

TALLER Y LABORATORIO

DETERMINACION DE LAS DENSIDADES: Una sencilla práctica para la iniciación en la metodología experimental

FUERTES J.F. y ALONSO, M.¹

Departamento de Física - Universidad de Oviedo - 33007, Oviedo

RESUMEN

A través de la medida de densidades de diferentes cuerpos, se intenta en este trabajo, el acercamiento al complejo y laborioso protocolo de la metodología experimental. Los conceptos de la medida directa o indirecta, calibración y contrastación de aparatos, organización y gestión de datos, rango de precisión y validez, etc., son puestos de manifiesto mediante esta sencilla realización práctica.

SUMMARY

Laboratory tasks for introductory physics courses must be focused to a wide and laborious procedure rather than to mimic realizations. The necessity to take first rude measurements, to analyze and discuss these results, to make rough graphs, to try some new and better conditions, etc., is discussed in this work by means of a single experiment: the measurement of the density for some bodies using both an hydrostatic and a geometrical method.

I. INTRODUCCION

La importancia y necesidad de las prácticas en la enseñanza de las ciencias está sobradamente demostrada, tanto por lo que se refiere a las tareas de laboratorio como por los problemas (Ej: Kerr, 1963; Gil et al., 1990, 91, 1983; Colombo et al., 1991). No cabe duda de que, para la completa asimilación de los conceptos teóricos y la apreciación de la esencia que se encuentra tras los enunciados de los principios y leyes, resulta de una inestimable ayuda el hecho de que el alumno se enfrente directamente a la comprobación de los mismos. En tales casos se puede acercar más a la esencia del conocimiento, pues se deben dar las condiciones que le permiten

relacionar los nuevos datos con lo que ya conoce, de forma que sea más sencillo construir sus propios esquemas interpretativos (Ausubel, 1968; Colombo et al., 1991; Bascones, 1989).

Es preciso que el alumno observe, experimente con la Naturaleza, demostrando, él mismo, lo que ha leído o ha escuchado, familiarizándose con el proceso científico habitual, que no consiste únicamente en asimilar planteamientos teóricos, sino que requiere una estrecha relación con los acontecimientos de la Naturaleza. En caso contrario se corre el riesgo de desligar las ciencias de su elemento de estudio, que abarca toda la realidad del entorno, y trasladarlas a un mundo imaginario, platónico, apartado totalmente

¹ Alumno de 2^º de Físicas.

de la realidad. De esta forma, mediante la "autoverificación", el alumno deja de lado el aprendizaje memorístico para avanzar a través del aprendizaje significativo (Novak, 1987) representado en este caso por la construcción de conocimientos y conceptos nuevos. Los estudios sobre la cuestión son extensos, las propuestas también; pero, los resultados, año tras año, para alumnos que llegan a la Universidad, no se perciben. Parece conveniente, por tanto, un intercambio de información y experiencias entre las aportaciones de la Pedagogía para la Enseñanza Secundaria y el "trabajo de campo", la experiencia directa, en el primer año de Universidad.

Quizá porque la insistencia en la realización práctica termina en una mala aplicación, se esconden otros peligros tras estos trabajos. Entre ellos, como destaca Tasker (1981), se encuentran el que los alumnos perciban objetivos diferentes a los percibidos por el profesor, o que los alumnos consideran las lecciones como hechos aislados, mientras los profesores las relacionan como una serie de experiencias, etc. Dichas dicotomías pudieran verse acentuadas por el propio planteamiento de las prácticas o los problemas, pues no se enfocan prioritariamente a la captación y comprensión de los conceptos adquiridos durante las clases teóricas, de forma que se complementen mutuamente. Pero este es el eterno problema presente entre todas las manifestaciones de la cultura humana: la diferencia entre los hechos reales, los acontecimientos que rodean al ser humano, y la idealización que de ellos se abstrae para su mejor comprensión. Este enfrentamiento dialéctico general se describe con claridad en nuestro libro más universal -El Quijote- y, en un tiempo en el que la ciencia se hace cada vez más dura, acaso convenga regresar a estas aportaciones (Fuertes, 1994b). Es más patente en la Enseñanza Universitaria en la que, por mor de la elevación del nivel, se hace más virtual, más abstracto el procedimiento y, en consecuencia, mucho más desconectado de la realidad todo el aprendizaje; incluso -y acaso con mayor diferencia- en las prácticas y los problemas que están llamados en principio a servir de eslabón de enlace.

Con demasiada frecuencia las prácticas se reducen al manejo de complicados aparatos que impiden

al alumno familiarizarse con el fenómeno a estudiar, y se convierten en el foco principal de su atención. De esta forma, las experiencias prácticas se reducen a aprender a manejar instrumentos y a tomar datos con dichos instrumentos, ocultando la parte más productiva de la experiencia. Ni tan siquiera suele ser posible atender al funcionamiento de dichos aparatos -el porqué y el cómo-, de forma que, aún de manera indirecta, los alumnos se habitúen al estudio de fenómenos físicos y el procedimiento experimental, complejo y laborioso, que lo rodea.

Otro de los peligros frecuentes consiste en reducir las prácticas al seguimiento de un determinado guión sobre la experiencia, que debe ser cumplido paso a paso por los alumnos (sólo hay que ver la inmensa bibliografía que existe en el mercado de estos libros de prácticas -que son más bien recetarios- y lo infrecuente que resulta encontrar una obra que dedique su atención a la metodología experimental, como, por ejemplo, la de Gutiérrez-Aranzeta (1987); esta tendencia es reciente, hay libros de los años '20 que son un ejemplo de precisión minuciosa, como el de Alvarez Zurimendi (1925) cuyo título ya da una muestra de esa minuciosidad. La propia capacidad de los alumnos para pensar y de ingeniar mecanismos para estudiar un determinado fenómeno queda totalmente anulada. Como señala Novak (1991), se aparta a los alumnos del aprendizaje significativo, empujándoles hacia una forma de aprendizaje esencialmente repetitiva. Y lo que es aún peor, esta situación se acaba haciendo común, cómoda para la mayoría de los alumnos, y susceptible así de ser impuesta frente a otros planteamientos docentes, de forma más o menos sutil, mediante presiones del ambiente.

De esta forma resulta imposible integrar las tres actividades fundamentales en la enseñanza de las ciencias: conocimientos teóricos, prácticas de laboratorio y resolución de problemas (Gil et al., 1990-91). Es necesario pues, un esfuerzo adicional: imponer esta metodología en forma gradual, que vaya siendo atractiva, con propuestas concretas. En el presente trabajo se pretenderá poner de manifiesto todo el laborioso protocolo de la metodología experimental a través de una simple práctica: la determinación de

densidades de diferentes cuerpos mediante dos métodos alternativos: con la balanza hidrostática y geoméricamente.

