

MOVIMIENTOS EN EL SENO DE UN FLUIDO. CAÍDA EN EL AGUA Y EN EL AIRE

IMPORTANCIA Y COMPLEJIDAD DE LOS MOVIMIENTOS EN EL SENO DE UN FLUIDO

Muchos movimientos tienen lugar en el seno de medios fluidos. Vivimos sumergidos en un mar de aire (la atmósfera terrestre) y rodeados de grandes masas de agua, por lo que son abundantes los ejemplos de movimientos de objetos que ocurren en el interior de alguno de estos medios.

La influencia del medio en estos movimientos es considerable. Las fuerzas de rozamiento entorpecen y modifican sensiblemente el movimiento y a menudo conviene intervenir para minimizar en lo posible estas influencias. Los estudios de aerodinámica, por ejemplo, diseñan perfiles afilados en vehículos, con objeto de facilitar su penetración en el aire. Otras veces, la influencia del medio se puede aprovechar positivamente, logrando algunas aplicaciones notables. Por ejemplo, el empuje puede ser aprovechado para hacer volar globos aerostáticos, la ingeniería aeronáutica aprovecha corrientes de aire generadas por helicópteros y por aviones para mantenerlos en vuelo, ..

En cualquier caso, un medio viscoso añade mucha complejidad al movimiento de objetos en su seno. Téngase en cuenta que el objeto siempre arrastra adheridas capas del medio y éstas afectan a capas próximas, pudiendo provocar movimientos turbulentos de dicho medio. Recíprocamente, los movimientos de capas del medio y su posible heterogeneidad afectan de forma considerable al movimiento de cualquier objeto en su seno. Todo ello complica enormemente el estudio de estos movimientos.



Para poner de manifiesto estas dificultades realizamos en clase el sencillo experimento de dejar caer al suelo un folio de papel. El movimiento resulta impredecible, prácticamente ingobernable y, en consecuencia, muy difícil de estudiar.

MOVIMIENTOS DE CAÍDA EN EL AGUA Y EN EL AIRE

Cuando la velocidad de penetración de un objeto en un medio es inferior a un cierto valor crítico, llamado número de Reynolds, la resistencia del medio se debe exclusivamente a fuerzas de rozamiento que se oponen al resbalamiento de unas capas de fluido sobre otras, a partir de una capa límite que queda adherida al cuerpo. En este caso, que es el más sencillo posible, se dice que el régimen es laminar y se ha comprobado experimentalmente que la resultante de las fuerzas de rozamiento es proporcional a una función de la velocidad. La superficie mínima que puede ofrecer un objeto en régimen laminar es la de una esfera. Entonces, la influencia de dicho objeto queda determinada por el radio de la esfera, R , y la expresión de la fuerza de rozamiento (proporcional al cuadrado de la velocidad) se llama ley de Stokes:

$$\mathbf{F}_r = -6\pi R\eta\mathbf{v} \quad \text{donde } \eta \text{ representa una propiedad del fluido que llamamos viscosidad.}$$

Un movimiento interesante en el seno de un fluido viscoso en régimen laminar es la caída de objetos de forma esférica en el aire y en el agua. Sobre la esfera que cae se ejercen dos fuerzas constantes de sentidos opuestos (el peso y el empuje), además de la fuerza de rozamiento. Según la fórmula de Stokes, la fuerza de rozamiento aumenta al aumentar la velocidad. Por tanto, ha de crecer paulatinamente hasta que llegue un momento en que el objeto deje de acelerar. De acuerdo con ello, la teoría y los experimentos confirman la existencia de una velocidad límite en la caída de objetos.

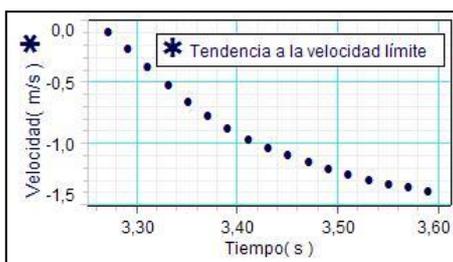
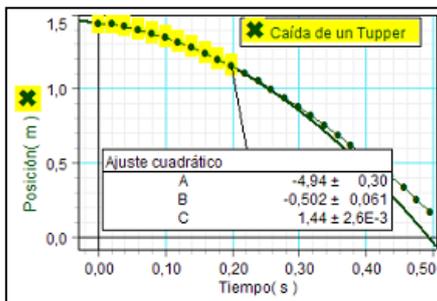
VELOCIDAD LÍMITE DE ALGUNOS OBJETOS	
OBJETO	VELOCIDAD (m/s)
Paracaidista con paracaídas cerrado	60
Pelota de tenis	42
Balón de baloncesto	20
Granizo	14
Pelota de ping-pong	9
Gota de lluvia	7
Paracaidista con paracaídas abierto	5

