

ZONAS LIQUIDAS FLOTANTES

Por Isidoro MARTINEZ HERRANZ
Ingeniero Aeronáutico

Se intenta dar en este artículo una breve, pero variada, exposición del comportamiento de las zonas flotantes. Se empieza dando cuenta de la realidad física de tales configuraciones, justificando a continuación la utilidad de su conocimiento. En un tercer apartado se esboza la situación actual y los antecedentes en el estudio de zonas flotantes, culminando este artículo con el desarrollo de un importante ejemplo: el análisis del equilibrio y estabilidad espacial de la zona. De cara al futuro, se ha estimado conveniente hacer mención al Módulo de Ensayos Físicos con Fluidos, que volaría en la primera misión «Spacelab», para acabar mostrando una secuencia típica de experimentación.

1. INTRODUCCION

Bajo el apelativo de columnas líquidas en ingravidez, o mejor, «zonas líquidas flotantes», se entiende un volumen de líquido comprendido entre dos placas, en ausencia de fuerzas másicas de gravitación (flotando).

Las fuerzas que gobiernan estas configuraciones suelen ser de superficie (ejercidas en el contorno del volumen líquido): tensión superficial, adherencia a las placas, y las perturbaciones que actúan sobre el contorno (vibraciones, giros, presencia de la zona en una atmósfera en movimiento, etc.), aunque también puede haber perturbaciones que den lugar a fuerzas másicas: inerciales, electromagnéticas, gravitatorias, etcétera.

Uno de los fines a conseguir en este campo es la puesta a punto de la técnica de zonas flotantes para su utilización en laboratorios espaciales de aplicación.

El análisis teórico en curso llegaría a cumplir los siguientes objetivos:

1.º Análisis de la geometría de las zonas flotantes en equilibrio, su estabilidad y estructura hidrodinámica.

2.º Predicción de tolerancias admisibles en el diseño de equipos que utilicen la zona flotante.

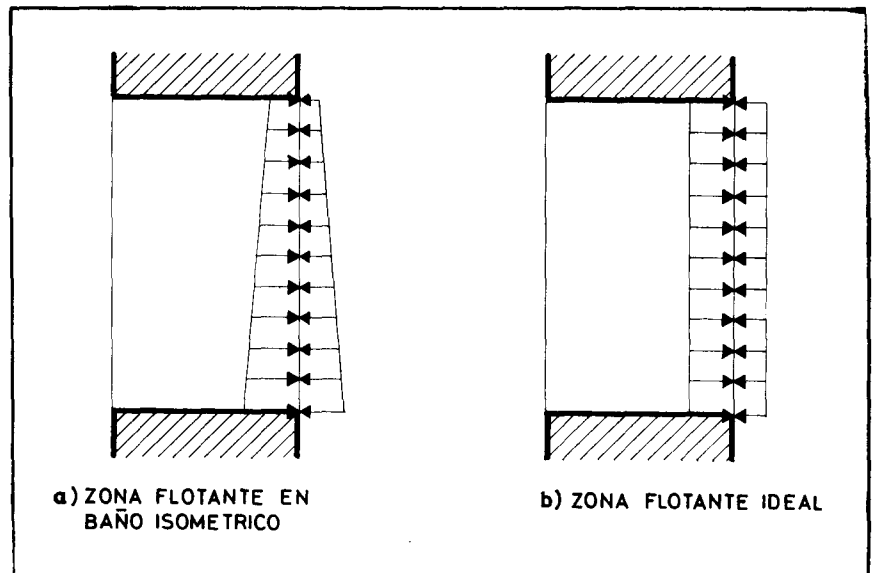
2. OBTENCION DE ZONAS LIQUIDAS FLOTANTES

Para la obtención de zonas flotantes han sido utilizados los siguientes procedimientos, citados en orden cronológico:

cedimientos, citados en orden cronológico:

Baño isométrico (flotabilidad neutra) [1], utilizando un baño líquido de densidad igual al de la zona, dentro del

Fig. 1.—Perfiles de presión: a) en la superficie de una zona cilíndrica flotando en baño isotérmico; b) caso ideal (sin fuerzas másicas).



cual se hacía la experimentación. Este procedimiento, pese a ser el de más fácil realización, el más usado, y sin duda alguna el más bello, adolece de serios inconvenientes:

— No se consigue con él la anulación de las fuerzas másicas, sino que sólo se logra que no influyan en el equilibrio local en la superficie libre, como se puede apreciar en la fig. 1.

— Se falsea una de las dos fuerzas que gobiernan la forma de equilibrio y la estabilidad de la zona flotante, ya que la tensión superficial (o energía superficial) es función de ambos medios contiguos y además el ángulo de contacto de un líquido con un sólido depende del tercer medio que forma con los dos anteriores la línea de contacto triple (ver fig. 2).