2. OBJETIVOS

Con el planteamiento de prácticas experimentales, sencillas en cuanto a instrumentación pero substancialmente ricas en cuanto a los conceptos, podemos eliminar muchos de los problemas anteriores. Por un lado, al no tener que analizar principalmente los instrumentos que serán utilizados durante la práctica, el alumno puede concentrarse más profundamente en la Física que se esconde en la misma, lográndose una mayor asimilación de dichos conceptos; además, la simplicidad permite redundar con mejor énfasis en aspectos comunes del proceder en la experimentación (Fuertes, 1994a, Gutiérrez-Aranzeta, 1987). Pero por otro lado, con experiencias de este tipo, donde el protagonismo del alumno sea más real (Valdés Castro et al., 1993; Gil et al., 1993) se consigue que los alumnos se sientan más motivados -al abandonar las prácticas guiadas- y comiencen a pensar e idear métodos para realizar una determinada tarea, utilizando los conceptos aprendidos durante las clases teóricas, se interesen por el debate con otros compañeros, etc.; en definitiva, una participación más activa.

De entre todas las prácticas que huyen de la complejidad de los aparatos -que es abordable a través de varios tipos de experiencias (Fuertes, 1990)-, una de las más elementales, sencilla y común, sea quizás la propuesta aquí, consistente en la determinación de la densidad de diferentes cuerpos. Su objetivo es claro y puede servir para una introducción a los conceptos básicos de la metodología experimental de la Física en la Enseñanza Secundaria -actualmente, es estrictamente necesario y trabajoso hacerlo en el primer curso de la Universidad-. Sin embargo, su realización requiere del conocimiento de principios básicos, que no deben suponerse conocidos -al menos no del todo madurados-, sino que requerirán de una adecuada explicación teórica que no es nada ajena a la que tradicionalmente forman los contenidos de la Física de BUP. Veamos algunas de las cuestiones que podrán ser abordadas con esta práctica, enriqueciéndola y no convirtiéndola en

un simple proceso de tomar datos y manipularlos, y que podría servir también para madurar más esos conceptos básicos de la Física.

2.1 El fenómeno y las magnitudes asociadas

De todo lo que acontece en un determinado entorno, es necesario restringir la observación a una parte bien delimitada y precisada; seleccionar los aspectos que van a ser objeto de la investigación -la experiencia, el fenómeno forzado- y las peculiaridades de dicho fenómeno susceptibles de cuantificar -las magnitudes-. La experiencia en sí puede involucrar más o menos magnitudes, con mayor o menor complejidad en su determinación o en sus relaciones; pero, cada una de estas magnitudes, necesita para su medida un protocolo nada simple y trivial que le es común. En nuestro caso, la experiencia sólo implica la medición de una magnitud, la densidad, pero, para redundar todo el procedimiento, aplicaremos a diferentes cuerpos con dos métodos distintos: una forma de forzar la laboriosidad y la paciencia como virtudes esenciales en la metodología experimental, una forma, también, de ver cómo el tipo de muestra objeto de la medición puede condicionar la precisión de la medida.

Así, una peculiaridad de los cuerpos, el hecho de que teniendo a primera vista un volumen/extensión parecido, sean más o menos pesados, como fenómeno aislado de otros muchos, su color, sabor, forma geométrica, utilidad, etc., es objeto de una investigación precisa y cuantificable. Todo el mundo sufrió alguna vez la caída en el absurdo ante la pregunta tentadora "de pega" -entre otras cuantas de la adolescencia:

- ¿Qué pesa más, un kilo de paja o un kilo de piedra?-
- El kilo de piedra-, era la contestación inmediata que nuestro sentido común nos dictaba.

Siendo a primera vista una trivialidad enorme, subyace en ella un aspecto común a todos los conceptos abstractos, ya sea de Física o de otras ciencias. Es el conflicto cognitivo (Bascones, 1989) que orienta la necesidad de un nuevo

concepto: en este caso la densidad. En una forma más genérica, es la 'experiencia cumbre' de Maslow (1971), vivencia ligada a un accidente peculiar que deja un sello que pervive. Es el momento de caracterizar esa peculiaridad oculta que relaciona lo que 'abulta' con lo que pesa. Así surge la necesidad de la 'fórmula' de la densidad, como la relación entre la masa y el volumen.

Pero también esa magnitud se puede contrastar de entrada por otra de sus peculiaridades directamente relacionada con la experiencia común: el hecho de que determinados cuerpos flotan y otros se hunden (Hexht, 1987); esta perspectiva nos lleva a plantear su medición de forma directa basándonos en el principio de Arquímedes. Ambas perspectivas, relacionadas con la experiencia cotidiana, nos permiten abordar el problema por dos métodos distintos: la posibilidad de la medición directa o indirecta de las magnitudes físicas, y generalizar su esencia a la metodología experimental en sí -y por extensión en la labor investigadora de los científicos-, que se relaciona íntimamente con el procedimiento de creación de hipótesis, elaboración de un modelo, verificación del mismo, replanteamiento y nueva verificación, etc. (Holton, 1989).

2.2 La medida y su margen de precisión

Tal y como señala Arons (1990), es corriente que los estudiantes no perciban la diferencia entre el concepto y la operación a través de la cual se determina la cantidad asociada a la magnitud con la que se caracteriza físicamente dicho concepto. La medición, como conjunto de operaciones, tanto mentales -caracterización de la magnitud-, como técnicas -asignación de una cantidad a través de un aparato- no es una actividad sencilla y fácil de asimilar (Lascher et al., 1994). Proceso, el de la caracterización de la magnitud, la asignación de una cantidad a dicha magnitud, la elección de una unidad patrón de entre las cantidades y la obtención, por fin, de la medida correspondiente -esto es, una cantidad con una cierta unidad asociada-, no muy explicitado en la docencia actual. Como tampoco lo es la convicción de que tales medidas están siempre dadas con un margen de precisión más o menos grande (Sánchez del Río, 1988). Esto es sorprendente, cuando la formalización de todo el

procedimiento corresponde a un español: J. Palacios (1957).

Todo ello no es sólo propio de la inmadurez del estudiante sino que, en gran medida, forma parte del paradigma actual del quehacer de la Física por el que se tiende a considerarla como una Ciencia exacta (ej.: Born, 1959; Romer, 1993), a pesar de que las distintas revoluciones del presente siglo -la cuántica, la relatividad o el caos- surgen, en parte, como consecuencia de una revisión en la forma en la que los conceptos básicos de dichas teorías son traducidos a cantidades.

Con objeto de evidenciar lo anterior, mediante los dos métodos ya aludidos, -uno directo y otro indirecto-, se plantea la experiencia en condiciones de precisión creciente; se tratará que la búsqueda de dicha precisión mejorable vaya siendo orientada por el análisis de las experiencias previas. Esto requerirá un procedimiento gradual de trabajo, común en parte, a toda experiencia científica, que es, en suma, el objetivo final de la práctica.

