

PRÁCTICA 5

FUERZA DE ROZAMIENTO

1) Objetivos

- Comprender el comportamiento de la fuerza de rozamiento en superficies de contacto secas.
- Determinar el coeficiente de rozamiento **dinámico** μ_K y el coeficiente de rozamiento **estático** μ_S entre dos superficies secas.
- Analizar los resultados obtenidos para diferentes superficies de contacto.
- Verificar la existencia o no de dependencia entre los coeficientes de rozamiento y los distintos parámetros involucrados en la práctica.

2) Fundamento teórico

En los cursos de física general se han discutido algunos fenómenos de rozamiento, como ser el rozamiento entre dos superficies secas y el rozamiento viscoso. En situaciones de la vida cotidiana en general, en el rozamiento entre dos superficies cualesquiera, se presentan ambos fenómenos, es decir, se tiene una combinación de los mismos que depende del grado de lubricación entre las superficies de contacto. En esta práctica nos concentraremos en el rozamiento debido al contacto entre dos superficies secas.

El rozamiento entre dos superficies secas se describe mediante dos coeficientes: el coeficiente de rozamiento estático μ_S y el coeficiente dinámico μ_K ^A. Lo anterior tiene relación con el hecho de que la fuerza de rozamiento \vec{F}_{Roz} experimentada contra una superficie de contacto por un objeto en reposo es distinta a la que experimentaría el mismo objeto en movimiento. En otras palabras, cuando el objeto está en reposo experimenta una fuerza de rozamiento estático y a ésta se le asocia un coeficiente de rozamiento estático μ_S , y cuando el objeto se encuentra en movimiento experimenta una fuerza de rozamiento dinámico la cual tiene asociado un coeficiente de rozamiento dinámico μ_K .

Para ejemplificar lo anterior, considere un cubo de masa m , inicialmente en reposo y apoyado sobre una superficie, al cual se le aplica una fuerza \vec{F} de módulo variable según $\vec{F} = F\hat{i}$. Las fuerzas \vec{f}_S y \vec{f}_K denotarán a la fuerza de rozamiento estático y dinámico respectivamente que aparecerán sobre el cubo al aplicar distintos valores de F , su dirección es también sobre la horizontal. f_S y f_K serán sus respectivos módulos. Llamaremos además v y a a la velocidad lineal y a la aceleración de la masa m respectivamente, ambas según la dirección \hat{i} .

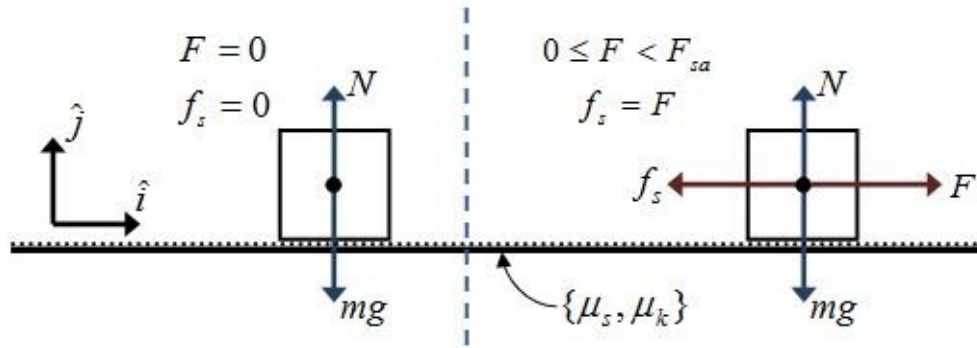


Figura 1: Situaciones para la masa m en reposo y valores de F aplicados tales que $0 \leq F \leq F_{SA}$.

Supongamos que inicialmente la fuerza \vec{F} aplicada es nula y lentamente se va aumentando el módulo F de dicha fuerza. El bloque permanecerá en reposo hasta que F llegue a un valor que llamaremos F_{SA} . Estas situaciones, cuando $0 \leq F \leq F_{SA}$, se ejemplifican en la figura 1 donde el cubo se encuentra en reposo y la fuerza de rozamiento estático f_s se adecua para compensar el efecto de la aplicación de F de modo de seguir manteniendo a la masa m en reposo.