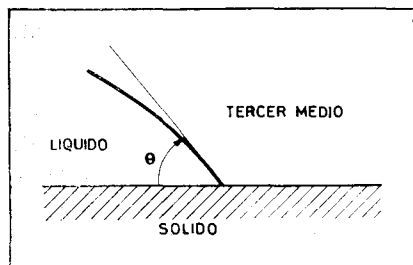


Fig. 2.—Ángulo de contacto de un líquido con un sólido.

— Al ser la densidad del medio que rodea la zona comparable a la de ésta (igual), quedan enmascarados los procesos dinámicos, y en especial la estabilidad.

— La gran densidad del medio circundante altera el equilibrio local con fuerzas másicas (invalida, por ejemplo, el análisis de la zona en rotación).

— La viscosidad del baño influye en el equilibrio hidrodinámico en la superficie.

— La zona se contamina (sobre todo su superficie), debido a la difusión.

— El acceso a la zona es complicado.

Suspensión electromagnética [2], manteniendo el líquido de la zona en un campo electromagnético que contrarreste directamente las fuerzas másicas de gravitación. La escasa efectividad del sistema y la tremenda restricción que impone en cuanto a líquidos candidatos (en general, metales fundidos), unido a su excesivo control de la hidrodinámica de la zona, parecen haber descartado este procedimiento.

Ingravidéz, es decir, cancelación de las fuerzas másicas gravitatorias con las de inercia de un movimiento acelerado, que puede ser:

- a) Caída libre en torre de vacío

(condición de ingravidéz durante algunos segundos).

b) Caída libre de proyectiles elevados a la estratosfera (hasta 40 Km.) mediante globo. Por la baja densidad del aire a esas cotas, se llegan a conseguir decenas de segundos de ingravidéz [3].

c) Vuelo parabólico. Condiciones de ingravidéz durante algunos minutos sin imperativos de carga útil y con inmejorables posibilidades de filmación y manipulación.

d) Cohetes de sondeo. Condiciones de ingravidéz hasta unos 15 minutos [4].

e) Vuelo orbital. Ningún inconveniente [5].

Los ensayos con zonas flotantes requieren extremo cuidado y un cierto tiempo, por lo que solamente resultan aptos los tres últimos procedimientos anteriormente citados, y en especial el vuelo orbital, donde se hicieron las primeras pruebas a bordo del «Skylab» IV. La Agencia Espacial Europea (ESA) tiene en proyecto la puesta en el laboratorio espacial «Spacelab» de un módulo de ensayos físicos con fluidos (FPM), para la experimentación metódica y rigurosa con zonas líquidas flotantes.

Para situar la zona líquida entre las dos placas puede utilizarse cualquier procedimiento, desde la inyección axial a través de una de las placas, a la simple deposición directa desde una pipeta, pasando por el método artesanal de conducir una gota flotante hasta las placas, con ayuda, por ejemplo, de una varilla.

3. APLICACIONES DE LA ZONA FLOTANTE

Aparte del indudable valor científico que representa el conocimiento de este nuevo campo de la mecánica de fluidos, y que de por sí justificaría su estudio y experimentación, existen numerosas aplicaciones prácticas de las zonas flotantes en la tecnología espacial, entre las que se destacan: el crecimiento cristalino y la electroforesis.

3.1. Crecimiento cristalino

En la obtención, refinado, manejo y utilización de metales se hace uso de la cristalización a partir del metal fundido. Así se viene haciendo desde la Edad de los Metales, con ayuda de un crisol y una fuente térmica. Estudios llevados a cabo en estas últimas décadas demuestran que con los procedimientos usuales no llegamos a obtener más que la décima parte de las posibilidades en características, por culpa de las imperfecciones cristalinas. Entre las causas más importantes de esta merma están: impurezas presentes, contaminación por el crisol y la atmósfera, corrientes internas de convección libre, etc.

Con la llegada en los años 40 de la utilización masiva de materiales semiconductores, se hizo imprescindible una mejora en la estructura cristalográfica disponible, desarrollándose nuevos métodos de crecimiento, de entre los que cabe destacar el de la columna líquida de Czochralski (en los años 50) y el de la zona líquida (en los 60). En la fig. 3 se representan esquemas de ambos procedimientos en comparación con una zona flotante.

Sobre la importancia de la obtención de cristales perfectos de aplicación electrónica, no hay que insistir: memorias de computadoras, microondas, optoelectrónica, detectores piezoeléctricos, ultrasónicos, etc., etc.; todo ello requiere cristales perfectos de Si y Ge, así como de materiales compuestos (semiconductores, ferromagnéticos, optoelectrónicos, piezoeléctricos, etc.) de una gran perfección [6].

