

4. INFLUENCIA DE LA VISCOSIDAD EN LA ZONA FLOTANTE

#### 4. INFLUENCIA DE LA VISCOSIDAD EN LA ZONA FLOTANTE

##### 4.1. INTRODUCCION

En cualquier estudio fluidodinámico es importante conocer la viscosidad del fluido de trabajo por dos razones: primera, por su influencia cuantitativa en la estimación de fuerzas, y segunda (y fundamental) por su influencia sobre el régimen del movimiento y la determinación de sus particularidades principales, en especial la presencia de capas límite.

En el caso de la zona líquida flotante, se presentan multitud de situaciones donde es necesario analizar con detalle la influencia de la viscosidad: capas de Ekman, capas de Stewartson, capas de cortadura transversales, etc., y no solamente en el estudio de la zona flotante propiamente dicha, sino en los ensayos de simulación en baño de Plateau, y en las etapas críticas de inyección y estrangulamiento.

Por otra parte, es conveniente disponer de algún procedimiento para la evaluación in situ de los efectos de la viscosidad utilizando líquidos estándar de viscosidad conocida y tratando de medir ésta en las condiciones reales del experimento, ya que por ejemplo, no siempre es posible mantener la zona isoterma, ni conseguir una información precisa del campo de temperaturas, lo cual introduce a veces errores de consideración en la estimación de resultados. En cualquier caso, parece evidente que un procedimiento de medición del par que el fluido ejerce sobre los discos, sería muy beneficioso para los estudios de la puesta en rotación y aceleración de las zonas flotantes, y puesto que su implantación en el aparato experimental de física de fluidos (FPM) del Space-

lab no parece presentar dificultades insalvables, se ha decidido hacer un estudio de las posibilidades que ofrecería la disponibilidad de un medidor de par en la zona flotante.

#### 4.2. MEDIDOR DEL PAR DE ARRASTRE

El fundamento es el siguiente (Fig. 1). Partiendo de una zona cilíndrica en reposo, por ejemplo, se comunica un par al disco 1 de tal manera que su velocidad de giro sea

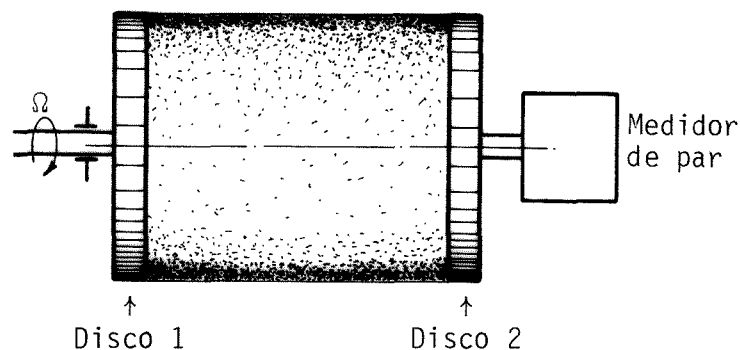


Fig. 1. Funcionamiento del medidor de par en la zona flotante.

constante; sería deseable medir el par motor comunicado al disco, evaluar el par de fricción en las guías, y obtener así el par transmitido al líquido, mediante la ecuación del momento cinético:

$$I \frac{d\Omega}{dt} + M_m + M_g + M_l \quad (1)$$

donde  $I$  es el momento de inercia del disco,  $\Omega$  su velocidad angular,  $M_m$  el momento motor, y  $M_g$  y  $M_l$  los momentos resistente en las guías y en la interfase líquido-sólido. Desgraciadamente, en los casos usuales,  $M_g$  es mucho mayor que  $M_l$  y como el error en su evaluación es bastante grande, resulta necesario diseñar un acoplamiento especial que, en su versión más simplificada, podría ser como se esquematiza en la

Fig. 1: la cantidad de movimiento angular introducida en la interfase disco 1 - líquido, es transportada por difusión y convección hacia la interfase líquido - disco 2, satisfaciéndose una ecuación del tipo

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \omega r dV = M_{11} + M_{atm} + M_{12} \quad , \quad (2)$$

donde el primer miembro representa la variación del impulso angular de la masa líquida,  $M_{11}$  el par en el disco 1,  $M_{12}$  el par en el disco 2, y  $M_{atm}$  el par resistente debido al aire en la superficie libre. En el caso estacionario y puesto que el par  $M_{atm}$  es siempre muy pequeño, resulta que ambos discos transmiten el mismo par, con lo cual, si se mantiene fijo el disco 2 y se le acopla directamente un medidor de par, se podrá conseguir la requerida precisión.

Para simplificar el estudio y poder experimentar en tierra, se ha elegido la disposición de la Fig. 2.

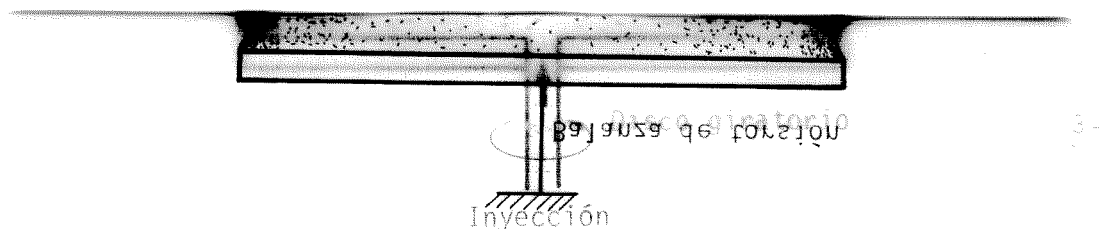


Fig. 2. Disposición experimental para ensayos en tierra.

El par a medir, suponiendo despreciables los efectos no deseados (gravedad, aire exterior, discos finitos, etc.) dependerá de la velocidad de giro del disco motor,  $\Omega$ , el valor del par que deberá medir la balanza de torsión será

$$M = \frac{\pi}{32} \frac{\mu \Omega D^4}{L} \quad (4)$$

de la viscosidad del líquido,  $\mu$ , y de las dimensiones de la zona,  $L$  y  $D$ . Suponiendo que el movimiento del líquido es del tipo de Couette simple, lo cual exige

$$\frac{L^2 \Omega}{\nu} \ll 1 \quad , \quad (3)$$

el valor del par que deberá medir la balanza de torsión será

$$M = \frac{\pi}{32} \frac{\mu \Omega D^4}{L} \quad . \quad (4)$$

El aparato que se ha construído tiene discos de diámetro  $D=0.15$  m., y los líquidos usados tienen viscosidades que van desde  $\mu=10^{-3}$  N.s<sup>-1</sup> para el agua a  $\mu=1$  N.s<sup>-1</sup> para el aceite DMS-1000, aunque los de mayor interés están en una zona intermedia algo más estrecha. Con estos datos y tomando el valor constante  $L^2 \Omega / \nu = 0.1$  a efectos de comparación, se ha dibujado la Fig. 3, donde pueden apreciarse los valores característicos de la velocidad angular máxima (para que el flujo sea de Couette) y el par máximo a medir, en función de la viscosidad del líquido y la altura  $L$  de la zona.

#### 4.3. BALANZA DE FLEJES

Como se ha indicado, el gran problema del diseño del medidor de par es conseguir un mecanismo de alta sensibilidad libre de rozamientos. Como primera solución, se pensó en un sistema pasivo interponiendo entre el eje de transmisión (o mejor, el eje de guiado) y el disco, un acoplamiento elástico cuya deformación diese una medida fiable del par transmitido. Para ello se montaron tres flejes radiales (de bronce al berilio) empotrados en el núcleo y deslizantes en

