

TALLER Y LABORATORIO

Experimento casero

Los líquidos reales: la viscosidad del aceite de oliva

INTRODUCCIÓN

En la mayoría de los problemas que se planteaban en hidrodinámica en el siglo XVIII se consideraba que los líquidos eran ideales: *incompresibles* (principios de Pascal y de Arquímedes), *sin viscosidad* (teorema de Bernouilli), *sin tensión superficial* (experimento de Torricelli), ... Es lo que un amigo del Premio Nobel de Física Richard Feynman denominaba irónicamente "los problemas del agua seca". Sin embargo, se conocían ya algunos fenómenos que resultaban inexplicables si se suponían los fluidos ideales (fenómenos de capilaridad, movimientos convectivos, ...), algunos de los cuales ya habían sido señalados por Newton en las páginas finales de su libro de Óptica. Estos fenómenos ponían de manifiesto la existencia de propiedades tales como la viscosidad y la tensión superficial, que desempeñaban un papel muy importante en su comportamiento. En lo que sigue, vamos a describir un experimento sencillo que tiene relación con la viscosidad.

VISCOSIDAD

Si se le saca el émbolo a dos jeringas aforadas iguales y a continuación se llenan una con agua y la otra con aceite obturando su agujero con el dedo, se constata que, cuando se retira éste, tarda mucho más en vaciarse la jeringa que contiene aceite que la que contiene agua¹. Esta diferencia en el fluir tiene que ver con la diferencia en su viscosidad, que es la dificultad que experimentan las moléculas de un fluido para deslizarse y que actúa como una especie de rozamiento que se opone a su movimiento. Esta resistencia es debida a las interacciones eléctricas entre sus moléculas, que son fuerzas atractivas y repulsivas como ya señalaba Newton en su obra citada más arriba.

Este rozamiento depende de la temperatura y viene determinado por un parámetro, η , propio de cada fluido. En el caso del aire, por ejemplo, fue estudiado experimentalmente por el propio Maxwell en el siglo XIX y, como dato interesante, cabe destacar que la viscosidad del aire desempeña un papel muy importante en el experimento de Millikan de la gota de aceite, con el que determinó la carga del electrón (véase 100cias@uned, nº2 (1999), págs. 104-109).

EXPERIMENTO DE STOKES: DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD

Para determinar el valor de la viscosidad de un líquido muy viscoso (como la glicerina, por ejemplo) se utiliza, en el laboratorio de estudiantes, un método ideado por Stokes. Consiste en analizar el movimiento de un cuerpo incompresible de forma esférica en el seno de un líquido. Según la teoría de Stokes, si el cuerpo se mueve a la velocidad v experimenta una fuerza de frenado F_η , debida a la viscosidad, que viene dada por la siguiente expresión:

$$F_\eta = 6\pi\eta r v$$

donde r es el radio de la esfera. En el experimento más clásico se utiliza una bolita de acero que desciende sumergida en la glicerina contenida en un tubo transparente vertical. Se observa experimentalmente que la velocidad v de caída de la bola es prácticamente constante. Esta velocidad está directamente relacionada con la viscosidad del líquido.

Estudio del movimiento de la bola

Supongamos una esfera de radio r y de densidad ρ_b sumergida en un fluido de densidad ρ . Puede tratarse de una bola de acero en la glicerina, de una gota de agua en el aire (lluvia), de una gota de aceite también en el aire (experimento de Millikan), o, con movimiento ascendente, de una burbuja de aire en un vaso de cerveza o en una copa de cava. Para simplificar el razonamiento vamos a suponer que la esfera ejecuta un movimiento vertical (ascendente o descendente) y, en consecuencia, utilizaremos solamente la coordenada z , con el origen en el fondo del recipiente que contiene el fluido (véase la Figura 1).

Por el hecho de estar sumergida, la esfera sufre el empuje F_A de Arquímedes hacia arriba, que se opone a su peso $m_b g$. Si, además, se mueve a la velocidad v (hacia arriba o hacia abajo), experimenta la fuerza F_η de frenado viscoso que se opone a su avance. En definitiva, la ecuación diferencial que rige su movimiento (segunda ley de Newton) es la siguiente:

$$m_b \frac{d^2 z}{dt^2} = -m_b g + m g - 6\pi\eta r \frac{dz}{dt}$$

donde m es la masa de fluido desalojada por la esfera.

¹Véase el experimento nº16 del libro *Experimentos caseros para un curso de Física General*, Cuadernos de la uned, nº130 (1994).