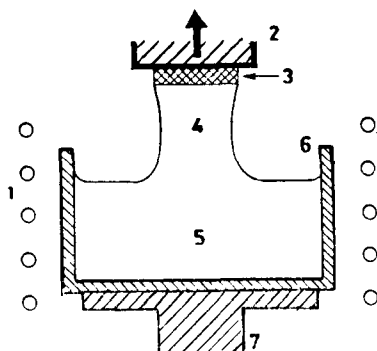
3.2. Electroforesis

La electroforesis es un procedimiento de separación de elementos en un compuesto, basado en el transporte neto de carga eléctrica por una partícula o ión, suspendido en un medio y en presencia de un campo eléctrico. Dependiendo de la carga de la partícula y de su tamaño, aparecen diferentes velocidades de difusión, que fraccionan la composición de la mezcla [7]. Pese a ser una técnica bien extendida en medicina (análisis proteínicos), su efecti-

I. MARTINEZ HERRANZ, Ingeniero Aeronáutico (ETSIA, Madrid), 1975. Profesor Ayudante de Aerodinámica en la ETSIA. Desde 1974 forma parte del grupo de Investigación de ETSIA Lab. Aer., bajo la dirección del Profesor I. Da Riva.

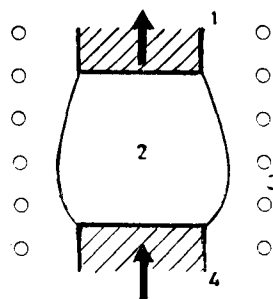


Fig. 3.—Métodos de crecimiento cristalino sin crisol.



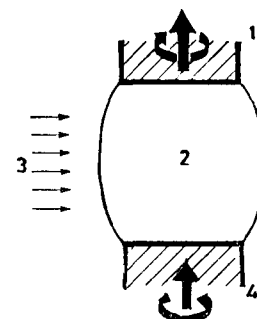
METODO DE CZOCHRALSKI

- 1 - Calentador
- 2 - Varilla de estirado
- 3 - Cristal puro inicial
- 4 - Cristal formado
- 5 - Fundido
- 6 - Crisol
- 7 - Soporte



ZONA LIQUIDA (CON GRAVEDAD)

- 1 - Varilla receptora
- 2 - Zona fundida
- 3 - Bobina de alta frecuencia
- 4 - Varilla suministradora



ZONA FLOTANTE (SIN GRAVEDAD)

- 1 - Varilla receptora
- 2 - Zona fundida
- 3 - Radiación laser
- 4 - Varilla suministradora

vidad está disminuida a causa de la contaminación de las paredes (coalescencia, electroósmosis, dispersión, etc.), y de la segregación debida al campo gravitatorio actuando sobre partículas de masa diferente. Ambos inconvenientes citados serían evitados usando una zona flotante como por ejemplo la de la fig. 4.

Existen otras aplicaciones de la zona flotante, pero todas ellas pueden agruparse en una u otra de las siguientes facilidades:

- 1.º Mantenimiento de zonas líquidas en ausencia de fuerzas másicas.
- 2.º Mantenimiento de zonas líquidas sin contacto con paredes.
- 3.º Estudio de la interfase líquido-gas en condiciones favorables.
- 4.º Estudio de las condiciones de mojado líquido-sólido-gas.
- 5.º Estudio del movimiento de burbujas en un líquido ingrávito: ebullición en el espacio.

Una de las grandes ventajas de la zona flotante se deriva de su gran tamaño (de todos modos la estabilidad se hace más precaria al aumentar el volumen). En la tierra, la máxima longitud estable de una columna líquida es, según Heywang [8],

$$L_{\max} = 2.84 \sqrt{\frac{\sigma}{\rho g}} \quad (1)$$

siendo σ la tensión superficial líquido-gas, ρ la densidad del líquido y g la aceleración de la gravedad. Fácilmente

se comprueba el conocido orden de valores para el agua: unos 4 ó 5 milímetros. (Se toca con un dedo una gota de agua y se va separando lentamente.)

En las zonas flotantes, la longitud máxima estable puede llegar a ser

$$L_{\max} = 2\pi R, \quad (2)$$

lo que, para un radio R de unos 2 cm. nos proporciona una columna de unos 12 cm. de larga.

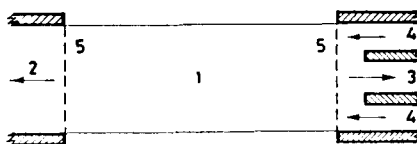


Fig. 4.—Electroforesis continua en zona flotante.

- 1 - Zona flotante
- 2 - Extracción de la especie pura
- 3 - Eliminación de restos
- 4 - Aporte de preparados
- 5 - Electrodo

4. EL ESTUDIO DE LAS ZONAS FLOTANTES

No existe un estudio concreto sobre la zona flotante, si bien se ha escrito mucho sobre problemas con ella relacionados.