2.3 El procedimiento

Empleando varios cuerpos de distintas geometrías y dos métodos distintos, se obliga a que la experiencia completa sea laboriosa y en parte repetitiva. Los artefactos empleados y las condiciones de medición se busca que no sean en principio las más idóneas, pues es ésta la norma común en cualquier experiencia profesional. Esos procedimientos de trabajo basados en aparatos que actúan con precisión ferviente en cierto rango muy delimitado -como es lo más común en la mayor parte de las prácticas que las propias casas distribuidoras suministran-, son más bien montajes para experiencias "de cátedra", nunca verdaderas simulaciones de lo que la experimentación real puede ofrecer. Empleando dos métodos alternativos se permite también la contrastación entre ellos y la posibilidad de evaluar su mayor o menor rango de precisión, así como la posibilidad de mejorarlos, mediante un análisis crítico de los datos obtenidos en cada caso. Esto obliga a que la práctica deba desarrollarse en más de una sesión, con intervalos de gestión, maduración y debate, etc.

Es el proceso, en definitiva, el que tiene un interés preferente, estelar (French, 1987) frente a los contenidos y, aunque a primera vista requiere cierta dosis de atención y un esfuerzo peculiar, cuando se entra en él, produce cierta satisfacción, excita la curiosidad (Romer, 1994) y la autorrealización, algo a lo que los adolescentes, en su necesidad de autoafirmación, son especialmente receptivos (Maslow, 1971). Para el profesor es igualmente válido pues, si en principio exige una mayor dedicación, se cobra de forma inmediata en el desarrollo posterior de otras tareas de laboratorio; aunque también, en principio, genera un cierto rechazo, tanto por el docente como por el discente, todo hay que decirlo -para el profesor, en general, es más sencillo elaborar una "receta" que funcione adecuadamente, que estar sometido a la tensión y el esfuerzo continuado del seguimiento abierto de la práctica.

3. REALIZACION PRACTICA

En concreto, como ejemplo arbitrario, se propone, la medida de la densidad de tres cuerpos comunes -trozos de metal- de geometría distinta: una placa de latón, una tuerca de acero y una barrita de aluminio, y de un líquido, también común, el alcohol, barato y aséptico (lo es más el agua, pero, como veremos, está llamada a tener un protagonismo más directo, por ser todavía más común, obviamente; ya que, ante todo, se trata de que tanto los artefactos empleados como las peculiaridades que se tratan de medir, sean de lo más cotidianas; ¿no es la Física de lo más cotidiano, por más que los procedimientos al uso le estén dando un carácter misterioso, sólo reservada a iniciados?).

3.1 Método hidrostático

Es un método directo de medida, se compara cuánto más densos son los cuerpos implicados que el agua, tomada aquí como cuerpo patrón. Es un buen momento para reincidir sobre la importancia de la elección de la unidad adecuada para establecer la medida de la magnitud implicada (Sánchez del Río, 1987). Lo más normal es que el alumno no esté nada familiarizado con ciertas unidades ajenas a las que tradicionalmente se toman como primarias en

el Sistema Internacional: el metro, el segundo y el kilogramo; incluso, toda la retahíla de precisiones específicas de las condiciones estrictas en las que se define dicha unidad, se asimilan con más trabajo y desidia que fundamento.

En este método de medida, la densidad del agua en condiciones precisas, es tomada como patrón primario; pues la medición de la densidad se obtiene por comparación directa con la del agua, basándose para ello en el principio de Arquímedes: tanto más denso que el agua, cuanto más se hunde, por decirlo de una manera. Y esa medida se obtiene a través del peso necesario que hay que poner en la balanza para equilibrar ese hundimiento. La fórmula de la que se obtiene la densidad del sólido (para un líquido es una modificación evidente), deducida del principio de Arquímedes (p.ej. Hecht, 1987):

$$\rho = (M_c/M_c - M_B)\rho_{\text{agua}} \quad (1)$$

que aparece en cualquier manual de prácticas, se presta, generalmente, a varias confusiones conceptuales, por una parte, se suele hablar de la masa del sólido sumergido, M_B , cuando en realidad es la masa asociada a la pesa de la balanza que equilibra la situación -pues, como es obvio, la masa del cuerpo M_c , como tal concepto, es una magnitud intrínseca-; y por otra, se interpreta como una medida indirecta al proceder de una fórmula de definición, cuando esa situación es ficticia, pues la relación entre las distintas masas que aparece en la expresión (1) no es más que el procedimiento por el cual se puede asignar el número de veces que es más grande la densidad del cuerpo en cuestión que la del agua, de la misma forma que para medir longitudes el procedimiento implica la colocación de la regla de una forma específica. En cualquier caso, la conocida balanza de Mohr, no es más que una calibración adecuada de una balanza en densidades.

También se confunde el carácter primario del patrón de densidad del agua al expresarse en g/cc, derivada de una expresión geométrica; se puede tomar para tal patrón la densidad de un cuerpo como el agua en unas condiciones precisas (pura, y a los consabidos 4 grados centígrados, etc.), como el valor unidad -llamémosle un Arquímedes, por ejemplo- de igual forma que se

toma la distancia entre las marcas de la famosa barra de platino-iridio como unidad de longitud. Esto le da un carácter más propio a este patrón de densidades, como ha de corresponder a cualquier patrón (Sánchez del Río, 1987). El hecho de que después se pueda referir a otro tipo de unidades, tomadas como primarias en un determinado sistema es, en parte, arbitrario.

En nuestra experiencia hemos tomado el agua del grifo. Patrón tosco, efectivamente, pero que antes de entorpecer nuestros objetivos, los reafirma. En efecto, la realidad más común de cualquier experiencia se inicia con unos aparatos de medida que en el primer ataque no son del todo adecuados, toda vez que la experiencia es nueva; el procedimiento más real requiere una calibración y adecuación del artefacto al experimento en cuestión. Este agua de grifo -el patrón del que se dispone en el primer acercamiento a la tarea-, puesto que no es del todo preciso, se toma con un valor de 1.0g/cc y con una imprecisión en media décima, como hay reglas que no precisan más que hasta el cm, pongamos por caso.

El desarrollo de la experiencia nos orientará hacia la búsqueda de un mejor patrón de medida, si fuera el caso, o a un mejor método, o ambas cosas. Es importante insistir en esta necesidad de aproximación hacia la precisión de la medida de forma gradual. En las prácticas comunes distribuidas por las casas comerciales es bastante frecuente que se disponga de unos aparatos cuya precisión es tan elevada que, antes que permitir una medida realmente precisa, lo que hacen es condicionar el acercamiento al buen resultado en condiciones muy específicas, demasiado virtuales, justo las que se recomiendan en el manual que acompaña al artefacto. Ejemplos hay a cientos, y es sorprendente que tamaño disparate no haya sido erradicado de dichos manuales, lo que dice mucho, una vez más, de la falta de una formación rigurosa en la metodología experimental que va más allá de los alumnos.