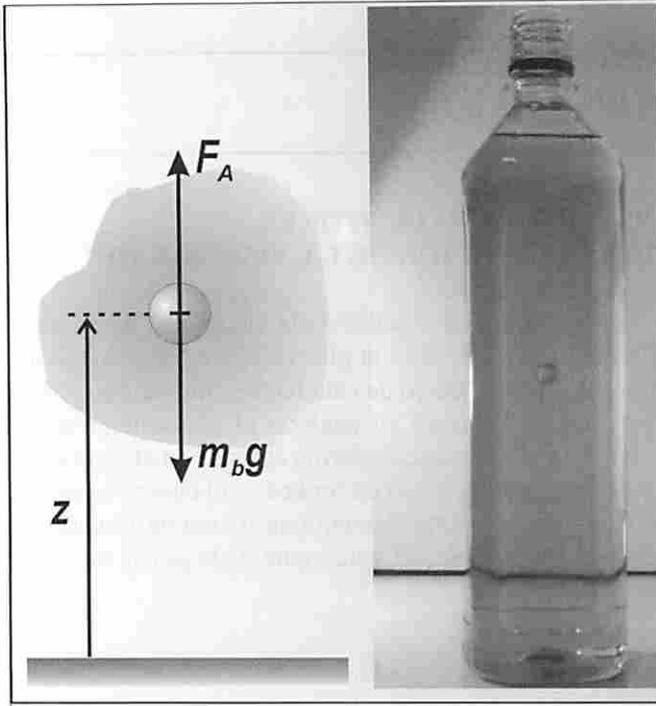


Figura 1. Esquema del experimento.

Esta ecuación se resuelve fácilmente y las fórmulas que proporcionan $z(t)$ y $v(t)$ son las siguientes:

$$z(t) = h + \beta(1 + e^{-\alpha t} - \alpha t)$$

$$v(t) = -\alpha t(1 - e^{-\alpha t})$$

donde h es la altura a la que se encuentra la esfera en reposo ($v = 0$) en el instante $t = 0$, y donde los parámetros α y β tienen la siguiente expresión:

$$\alpha = \frac{9}{2} \frac{\eta}{r^2 \rho_b} ; \quad \beta = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_b}\right) \frac{g}{\alpha^2}$$

El parámetro β es el que define el sentido del movimiento: si la densidad ρ_b de la esfera es mayor que la densidad ρ del líquido, β es positivo y la esfera descende ($v < 0$); inversamente, si ρ_b es menor que ρ , el movimiento es ascendente ($v > 0$); cuando $\rho_b = \rho$, la esfera no se mueve. Si las densidades son próximas, el movimiento (hacia arriba o hacia abajo) resulta lento y es entonces posible realizarlo en casa.

El parámetro α es directamente proporcional a la viscosidad η e inversamente proporcional al cuadrado del radio de la esfera y a la densidad del material de que ésta está constituida. Si α es muy grande (líquido muy viscoso o esfera de radio muy pequeño y poco densa) el término exponencial disminuye muy rápidamente y el

movimiento es prácticamente uniforme. Su velocidad es, en este caso, constante:

$$v = -\alpha\beta = -\frac{2}{9} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_b}\right) g \frac{\rho_b}{\eta} r^2$$

y la medida de v nos permite determinar η .

Experimento de Stokes en casa

Se puede realizar el experimento de Stokes utilizando aceite de oliva, que tiene una viscosidad suficientemente grande para que se pueda alcanzar rápidamente el régimen de velocidad constante, siempre que el radio de la esfera sea tal que la diferencia entre el empuje de Arquímedes y su peso sea comparable a la fuerza de viscosidad. Esto último no es posible si se utiliza una bola de acero, ya que la densidad ρ_b de éste es diez veces superior a la del aceite y el descenso se hace muy rápidamente². Sin embargo, se puede utilizar una gota de agua, que no se mezcla con el aceite cuando las velocidades son pequeñas y que tarda unos quince segundos en descender desde la parte superior de una botella hasta su fondo.

El material necesario para llevar a cabo el experimento es el siguiente:

- Una botella de litro de aceite de oliva, con las paredes planas, lisas y transparentes.
- Dos cuentagotas.
- Un cronómetro.
- Una jeringa de plástico aforada de una capacidad de 5 ó 10 cm³.

El experimento puede ser mejorado si se dispone, además, de una cámara fotográfica digital y de un ordenador con software de tratamiento de imágenes y programa de gráficos.

