

LA CIENCIA DE LOS MATERIALES EN EL ESPACIO

Isidoro Martínez Herranz

Resumen

El objetivo de este artículo es el de hacer una revisión del estado de las investigaciones en ciencia y tecnología, poniendo énfasis en los aspectos termodinámicos, de los múltiples procesos de materiales bajo las novísimas y peculiares condiciones ambientales existentes en los laboratorios espaciales, cuyo uso puede decirse que es ya "corriente" desde el histórico vuelo del Spacelab-1 a finales de 1983, donde 6 toneladas de sofisticados equipos permitieron a 4 científicos, operando en turnos de 12 horas durante 10 días, realizar 70 grandes experimentos (cada uno de ellos englobaba varias decenas de pequeños experimentos, uno de los cuales era español).

NOTA: En el núm. 201 de IAA (Enero 1980) aparece un artículo sobre el mismo tema.

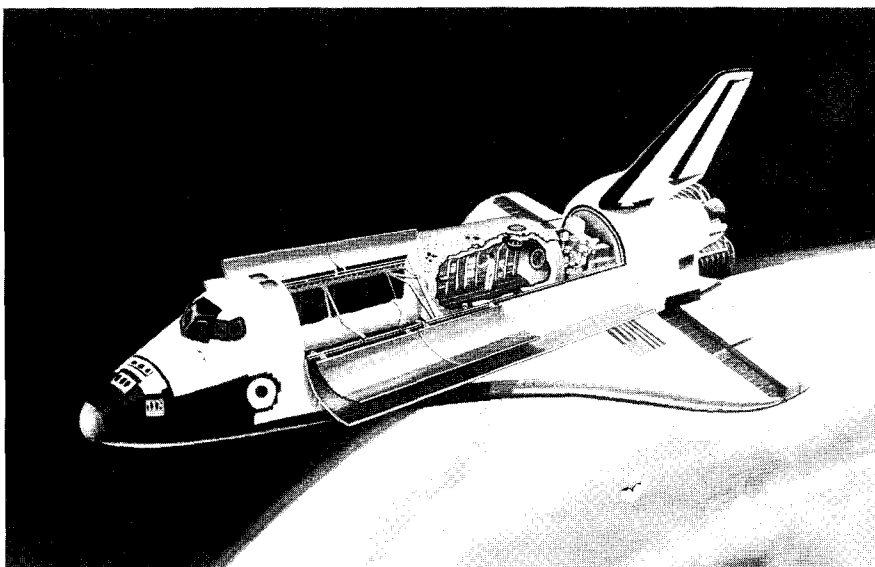


Fig. 1.— La mayor parte de los experimentos que se describen fueron realizados en el Spacelab-1 (Dic-83) o están previstos para el Spacelab-D1 (Oct-85).

1. Introducción:

La investigación espacial hoy día

Con el fin de dar una visión de conjunto sobre la posición de la ciencia de los materiales en el contexto de las disciplinas de interés en las investigaciones espaciales, conviene resumir aquí las mayores líneas de investigación seguidas hoy día, así como las particularísimas condiciones que han hecho del espacio un emplazamiento favorable para el estudio de problemas de interés en la Tierra.

Desde la Prehistoria se tiene noticia de actividades humanas relacionadas con el estudio del espacio exterior (Astronomía), pero hasta esta segunda mitad del siglo XX el hombre no había podido romper la atadura impuesta por la gravedad terrestre y salir al espacio exterior. Aparecieron entonces nuevos intereses: observar la Tierra de un modo global, aprovechar las particulares con-

diciones ambientales para el estudio de los materiales, y predecir las consecuencias que este ambiente (favorable para los materiales, pero desapacible para el hombre— puede producir sobre la materia viva y la fisiología del organismo humano a corto y largo plazo.

Aunque todavía no existe una división definida de las materias de interés para la investigación espacial, se pueden agrupar en cuatro grandes grupos:

Astrofísica: Estudio de nebulosas, galaxias, el Sol y los planetas. Este es un campo idóneo para el desarrollo de teorías sobre la formación de estrellas, fisión nuclear, radiaciones, plasmas, etc.

Geofísica: Estudio del interior de la Tierra (movimientos del magma y manto terrestre, geomagnetismo, geodesia) y estudio de la biosfera (ciclos vitales, recursos naturales, población, contaminación, meteorología). El panorama que ofrece este campo es de infinitas oportunidades de investigación. La resolución obtenida con la Cámara Métri-

ca a bordo del Spacelab-1 es de 20 m lo que revoluciona la cartografía, prospecciones marítimas y terrestres, seguimiento de cosechas, etc.