3.2 Método geométrico.

El método geométrico nos sirve, a la vez que como medida de contraste y calibración adecuada del anterior, como excusa para familiarizarse también con el procedimiento general de obten-

ción de medidas. Es un método indirecto, que necesita una fórmula de definición y un modelo geométrico de apoyo para medir el volumen, (salvo en el alcohol que se mide con la probeta: medición directa del volumen, Figura 1d). Este método incorpora de una forma clara el estudio de una limitación común en la metodología experimental: el modelo geométrico de apoyo, necesario para el cálculo de una buena parte de las magnitudes implicadas: aquí, volumen de los cuerpos físicos que son objeto de investigación. La barra de aluminio, la chapa de latón y la tuerca de acero, se idealizan, respectivamente, como un cilindro, un prisma y un cilindro hueco (Figuras 1a, b, c, respectivamente) para determinar su volumen.

Esta idealización geométrica, sobre todo en el cilindro-hueco/tuerca, por lo que respecta a la determinación de sus radios, interior y exterior, tiene a primera vista sus limitaciones; en los otros dos casos no es tan evidente. La búsqueda de una mejora del modelo vendrá condicionada por el resultado contrastado de las densidades obtenidas en cada caso. En efecto, de cómo se parezcan estas idealizaciones a los cuerpos en cuestión, dependerá la obtención de un mejor o peor resultado. La barra/cilindro, en nuestro caso, era bastante perfecta; no sucedía así con la chapa (bastante arrugada) y la tuerca, cada una de ellas por distintas razones. En la chapa, la falta de idealidad no se percibía entre los alumnos de forma inmediata; en cambio, en la tuerca, como ya se ha dicho, es evidente la disconformidad: la rosca interior, y su forma exterior hexagonal así lo determinan a primera vista y así se hacía notar. Sin embargo, se insiste en un primer ataque del problema con estas limitaciones ya sabidas -como en el caso anterior que afectaban al patrón-, con objeto de ir acercándose al procedimiento óptimo de forma gradual.

3.3 Margen de indeterminación

No es nada fácil, en nuestra experiencia, inculcar en el alumno la realidad ineludible del carácter no puntual, estrictamente preciso, de los datos obtenidos experimentalmente. La idolatración de la precisión es más paradigmática que de formación (Born, 1959). Algo tan poco evidente y tan poco aceptado tiene en parte su origen en el ca-

rácter determinista de la Física; en la práctica docente que confunde muchas veces la Física con las Matemáticas en las que se apoya (French, 1987). Aunque el problema tiene su complejidad

epistemológica, desde las prácticas es posible y necesario ir introduciendo a los alumnos en tales limitaciones.

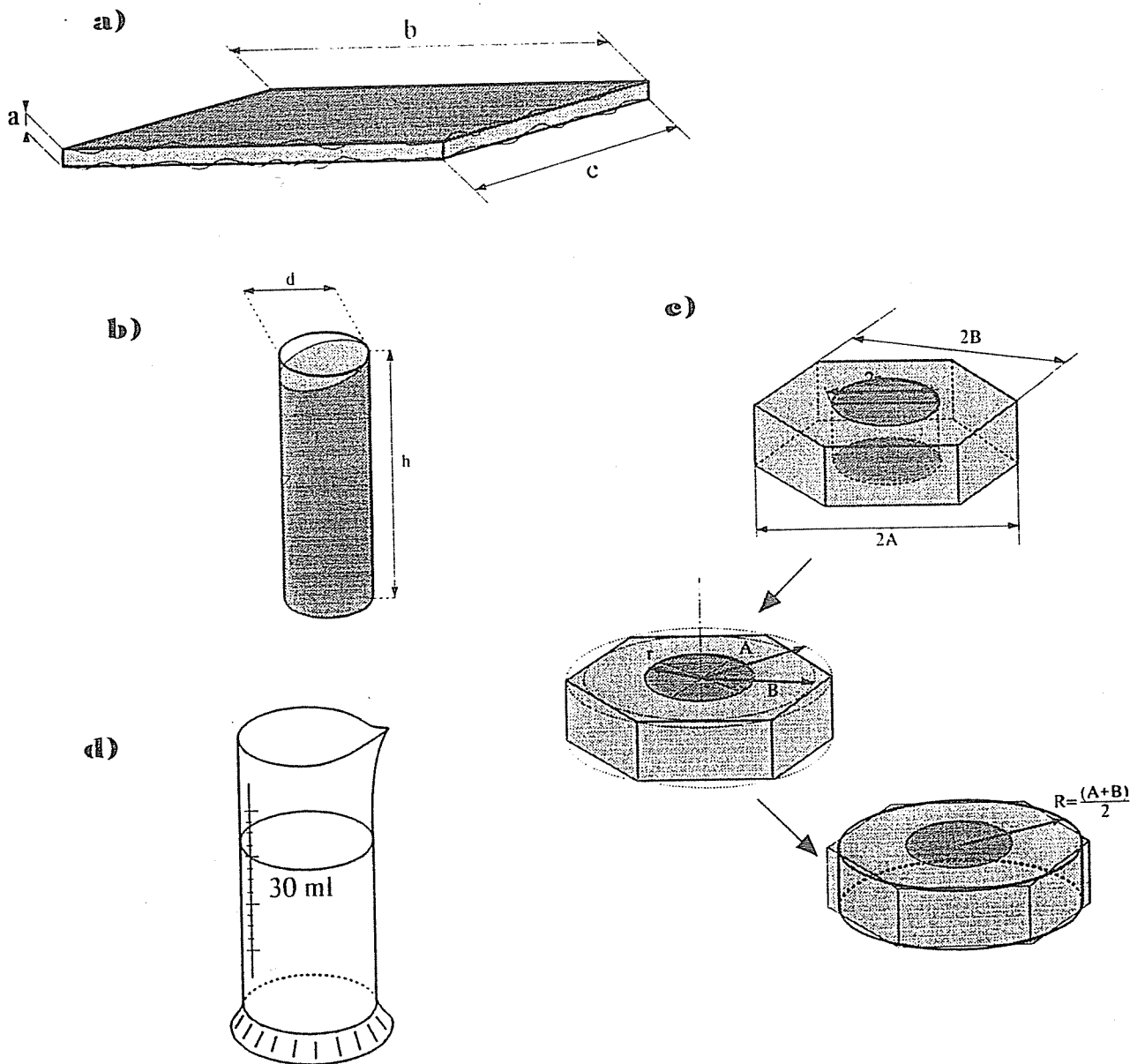


Figura 1. Modelos geométricos para la determinación de los volúmenes de los diferentes cuerpos: a. Placa de latón asociada a un paralelepípedo; b. Barra de aluminio asociada a un cilindro; c. Tuerca de acero asociada a un cilindro hueco; d. Alcohol/Agua (Medición directa)

En este planteamiento, la evaluación del margen de indeterminación de las medidas -es conveniente ir evitando la desafortunada nomenclatura de error-, se obtiene por el método logarítmico-diferencial (Sánchez del Río, 1988), como una técnica de apoyo, sin entrar en sus sutilezas

conceptuales -advírtase sin embargo, que el concepto tan abstracto, difuso, y tan poco asumido de derivada y el cálculo diferencial simple, tiene aquí también una forma de introducirse a través de la experiencia.

