



Universidad
Carlos III de Madrid

DISEÑO MECÁNICO

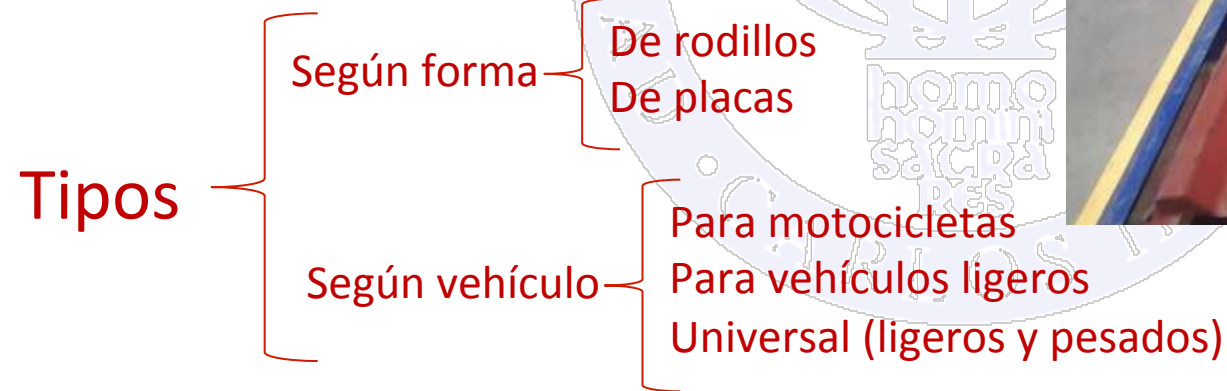


**CÁLCULO DE INCERTIDUMBRE
EN LA CALIBRACIÓN DE UN FRENÓMETRO**

1. INTRODUCCIÓN

Frenómetro ➡ Verificación del sistema de frenos

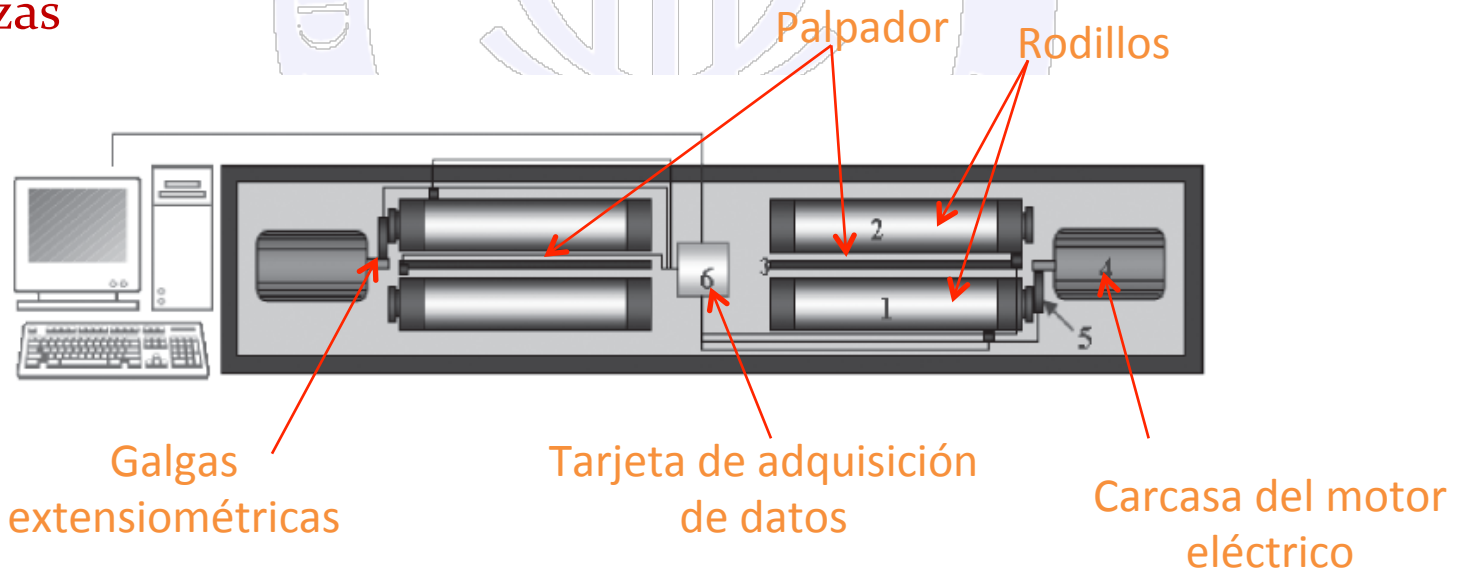
Evaluación de la eficacia de frenado: relación entre la fuerza de frenado y el peso del vehículo.