Se observa experimentalmente que una vez que aplicamos $F = F_{SA}$ (la mínima fuerza tal que la masa m sale del reposo) el cubo acelera ($a > 0$). Esto significa que podemos empezar a disminuir F hasta un valor donde se cumple que el cubo se mueva a velocidad constante ($a = 0$ y $v > 0$). A este valor de F lo llamaremos F_{KV}^c . Si seguimos disminuyendo la fuerza F el cubo comienza a desacelerar ($a < 0$ y $v > 0$) hasta que finalmente se detiene. Esto quiere decir que una vez en movimiento la fuerza de rozamiento dinámico f_k , que actúa sobre la masa m , es constante. En la figura 2 se pueden observar las situaciones descritas en este párrafo.

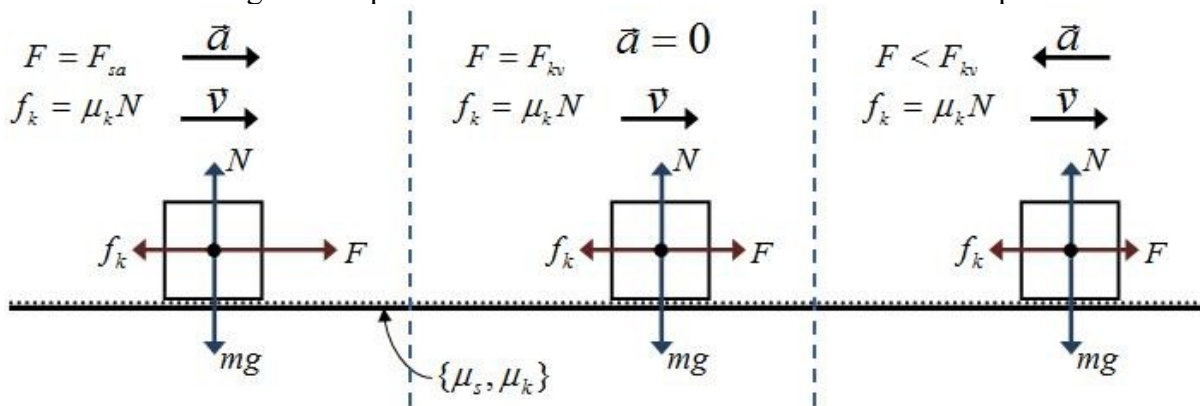


Figura 2: Situación para la masa m en movimiento para distintos valores de F .

El modelo usualmente utilizado para describir la fuerza de rozamiento F_{Roz} es un modelo empírico y se basa en experimentos de este estilo. Dicho modelo se representa en la ecuación 1, y el sentido de la fuerza -en la dirección horizontal- es tal que: se opone al movimiento en el caso dinámico y compensa la fuerza aplicada en el caso estático.

Esto quiere decir: la fuerza que hay que aplicar a la masa para que, una vez en movimiento, se mantenga en movimiento a velocidad constante.

$$F_{Roz} = \begin{cases} f_s \text{ con } f_s \leq \mu_s N & \text{si } v = 0 \\ f_k \text{ con } f_k = \mu_k N & \text{si } v \neq 0 \end{cases} \quad (1)$$

Para culminar con esta sección se muestran a continuación gráficos de distintas situaciones que ejemplifican cómo evolucionan F , F_{Roz} y v . Representan una posible evolución temporal que acompaña el ejemplo presentado en párrafos anteriores y la consecuente evolución temporal de las magnitudes F_{Roz} y v .