Young y Laplace sentaron los fundamentos de la teoría de la tensión superficial. Los experimentos de Plateau merecen mención especial, ya que, a mediados del siglo pasado llevó a cabo el más exhaustivo análisis de las formas de equilibrio y la estabilidad de zonas líquidas en baño isométrico. A finales de siglo, Rayleigh [9] hizo un profundo estudio teórico.

Aparentemente desconectado de la zona flotante está el estudio de la hidrodinámica debida a un disco girando en el seno de un fluido (problema de Kármán [10], pero que, por las múltiples aplicaciones de las zonas flotantes giratorias, supone una gran contribución al estudio general de su comportamiento.

Con mayor prelación, se vino profundizando en el estudio de la zona flotante: Rayleigh [11] (1914), Appel [12] (1932), Chandrasekhar [13] (1965), Wang [14] (1975), etc., debido en gran parte a su posible aplicación a teorías generales de astrofísica y combustión.

La zona flotante quedó a un lado hasta que las exigencias de la tecnología electrónica requirieron el perfeccionamiento de la recristalización de semiconductores. Gillis [15] establece en 1962 el límite máximo de estabilidad en rotación para columnas líquidas flotantes de sección circular, experimentando con baño isométrico; Mason [16] lo hace con película líquida. Carruthers y col. [17] hicieron el análisis de los ensayos que se llevaron a cabo a bordo del «Skylab» IV en 1973 (primeros ensayos con zona flotante) y, en esencia, en el 2.º Symposium Europeo de Ciencias de los Materiales en el Espacio, celebrado en Frascati (Italia) del 6 al 8 de abril de 1976, quedó marcado el estado actual de conocimientos sobre la zona flotante, en los términos siguientes: los estudios de las formas axilimétricas de equilibrio de una zona flotante, y la estabilidad de las formas cilíndricas, están suficientemente desarrollados; los estudios de la dinámica interna de la zona requieren, en cambio, un mayor esfuerzo, pues, como muestran algunos experimentos [18], el flujo convectivo por gradiente

de tensión superficial puede llegar a ser más dañino que el de convección libre en gravedad terrestre.

Para promover el estudio de la zona flotante, la Agencia Espacial Europea ha dispuesto el diseño y construcción de un Módulo de Ensayos Físicos con Fluidos (FPM) y, dado su especial interés, tiene prevista su utilización en la Primera Misión «Spacelab» para 1980. La empresa española CASA, con el asesoramiento científico de la Universidad Politécnica de Madrid (ETSIA Lab. Aer.), realizó el estudio de anteproyecto de dicho aparato [19].

La ESA ha hecho varios llamamientos para la presentación de Propuestas de Investigación a realizar en la Primera Misión «Spacelab», resultando admitidos para la experimentación en el FPM los siguientes grupos universitarios: Erlangen (D), Bristol (UK), Nápoles (I) y Madrid (ETSIA Lab. Aer.) y el centro privado de investigación Kodak Research Div. (UK).

5. PERSPECTIVAS FUTURAS

El análisis estático de la geometría de las zonas flotantes está hecho en los casos más simples. Para casos más específicos sería necesario dar un paso más en el estudio realizado; pero, considerando que el método ha sido ya trazado y que, hoy por hoy, la importancia de estas nuevas configuraciones es secundaria, a la vista del esfuerzo requerido por los estudios hidrodinámicos, parece lógico desviar el análisis hacia estos requerimientos prioritarios. Citemos, eso sí, los nuevos problemas previstos:

- Equilibrio en presencia de gravedad residual.

- Equilibrio en presencia de otros soportes (no paralelos, no circulares, etc.).

- Equilibrio en una atmósfera en movimiento, etc.

El análisis de la estabilidad del equilibrio de las zonas cilíndricas puede considerarse desarrollado, pero se hace imperativa la necesidad de corroborar experimentalmente la validez de los resultados obtenidos y la adecuación de las hipótesis utilizadas. El ofrecimiento de varias entidades relacionadas con el campo espacial (ERNO en Alemania Federal y CNES en Francia), de suministrar las facilidades de experimentación en ingravidez (con cohetes de sondeo y globos, respectivamente) debería ser aprovechado al máximo para sacar el mayor beneficio posible a la hora de la utilización del Laboratorio Espacial («Spacelab»).

Para el caso general de zonas no cilíndricas, convendrá seguir el estudio de la estabilidad.

También sería deseable ampliar estos estudios para tener en cuenta fenómenos no lineales que puedan introducir efectos importantes en la estabilidad.

El estudio de la dinámica interna de la zona requiere un mayor esfuerzo: la teoría desarrollada para líquidos confinados apenas si tiene utilidad para zonas flotantes, y la teoría para fluidos ilimitados (problema de Kármán y similares), basada en leyes de semejanza, tampoco tiene aplicación directa en nuestro estudio. Los esfuerzos viscosos, en un caso, y el principio de continuidad, en el otro, desfiguran completamente las distribuciones de presión y velocidades.