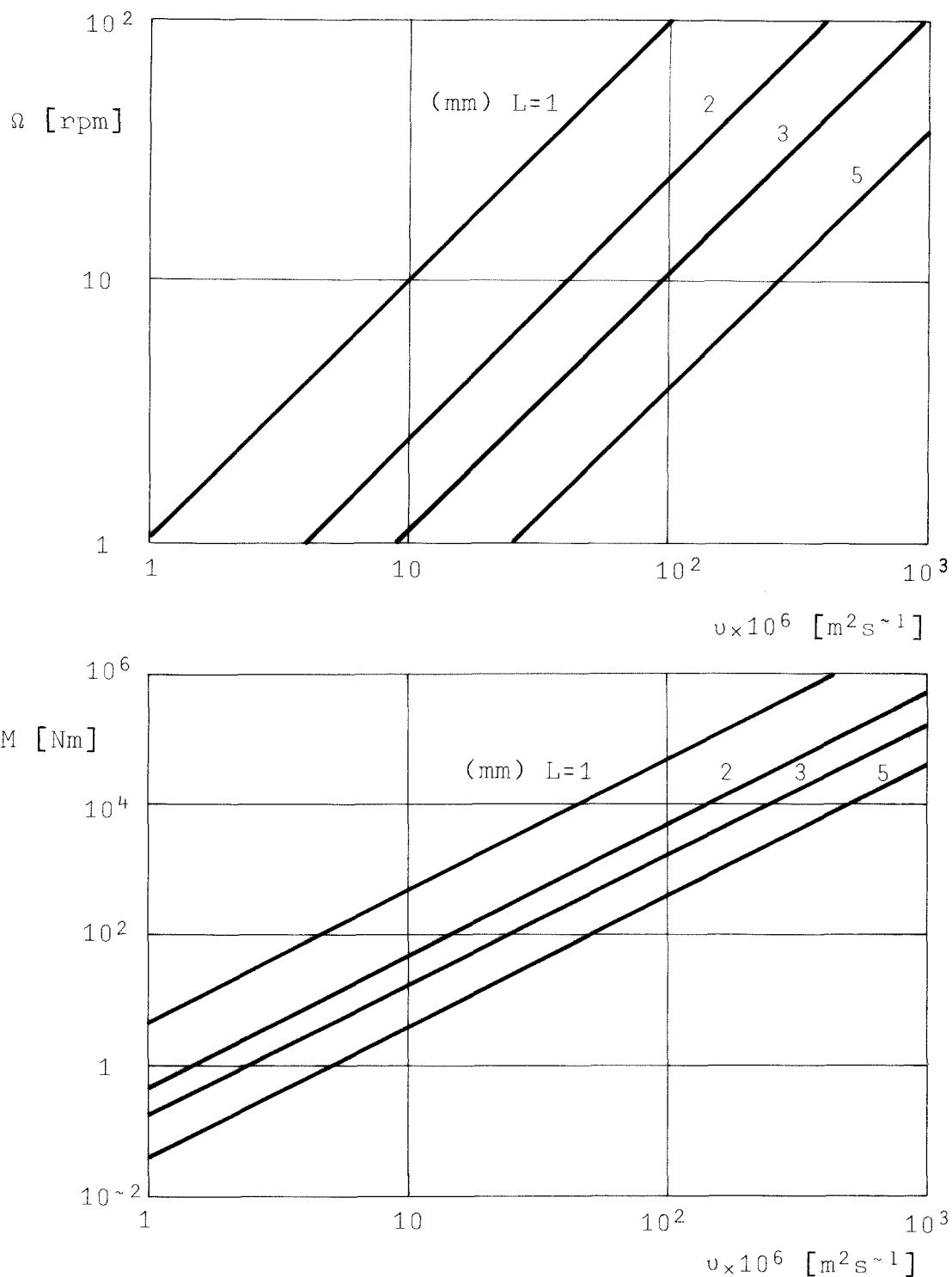


Fig. 3. Valores máximos aproximados de la velocidad angular (causa) y del par correspondiente (efecto) para que se consiga un movimiento simple de Couette en una zona flotante vertical de altura  $L$  y diámetro  $D$ , en función de la viscosidad cinemática del líquido. Se ha tomado como referencia común  $\Omega L^2/\nu=10^{-1}$ .

las guías periféricas (para permitir deflexiones grandes), tal como se muestra en la Fig. 4. Para evitar que los flejes pandeen, el disco va montado sobre un apoyo cónico que sirve además de centrado.

La relación carga-deformación para un sistema como el presente es:

$$M = \frac{4\pi EI}{D} \left( \frac{D}{D-D_n} \right)^2 \theta$$

habiendo supuesto válida la aproximación lineal, y siendo EI la rigidez a flexión del fleje y n el número de flejes. Las dimensiones de éstos son:

Espesor = 0.2 mm.

Anchura = 11 mm.

Longitud = 70 mm.

Desafortunadamente, los ensayos efectuados con este aparato no fueron satisfactorios debido, como era de temer, a la influencia de la fricción en las guías, sobre todo en las periféricas, lo que inutilizaba las medidas.

Tratando de soslayar esta dificultad, se tanteó la solución representada en la Fig. 5, donde se sustituían los flejes por muelles, lo que permitía, por otra parte, variar el rango de medidas por intercambio de los muelles. Sin embargo, una vez más, el rozamiento en los apoyos imposibilitó la utilización de esta balanza.

#### 4.4. BALANZA DE CERO

Con el fin de deshacerse de los pares de fricción

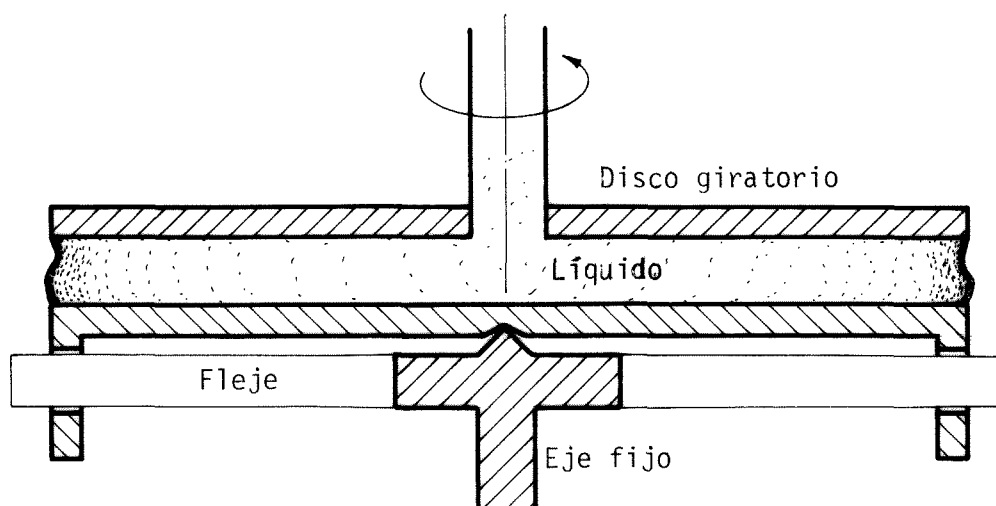
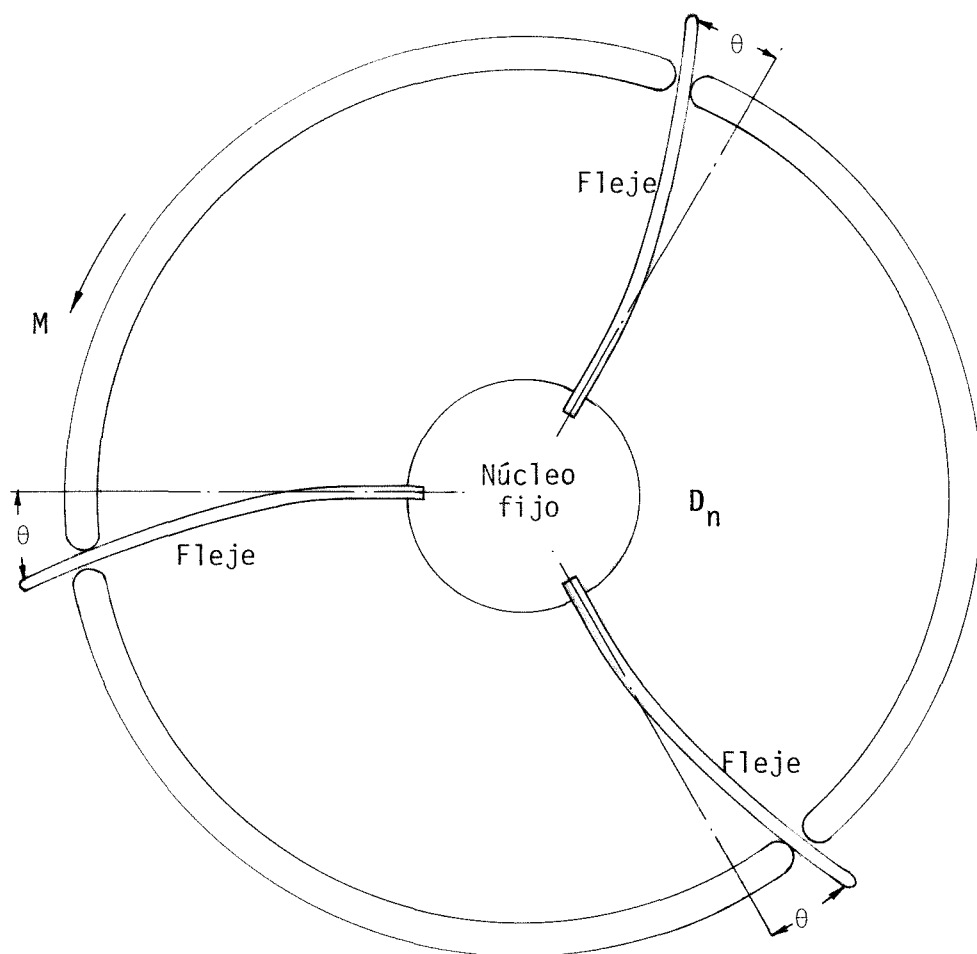


Fig. 4. Esquema de la disposición de la balanza de flejes para la medición del par actuante en el disco inferior debido al giro del superior.

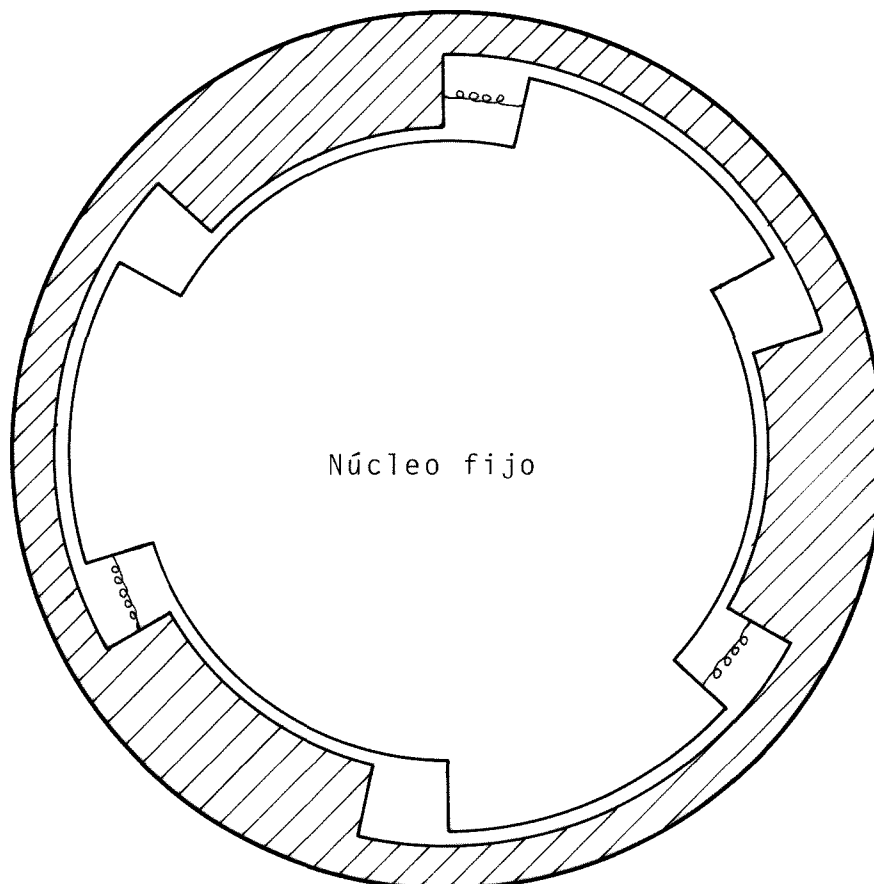


Fig. 5. Versión con muelles (comparar con Fig. 4).

que inutilizaban el uso del medidor de flejes (y de muelles), se ha cambiado en gran parte el diseño, estando construyéndose en estos momentos una balanza con la cual se mide el par que es necesario aplicar para impedir que el disco sea movido por el par de arrastre. El peso del disco lo aguantan tres hilos flexibles a modo de tirantes, como se muestra en la Fig. 6.