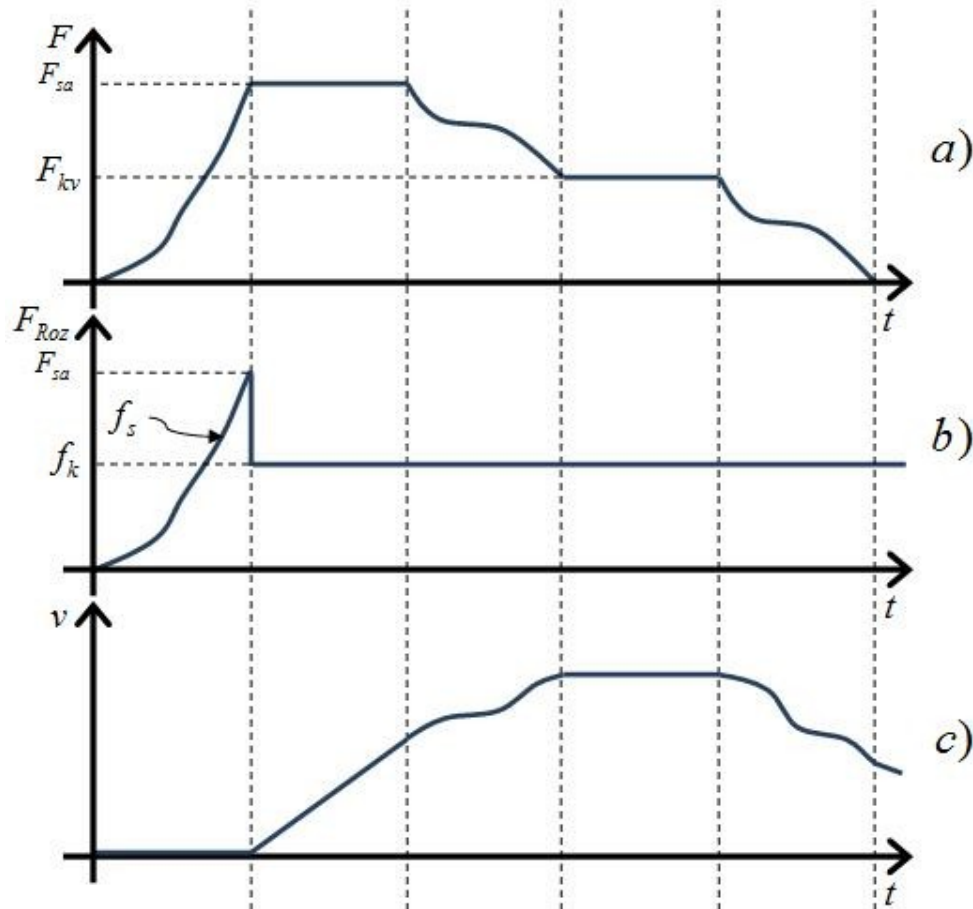


Figura 3: a) Posible evolución temporal para la fuerza F aplicada sobre el cubo. b) Evolución de la fuerza de rozamiento F_{Roz} al aplicar F . c) Evolución de la velocidad v del cubo al aplicar F .

Lo que hemos presentado a lo largo de esta sección es tan solo un **modelo** posible del comportamiento de la fuerza de rozamiento en superficies secas F_{Roz} . En particular, para velocidades pequeñas este modelo es bastante inexacto. Se **recomienda especialmente** la lectura de las referencias [Res93] y [Gil01].

3) Descripción general del sistema físico.

En la figura 4 se muestra el esquema básico con el que se trabajará en esta práctica.