En los próximos años deberá llevarse

a cabo un análisis detallado y profundo de las configuraciones esperadas, aprovechando los primeros vuelos del «Spacelab» para verificar hipótesis y resultados, con el fin de disponer de una teoría consolidada y fiable a la hora de la utilización práctica de zonas líquidas flotantes, en las diversas aplicaciones.

6. EQUILIBRIO Y ESTABILIDAD DE LA ZONA FLOTANTE

Sea una zona líquida flotante en una atmósfera poco densa, mantenida entre dos placas paralelas con posibilidad de giro global según se muestra en la fig. 5.

No se consideran efectos dinámicos.

Al ser un problema de hidrostática, la presión en el líquido sólo varía por las fuerzas másicas,

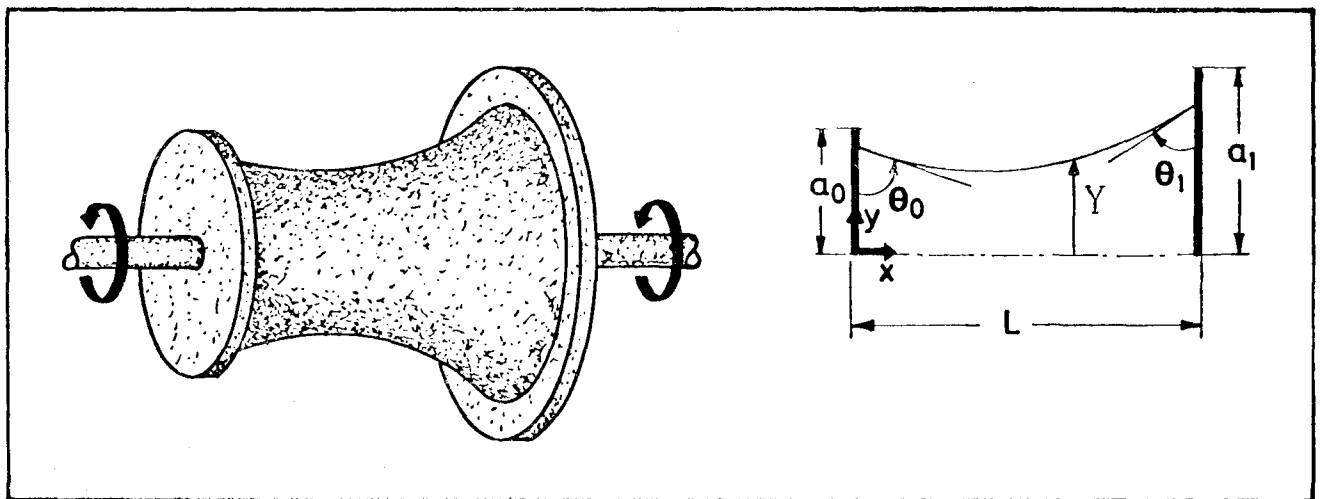
$$P = P_0 + \frac{1}{2} \rho \Omega^2 y^2 \quad (3)$$

siendo Ω la velocidad de giro, ρ la densidad del líquido y P_0 la presión en el eje de la zona, que se determinará imponiendo la condición de contorno en la superficie libre:

$$\sigma \left[\frac{Y''}{(1 + Y'^2)^{3/2}} - \frac{1}{Y(1 + Y'^2)^{1/2}} \right] + (P_0 - P_a) + \frac{1}{2} \rho \Omega^2 Y^2 = 0 \quad (4)$$

donde el primer sumando es la curvatura total, el segundo la caída de presión desde el eje a la atmósfera y el tercero el efecto inercial, siendo σ la

Fig. 5.—Esquema de una zona flotante.