El modo de operar puede ser el siguiente:

- Se practican tres trazos horizontales con un rotulador en la cara frontal de la botella: uno en la parte superior, otro en el centro y otro en la parte inferior³.
- Se deposita con cuidado una gota de agua sobre la superficie del aceite con uno de los cuentagotas. En general, aunque la densidad del agua es algo superior a la del aceite, el peso de la gota que produce un cuentagotas de los que se adquieren en las farmacias es insuficiente para romper la tensión superficial del aceite y penetrar en su interior. Para conseguirlo se depositan gotas de aceite sobre la gota de agua con el otro cuentagotas⁴. Nada más penetrar en el aceite, la gota inicia su descenso.

²El tiempo que tarda en descender 20 cm una bola de acero de 2 mm de radio es de medio segundo.

³Este es el procedimiento que utilizó Millikan en su famoso experimento para estudiar la constancia de la velocidad en la caída de una gota determinada.

⁴Se puede hacer un ensayo introduciendo el cuentagotas de agua en el aceite y formando la gota directamente en el interior, pero entonces la gota que se forma es de un radio superior al de la que se forma en el aire y desciende mucho más deprisa, lo que dificulta la medida de la velocidad.

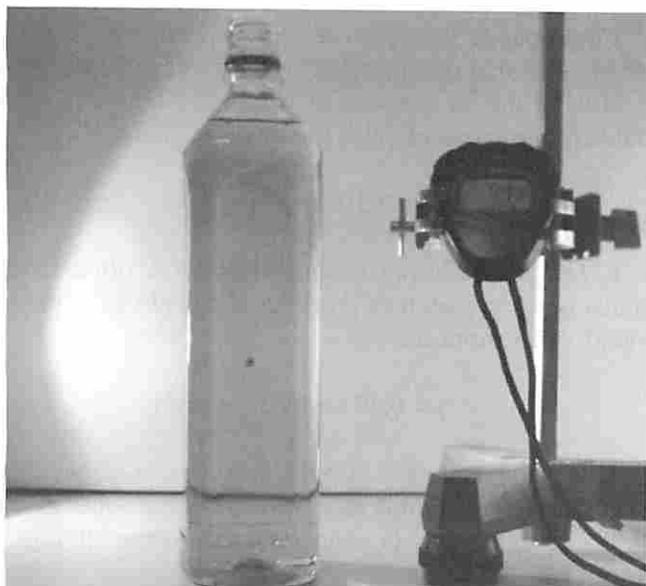


Figura 2. Instantánea de una gota de agua descendiendo.

- Se anotan los tiempos que tarda la gota de agua en pasar del trazo superior al trazo intermedio y al trazo final.
- Se comprueba que la velocidad es constante en todo el recorrido y se calcula ésta.

Si se dispone de la cámara fotográfica se toman varias instantáneas en las que aparezcan la gota y el cronómetro. De esta manera se puede determinar simultáneamente el instante de tiempo y la posición de la gota, con lo que se hace el estudio del movimiento con mayor comodidad.

Resultados obtenidos

a) *Constancia de la velocidad v*: En la Figura 2 se muestra una instantánea de la gota de agua descendiendo en el aceite.

A partir de cinco instantáneas similares se ha obtenido la gráfica $z(t)$ que se muestra en la Figura 3. Como puede verse, la coordenada z varía linealmente con el tiempo⁵; es decir, la velocidad es constante y, en este caso, vale $v = -0,0103 \text{ ms}^{-1}$, con un error inferior al 1%.

Para determinar η a partir de v necesitamos conocer la densidad ρ del aceite y el radio de la gota de agua:

$$\eta = -\frac{2}{9} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_b} \right) g \frac{\rho_b}{v} r^2$$

b) *Determinación de ρ* : Conocida la densidad del agua, la densidad del aceite de oliva puede ser determinada con una balanza de tipo casero como la que describimos a continuación (véase Figura 4): sobre un cilindro de plástico (o de madera) de unos 2 cm de diámetro se coloca una regla en cuyos extremos se han adosado dos