Materiales: Estudio de los procesos de materiales en condiciones espaciales. Esta es la ciencia "espacial" más moderna; de ella trata este trabajo. Aunque ya han pasado a la historia las optimistas predicciones de "materiales 10 veces más resistentes", "materiales para álabes de turbina que podrán trabajar a 2.000°C", "células solares y materia electrónica de mucho mayor rendimiento a mucho menor precio", etc. queda fuera de toda duda la incomparable utilidad que tiene la experimentación espacial para una mejor comprensión de los fenómenos inherentes al proceso de materiales en la Tierra.

Biología: Estudio de la fisiología humana en ingravidez (mareo, descalcificación), desarrollo de las células vivas y transformaciones genéticas. Una gran cantidad de procesos biológicos no son

LA CIENCIA DE LOS MATERIALES EN EL ESPACIO

más que transformaciones termoquímicas en disolución acuosa. Otros son más propiamente fluidodinámicos (sistema circulatorio), pero sobre unos y otros el ambiente espacial da lugar a cambios y modificaciones de gran importancia que es preciso analizar. Un descubrimiento importante en el Spacelab-1 fue mostrar que el nistagmus térmico (oscilación ocular ocasionada por aplicación de calor en el oído) también se produce en ingravidez, no siendo debido a la convección natural vestibular, como se creía.

1.1. Condiciones ambientales en el espacio

Son bastantes los parámetros ambientales que tienen magnitud y dirección distintas en órbita y en la superficie terrestre. Algunos: gravedad, temperatura, precisión, radiación cósmica y solar y campos eléctricos y magnéticos, son fácilmente identificables, dando lugar a interesantes efectos estáticos y dinámicos en los procesos con materiales. La ausencia de gravedad es el parámetro más relevante en la ciencia de los materiales. Los demás: atmósfera ratificada, bajas temperaturas, baja presión, alta radiación, etc., pueden conseguirse con mayor o menor facilidad en los laboratorios terrestres.

La obtención de gravedad reducida durante cortos períodos de tiempo puede conseguirse en tierra mediante caída libre en torres de vacío (2-3 segundos), vuelo parabólico de aviones (15-25 segundos), caída libre desde globos estratosféricos (1-2 minutos) y vuelo balístico de cohetes estratosféricos (4-6 minutos), pero los lentos procesos de relajación termodinámicos que suelen intervenir en la obtención de las condiciones de equilibrio de los sistemas heterogéneos de interés, requieren tiempos mucho mayores, por lo que el laboratorio orbital es la única solución aceptable.

Aunque se habla a menudo de "ingravidez", conviene recordar que se trata en realidad de una gravedad reducida, y que, en el mejor de los casos, hay que contar con una perturbación aleatoria (en magnitud y sentido) del orden de $5 \cdot 10^{-4}$ g (siendo $g = 9.8 \text{ m.s}^{-2}$, la aceleración de la gravedad en la superficie terrestre). Esta perturbación es debida al movimiento del personal de a bordo, pero hasta en los vehículos no tripulados se alcanza un valor del orden de 10^{-5} g (con una frecuencia entre 0.1 y 10 Hz) por causa de la resistencia aerodinámica y maniobras de mantenimiento de órbita y actitud.

1.2. El estudio de los procesos de materiales en el espacio

La ciencia y tecnología de los materiales en la Tierra han sido estudiadas con gran detalle; no es probable que aparezcan nuevas teorías científicamente revolucionarias por el mero hecho de poder trabajar en condiciones de gravedad reducida. Aun así, existe un gran interés de la comunidad científica por tener la posibilidad de contrastar teorías simples mediante experimentos no perturbados por la gravedad terrestre. Es esta oportunidad de "experimentación no perturbada" lo que justifica el enorme esfuerzo que se está dedicando hoy día a la ciencia de los materiales en el espacio.

De entre los fenómenos que merecen estudio en condiciones de ingravidez, se pueden citar:

- Aparición de las corrientes de convección y acoplamiento convección-difusión.

- Convección durante cambios de fase y reacciones químicas y su interacción con los procesos de transformación (especialmente aquellos responsables de la microestructura de los materiales sólidos).

- Influencia de la composición y temperatura en la distribución de densidad, viscosidad y difusividades térmica y másica en disoluciones y fundidos.

