	190,48	192,51	192,94
	193,4	195,20	194,88	194,37	192,99
	189,8	192,71	197,46	194,64	193,02
	197,1	191,71	187,54	192,66	192,95
	191,1	195,31	197,92	194,39	193,03
	191,6	191,18	196,75	193,08	193,00
	189,0	192,85	192,84	194,26	193,04
	195,4	194,87	191,41	193,45	192,98
	196,5	190,31	190,45	191,39	193,04
	189,1	191,62	198,96	193,77	192,98
MEDIA	192,38	192,999	193,869	193,452	192,996459
VARIANZA	9,222	3,268	14,987	1,088	0,001

Nota: los otros tres ensayos siguen el mismo procedimiento

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

- Frenómetro 2:

Fuerza de frenado teórica = 188 N

Fuerza de frenado experimental = 186 N

Uresolución = 4,1

Uflexión = 3

Uacoplamiento = 7

Umontaje = 2,07

Urozamiento = 0,07

La incertidumbre total es 16,24

La fuerza de frenado se expresa como $188 \pm 16,24$ N

	Uresolución	Uflexión	Umontaje	Uacoplamiento	Urozamiento
	187,26	185,31	186,55	183,34	188,01
	188,00	186,61	187,33	193,47	188,02
	188,36	186,59	187,25	191,50	187,95
	186,52	186,52	187,16	182,83	188,01
	186,36	187,59	187,58	184,57	188,03
	191,52	190,38	188,00	188,04	188,01
	190,11	186,79	186,68	194,86	188,03
	191,13	188,89	187,20	191,41	187,94
	190,99	188,48	186,01	190,62	188,01
	189,22	188,06	188,74	191,72	187,94
MEDIA	188,947	187,522	187,249	189,237	187,995
VARIANZA	3,735	2,155	0,584	18,504	0,001

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

- Frenómetro 3:

Fuerza de frenado teórica = 185 N

Fuerza de frenado experimental = 200 N

Uresolución = 4,1

Uflexión = 0,53

Umontaje = 0,13

Urepetibilidad = 0

Urozamiento = 0,07

La incertidumbre total es 4,83

La fuerza de frenado se expresa como $185 \pm 4,83$ N

	Uresolución	Uflexión	Umontaje	Urozamiento
	188,30	185,11	185,08	185,02
	186,11	184,65	184,87	185,05
	182,76	184,52	185,03	185,06
	186,79	185,35	184,92	184,98
	187,24	185,10	185,00	185,05
	188,91	184,48	184,88	184,94
	184,42	185,41	184,87	184,98
	182,40	185,22	185,02	184,99
	183,53	184,52	184,98	185,06
	181,15	185,20	185,02	184,96
MEDIA	185,159	184,955	184,967	185,008
VARIANZA	7,161	0,138	0,006	0,002



ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

- Frenómetro 4:

Fuerza de frenado teórica = 184 N

Fuerza de frenado experimental = 194 N

Uresolución = 4,1

Uflexión = 0,53

Umontaje = 0,13

Urepetibilidad = 0

Urozamiento = 0,07

La incertidumbre total es 4,83

La fuerza de frenado se expresa como $184 \pm 4,83$ N

	Uresolución	Uflexión	Umontaje	Urozamiento
	186,24	184,01	183,88	184,03
	185,87	183,87	184,11	184,05
	186,92	183,94	183,95	183,94
	184,31	183,61	183,89	183,95
	184,03	184,02	183,92	184,06
	183,48	183,59	183,98	184,05
	187,18	183,92	183,87	183,98
	181,47	184,34	184,10	183,97
	181,85	184,09	183,91	184,03
	187,05	183,67	183,95	183,97
MEDIA	184,840	183,906	183,956	184,003
VARIANZA	4,532	0,055	0,007	0,002

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

Frenómetro para vehículos ligeros

- Análisis de Ures:

	Tamaño de la muestra N	media	Varianza
Frenómetro1	10	192,380	9,222
Frenómetro2	10	188,947	3,735

$$Z = \frac{(192,38 - 188,947) - 0}{\sqrt{\frac{9,222}{10} - \frac{3,735}{10}}} = 4,63$$

Como $Z=4,63$ es mayor que el límite de aceptación, significa que se rechaza la hipótesis nula, existen diferencias significativas entre las medias, es decir, la incertidumbre debida a la resolución se ha de tener en cuenta.