La tabla adjunta recoge valores de la velocidad límite de varios cuerpos en el aire. Estos valores ayudan a entender, por ejemplo, por qué es necesario usar paracaídas, lo peligroso que puede resultar el granizo (si tenemos en cuenta que la fuerza ejercida por una bola de granizo al chocar es igual a la disminución brusca de su impulso lineal, igual al producto de su masa por su velocidad) o que, a estos efectos, la lluvia es inofensiva.

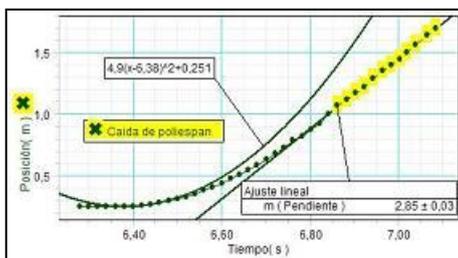
La dependencia que tiene la velocidad límite con la densidad del material y con su tamaño nos aclara también que Galileo no pudo realizar el famoso experimento de la Torre de Pisa. Los dos objetos lanzados desde lo alto de la torre tendrían distintas velocidades límite y habrían llegado al suelo en instantes diferentes.

EXPERIMENTOS Y SIMULACIONES

Nos referimos, en primer lugar, a los trabajos experimentales sobre movimientos de caída libre realizados en el laboratorio con la ayuda de sensores. En estos experimentos se obtienen valores de la aceleración de caída, siempre inferiores al valor que debería tener en ausencia de rozamiento. Además, los valores de la posición se van separando progresivamente de la curva que correspondería a una aceleración constante igual a 9.8m/s^2 . La figura adjunta corresponde a uno de estos estudios referido a la caída de un recipiente de plástico. Como se observa pone en evidencia de forma muy clara que la fuerza de rozamiento con el aire aumenta a medida que aumenta la velocidad de caída, lo que apoya el concepto de considerar una velocidad límite en dicha caída.



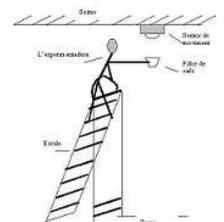
Para obtener dicha velocidad límite, realizamos en el laboratorio otro experimento con el sensor de posición en el que los grupos de estudiantes dejan caer un objeto de densidad pequeña en comparación con la densidad del aire. Los resultados experimentales muestran con mucha claridad el aumento paulatino de la fuerza de rozamiento al aumentar la velocidad del objeto, con el resultado de una tendencia hacia una velocidad límite.



la velocidad límite (uniforme).

El profesor Mikel Etxaniz de la Ikastola "Pasaia-Lezo" en Guipúzcoa, nos envió un estudio similar sobre este mismo concepto en la caída de un pedazo de Poliespan. Su trabajo aporta unos resultados excelentes, después de realizar un doble análisis del movimiento: el primero referido al tramo inicial de la caída (uniformemente acelerado) y el segundo sobre el tramo final, una vez alcanzada

En el IES "Sixto Marco" de Elche, la alumna de 4º ESO Silvia Martínez Salazar realizó en 2001 otro experimento para poner en evidencia la velocidad límite en la caída. Utilizó varios recursos TIC para



tomar y analizar las mediciones: calculadora gráfica, CBL y sensor de movimiento. Dejando caer filtros de café, pudo comprobar directamente en la gráfica de la evolución de la posición la transición que se produce en el entorno de la velocidad límite desde un movimiento uniformemente acelerado a un movimiento uniforme a esa velocidad límite. Este magnífico trabajo experimental fue dirigido por el profesor Vicent Soler.

Además de estudiar experimentalmente con ayuda de sensores la caída en la atmósfera con rozamiento, usamos el programa *Modellus* para simularla. En el modelo físico-matemático de la simulación incluimos una fuerza de resistencia,



que opone la atmósfera, proporcional al cuadrado de la velocidad del objeto. Además formalizamos el concepto de una velocidad límite escribiendo un coeficiente dependiente del peso del objeto y de esa velocidad límite. En estas condiciones se predice un movimiento de caída inicialmente acelerado (con una aceleración decreciente) y, una vez alcanzada la velocidad límite, uniforme. En la pantalla de la animación también se representan las gráficas de la evolución de las magnitudes cinemáticas y los valores de la fuerza y la aceleración del movimiento de caída.