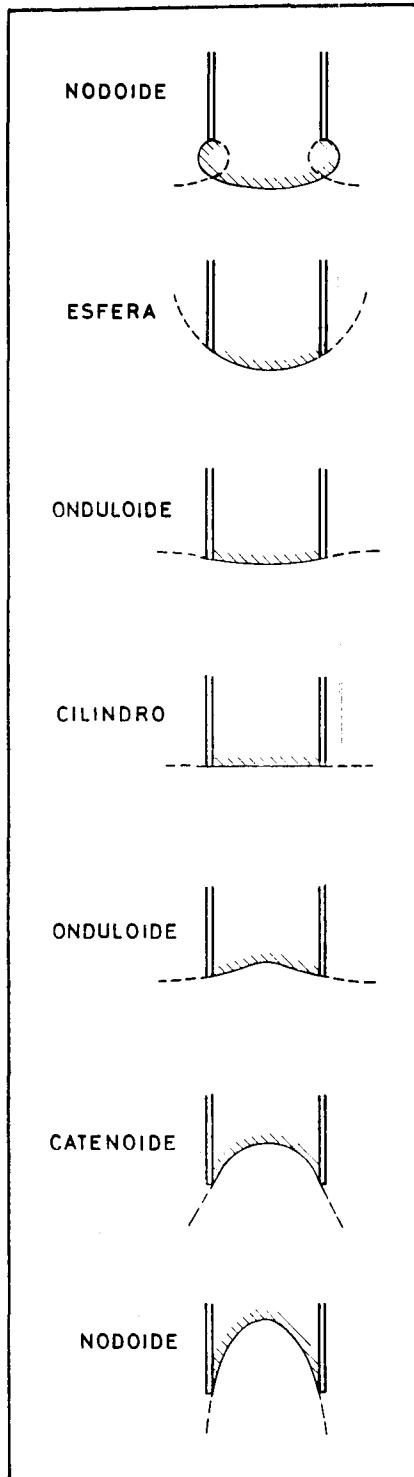


Fig. 6.—Perfiles de una zona flotante sin rotación, para diferentes volúmenes (bordes anclados).

tensión superficial, P_a la presión atmosférica exterior a la zona, e $Y(x)$ la ordenada de la superficie libre. A esta ecuación diferencial de segundo orden,

no lineal, será preciso añadir las condiciones de contorno en los límites de la zona:

$$Y(0) = a_0, \quad Y(L) = a_1$$

si el líquido llega a los bordes de las placas

$$Y'(0) = -\text{ctg } \theta_0, \quad Y'(L) = \text{ctg } \theta_1$$

si puede deslizar libremente sobre las placas a ángulos de contacto fijo

$$Y(0) = a_0, \quad Y'(L) = \text{ctg } \theta_1$$

si las condiciones son mixtas (5)

Para dejar completamente definido el problema hay que dar el volumen V de líquido en la zona,

$$V = \pi \int_0^L Y^2 dx \quad (6)$$

La resolución del problema requiere la ayuda del cálculo numérico, pues se llega a integrales hiperelípticas. Sí podemos decir que en el caso $\Omega = 0$ las diferentes superficies que se obtienen al ir disminuyendo el volumen son del tipo representado en la fig. 6 [20].

Para el estudio analítico de la estabilidad de una cualquiera de las formas de equilibrio, es necesario, en general, conocer dicha forma analíticamente, estudiando su estabilidad espacial (si es o no la única forma posible de equilibrio en las proximidades), plantear las complicadas ecuaciones del equilibrio dinámico y estudiar la estabilidad temporal del equilibrio (si la forma se recupera tras una pequeña deformación).

Vamos a exponer a continuación el análisis de la estabilidad espacial de una zona líquida cilíndrica.

Sea $Y = R$ la solución (cilindro). ¿Existirá alguna otra solución infinitamente próxima, o será ésta la única? Desarrollando las ecuaciones (4), (5) y (6) con

$$Y(x) = R + \varepsilon \eta(x) \quad (7)$$

$$P_0 - P_a = -\frac{\sigma}{R} - \frac{1}{2} \rho \Omega^2 R^2 + \varepsilon p \quad (8)$$

obtenemos el nuevo problema, linealizado respecto al cilindro,

$$\eta'' + \left(\frac{1}{R^2} + \frac{\rho \Omega^2 R}{\sigma} \right) \eta = -\frac{p}{\sigma} \quad (9)$$

una de estas tres condiciones

$$\eta(0) = \eta(L) = 0 \quad (10)$$

$$\eta'(0) = \eta'(L) = 0 \quad (11)$$

$$\eta(0) = \eta'(L) = 0 \quad (12)$$

y la conservación del volumen,

$$\int_0^L \eta dx = 0 \quad (13)$$

cuyas soluciones no triviales (distintas del cilindro), se calculan muy fácilmente [21], resultando, para cada caso respectivo,

bordes anclados

$$\begin{aligned} \text{sen } \frac{L}{R} = 0 & \longrightarrow \frac{L}{R} = 2\pi, 4\pi, \dots \\ \cos \frac{L}{R} = 1 & \\ \text{o} & \end{aligned}$$

$$\frac{L}{2R} = \text{tg } \frac{L}{2R} \longrightarrow \frac{L}{R} = 9, 28, \dots$$

$$\text{de donde } L_{\text{max}} = 2\pi R \quad (14)$$

bordes libres

$$\text{sen } \frac{L}{R} = 0 \longrightarrow \frac{L}{R} = \pi, 2\pi, \dots$$

$$\text{de donde } L_{\text{max}} = \pi R \quad (15)$$

un borde anclado y el otro libre

$$\frac{L}{R} = \text{tg } \frac{L}{R} \longrightarrow \frac{L}{R} = 4,5, 14, \dots$$

$$\text{de donde } L_{\text{max}} = 4,5 R \quad (16)$$

$$\text{siendo } R = R \left(1 + \frac{\rho \Omega^2 R^3}{\sigma} \right)^{-1/2}$$

en todos los casos

El resultado para bordes anclados coincide con el límite de estabilidad varicosa de Rayleigh, fue ya predicho por Gillis y ha sido comprobado experimentalmente numerosas veces. Los otros dos límites de estabilidad no han sido comentados (tal vez por la deficiente simulación de las condiciones de mojado en los experimentos), por lo que es preciso un programa de ensayos con vistas a la comprobación de estos nuevos límites de estabilidad.