1. INTRODUCCIÓN

Características constructivas:

- **Rodillos**: Generan una rotación a velocidad constante (5 km/h)
- **Palpador**: Accionador del banco de pruebas
- **Motor eléctrico**: Genera la energía que provoca el giro de los rodillos
- **Galgas extensiométricas**: Conectadas a la carcasa del motor (deformaciones)
- **Tarjeta de adquisición de datos**: transformación de deformaciones a fuerzas



1. INTRODUCCIÓN

- Principio de medida

Rodillos accionados a $w=cte$



Accionamiento del freno
FUERZAS DE FRENADO

Reacciones entre neumático y rodillos



Reacciones en la carcasa del motor



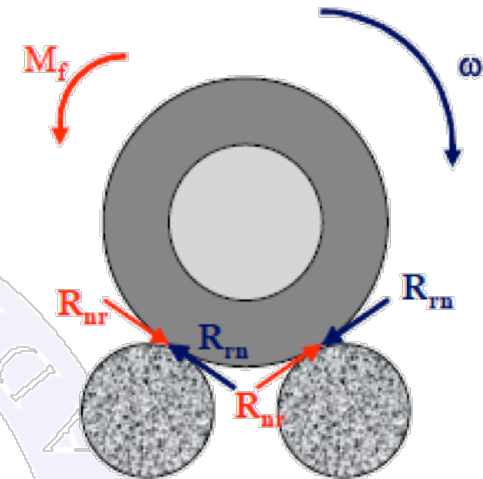
Deformación medida por un sensor



Transformación de deformación
a magnitud de fuerza



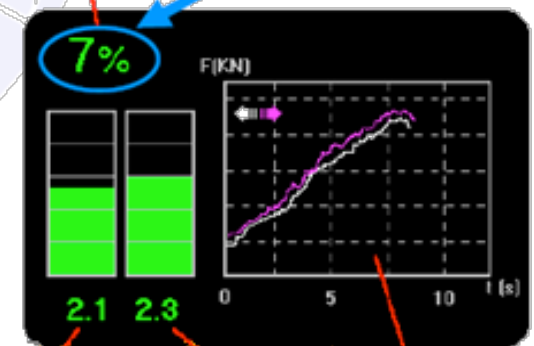
FUERZAS DE FRENADO



DISPLAY FRENOMETRO DIGITAL

Maxima diferencia de
frenado entre ruedas

Desequilibrio (%)



Fuerza maxima de
frenado rueda izq.

Fuerza maxima de
frenado rueda dcha.

HISTORIAL DE
FRENADO

2. ENUNCIADO

- Campo de medida: 0 – 6000 N
- Resolución del frenómetro: 50 N
- Nivel de confianza de la calibración del 95%
- Masa de calibración: 30,0719 kg

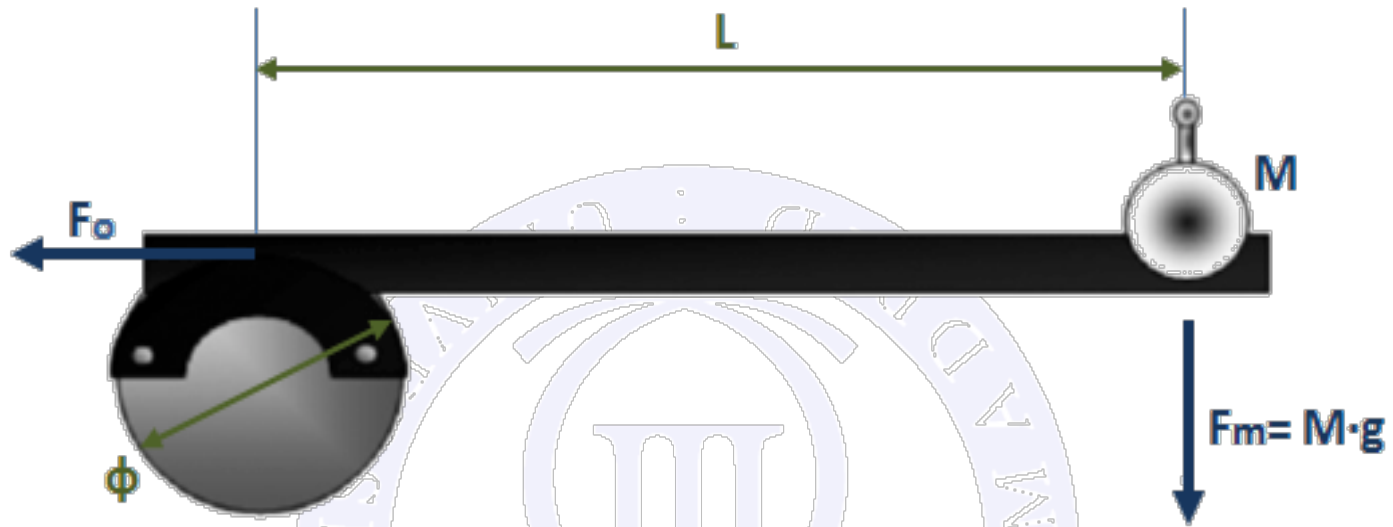
Incertidumbre expandida $U(M) = 500 \text{ mg} \rightarrow$ Factor de cobertura $k = 2$

Puntos de calibración	400 N	2400 N	3200 N	4000 N
Distancias equivalentes	0.137 m	0.819 m	1.093 m	1.367 m