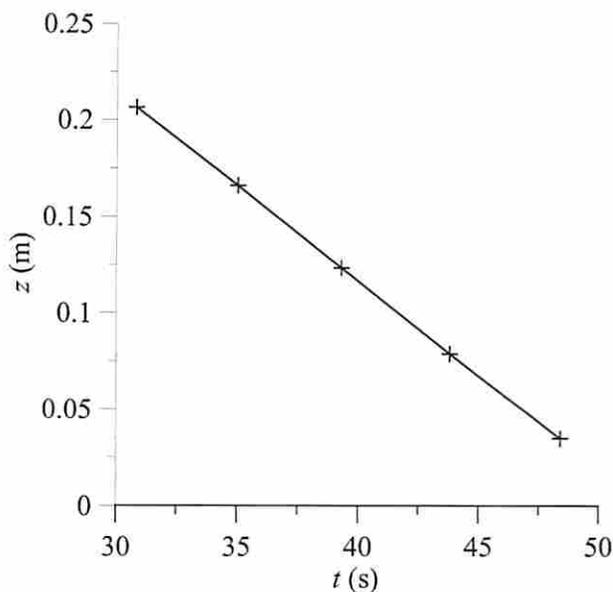


Figura 3. Gráfica de la posición frente al tiempo en el descenso de una gota de agua sumergida en aceite.

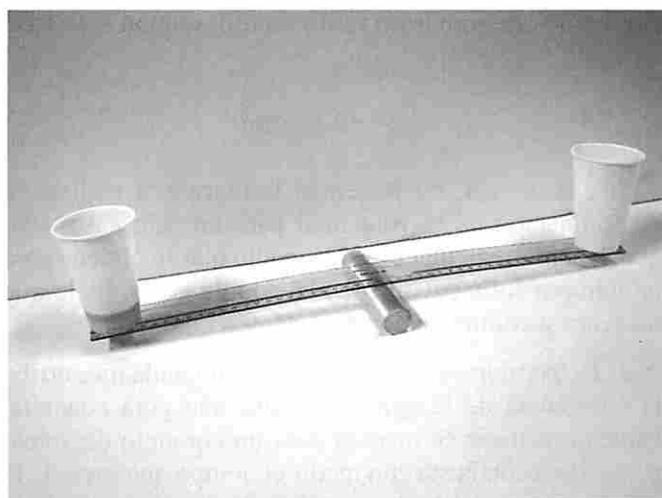


Figura 4. Balanza casera para determinar la densidad del aceite.

vasos ligeros a modo de platillos (los vasos de plástico son muy apropiados).

En uno de los vasos se vierten 30 cm³ de aceite utilizando para medirlos la jeringa aforada. En el otro se añade agua con la misma jeringa hasta que la balanza quede equilibrada. En estas condiciones, el cociente entre los volúmenes permite determinar la relación ρ/ρ_b con suficiente precisión. En el caso presente el resultado ha sido el siguiente:

$$\frac{\rho}{\rho_b} = 0,92 \pm 0,01$$

es decir, se conoce la densidad del aceite empleado con un error del 1%.

⁵Para realizar la operación es conveniente poner en marcha el cronómetro antes de depositar la gota de agua en la superficie del aceite. Por esta razón el origen de tiempos para el movimiento no coincide con el cero del cronómetro, pero este dato no es importante.

c) *Determinación de r*: Con ayuda del cuentagotas se determina el número de gotas de agua necesario para obtener un volumen concreto, que puede ser medido con la jeringa aforada. De esta manera podemos conocer el volumen de la gota y, a partir de él, su radio r . En la Tabla I se indica un ejemplo de los resultados obtenidos.

Tabla I: *Determinación del radio de la gota*

V (cm ³)	Nº de gotas	r (mm)
5	91	2,36
7	107	2,50
7	107	2,50
8	137	2,41
8	146	2,36
9	158	2,39

Al realizar la operación se constata que hay una cierta dispersión en el valor del radio de la gota, que alcanza en algunos casos hasta el 6%. En consecuencia, hemos de tomar un radio medio, que en este caso vale:

$$r = 2,42 \text{ mm}$$

Si esto es así, no podemos limitarnos a realizar la determinación de la velocidad para un solo caso, sino que debemos calcular el valor medio que se obtiene para un número suficientemente elevado de gotas. Es lo que hacemos a continuación.

d) *Dispersión en la velocidad*: Establecida más arriba la constancia de la velocidad para una gota concreta, vamos a realizar su medida para un conjunto de veinte gotas. Para ello basta con medir el tiempo que invierte la gota en pasar del trazo superior al trazo inferior de la botella. En la Figura 5 se indica el diagrama de barras de la dispersión de la velocidad.