Para la primera experiencia, sólo se evalúan las indeterminaciones debidas a las limitaciones de los aparatos: el calibre, con precisión de 0.05mm, la balanza, con precisión de 0.01g y la densidad del agua (el Arquímedes, el agua aquí actúa como unidad de división de otro aparato de medida; ¡hay que insistir!) con una precisión de 0.05g/cc. Con estos datos previos, los resultados, en nuestra experiencia concreta, se muestran en la Figura 2. Salvo los valores concretos de la densidad de cada cuerpo, dependiente de su naturaleza y su geometría, ha de ser equivalente

a cualquier otra colección de muestras parecidas. La discusión y contraste de dichos resultados es uno de los objetivos más jugosos de la experiencia (de toda experiencia, en general, que por extrañas razones se evita; es bastante común en la costumbre del alumno, mostrar más frustración que inquietud analítica cuando un resultado no coincide con el valor esperado; en consecuencia, más que deseos de explicarlo, justificarlo o mejorarlo si fuera el caso, hace encajar el valor como mejor puede, las más de las veces con precisiones inverosímiles).

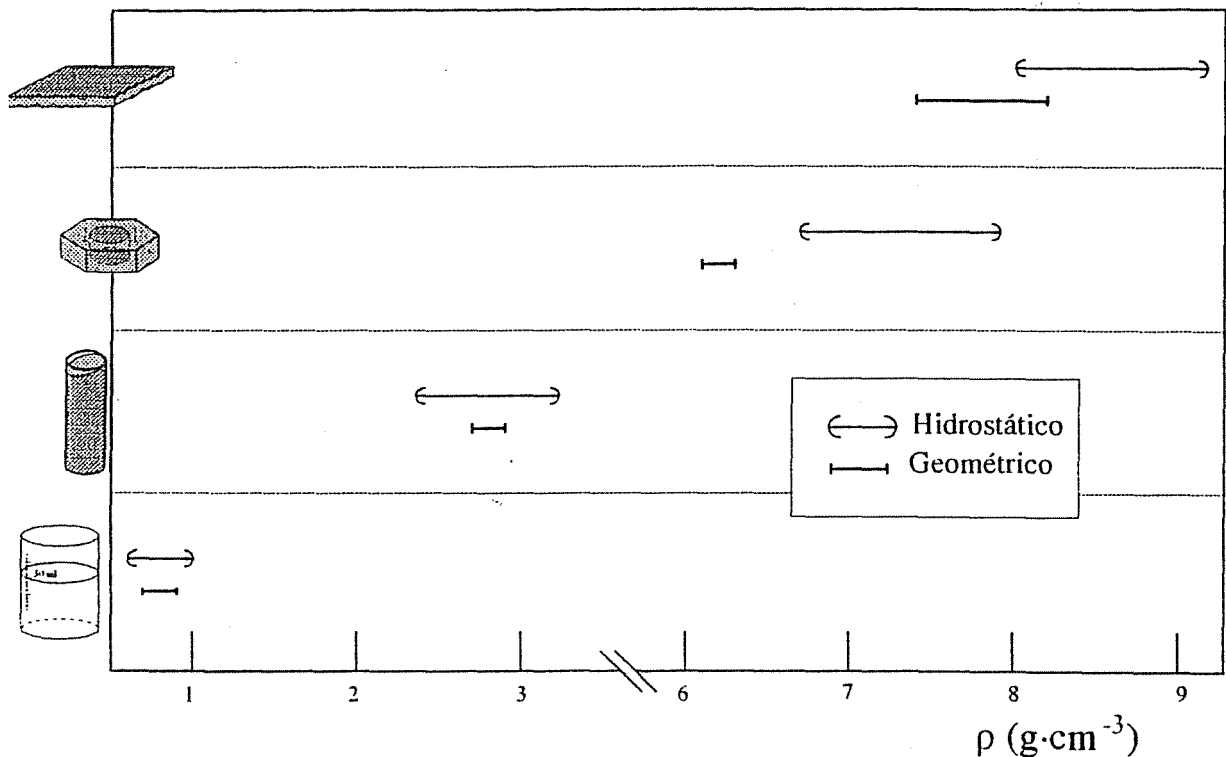


Figura 2. Representación contrastada de los resultados de las primeras experiencias.

4. ANALISIS Y DISCUSION

Un buen análisis de los datos siempre ha de apoyarse en una representación adecuada de éstos. Esta vendrá orientada por el tipo de contrastación que se busque y es una característica común en toda experiencia. Lo normal y tradicional es la representación en diagramas cartesianos de una cierta variable frente a otra de la que se busca encontrar su relación. Sin embargo, cuando se

trata de contrastar medidas que aparentemente no tienen una dependencia explícita, como en este caso, casi siempre se muestran los resultados en forma dispersa. En el otro extremo, con el florecimiento de los sondeos estadísticos, se abusa de los típicos "pasteles" y diagramas semejantes.

Aquí, el objetivo es doble: por una parte, se trata de contrastar el parecido más o menos amplio de las densidades respectivas a cada cuerpo

obtenidas por cada uno de los métodos; y por otra, ver cuál de los métodos es más fiable a la vista del contraste entre cada cuerpo y de todas las muestras entre sí; esto es, que no siempre el mismo método es universalmente válido para todo el margen de medidas y todo tipo de cuerpos. Así, inicialmente, se observa que los datos obtenidos por el método hidrostático para todos los cuerpos, muestran un amplio margen de indeterminación, mientras en el geométrico este margen es más irregular. Algo que cabría esperar de acuerdo a los planteamientos iniciales. En efecto, si se examinan las relaciones de indeterminación para cada par de medidas buscadas, este resultado es cualitativamente esperado. Por ejemplo, para el caso de la placa, las indeterminaciones relativas de la densidad obtenida por cada método, $\delta\rho_1/\rho_1$ y $\delta\rho_2/\rho_2$, cuyas expresiones respectivas, calculadas por el método ya aludido (ej.: Sánchez del Río, 1988) son:

$$\delta\rho_1/\rho_1 = \delta l/a + \delta l/b + \delta l/c + \delta m/M_c \quad (2)$$

$$\delta\rho_2/\rho_2 = 2\delta m/(M_c - M_B) + \delta m/M_c + \delta\rho_{\text{agua}}/\rho_{\text{agua}} \quad (3)$$

siendo a, b, c -Fig. 1.a-, las longitudes respectivas de cada dimensión de la placa, M_c su masa, M_B , su "masa sumergida", y las respectivas δ , las indeterminaciones de los aparatos correspondientes, idénticas pues en cada uno: el calibre $-\delta l-$, la balanza $-\delta m-$, y el agua patrón $-\delta\rho_{\text{agua}}$. Es evidente de la expresión (3) que la mayor contribución a la indeterminación proviene del último término, que siendo común a todas las muestras, justifica el resultado. Por otra parte, de la expresión (2) se observa que los términos que más pueden afectar dependen de la geometría principalmente. Para la placa, al ser su espesor $-a-$, del orden de la precisión del calibre (en torno a un mm) contribuirá de forma notable en este caso, no siendo igual en los otros cuerpos, lo que también explica cualitativamente el resultado obtenido.