Incertidumbre expandida $U(L) = 0,02 \text{ mm} \rightarrow$ Factor de cobertura $k = 2$

- Gravedad: $9,80665 \text{ m/s}^2 \rightarrow U(g) = 0,00002 \text{ m/s}^2 \rightarrow$ Factor de cobertura $k = 2$
- Resolución del pie de rey: 0,02 mm

3. CALIBRACIÓN



- Equilibrio de momentos en el eje del rodillo $F_0 \cdot \frac{\phi}{2} = F_m \cdot L$

- Fuerza de frenado

$$F_0 = \frac{2 \cdot M \cdot g \cdot L}{\phi}$$

3. CALIBRACIÓN

3.1. Pasos a seguir para calibración del frenómetro

- Comprobación de las condiciones ambientales

- Temperatura: 0 - 40 °C
- Presión: 800 - 1050 mbar
- HR: 25 - 80 %



- Desconexión del frenómetro
- Retirada de la cubierta metálica
- Instalación y fijación de la barra de calibración



3. CALIBRACIÓN

3.1. Pasos a seguir para calibración del frenómetro

- Conexión del frenómetro y ajuste del cero.

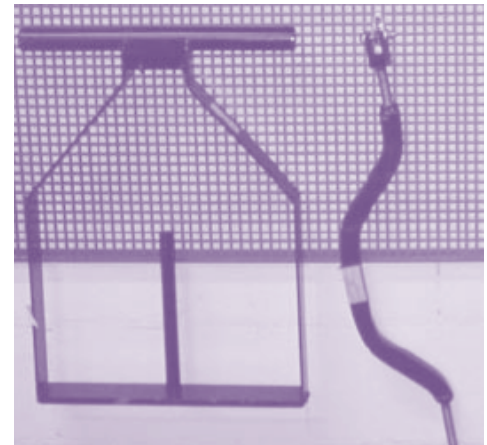
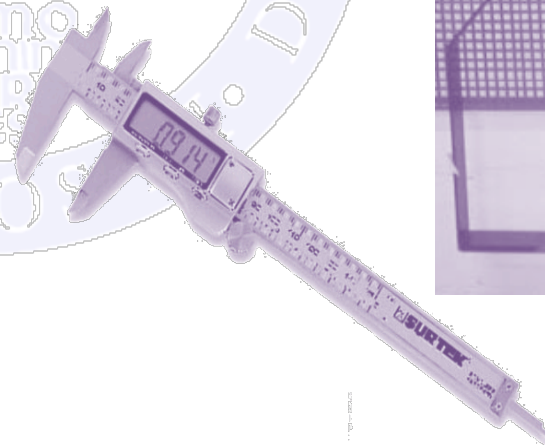
- Toma de medidas de Fo.

- Masa en las 4 muescas certificadas



- Cálculo de la incertidumbre del frenómetro.

- Medidas de diámetros.



3. CALIBRACIÓN

3.2. Cálculo de la incertidumbre

- Medición afectada por:
 - F_{oi} : valor de patrón en cada punto.
 - $\bar{F}_i$: repetibilidad de toma de datos.
 - $\delta fren$: resolución del frenómetro.
- Expresión de la corrección.

$$C_i = F_{oi} - \bar{F}_i + \delta fren$$

- Incertidumbre combinada

$$u_c^2(F_{oi}) = u^2(F_{oi}) + u^2(\bar{F}_i) + u^2(\delta fren)$$

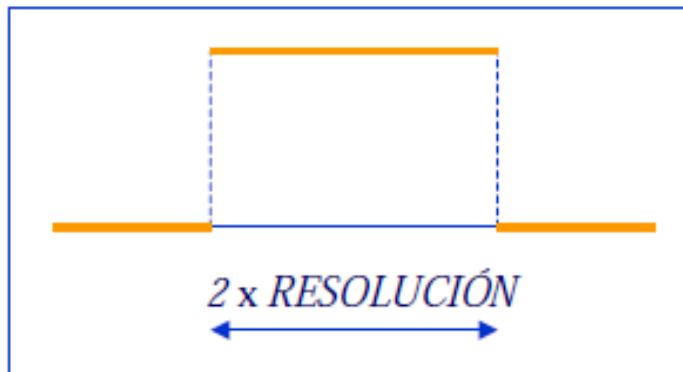
3. CALIBRACIÓN

Tipos de incertidumbre

- De Tipo A: evaluables estadísticamente.

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

- De Tipo B: se dispone de información suficiente.



