

# Medición del tiempo de contacto cuando colisionan dos partículas.

G. G. Aguirre Varela, R. G. Pereyra, E. E. Avila y J. M. Caranti

Facultad de Matemática, Astronomía y Física - Universidad Nacional de Córdoba  
Ciudad Universitaria - (5010) Córdoba - Argentina  
e-mail: [aguirre@roble.fis.uncor.edu](mailto:aguirre@roble.fis.uncor.edu), [pereyra@roble.fis.uncor.edu](mailto:pereyra@roble.fis.uncor.edu)

En este trabajo se presenta un método eléctrico para la medición del tiempo de contacto durante colisiones entre dos partículas. Este método puede ser aplicado a diferentes materiales, en este trabajo se reportan resultados de mediciones cuando chocan dos partículas de hielo, cuando chocan una partícula de hielo contra una de metal y cuando chocan dos partículas metálicas. En las mediciones en las que se usaron partículas de hielo, la temperatura ambiente ( $T_a$ ) se varió entre  $-3$  y  $-20^\circ\text{C}$  y la velocidad de impacto entre  $0.5$  y  $2.5$  m/s. Se estudió la dependencia del tiempo de contacto con  $T_a$  y con la velocidad para los diferentes tipos de colisiones.

Pacs N° 13.5225

## 1 Introducción

El tiempo de contacto cuando dos partículas colisionan es de interés en el análisis de varios procesos físicos, por ejemplo el de adhesión y el de transferencia de carga. En el primer caso estaría relacionado con el número de ligaduras que se establecen, determinando de esta manera la fuerza de adherencia, mientras que en el segundo podría estar limitando en principio la cantidad de carga transferida en la colisión.

### Colisiones elásticas:

Si los cuerpos que impactan son relativamente pequeños, el tiempo de contacto está determinado predominantemente por los procesos que ocurren en la región próxima a la superficie de impacto. Así, bajo la hipótesis de que los cuerpos son pequeños y suponiendo una colisión elástica, el tiempo de contacto viene dado por la formulación Hertziana. Entonces, de acuerdo a las ecuaciones elásticas de Hertz el tiempo de contacto en la colisión entre una esfera de radio  $r$  y una superficie plana, viene dado por:

$$t_c = 2.94 \frac{Z_0}{V} \quad (1)$$

Donde  $Z_0$  es la distancia máxima de aplastamiento y  $V$  la velocidad a la que se produce el choque. Poniendo el valor de  $Z_0$  en términos de los coeficientes de elasticidad de los materiales que colisionan, de las presiones al máximo de la deformación y de las dimensiones de las partículas, se puede poner al tiempo de la forma:

$$t_c = \frac{2.74 m^{\frac{2}{5}}}{V^{\frac{1}{5}} r^{\frac{1}{5}}} \left( \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (2)$$

Donde  $m$  es la masa de la partícula que choca y  $r$  es el radio de la partícula,  $E_1$  y  $E_2$  son los coeficientes de elasticidad de cada uno de los materiales que colisionan

(Tabor<sup>(1)</sup>). Como se puede ver, la dependencia de  $t_c$  con la velocidad es muy suave.

### Colisiones plásticas:

Cuando las tensiones durante el impacto superan el valor límite elástico, se producen en el material deformaciones plásticas (permanentes).

En una colisión entre una esfera (de radio  $r$ , de masa  $m$  y totalmente indeformable) y una superficie plana, para la cual los procesos son plásticos, donde la presión durante todo el tiempo en el que las partículas están en contacto es  $P$  y el área en contacto es  $A_c$ , tenemos:

$$P A_c = -m a \quad (3)$$

con:

$$A_c = 2\pi r x \quad (4)$$

donde  $a$  es la aceleración de la esfera y  $x$  la longitud a la que penetró la partícula a un dado tiempo.