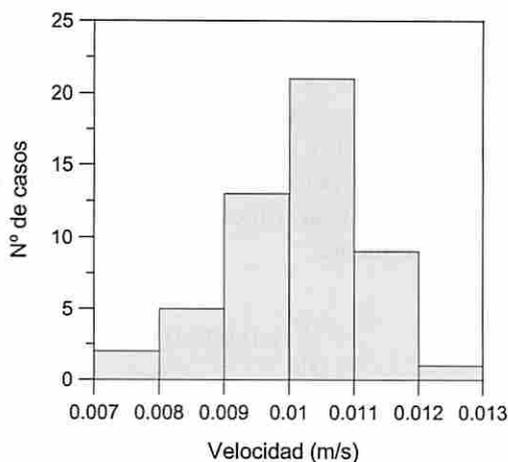


Figura 5. Diagrama de dispersión de la velocidad.

Como puede verse, existe una dispersión en el valor de la velocidad que presenta desviaciones con respecto a su valor medio cercanas al 10%. El análisis de estos datos proporciona el valor promedio siguiente:

$$v = -0,010 \text{ m s}^{-1} (\pm 10\%)$$

e) *Cálculo de la viscosidad del aceite de oliva*: Obtenidos ρ , r y v , podemos proceder al cálculo de la viscosidad, que resulta ser:

$$\eta = 0,10 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1} (\pm 10\%)$$

Este valor coincide razonablemente con el que proporcionan los laboratorios profesionales⁶ que es de $0,084 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ para la temperatura ambiente (20°C).

f) *Experimento complementario*: Hemos señalado más arriba que cuando se introduce el cuentagotas directamente en el aceite la gota que se obtiene es mayor que cuando está en el aire. En la Figura 6 se ha hecho un fotomontaje donde se puede comparar el tamaño de las dos gotas y puede constatarse que la obtenida en aceite es mayor.

Si nos fijamos en el proceso de formación de la gota, ésta se forma cuando su peso hace que se rompa el cuello de agua que la mantiene unida al cuentagotas. La fuerza de unión (*fuerza de cohesión*) depende de las atracciones y repulsiones entre las moléculas de agua, de vidrio y de aire que intervienen. La fuerza que la gota ejerce hacia abajo es, en el caso del aire, prácticamente solo debida a su peso, ya que el empuje de Arquímedes debido al aire es muy pequeño.

En el caso de que la gota se forme en el interior del aceite, las fuerzas que la unen al cuentagotas dependen ahora de las moléculas de este líquido, que substituyen a las del aire en su influencia, lo que puede hacer cambiar la fuerza de cohesión. Por otra parte, el empuje de Arquímedes debido al desplazamiento del aceite es ahora muy importante, por lo que la fuerza que tira hacia abajo de la gota es mucho menor.

No conocemos cómo actúa la fuerza de cohesión en ambos casos, pero podemos suponer que, en primera aproximación, es la misma. En estas condiciones podemos estimar la razón entre los radios de las gotas producidas en el aire y en el aceite. Para ello bastaría con igualar las fuerzas que tiran hacia abajo de las gotas en cada caso:

$$\frac{4}{3}\pi\rho_b r_1^3 g = \frac{4}{3}\pi(\rho_b - \rho)r_2^3 g$$

donde r_1 y r_2 son los radios de las gotas cuando se forman en el aire y en el aceite, respectivamente. Utilizando los correspondientes valores de las densidades, la relación entre sus radios resulta ser:

$$r_2 \cong 2,32 r_1$$

⁶Handbook of Chemistry and Physics, 58th edición, CRC Press, Ohio, Cleveland (1977).

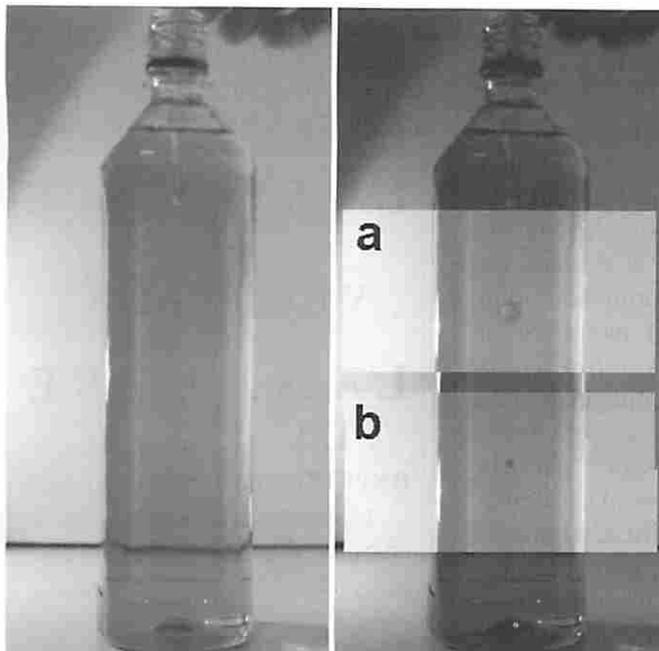


Figura 6. Comparación entre las gotas.