Además, del examen de estas expresiones para todas las muestras, se puede justificar el mayor o menor acuerdo encontrado entre los pares de datos de densidad para cada cuerpo, y orientar la mejora de la experiencia para buscar un mayor acuerdo de los resultados.

5. NUEVAS EXPERIENCIAS

5.1 Revisión del método geométrico

En el método geométrico cabe esperar un mayor desacuerdo respecto del valor concreto de la densidad pues la figura geométrica asociada al cuerpo físico en cuestión no siempre es la más idónea. (Figura 3). Tanto para la barra, como la tuerca o la placa, la figura ideal no corresponde con el cuerpo físico y, toda vez que el cálculo de la indeterminación nada más que se ha tenido en cuenta la imprecisión del aparato de medida de las longitudes, es necesario intentar la mejora buscando una mayor aproximación entre el modelo y la realidad. La barra es la más geoméricamente perfecta y, en efecto, es la que da un resultado más parecido, en los otros casos el desacuerdo es mayor y hay que buscar una optimización.

Esto se intenta con una medición estadística de los diferentes parámetros en los casos en los que es posible -altura y grosor del cilindro, espesor de la placa-, un mejor modelo geométrico -base hexagonal de la tuerca-, y una estimación de las situaciones no abordables con los recursos anteriores -rosca interior de la tuerca y muesca del cilindro- (figura 3). Una gran parte de situaciones comunes a cualquier experiencia quedan aquí bien evidentes: que el modelo formal que se emplea sea el óptimo -base hexagonal de la tuerca-, que se pueda mejorar con un nuevo modelo más preciso o no y, en consecuencia, haya que recurrir a una estimación estadística -grosor de la placa, altura del cilindro-, o que no haya ninguna posibilidad y se tenga que abordar desde una estimación grosera -muesca del cilindro y rosca interior de la tuerca-. En la placa, además, dado que la precisión del calibre es próxima a la medida del grosor, hay que recurrir a un mejor aparato, un tornillo micrométrico de precisión en la centésima de mm. En este último caso, sin embargo, las "arrugas" de la placa provocan una dispersión de la medida mayor que la del aparato, en torno a 0,02mm: un efecto importante que no está nada asumido; esto es, que la finura del aparato de medida lo hace más susceptible a las imprecisiones estadísticas.

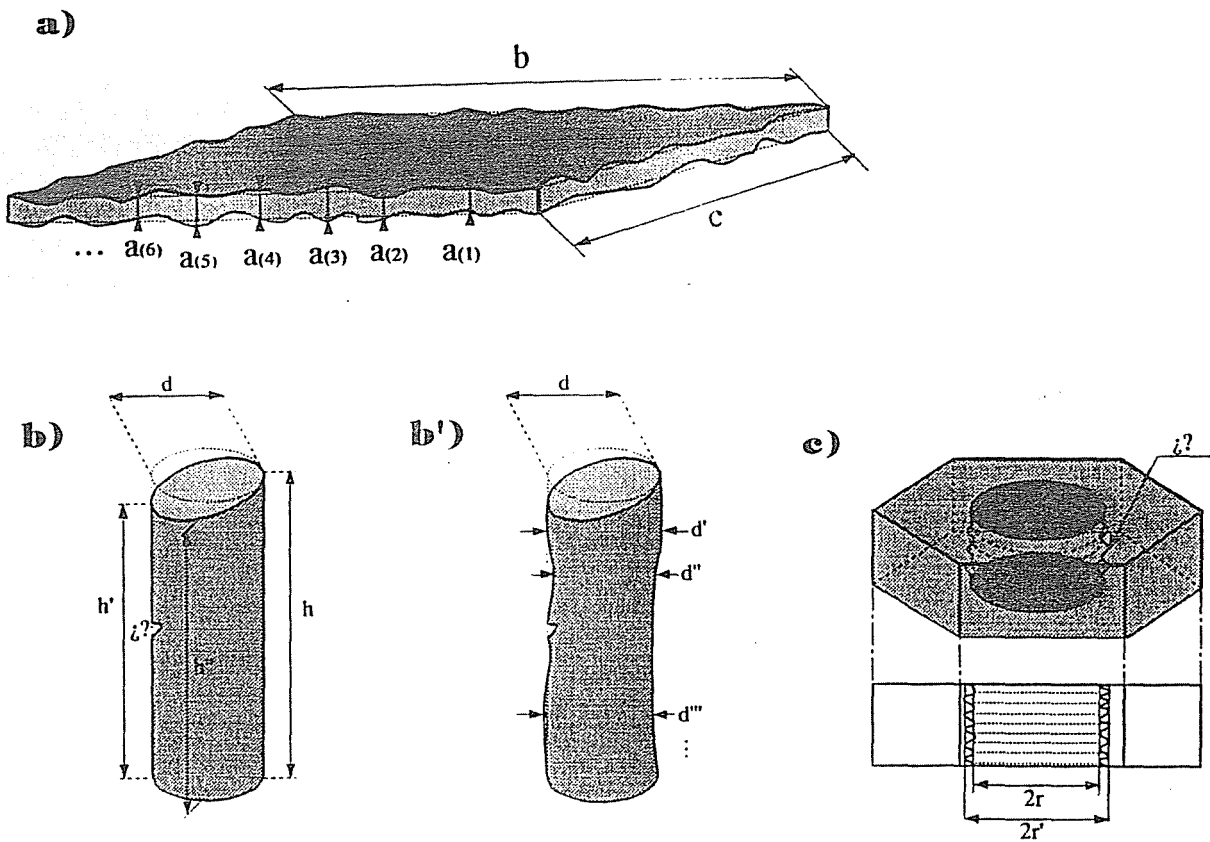


Figura 3. Modelos geométricos modificados para la determinación del volumen de las muestras: a. Placa con sus arrugas: los espesores $a_{(n)}$ pueden ser diferentes y es necesario buscar el valor óptimo estadísticamente; b. Barra: el corte de la base no es totalmente perpendicular al eje y es necesario encontrar el mejor valor de las alturas h_i ; también tiene una muesca que no es susceptible de precisar con rigor; c. Tuerca: el perímetro exterior hexagonal se puede calcular geoméricamente, pero la rosca interna sólo puede estimarse.