- Propiedades de equilibrio y fenómenos dinámicos en interfases: tensión superficial en función de la temperatura, composición y concentración de contaminantes.

- Interacción de meniscos con paredes sólidas: efectos de borde, ángulos de contacto, mojado y humectación.

- Parámetros termodinámicos cerca de los puntos críticos de transformación.

La simplificación del análisis de modelos teóricos sencillos de sistemas tan complejos como los anteriores está basada en los siguientes efectos debidos a la gravedad reducida: reducción drástica de la convección natural inducida por flotabilidad, disminución de la sedimentación, disminución de la estratificación por gradiente de densidad en las proximidades del punto crítico y posibilidad de aislamiento y levitación de muestras (ausencia de paredes).

Como contraposición a este amplio espectro de posibilidades de estudio ventajosos en ingravidez, hay que tener presente que el ambiente espacial introduce tantos o más problemas de los que resuelve: seguridad, sofisticación de los experimentos, fiabilidad, disponibilidades, accesibilidad, etc. Ya está pasada la época aventurera en que el mero hecho de realizar cualquier "experimento" a bordo de una nave espacial era razón suficiente de valía.

2. Efecto de la gravedad sobre la materia

2.1. Efectos a nivel macroscópico

El manejo de materiales en gravedad terrestre requiere un soporte (si son sólidos).

LA CIENCIA DE LOS MATERIALES EN EL ESPACIO

dos) o un recipiente (si son fluidos); en general, se puede decir que necesitan un apoyo o un medio de levitación y, además, un procedimiento de posicionado (mantenimiento o cambio de su situación relativa a otros cuerpos).

Por otra parte, la gravedad ocasiona un estado de esfuerzos y deformaciones en los sólidos, una presión hidrostática en los fluidos en equilibrio, y una pérdida de estabilidad en fluidos estratificados con gradiente de densidad opuesto al campo gravitatorio (inestabilidad de Rayleigh-Taylor), entre otros efectos; tal vez uno de los más curiosos sea el de la posición que adopta la superficie libre de un líquido en ingravidez.

La presencia de un campo de fuerzas másicas, como el gravitatorio, da lugar a fuerzas de flotabilidad en fluidos estratificados, siendo la fuerza proporcional a la intensidad del campo y a la diferencia de densidades. El efecto de la flotabilidad sobre las inclusiones en un fluido es el de sedimentar las partículas más pesadas (partículas sólidas o gotas de líquido en suspensión) y elevar las más ligeras (burbujas o gotas menos densas). Si las partículas son de tamaño microscópico o coloidal habrá que añadir otros efectos, como el movimiento browniano (fluctuaciones moleculares) que hace más lentos estos procesos de decantación.

La convección natural es crucial en casi todos los procesos de materiales con alguna fase fluida debido a su influencia en el transporte de masa (varía la concentración) y de energía (varía el campo de temperaturas). El problema es tan complejo que entre los técnicos metalúrgicos la convección natural se tenía por un hecho incontrolable, caprichoso (impredecible) e indeseable en la mayoría de las ocasiones (aunque en otras ayudaba a un buen mezclado).

De cualquier modo, hay que puntualizar que los efectos que origina la grave-

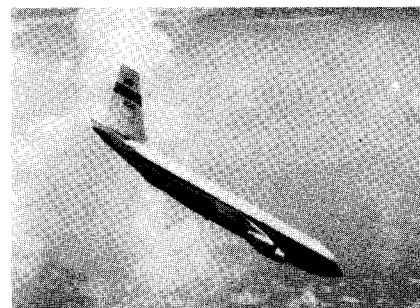
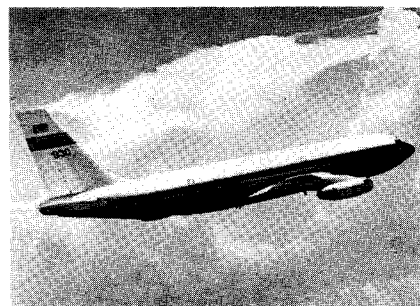
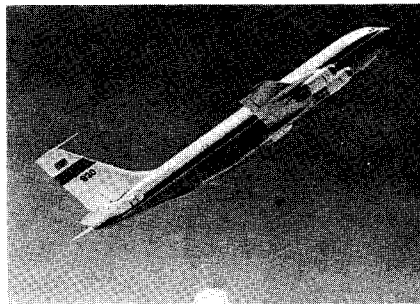


Fig. 2.— Con vuelos parabólicos de aviones y cohetes de sondeo se consiguen períodos de ingravidez que, aunque pequeños, son muy útiles para verificar los equipos y descubrir posibles problemas.

dad no pueden ser evaluados considerando tan sólo las fuerzas gravitatorias, sino que es necesario recurrir a una comparación con el resto de las fuerzas actuantes y analizar su importancia relativa.