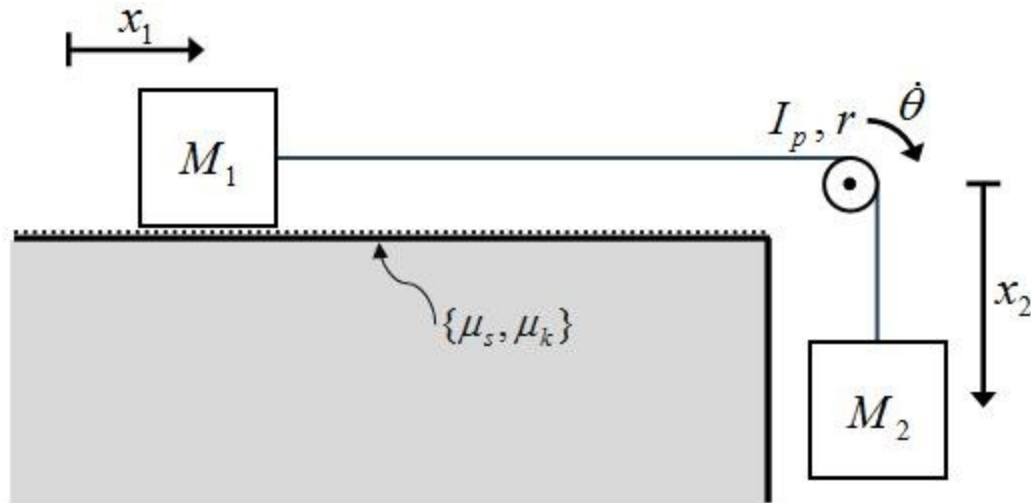


Figura 4: Esquema general del dispositivo a utilizar en la práctica.

M_1 y M_2 son las masas que el estudiante deberá variar a lo largo de la práctica para realizar los distintos ensayos, I_p y r son la inercia y el radio de la polea, respectivamente.

Pregunta 1: Considerando como válidas las hipótesis de hilo inextensible, rodadura sin deslizar en la polea y que la masa de la cuerda (m_c) es despreciable.

- ¿Cuántos grados de libertad tiene el sistema?
- Determine, para el caso dinámico, las aceleraciones del sistema utilizando las coordenadas $\{x_1, x_2, \theta\}$ que se muestran en la figura 4, en función de los parámetros $\{M_1, M_2, I_p, r, \mu_k\}$. Trabaje bajo las hipótesis de que la superficie de rozamiento es uniforme.
- Halle una expresión que permita determinar el coeficiente de rozamiento dinámico μ_k a partir de los parámetros $\{M_1, M_2, I_p, r\}$ y la aceleración de la masa M_1 (x_2).
- Simplifique dicha expresión para el caso en que m_p , la masa de la polea, sea despreciable respecto a la suma de M_1 y M_2 .

4) Medidas de Rozamiento estático

En la práctica vamos a determinar los coeficientes de rozamiento tanto estático como cinético para diferentes superficies de contacto. Cada grupo debe trabajar con *uno* de los métodos abajo.

4.A) Método 1

Para la determinación del coeficiente de rozamiento estático existen dos sistemas con los cuales se puede trabajar. El sistema 1 es aquél mostrado en la figura 4.

Pregunta 2: Bajo las mismas hipótesis de la Figura 4:

a. Dado un valor para la masa M_1 , determine para el caso estático el máximo valor que puede tomar la masa M_2 tal que el sistema se mantenga en reposo (en función de M_1 y μ_s). ¿Cómo se utilizaría este resultado para relevar el coeficiente de rozamiento estático μ_s ?

- I. Armamos el sistema de la Fig 4 toman un determinado valor (arbitrario) para la masa M1 e inicialmente, mantenemos el recipiente de la masa M2 vacío. Determinar M1 previamente usando la balanza
- II. El experimento consiste en aumentar el valor de la masa M2 de a poco y observar el instante exacto en que la masa M1 empieza su movimiento.
- III. Pesar la masa M2. A este valor de masa le llamaremos *masa crítica*.
- IV. Repita los pasos II y III al menos 3 veces y tome el promedio como medida de la masa M2.
- V. Usando que para la masa crítica vale la expresión $F_s = \mu_s N$, determine el coeficiente de rozamiento de la superficie utilizada.
- VI. Repita los pasos II – V para al menos 3 superficies diferentes

4.B) Método 2

El segundo método consiste en disponer de un plano inclinado, como el sistema de la Figura 5