Todas estas mejoras permiten obtener nuevos datos que se representan de forma contrastada en la figura 4 (segmentos continuos -frente a los punteados, que representan los datos respectivos de la primera experiencia-).

5.2 Revisión del método hidrostático

En el método hidrostático, que no presenta los problemas del anterior por ser independiente de la geometría, puede ser el óptimo si se consigue patrón mejor que el agua del grifo. Recurrimos al alcohol de cierta pureza que ahora actúa como patrón, con una densidad que es conocida, pues

viene dada en el frasco por el fabricante -un nuevo aparato mejor, en suma-, cuyo valor, para nuestro caso concreto, es de 0.82g/cc, con una indeterminación en la centésima. ¡Es importante hacer hincapié de nuevo en que no siempre la optimización en un aparato conlleva un resultado equivalente en la medida: elegir un alcohol más puro -lo hay no muy caro de hasta la media milésima-, no mejoraría más la experiencia, pues ahora ya entra en competición con la precisión de la balanza!. Con este nuevo patrón, se obtienen los datos que se muestran en la figura 4 (segmentos continuos limitados por puntos de flecha).

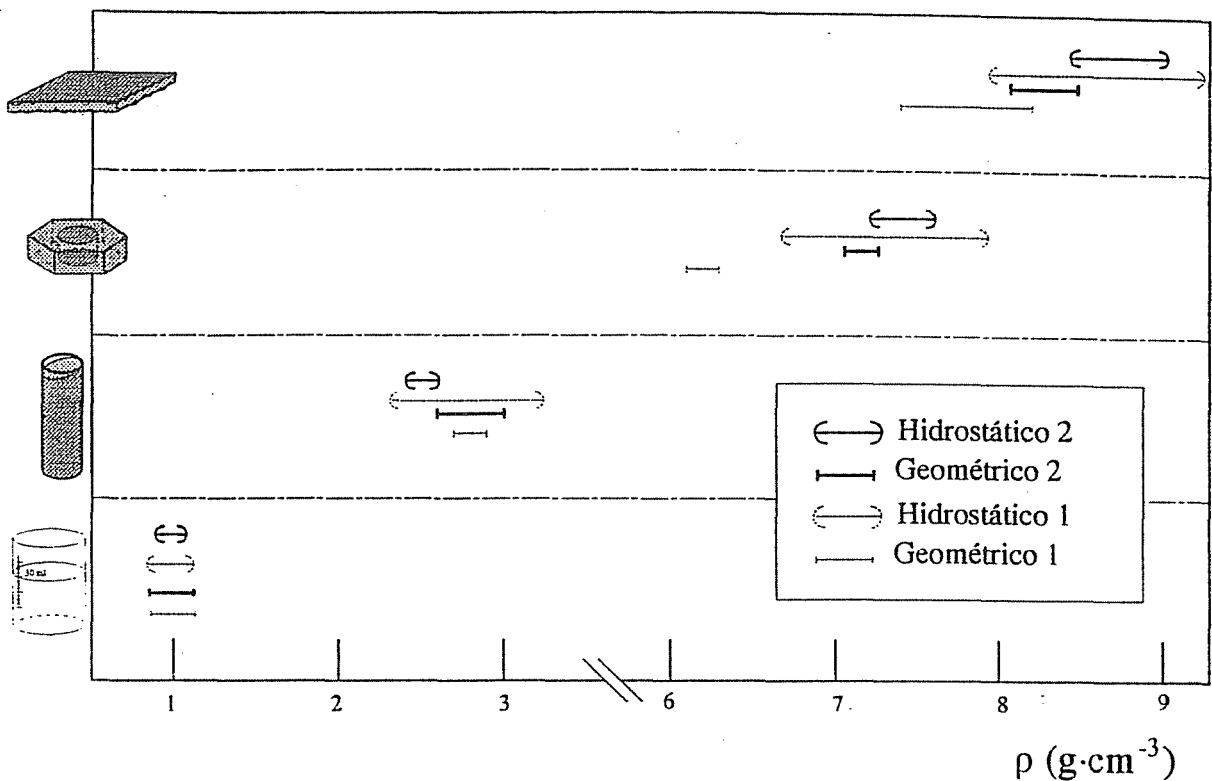


Figura 4. Representación contrastada entre los resultados de las primeras experiencias y la experiencia mejorada.

El agua del grifo es ahora una medida obtenida en función del alcohol patrón; resultado con algo mayor de precisión que el asignado en principio; en torno a 0.05g/cc, (figura 4, líneas continuas; valor de la parte inferior izquierda). Sin embargo, si se contrastan los datos obtenidos para los distintos grupos de alumnos en los distintos días, hay una dispersión más amplia (figura 4; líneas de puntos), lo cual es en parte aceptable pues los niveles de impurezas y la temperatura del agua de la cañería, no es todos los días idéntico. Este procedimiento de ir escalonadamente buscando un patrón óptimo de medidas es lo más natural en toda la Física (Sánchez del Río, 1987) y conviene resaltarlo: recuérdese la anécdota histórica de Galileo empleando inicialmente su pulso para estimar la regularidad de la oscilación de la lámpara de la Catedral de Pisa (Hecht, 1987), lámpara que permite el estudio del péndulo, péndulo que permite construir el reloj, reloj que permite medir el pulso, etc.; como sucedió con las pulgadas o los palmos, en las medidas de las longitudes -lo que se tiene más a mano, nunca mejor dicho, como nuestra agua-, o los pies, la vara del Faraón, las yuntadas, etc., ...

Todas las experiencias se contrastan, por fin, entre sí, en la Figura 4. El acuerdo entre los dos métodos es así bastante aceptable y las nuevas mejoras requerirían un nuevo proceso similar a todo el anterior.

6. CONCLUSION

En conclusión, el minucioso y reiterativo protocolo de la metodología experimental se muestra en forma clara. Aspectos, nada asequibles a primera vista para los alumnos, como el concepto y procedimiento de medida, patrón de unidades adecuado, cantidad y su margen de precisión, representación y contrastación de datos, estudio crítico y mejoras posibles, etc., que además son aprendidos de una forma mimética, en general, con grandes dificultades posteriores para erradicarlos, -la experiencia en primer curso de Universidad es evidente-, pueden y deben ser abordados de una forma sistemática. De esta manera el procedimiento gradual de hacer ciencia se hace evidente.