Un cuidadoso análisis adimensional nos permite también diseñar experimentos en tierra que no estén dominados por la gravedad, por ejemplo trabajando con longitudes características pequeñas o con materiales de características más adecuadas (mayor viscosidad, menor coeficiente de dilatación, etc.), aunque ello suele añadir otros problemas secundarios, por lo que es preciso adoptar una solución de compromiso. En general, las posibilidades de llevar a cabo tales simulaciones disminuye al aumentar el número de parámetros que intervienen simultáneamente (existen numerosos fenómenos de combustión, solidificación y separación en los cuales es éste el caso).

2.2. Efectos a nivel microscópico

El efecto del campo gravitatorio a nivel de la energía atómica y molecular es despreciable; en estas dimensiones los campos eléctricos y magnéticos debidos a las demás partículas dan lugar a fuerzas mucho mayores, y, como la experimentación demuestra, la no inclusión de las fuerzas gravitatorias en la teoría da lugar a resultados aceptables (aunque se han apuntado algunas excepciones que tienen lugar en experimentos de resonancia que tratan de fenómenos hiperfinos).

Es decir, las ecuaciones de estado del equilibrio local, los ángulos de contacto en las líneas triples de unión de fases distintas, los coeficientes de transporte, etc., son independientes de la gravedad (al menos hasta los niveles alcanzados con las centrifugadoras actuales). Sin embargo, existe una excepción: los fenómenos en las proximidades de los puntos críticos.

2.3. Punto crítico

Hasta mediados del siglo pasado se pen-

LA CIENCIA DE LOS MATERIALES EN EL ESPACIO

saba que había dos tipos diferentes de gases, según que al comprimirlos isotérmicamente licuasen o no (se llamaba gases permanentes a estos últimos). Pero en 1869 Andrews publicó un trabajo experimental sobre el punto crítico del dióxido de carbono, estableciendo que la curva de presión de vapor tiene un punto límite (punto crítico), por lo cual, a partir de una cierta temperatura (temperatura crítica) por mucho que se comprima el gas no aparece una interfase definida gas-líquido. Apenas cuatro años más tarde (1873) van der Waals publicó su célebre tesis doctoral explicando este fenómeno con una teoría sencilla sobre la interacción molecular.

En cierto sentido, el punto crítico puede considerarse como un punto de unión entre fenómenos a nivel molecular y fenómenos a nivel de medio continuo. Cerca de un punto crítico, al ir disminuyendo el coeficiente de compresibilidad isoterma, $k = (1/\rho) (\partial\rho/\partial p)_T$ va creciendo hacia infinito, por lo que la más ligera variación de presión por efecto hidrostático da lugar a enormes variaciones de densidad, originando una estratificación que impide tener una fase homogénea. La explicación es que al ir acercándose al punto crítico, el tamaño de la masa de moléculas que interviene en las fluctuaciones térmicas va aumentando y las diferencias de energía potencial empiezan a ser importantes, con lo que las ecuaciones de estado, los coeficientes de transporte, etc., se hacen dependientes de la gravedad (el modo en que esto ocurre todavía no se entiende bien).

En estos procesos el tiempo es un parámetro importante: cuanto más cerca del punto crítico, más lentos son los procesos de transporte que llevan al equilibrio. Por ejemplo, para un experimento cuya escala de longitud es de un centímetro, el tiempo de aproximación al equilibrio es de varias horas. Los coeficientes de difusión tienden a cero y para lograr equilibrio de concentraciones en un sistema de varios componentes se pueden necesitar días.