Asimismo, el estudio de la estabilidad temporal frente a perturbaciones introducidas en el seno del líquido (fuerzas místicas) o en su contorno

TABLA 1 - Secuencia de un experimento típico

Orden	Proceso	Tiempo ^{a)} [s]	Visuali- zación	REGISTRO					Interven- ción humana
				Cine Zips	Presión	Temp.	Perturb. mecán.	Excentr. Inclinac.	
1	Preparación	120							×
2	Llenado	60		×	×	×			
3	Control de empuje	120		×	×	×			
4	Vibración axial	120		×	×	×	×		
5	Reposo	120		×	×	×	×		
6	Rotación de un disco... ..	120	×	×	×	×			
7	Estacionario... ..	15	×	×	×	×			
8	Contrarrotación del otro disco	120	×	×	×	×			
9	Estacionario... ..	15	×	×	×	×			
10	Isorrotación de los discos.	60	×	×	×	×			
11	Estacionario... ..	15	×	×	×	×			
12	Giro excéntrico de un dis- co	60	×	×	×	×		×	
13	Recuperación	15		×	×	×		×	
14	Inclinación de un disco ...	60	×	×	×	×		×	
15	Recuperación	15		×	×	×		×	
16	Sobrepasar el límite de estabilidad	120	×	×	×	×	Según el modo de ^{b)} romper la columna		
17	Recuperación de todo el líquido posible	60		×	×	×			
18	Limpieza	120							×

Tiempo total (segundos) = 1.395

a) Datos de base estimados para ensayos con agua.

b) Cualquier modo es interesante. En principio, se piensa sobrepasar la velocidad crítica de rotación.

(fuerzas de superficie), se encuentra muy avanzado, estando ya acabado el análisis de la vibración axial de la zona y el efecto de un manantial pulsante centrado en uno de los discos (oscilaciones en el proceso de inyección del líquido en la zona).

7. EL MODULO DE ENSAYOS FISICOS CON FLUIDOS

A finales de 1975, la Agencia Espacial Europea decidió subvencionar el estudio de base de un módulo de ensayos con fluidos (FPM) para uso de los investigadores de los países miembros, con vistas a su posible incorporación en el primer vuelo del laboratorio espacial «Spacelab» (1980). Los primeros trabajos fueron encargados a la firma española CASA [19], actuando el laboratorio de Aerodinámica de la ETSIA como asesor científico en las partes concernientes al estudio de instalaciones y funcionamiento. En resumen, el FPM servirá para llevar a cabo, de un

modo sencillo y fiable, los siguientes cometidos:

- Formación de una zona líquida para diversas geometrías.
- Inyección y extracción de líquido (continua y oscilante).
- Variación de la longitud de la zona.
- Rotación independiente de cada disco soporte.
- Diferentes condiciones de contacto sólido-líquido-gas.
- Vibración controlada de la columna.

Y posiblemente también para:

- Establecer un gradiente térmico.
- Establecer un gradiente eléctrico.
- Establecer un gradiente de concentración.

Como disponibilidades básicas necesarias para la toma de datos, es preciso añadir los siguientes sistemas:

- Sistema de visualización del mo-

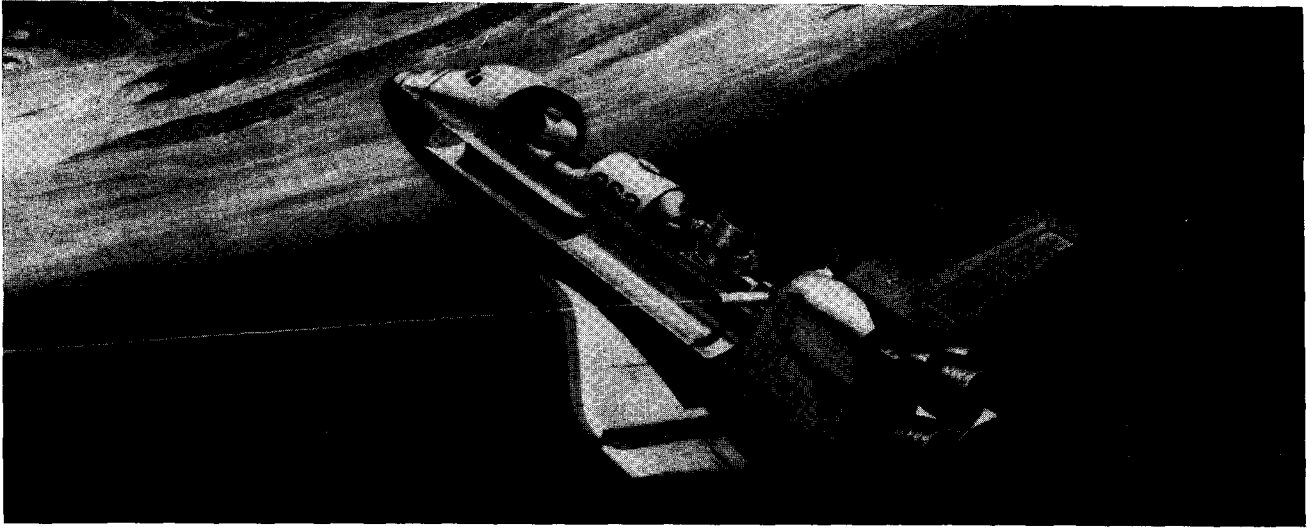
vimiento interno del líquido: trazadores e iluminación.