De una vez por todas, la necesidad de familiarizarse con el proceso de hacer ciencia ha de quedar establecida, o al menos insinuada en su complejidad, desautorizándose esa perniciosa tendencia a idolatrar los contenidos frente a los procesos (Romer, 1993; Arons, 1990): la resolución de problemas virtuales y situaciones de laboratorio igualmente ficticias y en muchos casos pedantescas, etc.; en fin, la iniciación de la desmitificación del determinismo en la Física, más próximo a la realidad del paradigma actual (Luffiigo et al., 1994), y una visión más ligada al proceso y al desarrollo histórico (Matthew, 1994) de los conceptos y las teorías de la Física pueden ser posibles a través de experiencias relativamente sencillas (aunque complejas, obviamente, no es la Física de otra manera). Todo ello sin perder la relación de la Física con lo cotidiano, lo que está más a mano.

7. SUPLEMENTO: CONSTRUCCION Y CALIBRACION DE UN DENSI-METRO

Por último, y como suplemento, se puede intentar la construcción de un densímetro con poco más que simples aparejos de pesca -corcho, plomo, etc.-, empleando el agua y el alcohol como referentes para establecer la escala, y probándolo con mezclas de agua y alcohol, por ejemplo,

soluciones de agua y sal, o azúcar, etc., para contrastarlo después con datos bibliográficos. La proximidad a la experiencia cumbre es así evidente; el alumno se siente por fin autor de su trabajo, antes que mero aprendiz, y las motivaciones posteriores son contundentes.

A la hora de intentar calibrar el densímetro, tomando como "puntos fijos" la densidad del alcohol y la del agua -más bien en "grado de flotabilidad" del corcho con su lastre-, aparece aquí una interesante discusión, paralela a la forma en la que se introduce la temperatura en la Física, como grado de calentamiento de un sistema medido a través de la dilatación de los líquidos. Esto es, hay una cierta equivalencia en la caracterización de dichas magnitudes primarias, temperatura y flotabilidad, a través de un cierto efecto en un determinado cuerpo tomado como detector de dicha propiedad. La forma en la que dichas magnitudes van adquiriendo una definición más precisa es distinta, en cambio, pues, mientras la temperatura necesita un tratamiento amplio y complicado, la densidad adquiere en seguida un carácter preciso, como magnitud secundaria, a través de su definición geométrica. Los orígenes son sin embargo muy paralelos y convendría enfatizar este aspecto; la importancia del desarrollo histórico de los conceptos físicos en la enseñanza (Mathew, 1994) queda resaltada de esta manera.

Referencias Bibliográficas

- ALVAREZ ZURIMENDI M., 1925; *Guía elemental de trabajos prácticos de Física*; Santiago de Compostela; Ed. El eco de Santiago.
- ARONS A., 1990; *A Guide to Introductory Physics Teaching*; New York, Ed. John Wiley & Sons.
- AUSUBEL D., 1968; *Educational Psychology: A Cognitive View*; New York; Holt, Rinehart & Winston.
- BASCONES J., 1989; "Instrucción para la transición cognoscitiva: El caso de la Física"; *Enseñanza de las Ciencias*, 7(2), 120-125.
- BORN M., 1959; "¿Dans quelle mesure la mécanique classique peut-elle prédire les trajectoires?"; *J. de Physique*; 20(1),43.
- COLOMBO de CUDMANI L., SALINAS de SANDOVAL J., PESA de DANON M., 1991; "La generación autónoma de conflictos cognoscitivos para favorecer cambios paradigmáticos en el aprendizaje de la física"; *Enseñanza de las Ciencias*, 9(3), 237-242.
- FRENCH A.P., 1987; "Some thoughts on introductory physics courses"; *Am. J. Phys.*, 56(2)110.
- FUERTE J.F., 1990; "El modesto péndulo"; *Revista Española de Física*, 4(3),82.
- FUERTE J.F., 1994a; "Una propuesta docente para los métodos experimentales en Física I"; *Revista Española de Física*; 8(2)37.
- FUERTE J.F., 1994b; "Del trecho que va del dicho al hecho"; *Anthropos*, (en revisión).
- GIL D., CARRASCOSA J., FURI C. y MTNEZ-TORREGROSA J., 1991; *La enseñanza de las ciencias en la educación secundaria*, Barcelona; Ed. Horsori.
- GIL D., DUMAS-CARÈ A., CAILLOT M. y MTNEZ-TORREGROSA J., 1990; "Paper and pencil problem solving in the physical sciences as a research activity"; *Studies in Science Education*; 19, 137.

- GIL D. y MTNEZ-TORREGROSA J., 1983; "A Model for problem-solving in accordance with scientific methodology"; *Eur. J. Sci. , Educ.* 5(4), 447.
- GUTIÉRREZ-ARANZETA C., 1987; *Introducción a la metodología experimental*. México, Ed. Limusa.
- HECHT E., 1987; *Física en perspectiva*; México; Ed. Addison-wesley.
- HOLTON G., y BRUSH S.G., 1989, *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas*; Barcelona, Ed. Reverté.
- KERR, 1963; *Practical work in school science*; Leicester Univ. press.
- LASCHER C., SÈRÈ M.G. y JOURNEAUX R., 1994; "Difficultés dans l'apprentissage du mesurage"; *Enseñanza de las Ciencias*, 12(2), 217-25.
- LUFFIAGO M., BASTIDA M.F., RAMOS F. y SOTO J., 1994; "Epistemología, caos y Enseñanza de las Ciencias"; *Enseñanza de las Ciencias*, 12(1)89.
- MASLOW A., 1971; "La personalidad creadora"; Barcelona, Ed. Kairós.
- MATTHEW M.R., 1994; "Historia, filosofía y Enseñanza de las Ciencias: la aproximación actual"; *Enseñanza de las Ciencias*, 12(2),255.
- NOVAK, J.D., 1987; "Human constructivism: Toward a Unity of psychological and epistemological meaning making"; *Enseñanza de las Ciencias*, 6(3)213.
- NOVAK, J.D., 1991; "Ayudar a los alumnos a aprender: La opinión de un profesor-investigador"; *Enseñanza de las Ciencias*, 9(3),215.
- PALACIOS J., 1957; *Análisis Dimensional*; Madrid, Espasa-Calpe.
- ROMER R., 1993; "Reading the equations and confronting the phenomena: the delights and dilemmas in physics teaching"; *Am. J. Phys.*; 61(2), 128.
- ROMER R., 1994; "Is curiosity a dirty word?"; Editorial, *Am.J. Phys.*, 62(3)199.
- SÀNCHEZ del RÌO, 1988; *Análisis de Errores*, Madrid, Eudema Ed.
- SÀNCHEZ del RÌO, 1987; *Unidades Físicas*, Madrid, Eudema ed.
- TASKER, 1981; "Childrens views and classroom experiences", *Australian Science Teacher Journal*; 27(1)33.
- VALDÈS CASTRO P., VALDÈS CASTRO R., 1993; "Problemas experimentales en física", *Didáctica de las Ciencias experimentales y sociales*: N°7, 91.