3. La convección en el proceso de materiales

En los procesos con masas fundidas o

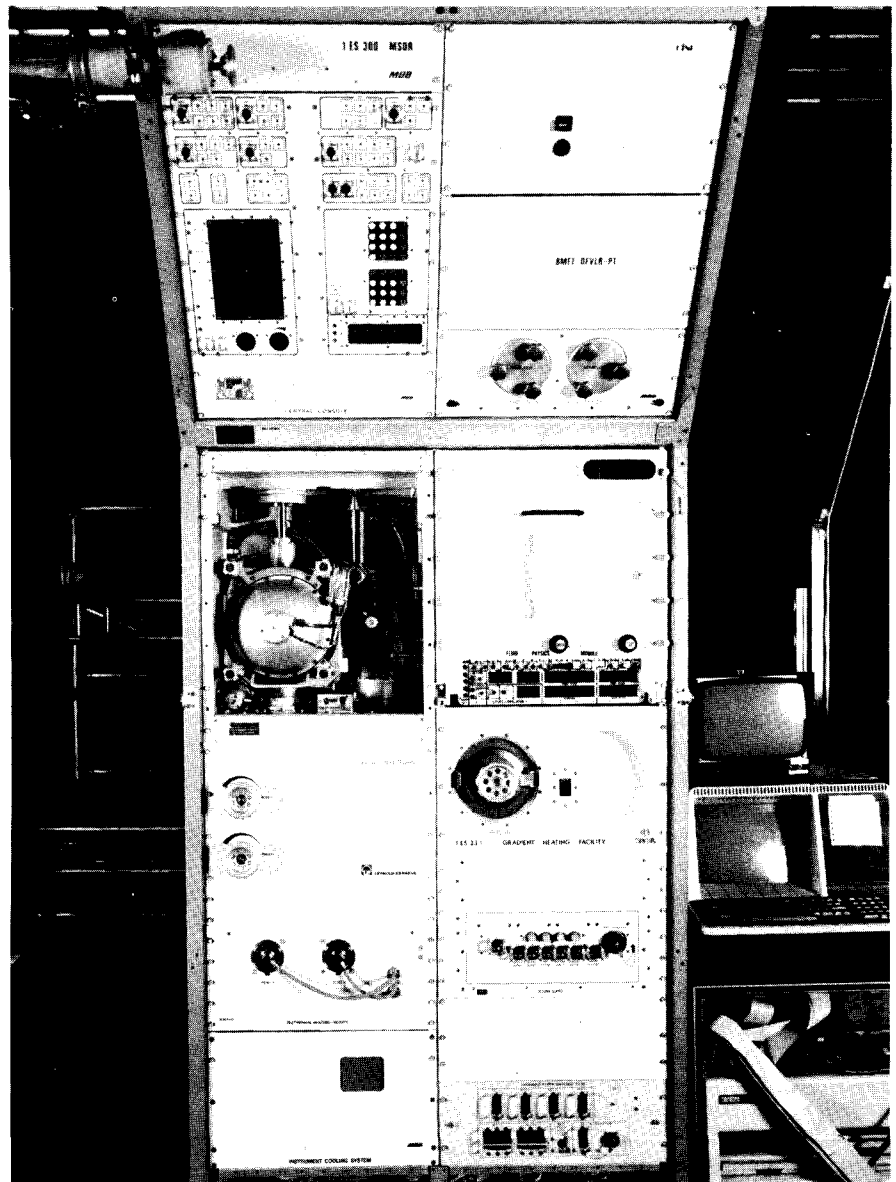


Fig. 3.— Banco de ensayo de materiales, utilizado en las misiones Sapcelab-1 y D1. El panel desmontado deja ver el Horno de espejos elípticos, donde se obtuvo el monocristal de la Figura 6. A su derecha, el Módulo de física de fluidos.

LA CIENCIA DE LOS MATERIALES EN EL ESPACIO

con vapores se suele liberar una gran cantidad de energía en el frente de solidificación y en el de reacción, si los hubiera. Esta energía interna se libera en una capa delgada, más o menos curva, a través de la cual existe un salto brusco de las propiedades físicas y químicas (sobre todo si existen reacciones de combustión). El salto de densidades a través del frente tiene una importancia capital en presencia de la gravedad (u otro campo de fuerzas másicas cualesquiera); este salto de densidades va acompañado de diferencias de concentración debido al cambio de fase y a la segregación.

Aun con gravedad, si no hubiera salto de densidades, las transformaciones tendrían lugar sin que apareciesen corrientes de convección, desplazándose el frente a través de la masa de material sin originar más que un proceso de difusión inherente a la diferencia de composición a uno y otro lado. Pero la acción conjunta de la gravedad y el gradiente de densidades da lugar a la aparición de corrientes de convección que aceleran perpendicularmente el fluido en contacto con el frente y curvan la interfase.