Escribiendo la ecuación diferencial correspondiente:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{2\pi r P}{m} x = 0 \quad (5)$$

Se puede obtener el tiempo característico:

$$t_c = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{m}{2\pi P r}} \quad (6)$$

Como se puede ver, en esta aproximación  $t_c$  es independiente de la velocidad del impacto. En el caso de colisiones en las que están involucradas partículas de hielo, propiedades tales como la presencia de la capa cuasi-líquida, podrían intervenir en el valor que tiene  $t_c$ . En este trabajo, se presentan mediciones de los tiempos de contacto en colisiones entre una partícula esférica y una superficie plana. Los experimentos se realizaron con una esfera de hielo y una placa de hielo.

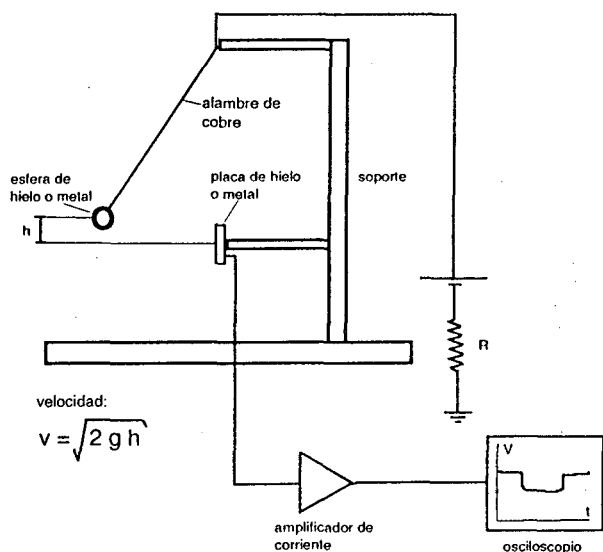


Figura 1: Esquema del equipo de medición.

con una esfera de acero y una placa de hielo, con una esfera de acero y una placa de acero. Se analiza la variación de los tiempos de contacto con la velocidad y con la temperatura ambiente, en los casos en los que se usó hielo.

## 2 Diseño experimental

La medición de los tiempos de contacto se realizó usando un circuito eléctrico, en el que uno de sus terminales era una esfera y el otro una placa plana. En el momento del contacto de la esfera con la placa plana, se cierra un circuito eléctrico y circula una corriente a través de la interfase formada. Esta se mide mediante un amplificador de corriente. La duración de esta corriente es lo que identificamos con el valor del tiempo de contacto y se lo mide con un osciloscopio digital. En la Figura 1 se muestra un esquema del aparato de medición. Las mediciones se realizaron dejando caer desde una altura conocida el péndulo formado con la esfera. La velocidad de la colisión se determinó midiendo la altura de la que se dejó caer la esfera, respecto a la altura de la zona de impacto.

### Colisiones acero-acero:

Estas mediciones se realizaron usando una esfera de acero de 4.5 mm de diámetro y como superficie plana se usó una de las bases de un cilindro de acero de 7 mm de diámetro y 14 mm de altura. Los experimentos se realizaron a temperatura ambiente.

### Mediciones con Hielo:

Este conjunto de mediciones se realizaron dentro de una cámara frigorífica de temperatura controlable.

### Hielo-hielo:

Para realizar estas mediciones se utilizaron placas de hielo policristalino de 8 a 12 mm de espesor y de 20 x 30 mm<sup>2</sup>. Las placas se pegaron sobre a una superficie

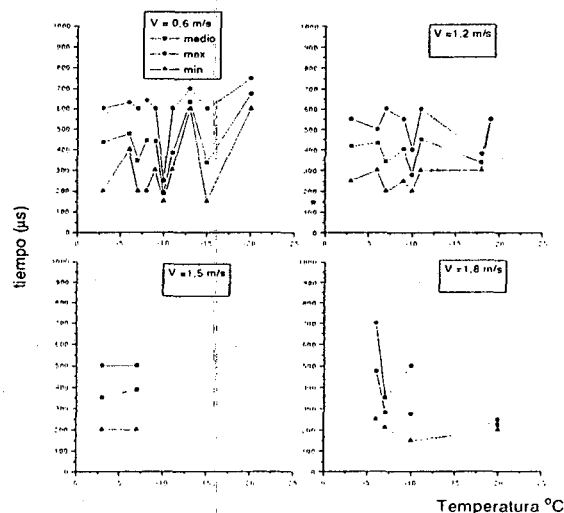


Figura 2: Resultados Hielo-hielo.