El líquido transmite el par que recibe del disco inferior al superior (iguales, en régimen estacionario), el cual es equilibrado automáticamente por el sistema regulador representado en la Fig. 7, y que consta de un captador foto-

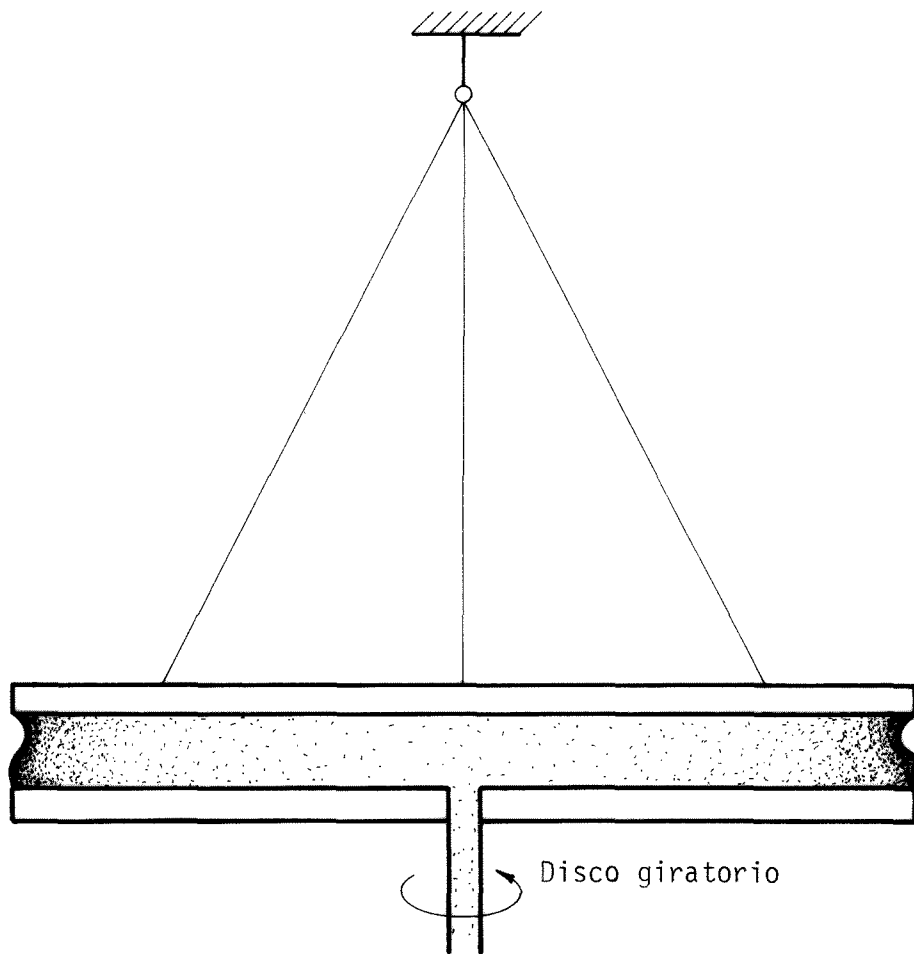


Fig. 6. Soporte del disco superior por medio de tirantes.

eléctrico, un servo-motor y un muelle (más el sistema de iluminación y el de guiado). Este montaje presenta numerosas ventajas frente a los anteriores: el muelle calibrado es fácilmente reemplazable, con lo que puede ajustarse el rango de momentos más apropiados para cada aplicación; el detector óptico es capaz de discernir giros tan pequeños como  $10^{-3}$  radianes; el automatismo hace innecesaria la intervención humana, y es ideal para la adquisición de datos y su tratamiento por ordenador, etc..

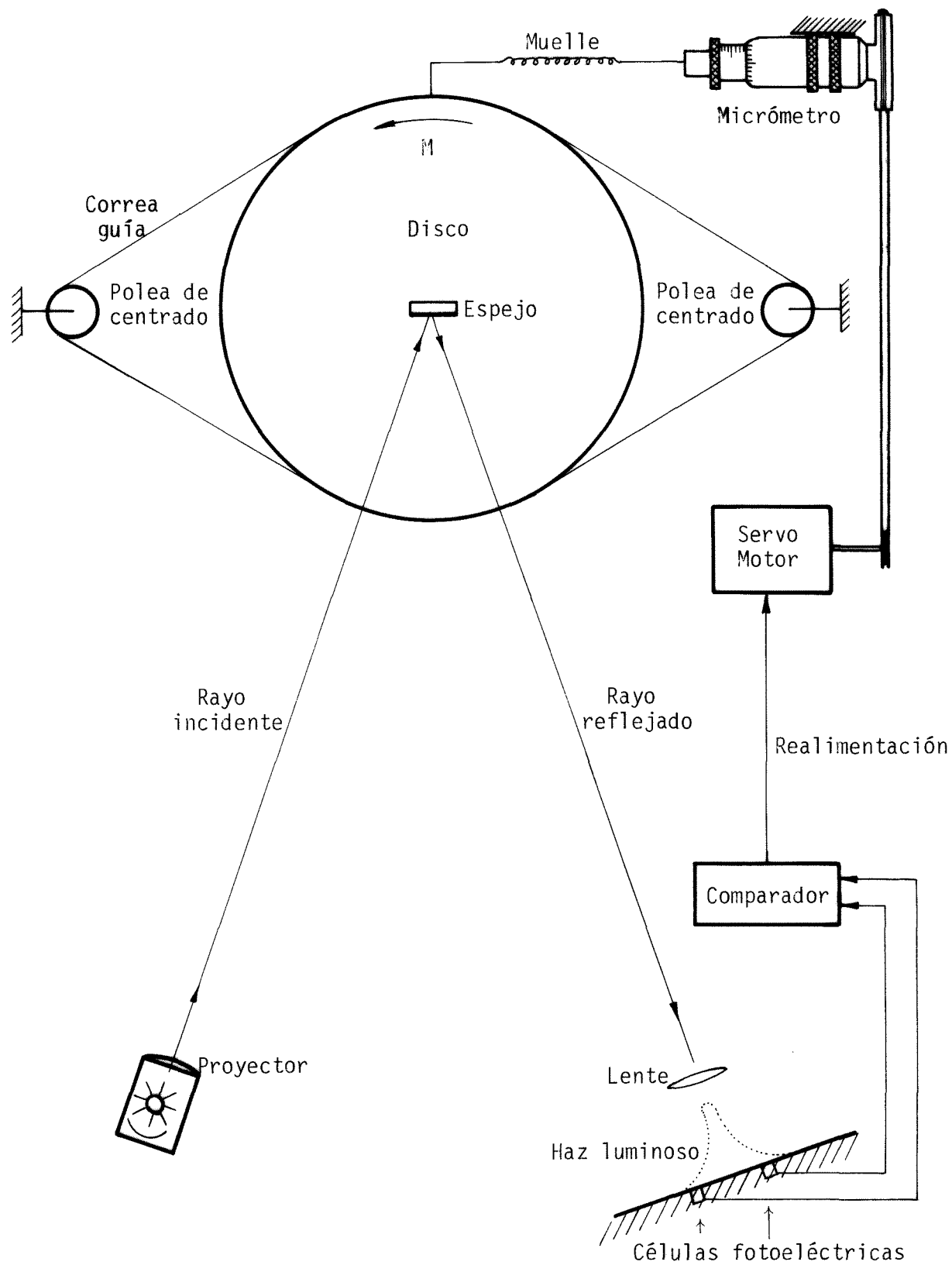


Fig. 7. Disposición del equipo para el medidor automático de par esquematizado en la Fig. 6.

5. VERIFICACION DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DEL  
MODULO DE FISICA DE FLUIDOS

## 5. VERIFICACION DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DEL MODULO DE FISICA DE FLUIDOS

### 5.1. INTRODUCCION

Los problemas asociados al manejo de líquidos en ingravidez se deben, fundamentalmente, al comportamiento diferente de éstos según estén en un campo gravitatorio o en ausencia de gravedad. La indeterminación existente en la posición de la interfase líquido-gas da lugar a situaciones en las que la experiencia obtenida en la superficie terrestre deja de ser válida y sin embargo, a veces, las soluciones adoptadas se basan únicamente en esta experiencia.