Para la verificación de teorías sobre inestabilidades y no uniformidades del frente de propagación de la solidificación, es conveniente hacer crecer cristales a baja velocidad pero con un gran gradiente de temperatura, lo cual es una fuente de movimiento convectivo por diferencia de densidades (si hay gravedad) que originará imperfecciones e inestabilidades en el frente. Trabajando en ingravidez se evitaría esta convección por gravedad, pero hay que tener presente que eso no quiere decir que se suprima toda corriente de convección, pues hay otros muchos fenómenos que la inducen, como el gradiente de temperaturas y/o concentración a lo largo de una interfase (convección de Marangoni).

4. Procesos sin paredes

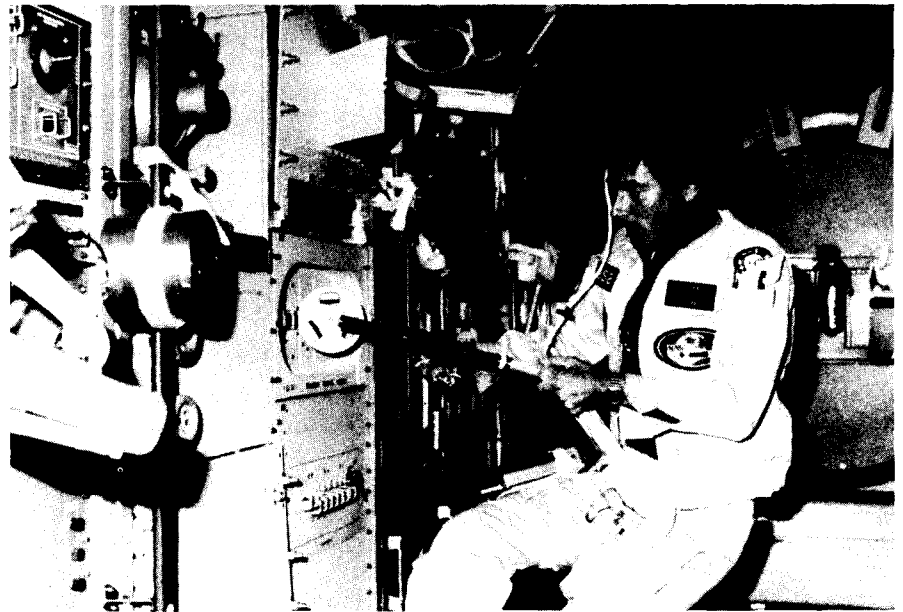
Para ciertos experimentos científicos y tecnológicos de medida de propiedades o de proceso de materiales se requiere mantener una muestra, en general un líquido, sin contacto con paredes (para evitar la contaminación por ellas, o la reacción, o el simple contacto térmico y mecánico). Con gravedad, sería necesario oponer una fuerza másica de la misma intensidad que el peso; esto se ha hecho con campos electromagnéticos, pero es sólo aplicable a ciertos materiales y bajo condiciones muy restrictivas.

Aunque ya no sea tan bueno, se puede compensar el peso de la muestra mediante fuerzas de superficie: hidrostáticas (baño neutro), aerodinámicas (corriente de aire) o acústicas (ondas estacionarias), aunque ello da lugar a una convección forzada en la superficie por efecto de la capa límite. En cualquier

caso, las posibilidades de estos dispositivos están severamente limitadas en cuanto a tamaño de la muestra, ya que todos los efectos perjudiciales son proporcionales a la fuerza de levitación y por tanto al peso. Conviene, pues, disminuir el peso.

Aunque en un laboratorio espacial la muestra "flota", siempre es necesario disponer de un procedimiento de control de posición, ya que, la experiencia adquirida en vuelo, muestra que las pequeñas perturbaciones en órbita y actitud de la nave y la velocidad residual de posicionado de la muestra originan una deriva hacia las paredes de la cámara de ensayo. Para evitar esta deriva y para controlar la posición relativa de dos o más muestras, se han ideado dispositivos electromagnéticos y acústicos cuyos efectos secundarios (convección inducida) son despreciables por la baja intensidad del campo (que ahora ya no soporta tanta carga como en tierra).

Fig. 4.— El científico Ulf Merbold cambiando un cartucho en el Horno de Gradiente térmico, durante el vuelo del Spacelab-1.