- Análisis de Uflex:

	Tamaño de la muestra N	Media	Varianza
Frenómetro1	10	192,999	3,268
Frenómetro2	10	187,522	2,155

$$Z = \frac{(192,999 - 187,522) - 0}{\sqrt{\frac{3,268}{10} - \frac{2,155}{10}}} = 16,396$$

Como $Z=16,396$ es mayor que el límite de aceptación, significa que se rechaza la hipótesis nula, existen diferencias significativas entre las medias, es decir, la incertidumbre debida a la resolución se ha de tener en cuenta.



ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

- Análisis de Uacopl:

	Tamaño de la muestra N	Media	Varianza
Frenómetro1	10	193,452	1,088
Frenómetro2	10	189,237	18,504

$$Z = \frac{(189,237 - 193,452) - 0}{\sqrt{\frac{18,504}{10} - \frac{1,088}{10}}} = -3,194$$

Como $Z=-3,194$ es mayor que el límite de aceptación, significa que se rechaza la hipótesis nula, existen diferencias significativas entre las medias, es decir, la incertidumbre debida a la resolución se ha de tener en cuenta.

- Análisis de Umontaje:

	Tamaño de la muestra N	Media	Varianza
Frenómetro1	10	193,869	14,987
Frenómetro2	10	187,249	0,584

$$Z = \frac{(1893,869 - 187,249) - 0}{\sqrt{\frac{14,987}{10} - \frac{0,584}{10}}} = 5,516$$

Como $Z=5,516$ es mayor que el límite de aceptación, significa que se rechaza la hipótesis nula, existen diferencias significativas entre las medias, es decir, la incertidumbre debida a la resolución se ha de tener en cuenta.



ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

- Análisis de Uroz:

	Tamaño de la muestra N	Media	Varianza
Frenómetro1	10	192,996	0,001
Frenómetro2	10	187,995	0,001

En este caso, como el tamaño de la muestra es el mismo, y la varianza es la misma, se observa a simple vista que las medias no son iguales

Frenómetro universal

- Análisis de Ures:

	Tamaño de la muestra N	Media	Varianza
Frenómetro1	10	185,159	7,161
Frenómetro2	10	184,84	4,532

$$Z = \frac{(185,159 - 184,84) - 0}{\sqrt{\frac{7,161}{10} - \frac{4,532}{10}}} = 0,62$$

Como $Z=0,62$ se encuentra dentro de los límites de aceptación, no se rechaza la hipótesis nula y se puede afirmar que las medias son iguales.

- Análisis de Uflex:

	Tamaño de la muestra N	Media	Varianza
Frenómetro1	10	184,955	0,138
Frenómetro2	10	183,906	0,055

$$Z = \frac{(192,999 - 187,522) - 0}{\sqrt{\frac{3,268}{10} - \frac{2,155}{10}}} = 11,514$$



ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

Como $Z=11,514$ es mayor que el límite de aceptación, significa que se rechaza la hipótesis nula, existen diferencias significativas entre las medias, es decir, la incertidumbre debida a la resolución se ha de tener en cuenta.

- Análisis de Umontaje:

	Tamaño de la muestra N	Media	Varianza
Frenómetro1	10	184,967	0,006
Frenómetro2	10	183,956	0,007

$$Z = \frac{(184,967 - 183,956) - 0}{\sqrt{\frac{0,006}{10} - \frac{0,007}{10}}} = 101,1$$

Como $Z=101,1$ es mayor que el límite de aceptación, significa que se rechaza la hipótesis nula, existen diferencias significativas entre las medias, es decir, la incertidumbre debida a la resolución se ha de tener en cuenta

- Análisis de Uroz:

	Tamaño de la muestra N	Media	Varianza
Frenómetro1	10	185,008	0,002
Frenómetro2	10	184,003	0,002

En este caso, como el tamaño de la muestra es el mismo, y la varianza es la misma, se observa a simple vista que las medias no son iguales.