La reglamentación sobre seguridad en naves espaciales prohíbe el manejo de líquidos no confinados; según esto, en el caso concreto del Módulo de Física de Fluidos (FPM), una vez en órbita el operador no debería abrir la cámara de ensayos del FPM bajo ningún concepto en tanto quedara líquido en el interior de la cámara. Por consiguiente, el sistema de limpieza del FPM debería garantizar la extracción del líquido existente en la cámara al finalizar cada experimento, si no hubiera sido posible extraerlo todo a través del sistema de inyección. Si se tiene en cuenta que parte de los experimentos a realizar en el FPM durante la primera misión Spacelab están relacionados con la rotura de zonas líquidas flotantes, se entenderá la naturaleza del problema. Como ejemplo, en la Fig. 1 se muestran las consecuencias de la rotura de una columna líquida. Aunque la rotura se produjo simulando un accidente que difícilmente podría ocurrir en el FPM (movimiento impulsivo de uno de los discos hacia el otro), las

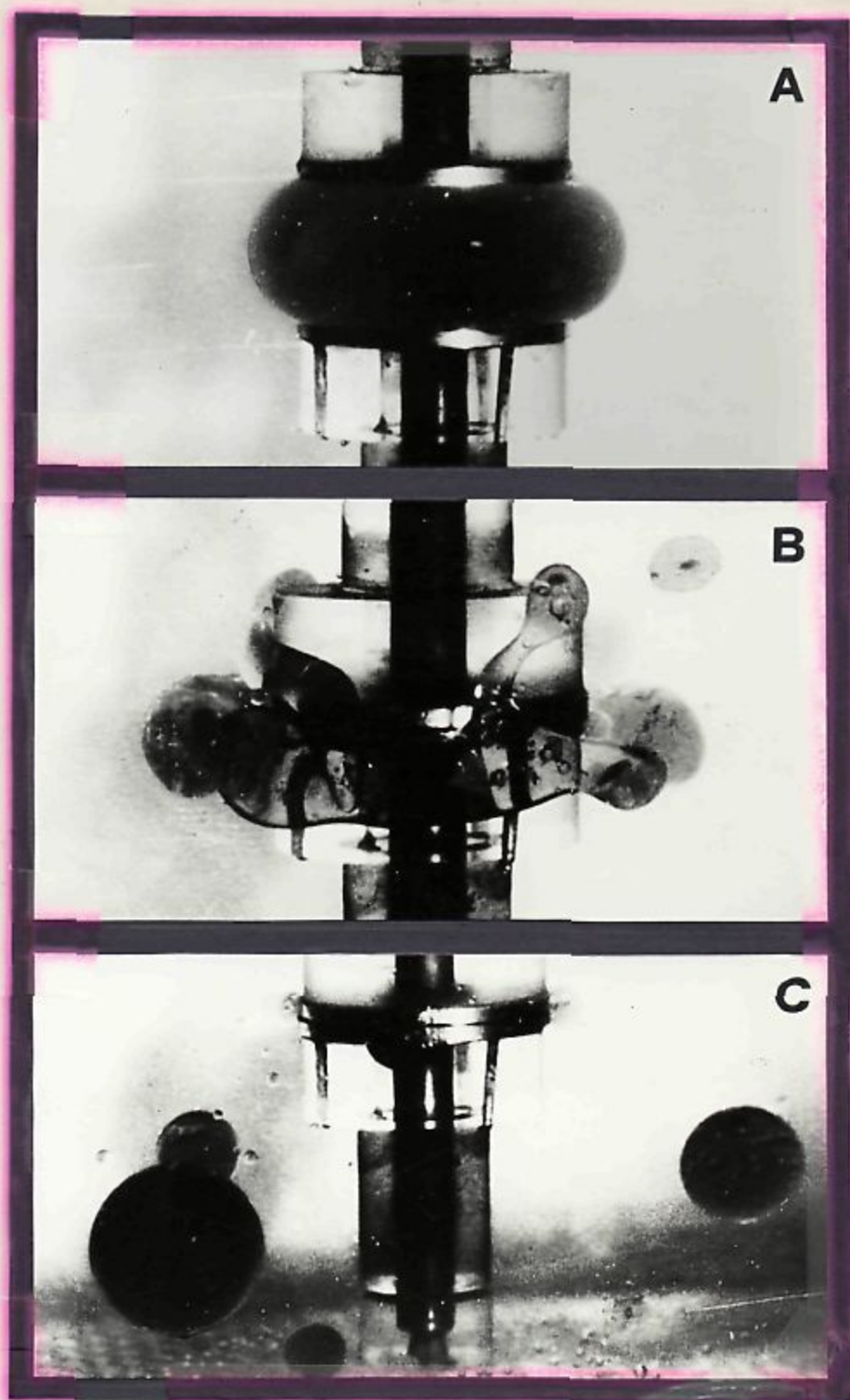


Fig. 1. Rotura de una zona líquida flotante obtenida en el Lamf por el método de Plateau. La columna es de aceite de lubricación en un baño de alcohol metílico y agua de igual densidad.

conclusiones finales son las mismas. Como se muestra en las fotografías, al acercar los discos la zona adopta la forma de barril cada vez menos esbelto (Fig. 1-A) hasta que rebosa los discos y se fragmenta en un cierto número de gotas (en la Fig. 1-B se muestra la situación un instante antes de que los discos lleguen a juntarse). En el estado final (Fig. 1-C) el líquido de la zona queda en parte flotando en el interior del recipiente dividido en gotas de diversos tamaños y en parte adherido a los discos y a las paredes del recipiente. De ocurrir algo similar en el FPM durante la realización de los experimentos, las normas de seguridad imponen -como se dijo anteriormente- que todas las masas de líquido sean retiradas de la cámara antes de abrir ésta para manipular en su interior.

Así pues, el sistema de limpieza de la cámara de ensayos del FPM debe realizar una tarea claramente definida. En las páginas siguientes se discute la viabilidad del sistema para cumplir este cometido a la vista de los resultados obtenidos en los ensayos de verificación realizados en el Lamf. Los aspectos analizados han sido:

1º) Verificación del sistema de limpieza como centrífugador de masas líquidas flotantes (simulación global).

2º) Extracción de masas líquidas adosadas a las paredes (limpieza por chorros parietales).

## 5.2. EL SISTEMA DE LIMPIEZA DE LA CAMARA DE ENSAYOS DEL FPM

El sistema de limpieza del FPM, según se esquematiza en la Fig. 2, es un circuito cerrado con circulación for

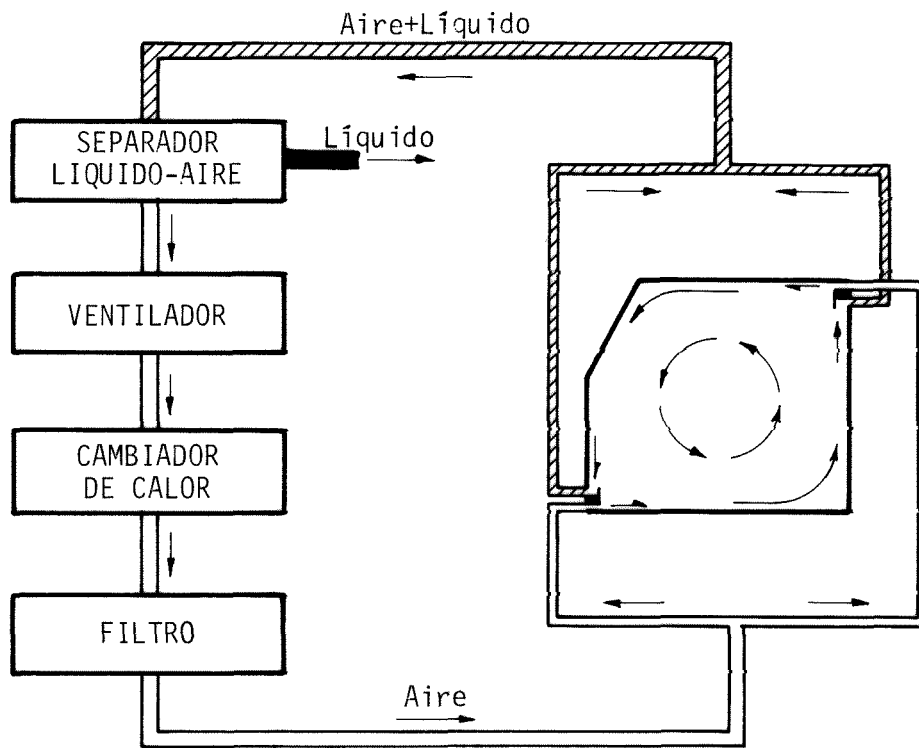


Fig. 2. Esquema de funcionamiento del sistema de limpieza del FPM.

zada de aire [01].

La limpieza de la cámara se consigue mediante dos chorros de aire de alta velocidad que descargan en la cámara junto a las ventanas de observación y dos tomas para evacuar el aire y los posibles líquidos. Los chorros, además de limpiar las ventanas, tienen la misión de generar un torbellino en el interior de la cámara para centrifugar las posibles gotas flotantes de líquido hacia las paredes de donde son succionadas por las tomas. El aire y líquido extraídos se dirigen hacia un separador por centrifugación; el líquido separado se conduce hacia el depósito de almacenamiento mientras que el aire es impulsado mediante un ventilador hacia un cambiador de calor aire-agua y un filtro antes de retornar a la

cámara.

El sistema de limpieza tiene además la misión de refrigerar la cámara de ensayos manteniendo la temperatura en su interior dentro de los límites permitidos para la intervención manual (45 °C como máximo [02]).

En la Fig. 3 se muestra con más detalle una sección transversal de la cámara de ensayos. Los parámetros de diseño del sistema (únicamente los relacionados con la cámara de ensayos) son los indicados en la Tabla 1.

### 5.3. SIMULACION GLOBAL

Para la verificación de la cámara de ensayos se ha construido una maqueta a escala 1.5:1 que reproduce la sección transversal de la cámara de ensayos. Para visualizar el movimiento en el interior de la cámara se ha utilizado agua con diversos tipos de trazadores.