Experimentalmente se puede hacer una comparación cuantitativa entre sus radios calculando r_2 a partir de la velocidad de caída y del valor de la viscosidad obtenido

precedentemente. El resultado es $r_2 = 3,8 \text{ mm}$. Si comparamos con el radio medio de la gota obtenida en el aire observamos que, aunque $r_2 > r_1$, su cociente $r_2/r_1 = 1,57$ es inferior al esperado $r_2/r_1 = 2,32$. La discrepancia puede ser debida a que la fuerza de cohesión en ambos medios no es la misma, como habíamos supuesto en primera aproximación, sino que es más débil cuando interviene el aceite.

CONCLUSIONES

Con este ejemplo hemos podido comprobar que, aunque se disponga de escasos recursos, los experimentos caseros pueden ser utilizados para desarrollar en el estudiante hábitos de investigación tales como la búsqueda de soluciones a los problemas experimentales y, sobre todo, la obtención de las medidas con el menor margen de error posible.

Finalmente, queremos hacer notar que la viscosidad desempeña un papel importante no solo en algunos problemas de Física sino también en muchos otros procesos biológicos, químicos, industriales⁷...

Manuel Yuste Llandres y
Juan Pedro Sánchez Fernández
Dpto. de Física de los Materiales

Experimento histórico

La composición del aire: los primeros datos científicos

INTRODUCCIÓN

En el largo camino que hubo que recorrer para lograr un conocimiento científico del mundo que rodea al hombre, los dos mayores problemas a solventar fueron si las materias que cotidianamente le rodeaban eran puras o se trataba de mezclas, y cuál era la explicación de la combustión o de la respiración. Con respecto al primer problema, en las religiones primitivas fue constante la creencia en cuatro elementos primordiales que configuran la materia física que rodea al hombre. En el relato del Génesis, al cuarto día de la Creación, los elementos aire, tie-

rra y agua ya habían sido creados, y el fuego estaba implícito en las luminarias del cielo. Sin embargo, es la filosofía griega la que organiza intelectualmente la materia que emerge del Caos. La pregunta: ¿cuál es el principio vital que actúa sobre la materia primordial?, se intenta responder recurriendo a alguno de los cuatro elementos o a lo indefinido, al *apeirón* de Anaximandro de Mileto.

Su discípulo, Anaxímenes de Mileto (577? - 526? a.C.), define que el principio vital es el aire (el *pneuma*, el aliento), que está en la Naturaleza y es invisible. Para él el Universo está hecho de aire y está sometido a la evaporación y rarefacción que produce calor (fuego) y a la condensación que produce el frío (agua), por lo que concluyó equivocadamente que calor y frío no son causas sino efectos. El fuego es aire en condiciones especiales y las piedras son aire que se ha condensado poco a poco.

Es Empédocles de Agrigento (492-430 a.C.) quien describe la existencia del aire como algo que tiene masa y organiza los cuatro elementos preconizados por Thales (agua), Anaxímenes (aire), Heráclito (fuego como imagen de un mundo cambiante) y Jenófanes (tierra) en la tetrasomía. En un fragmento que se conserva de su obra *Perí físeos* (*De la Naturaleza*) escribe:

*Cuatro son las raíces de las cosas
Zeus resplandeciente, Hera avivadora
Aidoneo y Nesti que de lágrimas
destila la fuente inmortal.*

La explicación es simple: las raíces de las cosas son fuego (el rayo de Zeus), aire (los celos de Hera), tierra (Aidoneo, el padre de Perséfone la esposa de Hades) y agua (la ninfa siciliana Nesti). En la mezcla de los elementos actúan dos principios activos: Eros y Anteros (amor y discordia) que complican la teoría

⁷Véase, por ejemplo, "Centrifugación de la pasta de aceituna para la obtención de aceite de oliva virgen". F. Espinosa Lozano. Alimentación, junio de 2000, págs. 71-78.