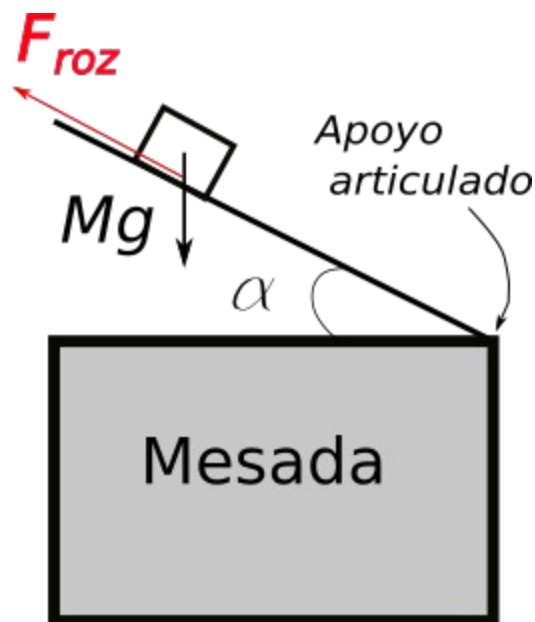


Figura 5: Plano inclinado para la determinación del coeficiente de rozamiento estático a través de la medida del ángulo α .

Pregunta 3: Considere el sistema de la Figura 5 en la situación estática. Encuentre una expresión para determinar el valor de la fuerza de rozamiento en función del ángulo de inclinación.

- I. Armamos el sistema presentado en la Fig. 5 tomando una caja con una masa M no muy grande, pero en principio arbitraria y el tablón con una determinada superficie de contacto.
- II. El experimento consiste en levantar muy de a poco una extremidad del tablón de manera a aumentar el ángulo α hasta que la masa empiece a moverse. Este ángulo se llama de *ángulo crítico*, el cual constituye el valor a ser medido.
- III. Para medir el ángulo se puede proceder de dos maneras: se puede posicionar un semicírculo en una posición adecuada sobre la mesa o se puede usar el sensor existente en los smartphones. Tomar nota de ángulo α en que el bloque justamente empieza a moverse.
- IV. Repita los pasos II y III al menos 3 veces y tome el promedio como medida del ángulo.
- V. Usando que para este ángulo vale la expresión $F_s = \mu_s N$, determine el coeficiente de rozamiento de la superficie utilizada.
- VI. Repita los pasos II – V para al menos 3 superficies diferentes

5) Medidas de coeficiente de rozamiento dinámica

5.A) Materiales

A continuación se muestra un listado de materiales que pueden ser utilizados para la realización de la práctica.

- Foto-detector: instrumento de medida que se utilizará para determinar la aceleración del sistema a partir del movimiento de la polea.
- *Hardware* y *software* de adquisición *Labtec*. Alimentación: 5V. Cables de datos necesarios.
- Plataforma. Hilo.
- Pesas, arena y recipientes.
- Elementos de medida auxiliares: balanza y nivel.
- Semicírculo
- Goniómetro del sensor del smartphone
- Distintas superficies de contacto.
- PC con tarjeta de adquisición y *software*.

5.B) Montaje y procedimiento

A partir de los materiales que se suministran, se recomienda armar el siguiente montaje para la realización de la práctica.

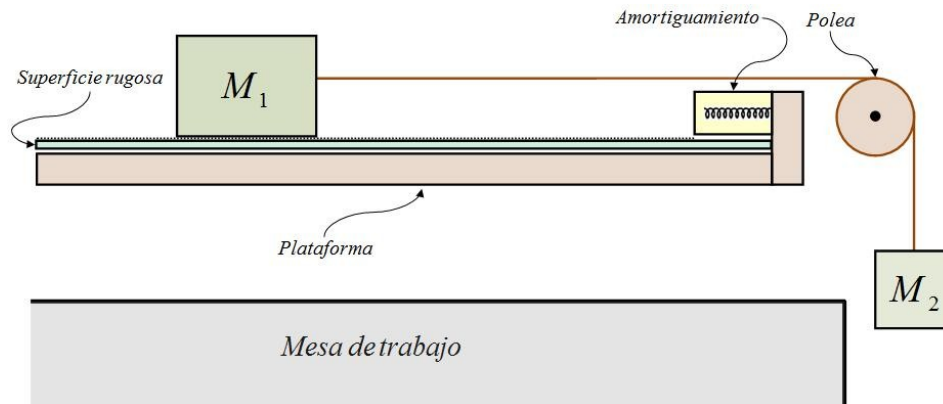


Figura 6: Montaje básico recomendado para la práctica.