7.2.2 Análisis de sensibilidad de la fuerza patrón

En este apartado, se analizará qué parámetro es el más influyente en la fórmula del cálculo de la fuerza patrón tanto en frenómetros para vehículos ligeros, como universales.

La expresión de la incertidumbre de la fuerza patrón para calibración de frenómetros de vehículos ligeros es:

$$u_{0F}^2 = \left(\frac{2dg}{D}\right)^2 \cdot u_m^2 + \left(\frac{2md}{D}\right)^2 \cdot u_g^2 + \left(\frac{2mg}{D}\right)^2 \cdot u_d^2 + \left(\frac{-2mgd}{D^2}\right)^2 \cdot u_D^2$$



ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

	m	u_m^2	G	u_g^2	d	u_d^2	D	u_D^2
Frenómetro 1	14,94	6,25E-4	9,8	4E-3	343,95	0,812	205,1	0,34
Frenómetro2	14,94	6,25E-4	9,8	4E-3	343,95	0,812	204,8	0,17

Operando se obtiene:

$$\text{Frenómetro1} \rightarrow u_{0F}^2 = 14,322 \text{ N}$$

$$\text{Frenómetro2} \rightarrow u_{0F}^2 = 12,89 \text{ N}$$

A simple vista, sin ningún tipo de análisis estadístico, se observa que todos los parámetros son constantes salvo el diámetro del rodillo y su incertidumbre.

Si se hiciese un contraste de hipótesis como se ha hecho en el apartado anterior para la media, se obtendría que ni la masa, ni la gravedad, ni la distancia patrón influyen significativamente en el resultado. Para el diámetro, a priori, no se puede conocer el resultado, por tanto se plantea el mismo contraste que anteriormente para ver qué obtenemos.



ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

Primero se genera la variable aleatoria:

	U _D 1	U _D 2
	205,0754	204,8051
	205,0457	204,9265
	204,8551	204,7531
	205,4337	204,6623
	204,7722	204,6526
	204,8082	204,6813
	204,8509	204,8465
	205,3483	204,9245
	205,1215	204,8503
	205,4287	204,7370
MEDIA	205,0740	204,7839
VARIANZA	0,0659	0,0105

A continuación se realiza el contraste:

	Tamaño de la muestra N	Media	Varianza
Frenómetro1	10	205,074	0,0659
Frenómetro2	10	204,7839	0,0105

H₀: $\mu_1 = \mu_2$

H₁: $\mu_1 \neq \mu_2$

$$Z = \frac{(205,074 - 204,7839) - 0}{\sqrt{\frac{0,0659}{10} - \frac{0,0105}{10}}} = 3,897$$

Como $Z=3,897$ es mayor que el límite de aceptación, se rechaza la hipótesis nula, es decir, existen diferencias significativas entre las medias.



ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

La expresión de la incertidumbre de la fuerza patrón para calibración de frenómetros universales es:

$$u_{0F}^2 = \left(\frac{2gL_1L_3}{DL_2}\right)^2 \cdot u_m^2 + \left(\frac{2mL_1L_3}{DL_2}\right)^2 \cdot u_g^2 + \left(\frac{2mgL_3}{DL_2}\right)^2 \cdot u_{L1}^2 + \left(-\frac{2mgL_1L_3}{DL_2^2}\right)^2 \cdot u_{L2}^2 + \left(\frac{2mgL_1}{DL_2}\right)^2 \cdot u_{L3}^2 + \left(\frac{-2mgL_1L_3}{D^2L_2}\right)^2 \cdot u_D^2$$

	m	u_m^2	g	u_g^2	L1	U_{L1}^2	D	u_D^2	L2	U_{L2}^2
Fren.3	1,93	6,29E-4	9,8	4E-3	225,95	0,41	270,5	0,9	67,96	0,1125
Fren.4	1,93	6,29E-4	9,8	4E-3	225,95	0,41	278	0,44	67,96	0,1125