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

3. CALIBRACIÓN

3.2.1. Cálculo de la incertidumbre debida al

patrón

$$u_c^2(F_{oi}) = u^2(F_{oi}) + u^2(\bar{F}_i) + u^2(\delta fren)$$

$$u^2(F_{oi}) = \sum_{i=1}^n c_i^2 \cdot u^2(x_i)$$

$\cdot u(x_i)$: Incertidumbre de variables de entrada
 $\cdot c_i$: Coeficiente de sensibilidad $c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$

$$F_o = \frac{2 \cdot M \cdot g \cdot L}{\phi}$$

$$\Rightarrow u^2(F_{oi}) = A^2 \cdot u^2(M) + B^2 \cdot u^2(g) + C^2 \cdot u^2(\phi) + D^2 \cdot u^2(L_i)$$

$$A = \left(\frac{\partial F_{oi}}{\partial M} \right) = \left(\frac{2gL_i}{\phi} \right)$$

$$B = \left(\frac{\partial F_{oi}}{\partial g} \right) = \left(\frac{2ML_i}{\phi} \right)$$

$$C = \left(\frac{\partial F_{oi}}{\partial \phi} \right) = \left(-\frac{2MgL_i}{\phi^2} \right)$$

$$D = \left(\frac{\partial F_{oi}}{\partial L_i} \right) = \left(\frac{2Mg}{\phi} \right)$$

3. CALIBRACIÓN

3.2.1. Cálculo de la incertidumbre debida al patrón

→ NOTA: $u^2(\phi) = u^2(\bar{\phi}) + u^2(\delta \text{ pie de rey})$

3.2.2. Incertidumbre debida a repetibilidad

- Incertidumbre Tipo A.

3.2.3. Incertidumbre debida a resolución

- Incertidumbre Tipo B.

3. CALIBRACIÓN

Incertidumbre combinada

$$u_c^2(F_{oi}) = A^2 \cdot u^2(M) + B^2 \cdot u^2(g) + C^2 \cdot [u^2(\bar{\phi}) + u^2(\delta \text{ pie de rey})] \\ + D^2 \cdot u^2(L_i) + u_{rep}^2(\bar{F}_i) + u_{res}^2(\delta \text{ fren})$$

3.3. Incertidumbre expandida

- x Factor de cobertura:

$$U(F_{oi}) = k \cdot u_c$$

- La mayor:

$$U(F_o) = \max_i [U(F_{oi})]$$

4. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA

RECORDATORIO DATOS

- Campo de medida: 0 – 6000 N
- Resolución del frenómetro: 50 N
- Nivel de confianza de la calibración del 95%
- Masa de calibración: 30,0719 kg
Incertidumbre expandida $U(M) = 500 \text{ mg} \rightarrow$ Factor de cobertura $k = 2$

Puntos de calibración	400 N	2400 N	3200 N	4000 N
Distancias equivalentes	0.137 m	0.819 m	1.093 m	1.367 m

Incertidumbre expandida $U(L) = 0,02 \text{ mm} \rightarrow$ Factor de cobertura $k = 2$

- Gravedad: $9,80665 \text{ m/s}^2 \rightarrow U(g) = 4 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2 \rightarrow$ Factor de cobertura $k = 2$
- Resolución del pie de rey: 0,02 mm

4. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA

4.1. Cálculo del diámetro de los rodillos

- 15 medidas de cada rodillo
- Pie de rey

[mm]	Rodillo Derecho			Rodillo Izquierdo		
Medida	Dcha.	Centro	Izda.	Dcha.	Centro	Izda.
1	208,2	208,5	208,1	208,7	207,5	208,9
2	208,6	208	208,2	208	205,7	208,7
3	206,5	207,8	207,6	209	207,5	208,5
4	208,9	207,2	208,1	206,9	207,5	209,1
5	208,4	208,2	208,2	208,2	207,5	208,6

- Media:

$$\phi_{dcho} = 208,033 \text{ mm}$$

$$\phi_{izdo} = 208,027 \text{ mm}$$

4. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA

4.2. Cálculo de la fuerza patrón

- Fuerza patrón de frenado: $F_o = \frac{2 \cdot M \cdot g \cdot L}{\phi}$

- Datos:
 - $M = 30,0719 \text{ kg}$
 - $g = 9,80665 \text{ m / s}^2$
 - $\phi_{dcho} = 208,033 \text{ mm}$
 - $\phi_{izdo} = 208,027 \text{ mm}$

	Puntos de calibración			
	400 N	2400 N	3200 N	4000 N
$L_i \text{ [m]}$	0,1367	0,8197	1,0932	1,3668
$F_{oi} \text{ (dcho.) [m]}$	387,57	2322,01	3099,41	3875,11
$F_{oi} \text{ (izdo.) [m]}$	387,58	2322,07	3099,5	3875,22

4. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA

4.3. Cálculo de incertidumbres y coef. sensibilidad

Puntos de calibración	400 N	2400 N	3200 N	4000 N
$A^2 \cdot u^2(M)$				
$B^2 \cdot u^2(g)$				
$C^2 \cdot u^2(\bar{\phi})$				
$C^2 \cdot u^2(\delta \text{pie de rey})$				
$D^2 \cdot u^2(L_i)$				
$u^2(\bar{F}_i)$				
$u^2(\delta \text{fren})$				
$u_c(F_{oi}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n C_i^2 \cdot u_i^2(x)}$				
$U(F_{oi}) = k \cdot u_c(F_{oi})$				

4. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA

4.3.1. Cálculo de u (M) y A

$$u_c^2(F_{oi}) = A^2 \cdot u^2(M) + B^2 \cdot u^2(g) + C^2 \cdot [u^2(\bar{\phi}) + u^2(\delta \text{ pie de rey})] \\ + D^2 \cdot u^2(L_i) + u_{rep}^2(\bar{F}_i) + u_{res}^2(\delta \text{ fren})$$