LA CIENCIA DE LOS MATERIALES EN EL ESPACIO

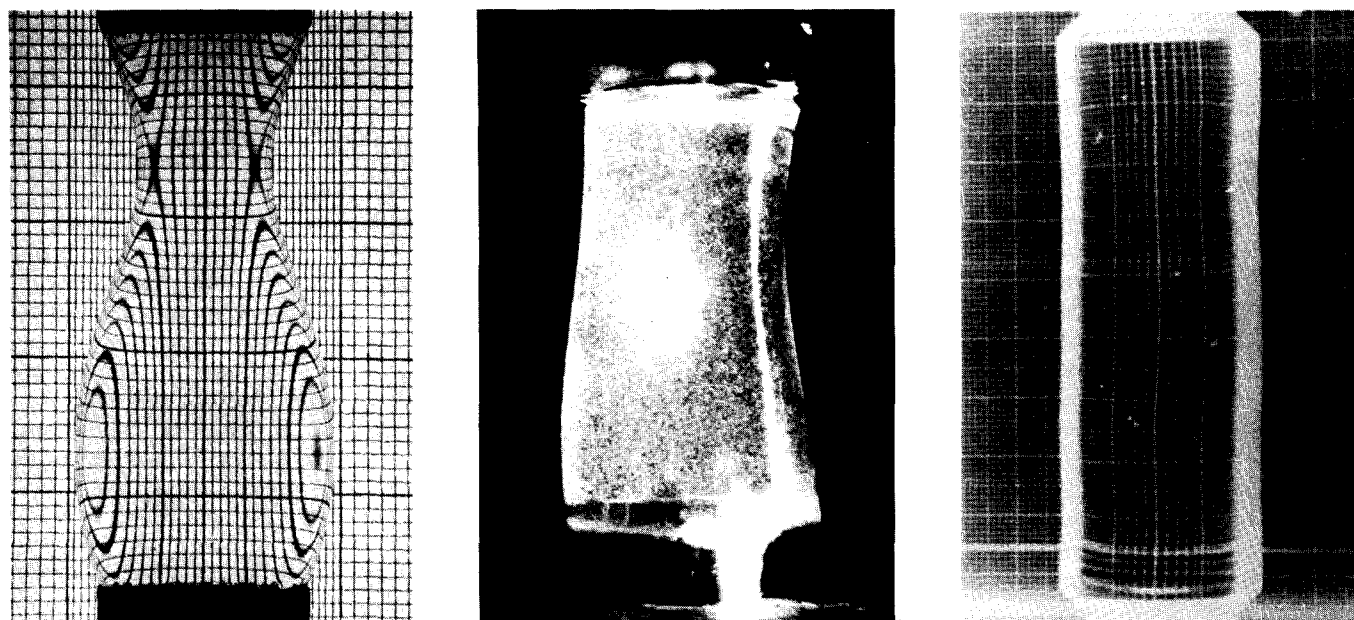


Fig. 5.— Ejemplos de zonas líquidas flotantes: *a)* ensayos en Tierra con baño exterior, *b)* puente líquido de 96 mm de longitud obtenido en el Spacelab-1 (Dic-83), *c)* puente de 82 mm obtenido en el cohete TEXUS-12 (mayo-85). La columna líquida es de aceite de silicona.

5. Zonas líquidas flotantes

Un procedimiento intermedio entre la utilización de cartuchos llenos de material a tratar y la levitación de la muestra aislada es el de mantener una masa líquida ligeramente apoyada en una superficie sólida. De entre las diferentes formas de hacer esto, la que está siendo más estudiada es la de una columna líquida entre dos discos paralelos coaxiales separados entre sí, debido por una parte a la sencillez de la geometría y por otra al alto grado de control y manipulación que permite. Ya se ha construido varios aparatos para el estudio experimental con esta técnica (zona flotante) a bordo del Spacelab. Con esta configuración se pueden estudiar numerosos fenómenos fisicoquímicos: inestabilidades de interfase, tensiones interfaciales, convección de Marangoni, efectos macroscópicos de las fuerzas in-

termoleculares, electroforesis, dinámica del mojado de sólidos por líquidos, hidrodinámica de burbujas y partículas en suspensión, difusión de solutos, etc. Esta técnica de trabajo no es nueva; en metalurgia se usa para el crecimiento y purificación de cristales (método de Czochralski), en las acerías de colada continua, etc.; su estudio en ingravidez promete perfeccionar y potenciar su utilización en la Tierra.