Se proporcionan distintas superficies rugosas: madera *durabol* (se puede utilizar ambas caras), madera MDF (la propia plataforma) y papel de lija. Para medir los coeficientes de rozamiento de las distintas superficies de contacto el estudiante podrá variar los valores de M_1 y M_2 mediante pesas o arena según le parezca conveniente.

Para el relevamiento de datos correspondiente a la estimación de los coeficientes de rozamiento dinámico μ_K se recomienda:

1. Verifique la horizontabilidad de la plataforma en su montaje. Puede analizar si lo desea cómo afecta este aspecto en su estimación del coeficiente μ_K .
2. Verifique la estabilidad de su montaje. En particular, el montaje correspondiente al foto-detector.
3. No utilice valores de masas M_1 / M_2 tales que las aceleraciones del sistema sean muy grandes o muy bajas. Aceleraciones del orden de $\approx 0.8 \text{ m/s}^2$ son recomendadas.
4. No utilice valores de M_1 y M_2 mayores a 700 gr .
5. Utilice un tamaño de la cuerda tal que le permita aprovechar al máximo el tramo de la superficie de contacto.
6. La medida se realiza dejando que la masa M_2 caiga y permitiendo que el sensor tome los datos de posición y velocidad en función del tiempo.
7. A partir del gráfico de velocidad, seleccionar la zona de movimiento Uniformemente Acelerado y efectuar un ajuste lineal. La pendiente de esta curva representa la aceleración del sistema.
8. Realizar aproximadamente 5 medidas de la aceleración bajo una misma relación de masas M_1 / M_2 y superficie de rozamiento.

Pregunta 4: El momento en la polea, debido a la fuerza de rozamiento en la misma, existe

a. Si la polea es de buena calidad, ¿Es de esperar que sea despreciable frente a la demás fuerzas involucradas? Explícite frente a qué otros momentos podría ser despreciado el τ_{Roz} en la polea.

b. ¿Qué pequeños *tests* cualitativos se pueden hacer para saber si la polea cumple los supuestos de la parte a.?

c. ¿Cómo podría estimar el momento τ_{roz} en la polea? Sugiera una forma de relevarlo de forma cuantitativa para poder determinar de mejor manera si es despreciable o no.

Previa coordinación con el docente puede incluso agregar o sugerir configuraciones alternativas (nuevos montajes), otras superficies de contacto para probar o variantes de la práctica que incluyan los temas de estudio. Para esto se pueden utilizar los materiales proporcionados u otros materiales que el grupo de estudiantes proporcione.

6) Software para procesamiento de datos

Para el relevamiento de datos correspondiente a la determinación del coeficiente de rozamiento dinámico el estudiante deberá realizar varias ‘tiradas’ para una determinada relación de masas y una determinada superficie de rozamiento, y guardar los datos para posterior procesamiento. En cada tirada el estudiante obtendrá datos similares a los que se muestran en los siguientes gráficos.