- Sistema de medición de parámetros: geométricos, mecánicos, térmicos, eléctricos, etc.
- Sistema de registro y almacenamiento de datos: filmación de imagen, registro de parámetros, etc.

Por último, es de destacar la ventaja que supondría el funcionamiento semi-automático del módulo, de cara a programar secuencias de experimentación y con miras a un mejor aprovechamiento del tiempo disponible.

8. SECUENCIA DE UN EXPERIMENTO TIPICO CON ZONA LIQUIDA FLOTANTE

En orden a concretar y dar una idea sobre tiempos y complejidad del proceso, se resume en la tabla 1 una posible secuencia de experimentación [21].



AGRADECIMIENTO

Las investigaciones que actualmente

se llevan a cabo sobre este tema en el Laboratorio de Aerodinámica de la ETSIA y que han dado origen a este

artículo, se hallan subvencionadas por la Comisión Nacional de Investigación del Espacio (CONIE).

REFERENCIAS

1. Plateau, J. A. F.: «Statique expérimentale et théorique des liquides soumis aux seules forces moléculaires», vol. II, Gauthier-Villars, Paris, 1873.
2. Reboux, J.: «Use of electromagnetic fields for positioning and stirring materials under zero gravity», ESRO SP-101, July 1974.
3. «Albatros», CNES, 1975.
4. Lewis, G.: «Apparatus, techniques and physical parameters of sounding-rocket flights», ESRO SP-101, July 1974.
5. Ostrach, S.: «Skylab science demonstrations», ESRO SP-101, July 1974.
6. Benz, K. W.: «Single crystals of electronic materials grown in a space environment», ESRO SP-101, July 1974.
7. Lewis, G.: «Preliminary study of a general-purpose floating-zone electrophoresis facility for Spacelab», ESA SP-114, Sept. 1976.
8. Heywang, W.: «Zur stabilität senkrechter schmelzzonen», Z. Naturforschung 11a, 238-243, 1956.
9. Rayleigh, Lord: «The theory of sound», vol. II, Dover Publications, Inc., New York, 1945.
10. Kärman, Th.: «Über laminare und turbulente reibung», Z. angew. Math. Mech. I, 233-51, 1921.
11. Rayleigh, Lord: «Equilibrium of revolving liquid under capillary forces», Phil. Mag. 28, 161, 1914.
12. Appel, P.: «Traité de mécanique rationnelle», vol. 4, Chap. IX, Gauthier-Villars, Paris, 1932.
13. Chandrasekhar, S.: «The stability of a rotating liquid drop», Proc. Roy. Soc. (London) 286, 1965.
14. Wang, T. G.: «Drop dynamics in space», ESA SP-114, Sept. 1976.
15. Gillis, J. & Suh, K. S.: «Stability of a rotating liquid column», Phis. Fluids 5, 1149-55, 1962.
16. Mason, G.: «An experimental determination of the stable length of cylindrical liquid bubbles», J. Colloid Interface Sci., vol. 32, 1970.
17. Carruthers, J. R. y col.: «Studies of rotating liquid floating zones on Skylab IV», AIAA Paper No. 75-692, Denver, 1975.
18. Beck, R. y col.: «Observations, estimates and suggested experiments relating to surface-tension-induced thermoconvection», ESA SP-114, Sept. 1976.
19. Ruesga, J. M.: «Fluid Physics Module», CASA, ESA contract SC/95/HQ, Madrid, June 1976.
20. Struik, D. J.: «Geometría diferencial clásica», Aguilar, Madrid, 1966.
21. Martínez Herranz, I.: «Floating zone under reduced gravity. Axisymmetric equilibrium shapes», ESA SP-114, Sept. 1976.
22. Da Riva, I.: «Floating liquid zones in zero gravity», Reply to Call for proposals from ESA (DP/ST/SH/AO/3 30 April 1976). Madrid, June 1976.