6. Resultados y conclusiones

Nos vamos a limitar aquí a comentar algunos de los espectaculares resultados obtenidos en el Spacelab-1. Pero antes conviene precisar que este vuelo no era "operacional", sino de verificación del acoplamiento Shuttle/Spacelab y de demostración, como así se acordó en el protocolo de colaboración NASA/ESA

de 1973. En efecto, el 28 de Noviembre de 1983, tras varios años de retraso, tuvo lugar el primer vuelo del Spacelab, que duró 10 días (los vuelos normales son de una semana). De los 70 grandes experimentos programados, uno era el de "Ciencia de los materiales", bajo cuyo nombre se realizaron cientos de pequeños experimentos (entre ellos uno español, sobre estabilidad de zonas líquidas flotantes).

Se lograron dos muestras de cristales grandes de proteínas, 30 y 1.000 veces mayores que en la Tierra, respectivamente, lo que aquí es imposible debido a su fragilidad, pues las corrientes de convección o la estructura del gel usado, los rompen. La importancia es enorme, pues se posibilita con ello el estudio de su complicada estructura por difracción con rayos X.

Tampoco se pueden obtener en la Tie-

LA CIENCIA DE LOS MATERIALES EN EL ESPACIO

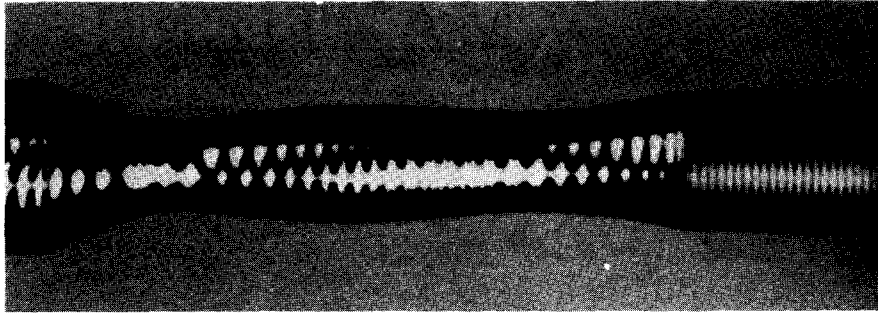


Fig. 6.— Varilla monocristalina de 122 mm de longitud y 10 mm de diámetro, de silicio dopado con fósforo, obtenida en el Spacelab-1.

En ciertas aleaciones de metales muy diferentes, debido a la segregación microscópica que la gravedad causa durante la solidificación. Sin embargo, en este caso los resultados mostraron que se trata de una segregación intrínseca, no dominada por la gravedad. Otro hallazgo más.

En otro experimento se observó un fuerte aumento de la velocidad de migración térmica en ingravidez, lo que hace pensar que la separación de isótopos en fase líquida, que actualmente es un proceso muy ineficiente, puede mejorarse mucho.

En resumen, muchos de los métodos usados actualmente en el proceso de

materiales, sobre todo en las técnicas modernas de crecimiento de cristales de semiconductores, han sido desarrollados empíricamente con una falta de entendimiento teórico que se hace notar cada vez más. Los procesos son complicados porque en ellos intervienen varias fases, geometrías de poca simetría, campos de temperaturas no uniformes, etc.; además, la gravedad terrestre introduce complicaciones adicionales por las inestabilidades que origina en las fases fluidas, en las que aparecen corrientes de convección que enmascaran en gran parte los fenómenos básicos. La experimentación en las condiciones de microgravedad de los laboratorios orbitales permite la contrastación de teo-

rías básicas que no tienen en cuenta corrientes de convección ni efectos hidrostáticos.

Se podría mencionar como último ejemplo que las variaciones de la resistividad a través de una lámina de silicio comercial (que vale a 50.000 pts./kg.) puede ser del 10% ó el 20%, mientras que los requerimientos para aplicaciones comunes (transistores, diodos, sensores y circuitos integrados) van aumentando sin cesar. El volumen de consumo de estos materiales crece a un ritmo vertiginoso, y en orden a mejorar la relación calidad/precio, será necesario un diseño apropiado de experimentos sencillos y claros, en un esfuerzo conjunto de científicos y técnicos para lograr un entendimiento más perfecto de los procesos fundamentales de obtención y tratamiento de materiales en la Tierra.

Finalmente, conviene recordar que, aparte de estos logros científicos que se van consiguiendo y su influencia en la tecnología terrestre a ellos asociada, existe un beneficio tecnológico paralelo que en este caso, por ejemplo, ha contribuido a que Europa, que no supo despertar a tiempo a la revolución microelectrónica, siga siendo competitiva en tecnología aeroespacial.



*Isidoro Martínez Herranz
Dr. Ingeniero Aeronáutico
Profesor Titular de la E.T.S.I.A.*