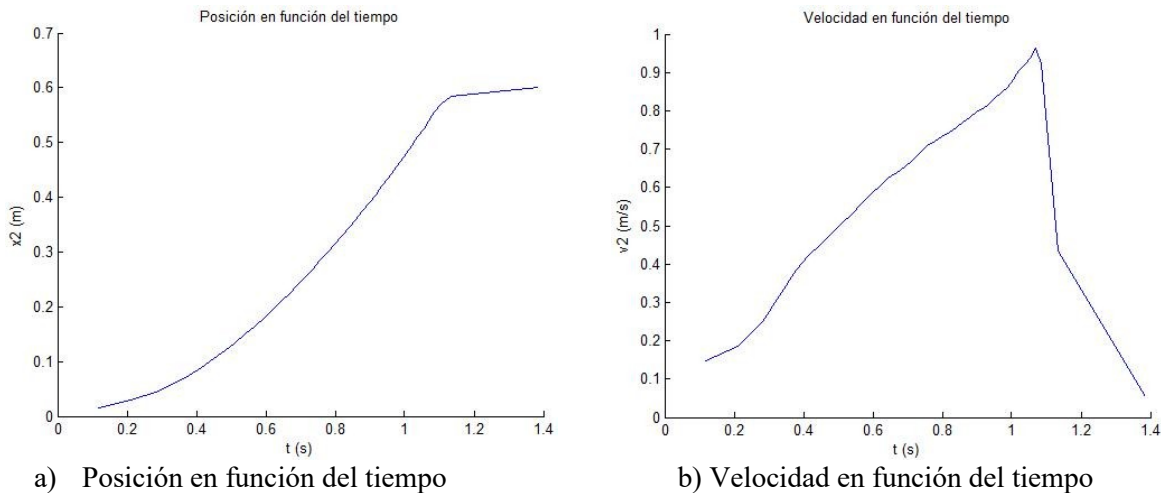


Figura 6: Ejemplo de datos obtenidos experimentalmente con una de las superficies disponibles

Pregunta 4: Las gráficas presentadas corresponden a la evolución temporal de la posición y la velocidad del sistema.

- ¿Qué relación tienen estas gráficas con la aceleración del sistema?
- ¿Qué métodos se le ocurren para, a partir de dichas muestras, obtener una estimación para la aceleración del sistema?
- No todas las muestras son representativas. ¿Cuáles son las muestras que no son útiles? ¿Qué se le ocurre para solucionar este problema?
- Usted realizará varias ‘tiradas’ donde tendrá datos del estilo mostrado. ¿Cómo hallará un valor estimado μ_K para el coeficiente de rozamiento dinámico μ_K en base a los datos de las tiradas?

7) Análisis de resultados.

En esta sección se enumeran los *ítems* que se espera que el estudiante sea capaz de discutir y resolver como resultado de esta práctica, los cuales deberán estar contenidos en la presentación final.

Informaciones básicas sobre la presentación

- Cada grupo debe preparar una presentación oral de 30 min, repartiendo el tiempo igualmente entre todos los integrantes del grupo. Se espera que todos los estudiantes contesten preguntas de los docentes y de los compañeros del curso.
- La presentación debe contener objetivos, fundamento teórico, descripción del experimento, análisis de los resultados, estimación de las incertidumbres, conclusiones y otros datos y características del experimento que a cada uno les parezca pertinente.
- Se valorará tanto el contenido como la claridad de la exposición

Puntos importantes a tener en cuenta al momento de preparar

- Correcto tratamiento de los datos relevados durante la práctica.
- Determinación del coeficiente de rozamiento estático y dinámico para las distintas superficies utilizadas.
- Exponer los conceptos y métodos de cálculo utilizados para las incertidumbres asociadas a las medidas y a los resultados finales.
- Discutir y concluir respecto a los siguientes aspectos:
 - Rozamiento en la polea.
 - Superficie de rozamiento no homogénea.
 - Masa de la cuerda y la polea. Cuerda inextensible.
 - ¿Dependen los coeficientes de rozamiento del área de contacto?

8) Bibliografía recomendada.

- [Bev69] P. R. Bevington, *Data reduction and error analysis for the physical sciences*, 1969.
- [Gil01] S. Gil, E. Rodríguez, *Física re-Creativa, Experimentos de Física usando nuevas tecnologías*. Primera edición 2001 (<http://www.fisicarecreativa.com>.)
- [Res93] R. Resnick, D. Halliday, K. S. Krane - *Física Vol. 1.*, 1996.
- [Tay97] Taylor, J.R., *An Introduction to Error Analysis*, California: University Science Books, 1997