metálica. Las esferas de hielo utilizadas tenían entre 9 y 11 mm de diámetro. La esfera de hielo se colgó del alambre pendular mediante un gancho de alambre. Para fabricar la esfera de hielo y la placa se usó agua tridestilada.

### Hielo-metal:

Estas mediciones se realizaron usando una esfera de acero de 4.5 mm de diámetro y placas de hielo de características similares a las que se usaron en los experimentos descriptos anteriormente.

## 3 Resultados

### Hielo-hielo:

En la Figura 2 se muestran los valores de los tiempos medidos en las diferentes temperaturas y velocidades. Se grafican los valores máximos y mínimos observados y el valor medio de todos los valores correspondientes a primeras colisiones. Esto es, corresponden a eventos que consistían en un choque sobre una región de la placa en la que no había producido previamente ningún otro choque, o luego someter a la placa y a la esfera de hielo a un breve recocido.

Como se ve en la Figura 2, los valores de tiempo mínimo observados son en general próximos a 200 µs, independientemente del valor de temperatura y de velocidad. Este valor fluctuó menos a velocidades más altas.

Nota: Se observó que los tiempos aumentaban en algunos casos a valores de hasta 2000 µs, cuando se producía más de un impacto en la misma zona de la placa. Esto también ocurría cuando se producía algún tipo de fragmentación, ya sea de la esfera o de la placa.

Cuando la velocidad fue de 1.2 m/s o más, se observó que la mayoría de los impactos dejaban marcas

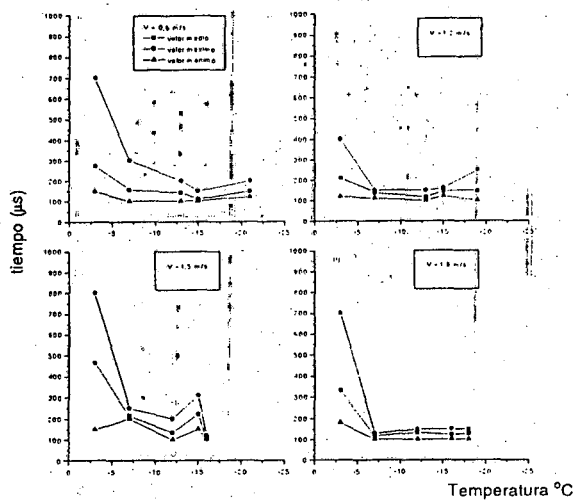


Figura 3: Resultados Hielo-metal.

en la placa de hielo o en la esfera de hielo.

*Hielo-metal:*

En la Figura 3 se muestran los resultados de las colisiones de la esfera de acero con la placa de hielo. Como se puede ver, los valores de tiempo mínimo que se observaron, fueron en general independientes de la temperatura y de la velocidad. El valor fluctuó entre los 110 y 140  $\mu s$ . Es de notar la tendencia que muestran los valores máximos; estos son apreciablemente más largos a alta temperatura.

*Metal-metal:*

La Figura 4 muestra los resultados para las mediciones realizadas con la esfera y el cilindro de acero. Estas mediciones se realizaron solamente a temperatura ambiente ( $25^{\circ}C$ ). Se puede ver una disminución del tiempo cuando aumenta la velocidad. Notar que estos valores tienen menor dispersión que los encontrados en las mediciones anteriores.