- Incertidumbre

$$U = k \cdot u_{res} \Rightarrow u_{res} = \frac{U(M)}{k} = \frac{0.5 \text{ gr}}{2} = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ kg}$$

Incertidumbre expandida
en la medida de los
puntos de calibración

Factor de cobertura

- Coeficiente de sensibilidad A

$$A = \left(\frac{\partial F_{oi}}{\partial M} \right) = \left(\frac{\frac{\partial}{\partial} \frac{2 \cdot M \cdot g \cdot L}{\phi}}{\partial M} \right) = \left(\frac{2gL_i}{\phi} \right) [m / s^2]$$

4. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA

4.3.1. Cálculo de u (M) y A

- Coef. de sensibilidad A

	Puntos de calibración			
	400 N	2400 N	3200 N	4000 N
L_i [m]	0,1367	0,8197	1,0932	1,3668
A [m/s^2] (dcho.)	12,89	77,28	103,07	128,86
A [m/s^2] (izdo.)	12,89	77,28	103,07	128,87

- $A^2 \cdot u^2(M)$

- Rodillo derecho

Puntos calibración	400 N	2400 N	3200 N	4000 N
$A^2 \cdot u^2(M)$	$1,04 \cdot 10^{-5}$	$0.37 \cdot 10^{-3}$	$0,66 \cdot 10^{-3}$	$1,04 \cdot 10^{-3}$

- Rodillo izquierdo

Puntos calibración	400 N	2400 N	3200 N	4000 N
$A^2 \cdot u^2(M)$	$1,04 \cdot 10^{-5}$	$0.37 \cdot 10^{-3}$	$0,66 \cdot 10^{-3}$	$1,04 \cdot 10^{-3}$

4. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA

4.3.2. Cálculo de $u(g)$ y B

$$u_c^2(F_{oi}) = A^2 \cdot u^2(M) + B^2 \cdot u^2(g) + C^2 \cdot [u^2(\bar{\phi}) + u^2(\delta \text{ pie de rey})] \\ + D^2 \cdot u^2(L_i) + u_{rep}^2(\bar{F}_i) + u_{res}^2(\delta \text{ fren})$$

- Incertidumbre

$$U = k \cdot u_{res} \Rightarrow u_{res} = \frac{U(g)}{k} = \frac{0.00002 \text{ m/s}^2}{2} = 0.00001 \text{ m/s}^2$$

Incertidumbre expandida
en la medida de los
puntos de calibración

Factor de cobertura

- Coef. de sensibilidad B

$$B = \left(\frac{\partial F_{oi}}{\partial g} \right) = \left(\frac{\partial \frac{2 \cdot M \cdot g \cdot L}{\phi}}{\partial g} \right) = \left(\frac{2ML_i}{\phi} \right) [m/s^2]$$

4. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA

4.3.2. Cálculo de $u(g)$ y B

- Coef. de sensibilidad B

	Puntos de calibración			
	400 N	2400 N	3200 N	4000 N
L_i [m]	0,1367	0,8197	1,0932	1,3668
B [m/s^2] (dcho.)	39,53	237,04	316,13	395,25
B [m/s^2] (izdo.)	39,53	237,04	316,14	395,26

- $B^2 \cdot u^2(g)$
 - Rodillo derecho

Puntos calibración	400 N	2400 N	3200 N	4000 N
$B^2 \cdot u^2(g)$	$1,56 \cdot 10^{-7}$	$5,52 \cdot 10^{-6}$	$9,99 \cdot 10^{-6}$	$1,56 \cdot 10^{-5}$

- Rodillo izquierdo

Puntos calibración	400 N	2400 N	3200 N	4000 N
$B^2 \cdot u^2(g)$	$1,56 \cdot 10^{-7}$	$5,62 \cdot 10^{-6}$	$9,99 \cdot 10^{-6}$	$1,56 \cdot 10^{-5}$

4. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA

4.3.3. Cálculo de $u(\phi)$ y C

$$u_c^2(F_{oi}) = A^2 \cdot u^2(M) + B^2 \cdot u^2(g) + C^2 \cdot [u^2(\bar{\phi}) + u^2(\delta \text{ pie de rey})] + D^2 \cdot u^2(L_i) + u_{rep}^2(\bar{F}_i) + u_{res}^2(\delta \text{ fren})$$

- Coef. de sensibilidad C

$$C = \left(\frac{\partial F_{oi}}{\partial \phi} \right) = \left(\frac{\partial \frac{2 \cdot M \cdot g \cdot L}{\phi}}{\partial \phi} \right) = \left(-\frac{2MgL_i}{\phi^2} \right) \quad [kg / s^2]$$

	Puntos de calibración			
	400 N	2400 N	3200 N	4000 N
L_i [m]	0,1367	0,8197	1,0932	1,3668
$C [m/s^2]$ (dcho.)	-1863,01	-11171,26	-14898,64	-18627,39
$C [m/s^2]$ (izdo.)	-1863,12	-11171,90	-14899,50	-18628,47

4. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA

4.3.3. Cálculo de $u(\bar{\phi})$ y C

- Incertidumbre debida a repetibilidad $u(\bar{\phi})$
 - Tipo A

[mm]	Rodillo Izquierdo			Rodillo Derecho		
Medida	Dcha.	Centro	Izda.	Dcha.	Centro	Izda.
1	208,7	207,5	208,9	208,2	208,5	208,1
2	208	205,7	208,7	208,6	208	208,2
3	209	207,5	208,5	206,5	207,8	207,6
4	206,9	207,5	209,1	208,9	207,2	208,1
5	208,2	207,5	208,6	208,4	208,2	208,2
$\bar{\phi}_i$	208,16	207,14	208,76	208,12	207,94	208,04
S_i	0,8	0,8	0,24	0,94	0,49	0,25
$u(\bar{\phi}_i)$	0,36	0,36	0,11	0,42	0,22	0,11

$$u(\bar{\phi}_i)_{izdo} = 0,36$$

$$u(\bar{\phi}_i)_{dcho} = 0,42$$

4. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA

4.3.3. Cálculo de $u(\phi)$ y C

- Incertidumbre debida a resolución del pie de rey u (piederey)

$$u_{res} = \frac{\text{Tipo.B resolución}}{2\sqrt{3}} \Rightarrow u(\text{pie de rey}) = \frac{0,02\text{mm}}{2\sqrt{3}} = 0,0058\text{mm}$$

- Rodillo derecho

Puntos calibración	400 N	2400 N	3200 N	4000 N
$C^2 \cdot u^2(\bar{\phi})$	0,61	22,01	39,16	61,21
$C^2 \cdot u^2(\delta \text{ pie de rey})$	$1,17 \cdot 10^{-4}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$7,47 \cdot 10^{-3}$	$11,7 \cdot 10^{-3}$

- Rodillo izquierdo

Puntos calibración	400 N	2400 N	3200 N	4000 N
$C^2 \cdot u^2(\bar{\phi})$	0,45	16,16	28,77	44,97
$C^2 \cdot u^2(\delta \text{ pie de rey})$	$1,17 \cdot 10^{-4}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$7,47 \cdot 10^{-3}$	$11,7 \cdot 10^{-3}$

4. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA

4.3.4. Calculo de $u(L_i)$ y D

$$u_c^2(F_{oi}) = A^2 \cdot u^2(M) + B^2 \cdot u^2(g) + C^2 \cdot [u^2(\bar{\phi}) + u^2(\delta \text{ pie de rey})] \\ + D^2 \cdot u^2(L_i) + u^2(\bar{F}_i) + u^2(\delta \text{ fren})$$

- Incertidumbre

$$U = k \cdot u_{(L_i)} \Rightarrow u_{(L_i)} = \frac{U(L_i)}{k} = \frac{0.02mm}{2} = 0,01mm$$

- Coeficiente de sensibilidad

$$D = \left(\frac{\partial F_{oi}}{\partial L_i} \right) = \left(\frac{\partial \frac{2 \cdot M \cdot g \cdot L}{\phi}}{\partial L_i} \right) = \left(\frac{2gM_i}{\phi} \right) [kg / s^2]$$

Incertidumbre expandida
en la medida de los
puntos de calibración

Factor de cobertura

4. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA

4.3.4. Calculo de $u(L_i)$ y D

Por lo tanto los coeficientes de sensibilidad para los rodillos son:

$$D_{der} = \left(\frac{2gM_i}{\phi_{der}} \right) = 2,835mm \quad D_{izq} = \left(\frac{2gM_i}{\phi_{izq}} \right) = 2,835mm$$

Rodillo derecho

Puntos calibración	400 N	2400 N	3200 N	4000 N
$D^2 \cdot u^2(L_i)$	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008

Rodillo izquierdo

Puntos calibración	400 N	2400 N	3200 N	4000 N
$D^2 \cdot u^2(L_i)$	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008

4. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA

4.3.5. Incertidumbre debida a la repetibilidad $u(\bar{F}_i)$

$$u_c^2(F_{oi}) = A^2 \cdot u^2(M) + B^2 \cdot u^2(g) + C^2 \cdot [u^2(\bar{\phi}) + u^2(\delta \text{ pie de rey})] \\ + D^2 \cdot u^2(L_i) + u_{rep}^2(\bar{F}_i) + u_{res}^2(\delta \text{ fren})$$

Incertidumbre **Tipo A**: Evaluables estadísticamente



Incertidumbre → Desviación típica de la media muestral

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

4. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA

4.3.5. Incertidumbre debida a la repetibilidad $u(\bar{F}_i)$

- Toma de datos de la fuerza de frenado (10 medidas)

	RODILLO IZQUIERDO				RODILLO DERECHO			
	400	2400	3200	4000	400	2400	3200	4000
1	350	2300	3100	4000	400	2400	3150	4000
2	400	2300	3100	4000	400	2300	3150	4000
3	350	2300	3100	4000	400	2300	3150	4000
4	350	2400	3100	4000	350	2400	3150	4000
5	400	2400	3100	4000	400	2300	3150	4000
6	350	2400	3100	4000	400	2300	3200	4000
7	350	2400	3100	4000	350	2400	3200	4000
8	400	2300	3100	4000	350	2400	3200	4000
9	400	2300	3100	4000	350	2400	3200	4000
10	400	2400	3100	4000	400	2400	3200	4000