La instalación utilizada en los ensayos realizados consta, además de la maqueta de la cámara ya mencionada, de un conducto de entrada (con una válvula para la regulación del gasto) que se bifurca en dos que desembocan en las ranuras de inyección de los chorros. El agua sale de la cámara a través de las tomas hacia un depósito calibrado donde se va acumulando; el gasto se determina midiendo el tiempo que tardan en acumularse en el depósito  $5 \times 10^{-3} \text{ m}^3$  de agua (la utilización de este modo de medida -intermitente- se debe a que los medidores de gasto, rotámetros, disponibles en el Lamf durante los ensayos, no eran aptos para medir los gastos requeridos). El movimiento de los trazadores se registra foto-

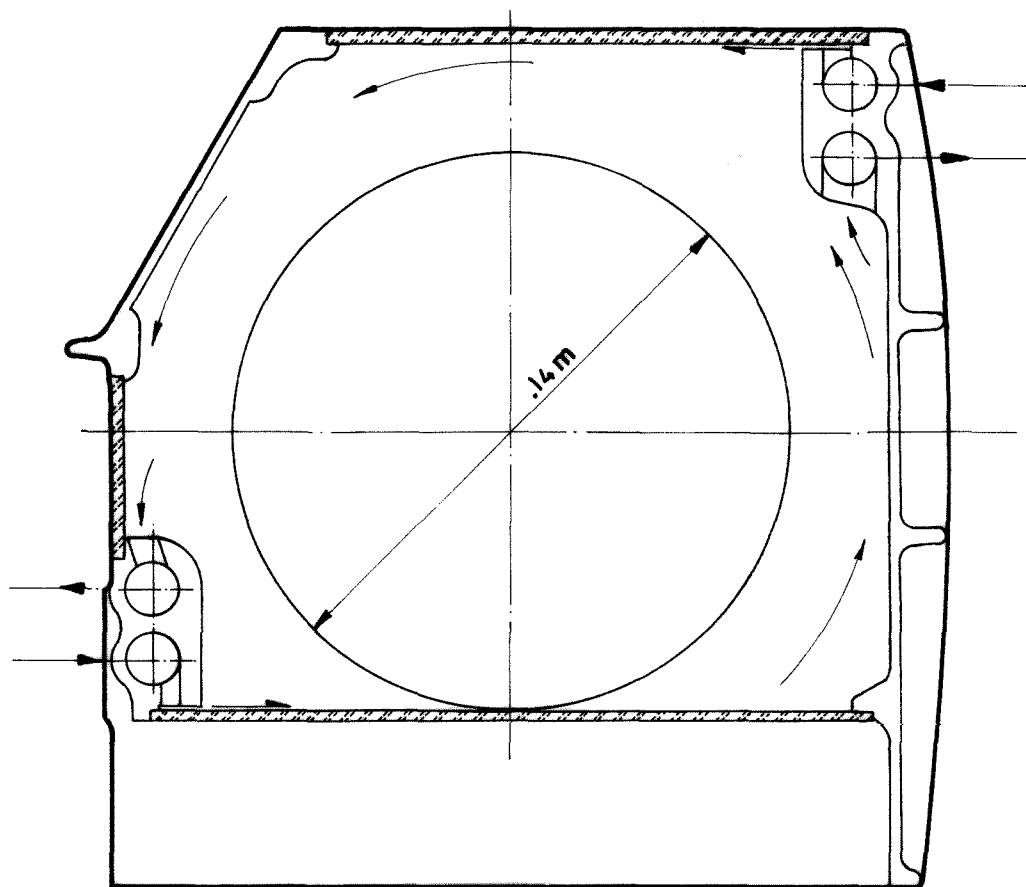


Fig. 3. Sección transversal de la cámara de ensayos del FPM.

Tabla 1

Parámetros de diseño del sistema de limpieza de la cámara de ensayos del FPM [01].

Velocidad de salida de los chorros	$30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Gasto volumétrico total	$4.83 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Area neta de los chorros	$1.61 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
Coefficiente de descarga	.8
Area total de las ranuras	$2 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
Ancho de las ranuras	$.80 \times 10^{-3} \text{ m}$ $.77 \times 10^{-3} \text{ m}$

gráficamente mediante una cámara dispuesta en la vertical de la maqueta. Para la iluminación se emplean dos focos luminosos; el primero proporciona una iluminación de fondo y está continuamente conectado mientras duran las tomas fotográficas, la segunda fuente de iluminación es estroboscópica, de esta forma en las fotografías se registra no sólo las sendas seguidas por los trazadores, sino además sus trayectorias (las distancias entre cada dos posiciones consecutivas de los trazadores han sido recorridas en intervalos iguales de tiempo). En la Fig. 4-A se muestra un esquema de la instalación descrita acompañada de una imagen real de la misma (Fig. 4-B). En la Tabla 2 se resumen los equipos utilizados.

Los ensayos se han realizado de forma que el número de Reynolds sea el mismo en ambas cámaras de ensayos (FPM y maqueta), si es  $U$  la velocidad de salida,  $h$  el espesor de la ranura y  $\nu$  la viscosidad cinemática, será:

$$\frac{U_a h_a}{\nu_a} = \frac{U_w h_w}{\nu_w} \quad , \quad (1)$$

donde el subíndice  $a$  se refiere al aire (FPM) y el  $w$  al agua (maqueta). Esta expresión en función del gasto,  $Q$ , y de la altura de las ranuras,  $l$ , quedará:

$$\frac{Q_a}{l_a \nu_a} = \frac{Q_w}{l_w \nu_w} \quad , \quad (2)$$

o bien

$$Q_w = Q_a \frac{l_w}{l_a} \frac{\nu_w}{\nu_a} \quad . \quad (3)$$

De acuerdo con las Tablas 1 y 2 la longitud de cada una de las ranuras del FPM es aproximadamente .125 m y las

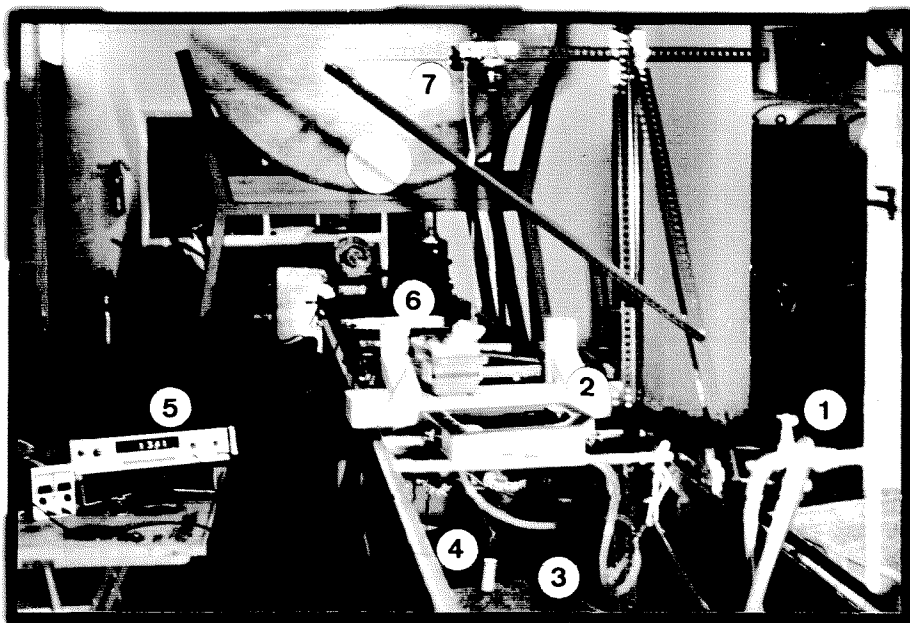
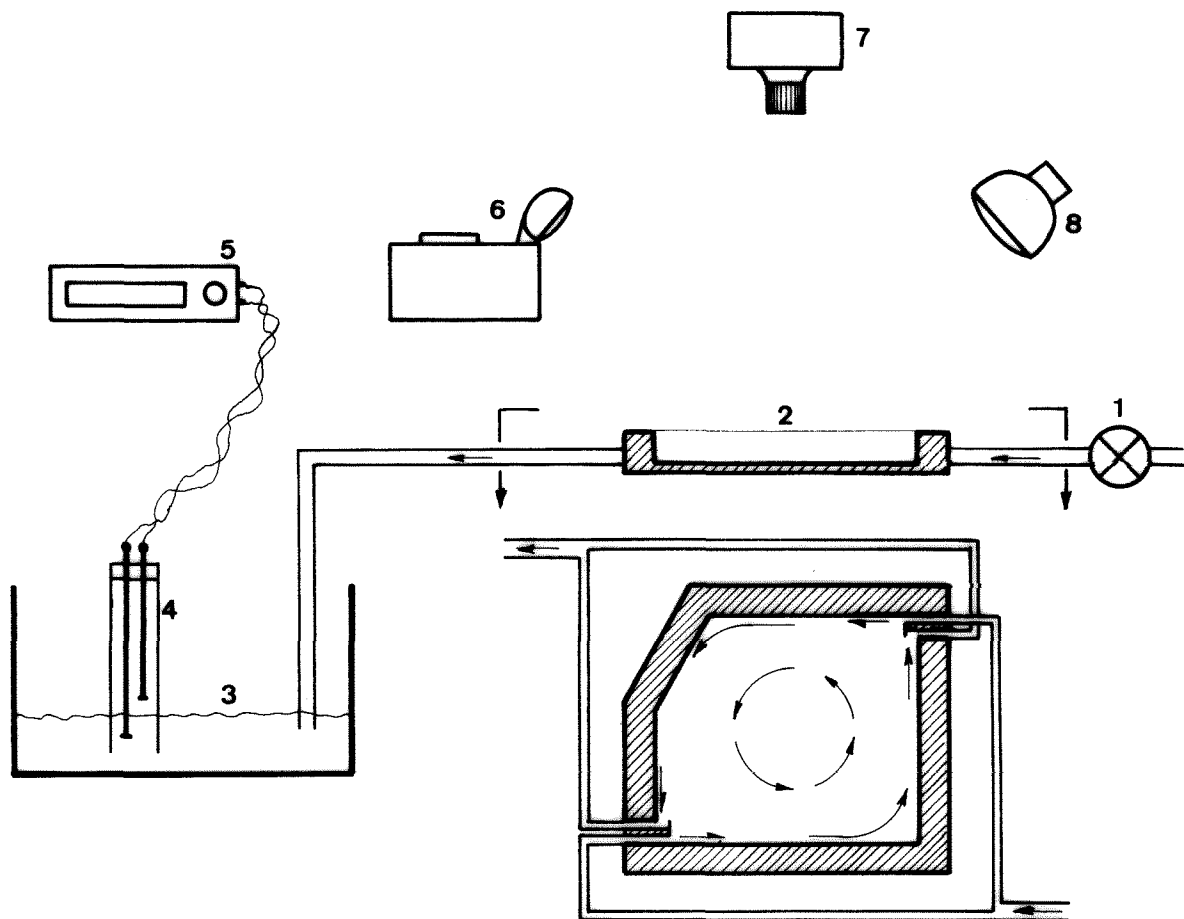