La velocidad límite de caída de una persona en el aire es bastante elevada (del orden de 60m/s), desde luego excesiva para que llegue al suelo un ser humano con esa velocidad. Por eso son imprescindibles los paracaídas y, por nuestra parte, hemos incorporado uno en la animación anterior. Planteamos que en el momento de su apertura disminuya bruscamente la velocidad, lo que es equivalente a incorporar en el modelo físico-matemático una modificación repentina de la velocidad límite. Así, la simulación responde satisfactoriamente a todas las predicciones.



La velocidad límite de caída de una persona en el aire es bastante elevada (del orden de 60m/s), desde luego excesiva para que llegue al suelo un ser humano con esa velocidad. Por eso son imprescindibles los paracaídas y, por nuestra parte, hemos incorporado uno en la animación anterior. Planteamos que en el momento de su apertura disminuya bruscamente la velocidad, lo que es equivalente a incorporar en el modelo físico-matemático una modificación repentina de la velocidad límite. Así, la simulación responde satisfactoriamente a todas las predicciones.

Por otra parte, el concepto de velocidad límite nos permite comprobar que Galileo no pudo realizar el famoso experimento de la Torre de Pisa. Cuenta la leyenda que dejó caer dos bolas de masas muy diferentes (quizá de hierro y de madera) desde lo alto de la Torre y que algunos de sus discípulos comprobaron a pie de Torre la caída simultánea de ambas bolas. Lo cierto es que si hubiera realizado el experimento, la bola de hierro habría llegado al suelo bastante antes que la de madera. Entrando en el modelo físico-matemático de la animación se puede comprobar que, al considerar la fuerza de rozamiento del aire, la masa inercial y la masa gravitatoria no se cancelan y, como consecuencia, dos objetos de masas diferentes adquieren en estas circunstancias aceleraciones diferentes y tienen una velocidad límite diferente.



Por otra parte, el concepto de velocidad límite nos permite comprobar que Galileo no pudo realizar el famoso experimento de la Torre de Pisa. Cuenta la leyenda que dejó caer dos bolas de masas muy diferentes (quizá de hierro y de madera) desde lo alto de la Torre y que algunos de sus discípulos comprobaron a pie de Torre la caída simultánea de ambas bolas. Lo cierto es que si hubiera realizado el experimento, la bola de hierro habría llegado al suelo bastante antes que la de madera. Entrando en el modelo físico-matemático de la animación se puede comprobar que, al considerar la fuerza de rozamiento del aire, la masa inercial y la masa gravitatoria no se cancelan y, como consecuencia, dos objetos de masas diferentes adquieren en estas circunstancias aceleraciones diferentes y tienen una velocidad límite diferente.

Un movimiento interesante de caída dentro de fluidos es el de un cuerpo sumergido en agua. En este caso, es lógico esperar que se alcance enseguida la velocidad límite. La densidad de agua (mucho mayor que la del aire) hace al empuje ser muy apreciable. Además, la fuerza de rozamiento es también mucho mayor que en el aire. En consecuencia, se prevé que el descenso del objeto corresponda enseguida a un movimiento uniforme a esa velocidad.

Para comprobar estas hipótesis realizamos un experimento que estudia el movimiento de caída de una esferita dentro de una probeta llena de agua. La imagen de la izquierda corresponde a un análisis experimental realizado en el Laboratorio y la de la derecha a otro realizado en el concurso Ciencia en Acción 11, donde obtuvimos Mención de Honor del Jurado. El

experimento utiliza una cámara para filmar el movimiento y el programa *Modellus* para simularlo y analizar la correspondencia entre el movimiento real filmado y un movimiento uniforme, simulado.



Los experimentos, materiales y referencias citadas en este documento están disponibles en la página dedicada al estudio de movimientos en el seno de un fluido (<http://intercentres.edu.gva.es/iesleonardodavinci/Fisica/Rozamiento-fluido/rozamiento-fluidos.htm>) dentro de la web del Departamento de Física y Química del IES "Leonardo Da Vinci" de Alicante (<http://intercentres.edu.gva.es/iesleonardodavinci/Fisica/fisica.htm>)