Media:

$$\bar{F}_i = \sum_{j=1}^{10} F_{ij} / 10$$

Desviación típica:

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

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

Rodillo derecho

Puntos calibración	400 N	2400 N	3200 N	4000 N
$u(\bar{F}_i)$	66,67	266,67	69,44	0

Rodillo izquierdo

Puntos calibración	400 N	2400 N	3200 N	4000 N
$u(\bar{F}_i)$	69,44	277,78	0	0

4. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA

4.3.6. Incertidumbre debida a la resolución

$$u_c^2(F_{oi}) = A^2 \cdot u^2(M) + B^2 \cdot u^2(g) + C^2 \cdot [u^2(\bar{\phi}) + u^2(\delta \text{ pie de rey})] \\ + D^2 \cdot u^2(L_i) + u_{rep}^2(\bar{F}_i) + u_{res}^2(\delta \text{ fren})$$

Incertidumbre Tipo B: No están basadas en mediciones repetitivas


$$u_{res}(\delta \text{ fren}) = \frac{\text{resolución}}{2\sqrt{3}} = \frac{50\text{N}}{2\sqrt{3}} = 14,43\text{N}$$

Rodillo derecho

Puntos calibración	400 N	2400 N	3200 N	4000 N
$u_{res}^2(\delta \text{ fren})$	208,23	208,23	208,23	208,23

Rodillo izquierdo

Puntos calibración	400 N	2400 N	3200 N	4000 N
$u_{res}^2(\delta \text{ fren})$	208,23	208,23	208,23	208,23

4. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA

4.4. CALCULO DE LA INCERTIDUMBRE COMBINADA Y EXPANDIDA

- Incertidumbre combinada

$$u_c^2(F_{oi}) = A^2 \cdot u^2(M) + B^2 \cdot u^2(g) + C^2 \cdot [u^2(\bar{\phi}) + u^2(\delta \text{ pie de rey})] \\ + D^2 \cdot u^2(L_i) + u^2(\bar{F}_i) + u_{res}^2(\delta \text{ fren})$$

$$u_c(F_{oi}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2 \cdot u_i^2(x)}$$

Rodillo derecho

Puntos calibración	400 N	2400 N	3200 N	4000 N
$u_c(F_{oi}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2 \cdot u_i^2(x)}$	16,60	22,29	17,80	16,42

Rodillo izquierdo

Puntos calibración	400 N	2400 N	3200 N	4000 N
$u_c(F_{oi}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2 \cdot u_i^2(x)}$	16,68	22,41	15,40	15,91

4. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA

4.4. CALCULO DE LA INCERTIDUMBRE COMBINADA Y EXPANDIDA

- Incertidumbre expandida $U = k \cdot u_c(F_{0i})$

“K” se calcula en función de los grados de libertad

$$\nu_{eff} = \frac{\text{efectivo}(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4(x_i)}{\nu_i}}$$

Donde: $u_c^2(F_{oi}) = u^2(F_{oi}) + u^2(\bar{F}_i) + u^2(\delta fren)$

Combinación de:
 $u(M), u(g), u(\phi), u(pier ey), u(L_i)$

$\nu = \infty$

Incetidumbre Tipo A

$$\nu = n - 1 = 10 - 1 = 9$$

Incetidumbre Tipo B
Distribución rectangular

$$\nu = \infty$$

$$\nu_{eff} = \infty$$

4. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA

4.4. CALCULO DE LA INCERTIDUMBRE

COMBINADA

$$U = k \cdot u_c(F_{0i})$$

k {
- Nivel de confianza
del 95%
- Infinitos grados
de libertad

FACTOR DE
COBERTURA
K = 2

Número de observaciones	Grados de libertad (n-1)	Nivel de confianza					
		99%	98%	95,45%	90%	80%	68%
2	1	63.66	31.82	13.97	6.31	3.08	1.82
3	2	9.92	6.96	4.53	2.92	1.89	1.31
4	3	5.84	4.54	3.31	2.35	1.64	1.19
5	4	4.60	3.75	2.87	2.13	1.53	1.13
6	5	4.03	3.36	2.65	2.02	1.48	1.10
7	6	3.71	3.14	2.52	1.94	1.44	1.08
8	7	3.50	3.00	2.43	1.89	1.41	1.07
9	8	3.36	2.90	2.37	1.86	1.40	1.06
10	9	3.25	2.82	2.32	1.83	1.38	1.05
11	10	3.17	2.76	2.28	1.81	1.37	1.05
12	11	3.11	2.72	2.25	1.80	1.63	1.04
13	12	3.05	2.68	2.23	1.78	1.63	1.04
14	13	3.01	2.65	2.21	1.77	1.35	1.03
15	14	2.98	2.62	2.20	1.76	1.35	1.03
16	15	2.95	2.60	2.18	1.75	1.34	1.03
17	16	2.92	2.58	2.17	1.75	1.34	1.02
18	17	2.90	2.57	2.16	1.74	1.33	1.02
19	18	2.88	2.55	2.15	1.73	1.33	1.02
20	19	2.86	2.54	2.14	1.73	1.33	1.02
Infinito	Infinito	2.58	2.33	2.00	1.64	1.28	1.00

4. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA

4.4. CALCULO DE LA INCERTIDUMBRE COMBINADA Y EXPANDIDA

- Incertidumbre expandida

$$U = k \cdot u_c(F_{oi}) = 2 \cdot u_c(F_{oi})$$

Rodillo derecho

Puntos calibración	400 N	2400 N	3200 N	4000 N
$U(F_{oi}) = k \cdot u_c(F_{oi})$	33,20	44,58	35,60	32,83

Rodillo izquierdo

Puntos calibración	400 N	2400 N	3200 N	4000 N
$U(F_{oi}) = k \cdot u_c(F_{oi})$	33,35	44,82	30,79	31,83

4. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA

4.5. CALCULO DE LA INCERTIDUMBRE EXPANDIDA DEL FRENOMETRO

Rodillo derecho

	Puntos calibración	400 N	2400 N	3200 N	4000 N
masa patrón	$A^2 \cdot u^2(M)$	$1,04 \cdot 10^{-5}$	$0,37 \cdot 10^{-3}$	$0,66 \cdot 10^{-3}$	$1,04 \cdot 10^{-3}$
gravedad	$B^2 \cdot u^2(g)$	$1,56 \cdot 10^{-7}$	$5,52 \cdot 10^{-6}$	$9,99 \cdot 10^{-6}$	$1,56 \cdot 10^{-5}$
diámetros	$C^2 \cdot u^2(\bar{\phi})$	0,61	22,01	39,16	61,21
Resolución Pie de Rey	$C^2 \cdot u^2(\delta \text{ pie de rey})$	$1,17 \cdot 10^{-4}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$7,47 \cdot 10^{-3}$	$11,7 \cdot 10^{-3}$
Puntos de calibración	$D^2 \cdot u^2(L_i)$	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008
Repetitividad	$u^2(\bar{F}_i)$	66,67	266,67	208,23	208,23
Resolución frenómetro	$u^2(\delta \text{ fren})$	208,23	208,23	208,23	208,23
I. combinada	$u_c(F_{oi}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2 \cdot u_i^2(x)}$	16,60	22,29	17,80	16,42
INCERTIDUMBRE EXPANDIDA	$U(F_{oi}) = k \cdot u_c(F_{oi})$	33,20	44,58	35,60	32,83

4. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA

4.5. CALCULO DE LA INCERTIDUMBRE EXPANDIDA DEL FRENOMETRO

Rodillo izquierdo

Puntos calibración	400 N	2400 N	3200 N	4000 N
$A^2 \cdot u^2(M)$	$1,04 \cdot 10^{-5}$	$0,37 \cdot 10^{-3}$	$0,66 \cdot 10^{-3}$	$1,04 \cdot 10^{-3}$
$B^2 \cdot u^2(g)$	$1,56 \cdot 10^{-7}$	$5,62 \cdot 10^{-6}$	$9,99 \cdot 10^{-6}$	$1,56 \cdot 10^{-5}$
$C^2 \cdot u^2(\bar{\phi})$	0,45	16,16	28,77	44,97
$C^2 \cdot u^2(\delta pie de rey)$	$1,17 \cdot 10^{-4}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$7,47 \cdot 10^{-3}$	$11,7 \cdot 10^{-3}$
$D^2 \cdot u^2(L_i)$	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008
$u^2(\bar{F}_i)$	69,44	277,78	0	0
$u^2(\delta fren)$	208,23	208,23	208,23	208,23
$u_c(F_{oi}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2 \cdot u_i^2(x)}$	16,68	22,41	15,40	15,91
$U(F_{oi}) = k \cdot u_c(F_{oi})$	33,35	44,82	30,79	31,83

4. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA

4.5. CALCULO DE LA INCERTIDUMBRE EXPANDIDA DEL FRENOMETRO

$$U(F_o) = \max_i [U(F_{oi})] \longrightarrow \text{Criterio totalizador}$$

Rodillo derecho

Puntos calibración	400 N	2400 N	3200 N	4000 N
$U(F_{oi}) = k \cdot u_c(F_{oi})$	33,20	44,58	35,60	32,83

$$U(F_o)_{dcho} = 44,58 N$$

Rodillo izquierdo

Puntos calibración	400 N	2400 N	3200 N	4000 N
$U(F_{oi}) = k \cdot u_c(F_{oi})$	33,35	44,82	30,79	31,83

$$U(F_o)_{izq} = 44,82 N$$

4. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA

4.5. CALCULO DE LA INCERTIDUMBRE EXPANDIDA DEL FRENOMETRO

$$U(F_o)_{dcho} = 44,58N \quad U(F_o)_{izq} = 44,82N$$

Resolución del
frenómetro = 50 N

$$U(F_o) = 50N$$

INCERTIDUMBRE ASOCIADA A LA FUERZA DE FRENADO