Fig. 4. Instalación para la simulación del movimiento en el interior de la cámara de ensayos del FPM. 1: Válvula de control de gasto. 2: Maqueta del FPM. 3: Depósito para la recogida del agua. 4: Medidor de nivel. 5: Contador de tiempo. 6: Estroboscopio. 7: Cámara fotográfica. 8: Foco luminoso (no visible en la fotografía).

Tabla 2  
Descripción del ensayo. Equipo utilizado

Denominación Fabricante	Características y/o comentarios
Maqueta <i>Lamf</i>	Planta: a escala 1.5:1 del FPM Altura: $6 \times 10^{-2}$ m Altura de las ranuras: $4.85 \times 10^{-2}$ m
Depósito y medidor de nivel <i>Lamf</i>	El medidor genera una señal cuando el agua alcanza un cierto nivel en el depósito y una segunda señal cuando, a partir de ese instante, se acumulan en el depósito $5 \times 10^{-3}$ m <sup>3</sup> de agua.
Contador 5325 B Universal Counter <i>Hewlett Packard (U.S.A.)</i>	Ajustado en la escala de 1 a $10^3$ s. Precisión: $10^{-2}$ s.
Estroboscopio Strobotac Type 1531-A <i>General Radio Co.</i> (U.S.A.)	Ajustado a la frecuencia de 30 Hz en todos los ensayos.
Cámara fotográfica Olympus OM-1 <i>Olympus (Japón)</i>	Con objetivo Olympus 1:1.8, $f = 50$ mm. Avance automático de película. Tiempo de exposición: 1 s en todas las fotografías realizadas.

de la maqueta  $4.85 \times 10^{-2}$  m. Aunque en las referencias consultadas ([01], [02]) no se precisa la temperatura a que es inyectado el aire en la cámara, ésta se puede estimar en 27 °C; la temperatura del agua durante los ensayos fue de unos 9 °C, según la Fig. 5 será:

$$\left. \begin{aligned} v_a &= 1.57 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \\ v_w &= 1.34 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned} \right\} ; \quad (4)$$

sustituyendo estos valores en la expresión (3) resulta:

$$Q_w = 1.6 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \quad ,$$

es decir, el tiempo de llenado del recipiente calibrado ( $5 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ ) debe ser de 31.3 s.

Para visualizar el movimiento del agua en el interior de la cámara se han utilizado tres tipos de trazadores, dos con menor densidad que el agua, que sirven como trazado-

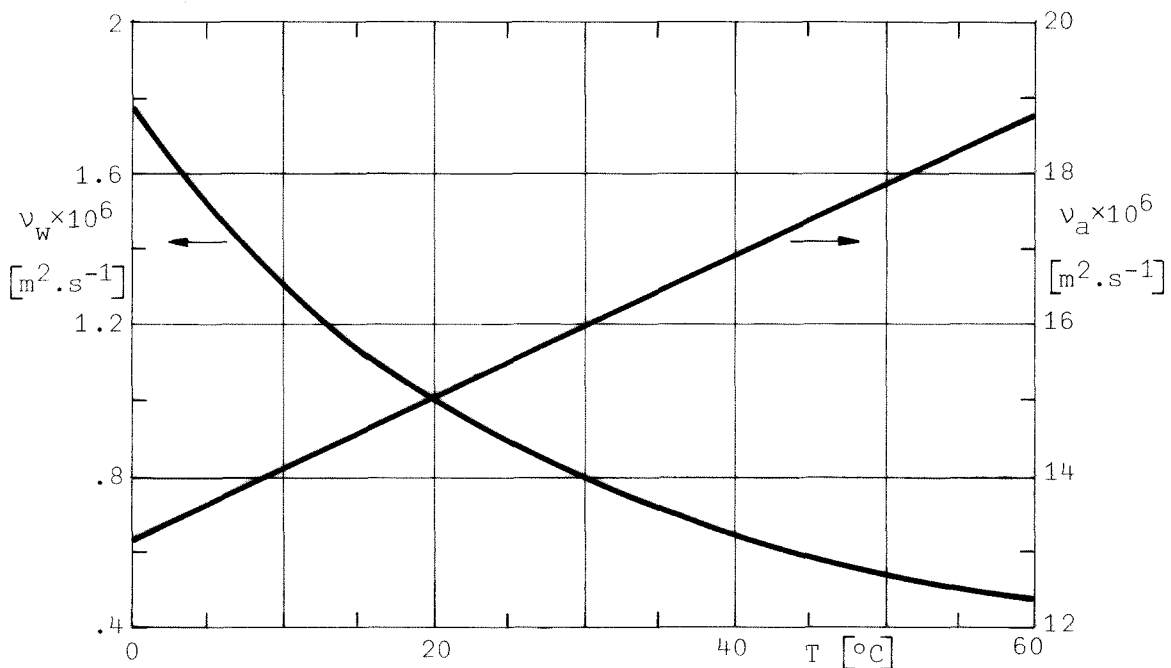


Fig. 5. Variación con la temperatura de la viscosidad cinemática del agua,  $v_w$ , y del aire,  $v_a$ . [03].

res del movimiento en la superficie libre (que podría considerarse como representativa de una sección media de la cámara del FPM) y un tercero más denso para visualizar el movimiento en el fondo del recipiente (paredes laterales de la cámara).

En el FPM, el fluido de trabajo -aire- deberá arrastrar las masas de Dimetil-Silicona existentes en el interior de la cámara en forma de gotas flotantes o adheridas a las

paredes; respecto a las primeras, el movimiento turbillona-  
rio del aire pone en movimiento a las gotas que, debido a su  
mayor densidad (unas  $10^3$  veces la del aire), son centrifuga-  
das hacia la periferia y desde allí, presumiblemente, hacia  
las tomas de extracción. Dado que no existen líquidos ni só-  
lidos naturales con una densidad mil veces superior a la del  
agua -que es el fluido de trabajo utilizado- no es posible  
reproducir esta relación de densidades en los ensayos. Para  
comprobar la capacidad de centrifugación del sistema, en los  
ensayos se han utilizado esferas de acero o cristal.

En la Tabla 3 se resumen las condiciones de los en-  
sayos y se describen los trazadores utilizados en cada uno,  
y en las páginas siguientes se muestran algunas de las foto-  
grafías más representativas de los resultados obtenidos. Pa-  
ra una más fácil identificación, las fotografías se muestran  
en negativo y debajo de cada una de ellas se han representa-  
do las trayectorias de las partículas; éstas se han obtenido  
a partir de los negativos originales, lo que permite comple-  
tar algunos detalles perdidos durante el proceso de reproduc-  
ción fotográfica. Las zonas oscuras que aparecen en las foto-  
grafías y no se han representado en los dibujos correspondien-  
tes son reflejos de los focos en el fondo del recipiente y  
en la superficie libre. Las distancias entre cada dos marcas  
consecutivas se han recorrido en un tiempo de  $1/30$  de segun-  
do.

En la Fig. 6, obtenida usando trazadores de poliu-  
retano, se muestra el movimiento de las partículas en la su-  
perficie libre. Como se puede observar, la velocidad de las

Tabla 3

Condiciones de los ensayos de verificación del sistema de limpieza del FPM.<sup>1</sup>

Temperatura del agua [°C]	Gasto volu métrico <sup>2</sup> $Q_w \times 10^4$ [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	Trazador			
		Forma	Diámetro $d \times 10^3$ [m]	Densidad <sup>3</sup> $\rho \times 10^3$ [kg.m <sup>-3</sup> ]	Descripción
9	1.71	Aproxim. esférica	1 a 4	.047	Partículas de poliuretano
	1.70		~ 3	~.9	Bolas de papel de aluminio con un núcleo de poliuretano
	1.71			~1.4	Bolas de papel de aluminio
10	1.64	Esfera	10	7.8	Bolas de rodamientos
9	1.59		13.5	2.6	Bolas de cristal traslúcido, de color blanco o amarillo

<sup>1</sup> Frecuencia del estroboscopio: 30 Hz en todos los ensayos.

<sup>2</sup> Valor nominal calculado,  $Q_w = 1.6 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (véase la expresión (2) y siguientes).