**4 Discusión y Observaciones**

Se calcularon los valores de tiempo de contacto en colisiones elásticas y se los comparó con los obtenidos en las colisiones metal-metal. Esto se muestra en la Figura 4. Como se puede ver los valores teóricos están en un buen acuerdo con los medidos. Lo que indica que las colisiones acero-acero tienen en este rango de velocidades un comportamiento elástico.

Por otro lado, en los resultados de las mediciones hielo-hielo, consideramos que el valor de tiempo mínimo observado es el correspondiente al tiempo de contacto. Ya que sería razonable esperar que sea el menos afectado por condiciones particulares de algunos eventos; por ejemplo, si la esfera tuvo algún tipo de rotación en el momento de la colisión podría

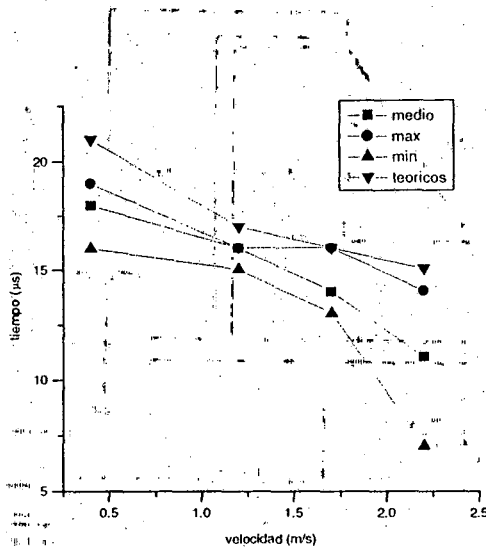


Figura 4: Resultados Metal-metal.

aumentar el tiempo de contacto.

Con estas consideraciones se puede concluir que en las colisiones hielo-hielo el tiempo de contacto no depende de la velocidad. Por lo que se estaría comportando como en un choque plástico.

A partir de estos resultados se puede calcular un valor para  $P$ . Así, considerando que la esfera de hielo tenía una masa de 0.5 g, un radio de 5 mm y que el tiempo de contacto es del orden de los 250  $\mu s$ , tenemos que  $P = 6.8 \cdot 10^6 \text{ Dyn cm}^{-2}$ . Este valor está en acuerdo con los valores de tensiones de deformación plástica medidos para el hielo (Hobbs (2)).

La gran dispersión de los valores de tiempo medidos podría deberse a las deformaciones que se estarían produciendo en cada colisión; esto es, podrían existir eventos en los que hubiese una gran formación de fracturas o rajaduras (eventos en los que el hielo quedó con marcas), mientras que en otros eventos las deformaciones podrían deberse principalmente al movimiento de dislocaciones (eventos en los que no había marcas en el hielo). Los resultados de hielo-metal sugieren que el material que controla los tiempos de contacto es el hielo. Esto estaría indicado por los valores de tiempo mínimo que se observaron. Es de notar que en este caso la dispersión de los valores de tiempo fue menor y que además depende notablemente de la temperatura. El hecho de que a temperaturas altas ( $-3^{\circ}C$ ) haya más dispersión que a bajas temperaturas (menores que  $-10^{\circ}C$ ) podría ser un indicativo de la presencia de propiedades diferentes, asociadas con la capa cuasi-líquida, tales como la adherencia.

## 5 Agradecimientos

Este trabajo fue realizado gracias al apoyo del CONICET, del CONICOR y de la SeCyT UNC. Queremos agradecer la colaboración prestada en el diseño y construcción de los equipos de medición como así también la colaboración durante las mediciones de José Barcelona.

## Referencias

- [1] Tabor D. The Hardness of Metals. Clarendon Press - Oxford, 1951.
- [2] Hobbs Peter V. Ice Physics. Clarendon Press - Oxford, 1974.

CEILAP  
CITEFA - CONICET  
ZUFRIATEGUI Y VARELA  
1603 - VILLA MARTELLI  
REPUBLICA ARGENTINA