	L3	U_{L3}^2
Fren.3	397	0,114
Fren.4	342,6	0,099

Operando se obtiene:

Frenómetro3 $\rightarrow u_{0F}^2 = 8,734 \text{ N}$

Frenómetro4 $\rightarrow u_{0F}^2 = 10,838 \text{ N}$

Al igual que en la expresión de vehículos ligeros, a simple vista se observa que la masa, la gravedad y las longitudes L1 y L2 son constantes para todos los casos. Se realiza el contraste para el diámetro del rodillo, y para la longitud L3.

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

	U _{D1}	U _{D2}	U _{L31}	U _{L32}
	270,013	277,923	396,893	342,633
	270,025	277,900	396,947	342,669
	269,659	277,849	397,103	342,582
	270,863	277,568	397,113	342,602
	271,253	278,361	396,929	342,688
	270,738	277,612	396,939	342,620
	271,122	278,003	396,914	342,553
	270,092	277,777	397,066	342,528
	270,617	277,560	397,064	342,642
	270,723	277,852	397,057	342,582
MEDIA	270,511	277,840	397,002	342,610
VARIANZA	0,282	0,057	0,007	0,003

Contraste para el diámetro:

	Tamaño de la muestra N	Media	Varianza
Frenómetro3	10	270,511	0,282
Frenómetro4	10	277,840	0,057

$$Z = \frac{(270,511 - 277,840) - 0}{\sqrt{\frac{0,282}{10} - \frac{0,057}{10}}} = -48,86$$

Contraste para L3:

	Tamaño de la muestra N	Media	Varianza
Frenómetro3	10	397,002	0,007
Frenómetro4	10	342,610	0,003



ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

$$z = \frac{(397,002 - 342,610) - 0}{\sqrt{\frac{0,003}{10} - \frac{0,003}{10}}} = 2719,6$$

Ambos valores superan los límites del intervalo, por lo que hay diferencias significativas entre sus medias.



Capítulo 8

Interpretación de los resultados y conclusión

En el análisis de de las expresiones del cálculo de incertidumbres, como se muestra, en la calibración de frenómetros para vehículos ligeros, todas las incertidumbres influyen de manera significativa en el resultado de la medición. En los ensayos en los que se ha basado el cálculo numérico, la incertidumbre debida a la repetibilidad es cero. Esto se debe, a que a pesar de ensayar en frenómetro varias veces, la variable de salida (la fuerza de frenado experimental) no variaba.

Observando los resultados obtenidos, se aprecia que la variable que más se aleja de los límites de aceptación es la incertidumbre debida a la flexión, y la que se aleja menos es la incertidumbre asociada al acoplamiento.

Por tanto, se interpreta, que la barra patrón ha de ser de un material rígido, que a pesar de ser sometido a diferentes masas en su extremo libre, flecte lo menos posible para que esta flexión, contribuya lo menos posible al resultado de la medición.

También se interpreta, que el montaje del frenómetro es preciso. Existe axialidad suficiente entre los taladros, y las holguras son pequeñas. Aún así, se recuerda que esta incertidumbre también está fuera del intervalo de aceptación, por lo que a pesar de ser la menos influyente, también contribuye de manera significativa al resultado de la medición.

Por otro lado, se tienen los resultados obtenidos en el análisis del sistema de calibración de frenómetros universales.

Los resultados indican que la única incertidumbre que no contribuye de manera significativa a la medición, es la debida a la resolución.

Como se puede observar, tanto los frenómetros ensayados para vehículos ligeros como los universales, tienen la misma resolución: ± 10 N. por tanto, a priori, no es lógico

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

pensar que bajo las mismas condiciones de ensayo, en un caso sea significativo, y en el otro no.