<sup>3</sup> Los valores precedidos del signo ~ se dan únicamente a título indicativo. La densidad se ha estimado asignando a las partículas un diámetro nominal de  $3 \times 10^{-3} \text{ m}$  y una masa calculada como la media de la masa de un gran número de partículas.

partículas es mayor cerca de la periferia (máxima en los chorros) disminuyendo conforme nos acercamos al centro del recipiente. Este tipo de trazadores presenta la desventaja de que las partículas tienen una marcada tendencia a adherirse entre sí formando aglomerados de partículas que se desplazan conjuntamente, lo que dificulta la interpretación de los resultados (tal es el caso de la mancha negra central que aparece en la fotografía). Para evitar este inconveniente se repitíe

ron los ensayos utilizando como trazadores esferas de papel de aluminio con un núcleo de poliuretano; en la Fig. 7 se muestran los resultados obtenidos con este segundo tipo de partículas, en dicha figura se observa que las trayectorias son similares a las mostradas en la figura anterior. Aunque no se aprecian en las fotografías, existen dos zonas de recirculación próximas a los chorros debido a que la corriente se desprende pasadas las tomas de extracción (obsérvese que en la parte superior derecha de la fotografía de la Fig. 6 una partícula permanece todo el tiempo adherida a la pared).

En la capa límite del fondo del recipiente existe una componente radial de velocidad que ocasiona que las partículas (esferas de papel de aluminio con un diámetro aproximado de  $3 \times 10^{-3}$  m) sigan una trayectoria espiral hacia el centro de la cámara donde se detienen (Fig. 8). Existe pues un movimiento radial sobreimpuesto al movimiento turbillonario global, hacia el centro en el fondo (paredes laterales del FPM) y hacia la periferia en la corriente exterior (secciones medias del FPM). En esta misma figura se muestran también las trayectorias seguidas por las bolas metálicas (de las usadas en los rodamientos, de  $10^{-2}$  m de diámetro) cuyo movimiento está determinado por la corriente exterior. Las bolas son lanzadas hacia las paredes de la cámara tal como se esperaba aunque si, inicialmente, se colocan en el centro del recipiente, pueden no ser arrastradas por la corriente (Fig. 9). A pesar del gran tamaño de estos trazadores, la huella registrada en las fotografías es apenas perceptible, lo que motivó la repetición de los ensayos con trazadores más visibles (es

feras de vidrio traslúcido). En las Figs. 10 y 11 se muestran las trayectorias seguidas por las esferas de vidrio. Obviamente las condiciones de los ensayos no son las mismas que en el FPM, pues aquí las partículas chocan contra las paredes y no quedan adheridas a éstas; sin embargo, poco después de cada choque el movimiento de las esferas vuelve a ser el causado por la corriente de agua (Figs. 8 y 10).

Puesto que la relación de densidades entre trazador y fluido es mucho menor que la que existirá en el FPM (2.6 frente a  $10^3$ ) los resultados obtenidos sólo tienen un carácter indicativo; por ejemplo, los trazadores tardan un tiempo extremadamente largo en salir del recipiente (en la parte inferior de la Fig. 11 se muestra el caso de una esfera de cristal a punto de salir del recipiente) pero esto es debido, como ya se ha dicho, a que los trazadores se comportan después de cada choque con las paredes como un nuevo trazador.

En resumen, el sistema de centrifugación de gotas flotantes de la cámara de ensayos del FPM parece efectivo para el cometido que ha sido diseñado, con la salvedad de que las gotas situadas cerca del centro de la cámara (eje del torbellino) puede que no sean arrastradas por este modo de limpieza; esto no parece un grave inconveniente, ya que el barrido de la cámara podría hacerse con los discos de trabajo juntos, en cuyo caso el centro de la cámara estaría ocupado por el tubo guía del disco móvil.

Queda ahora estimar la capacidad del sistema para extraer las gotas adosadas a las paredes, lo que constituye el objeto del apartado siguiente.

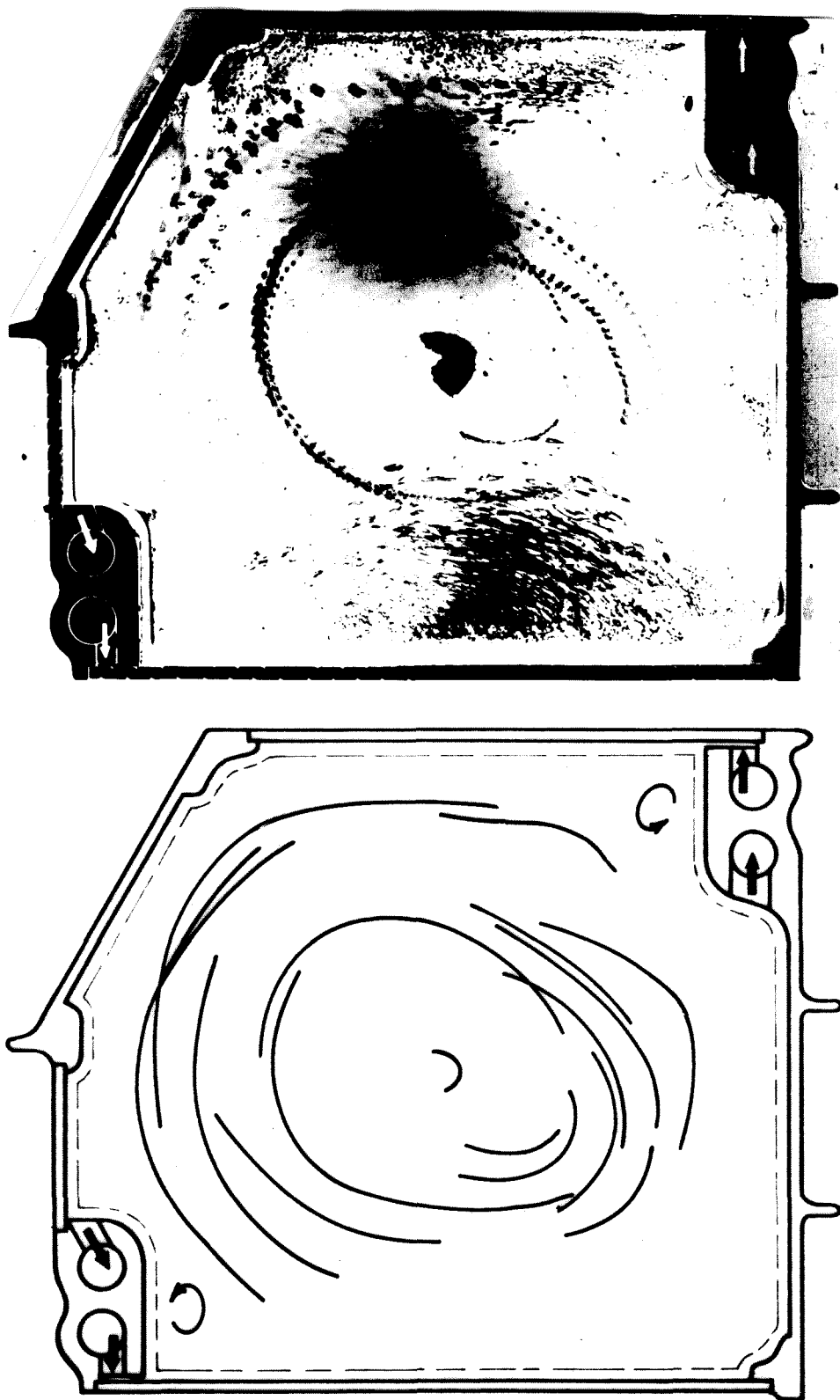


Fig. 6. Ensayos de verificación del sistema de limpieza del FPM. Visualización del movimiento de la superficie libre. Trazadores: partículas de poliuretano.