El motivo de este resultado, es que el frenómetro universal, está diseñado para realizar ensayos de hasta 40 kN (frente a los 4 o 6 kN de los ensayos de vehículos ligeros). No es lo mismo tener una fuerza de 300 ± 10 N, que tener 20000 ± 10 N.

Dado que el ensayo de frenómetro universal se ha realizado para fuerzas relativamente pequeñas, es normal que esta incertidumbre aparezca como no significativa.

La incertidumbre que más difiere de los límites del intervalo es la debida al montaje. Al contrario que en el ensayo de vehículos ligeros, en este caso, el sistema utilizado para realizar la calibración, es más complejo, y requiere más precisión. Para poder producir un mayor par, se introducen más elementos en el sistema unidos entre sí. Evidentemente, a medida que aumenta la complejidad del equipo de medida, aumentan los errores debidos al montaje.

Por último, se observa que la incertidumbre debida al rozamiento es significativa en ambos casos. Un buen agarre entre neumático y rodillo, es imprescindible para poder llevar a cabo el ensayo. El deslizamiento entre ambos elementos, implicaría la obtención de medidas erróneas y disparatadas.

En el análisis de la sensibilidad de los parámetros de la fuerza patrón, tanto en la expresión teórica de la fuerza de frenado en el ensayo de vehículos ligeros como en el ensayo de frenómetro universal, existen parámetros que permanecen constantes ensayo tras ensayo. Estos son la gravedad y la masa.

La incertidumbre que puede provocar la influencia de la gravedad es despreciable frente a cualquiera del resto de parámetro que intervienen en la expresión.

La masa, calibrada externamente, al ser una referencia, un **patrón**, también produce desviaciones despreciables comparadas con otras variables.

Para la expresión de vehículos ligeros, existe otro parámetro que también es una medida patrón, que se calibra externamente al ensayo y que su incertidumbre no es relevante



ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE UN FRENÓMETRO

(siempre que esté bien medida y calibrada). Este parámetro es la distancia patrón, es decir, la barra de calibración.

Sin embargo, existe una variable que se mide directamente al realizar el ensayo, y cuya incertidumbre influye significativamente en los resultados. El diámetro de los rodillos. La imprecisión que puede conllevar cualquier error humano al medir, provoca que este parámetro sea el más significativo de la expresión. (Igual para frenómetro universal)

Por otro lado, en la expresión del frenómetro universal, aparece otra variable significativa que también hay que tener muy en cuenta a la hora de realizar los cálculos. Esta es la longitud de la barra L3. En este caso, esta distancia viene fijada por el fabricante, pero es preciso que esté bien medida ya que el cálculo de la fuerza deriva de aplicar momentos en las barras. Por tanto, esta longitud es crítica para obtener un buen, o mal resultado.



Bibliografía

AENOR. *Instrumentos destinados a medir las fuerzas de frenada de un vehículo a motor: frenómetro de rodillos*. UNE 82502. Enero 2007

Expresión de la incertidumbre de medida en las calibraciones. CEA-ENAC-LC/02

Centro español de metrología [en línea]. [Consulta: 9 de noviembre de 2012].
Disponible en web: www.cem.es

Frenos: teoría y funcionamiento. Instituto de investigación sobre reparación de vehículos S.A

Apuntes de la asignatura Mecánica experimental (Universidad Carlos III de Madrid)

Apuntes de Cálculo de incertidumbre en la calibración de un frenómetro (Universidad Carlos III de Madrid)

Apuntes de la asignatura Diseño mecánico (Universidad Carlos III de Madrid)

Métodos estadísticos: control y mejora de la calidad. 2º ed. Prat Bartés, Albert.

Estadística aplicada con Statgraphics. Coronado Morales, José Luis.

www.histron.com [Consulta: 13 de noviembre de 2012]

www.bosch-automotive.com [Consulta: 13 de noviembre de 2012]

www.altus-test.com [Consulta: 13 de noviembre de 2012]

www.cemausa.com [consulta: 13 de noviembre de 2012]