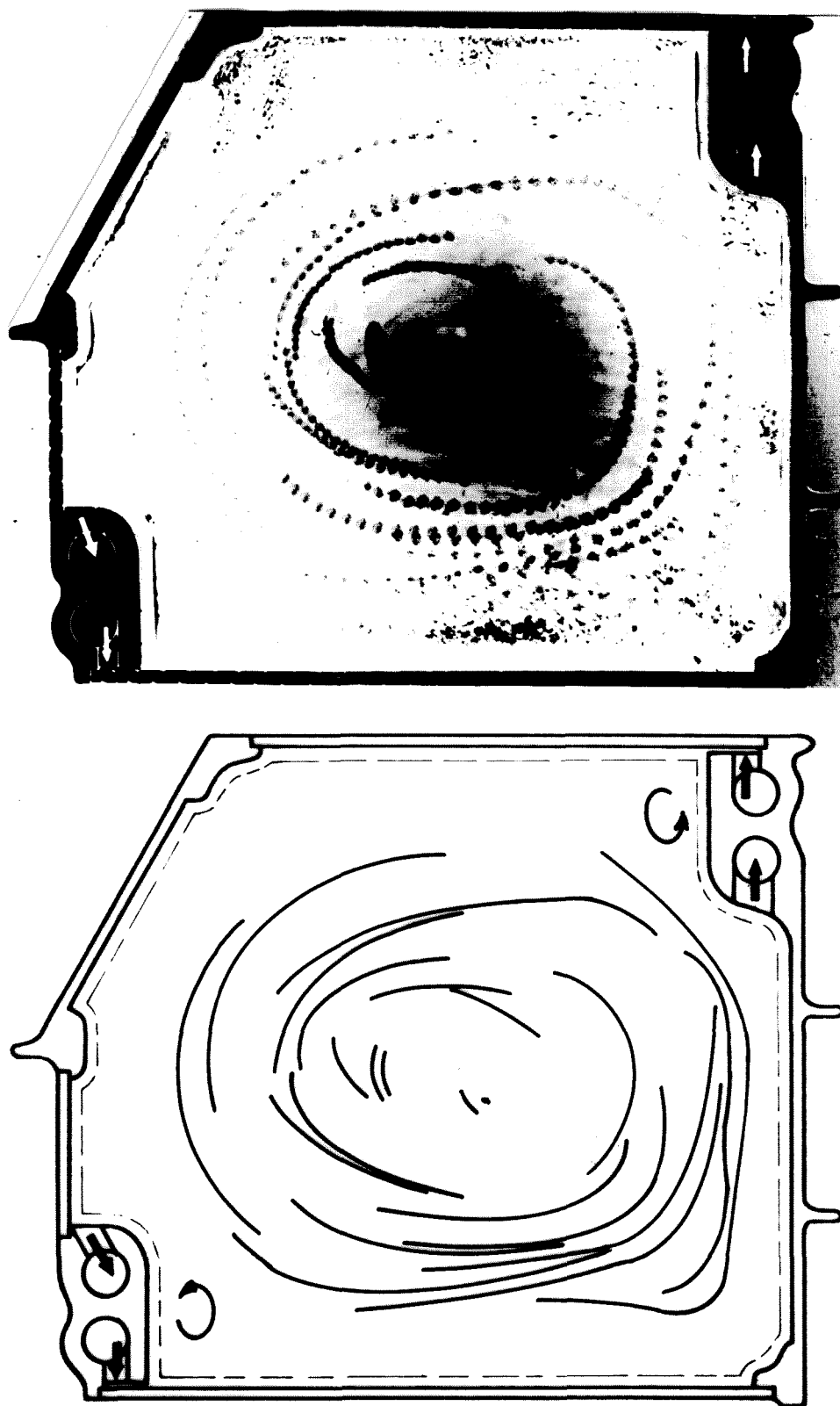


Fig. 7. Ensayos de verificación del sistema de limpieza del FPM. Visualización del movimiento en la superficie libre. Trazadores: esferas de papel de aluminio con núcleo de poliestireno.

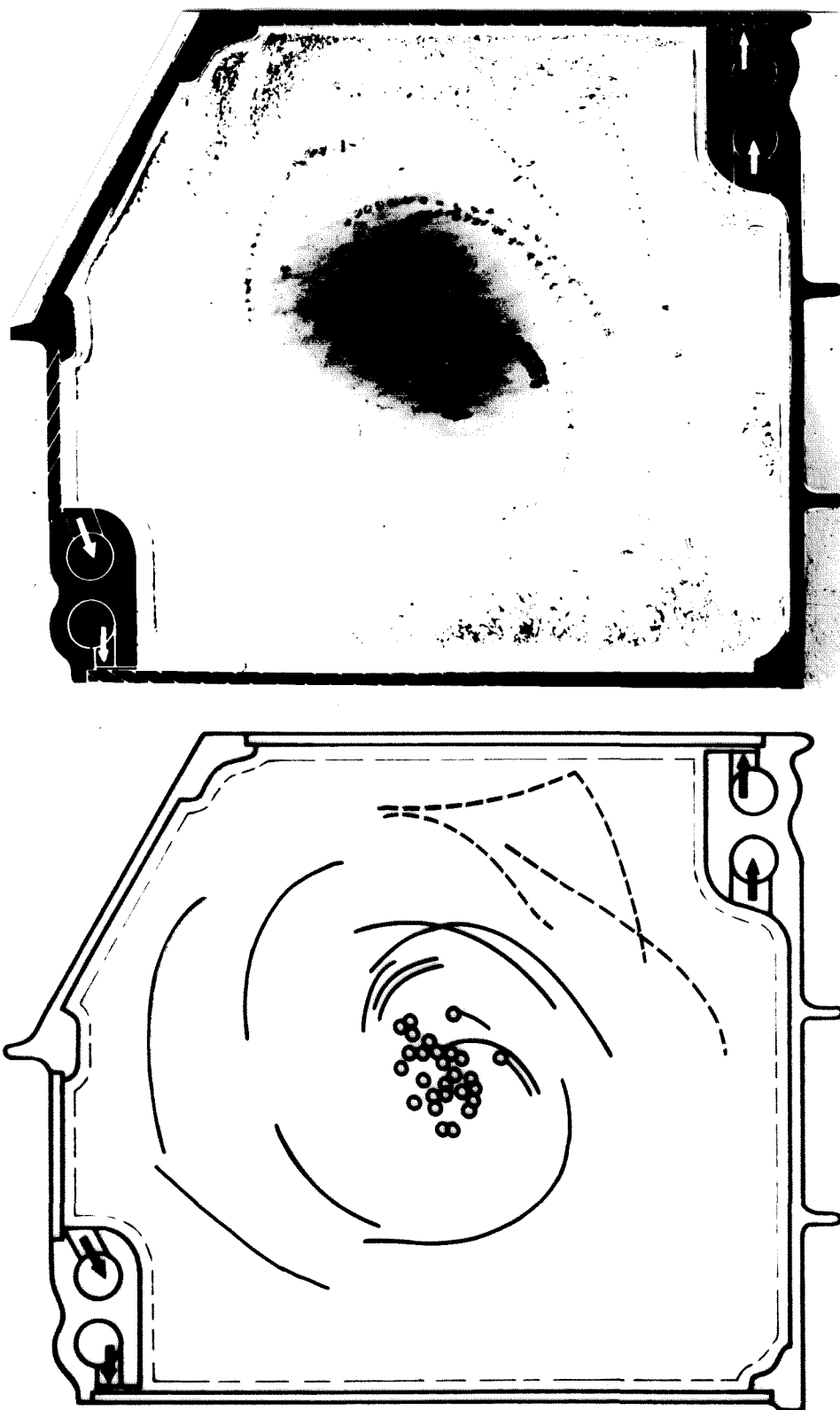


Fig. 8. Ensayos de verificación del sistema de limpieza del FPM.  
Visualización del movimiento en el fondo del recipiente.  
Trazadores:

- esferas de papel de aluminio.
- esferas de acero (bolas de rodamiento).

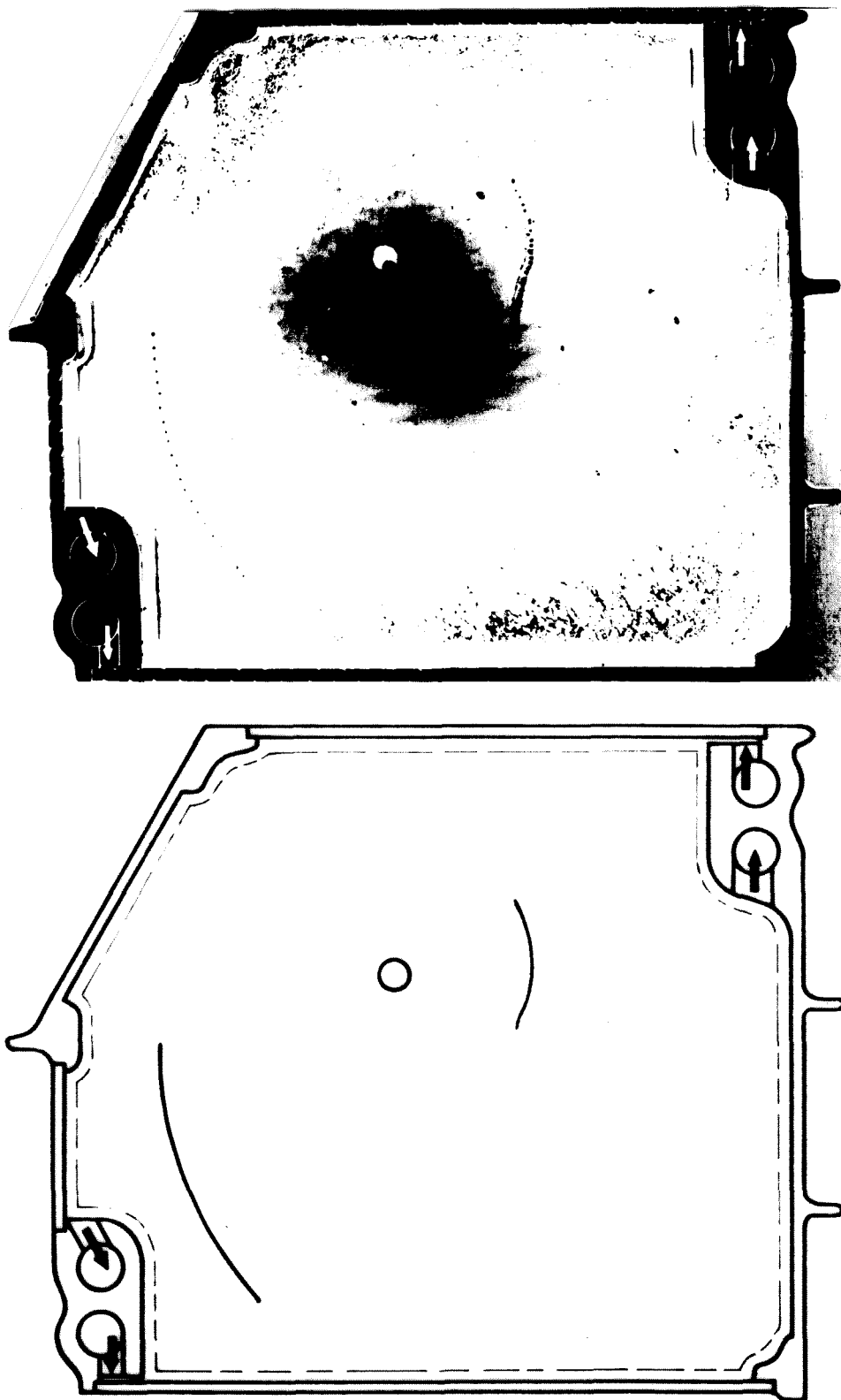


Fig. 9. Ensayos de verificación del sistema de limpieza del FPM. Visualización del movimiento de partículas más densas que el fluido de trabajo. Trazadores: esferas de acero (bolas de rodamiento).

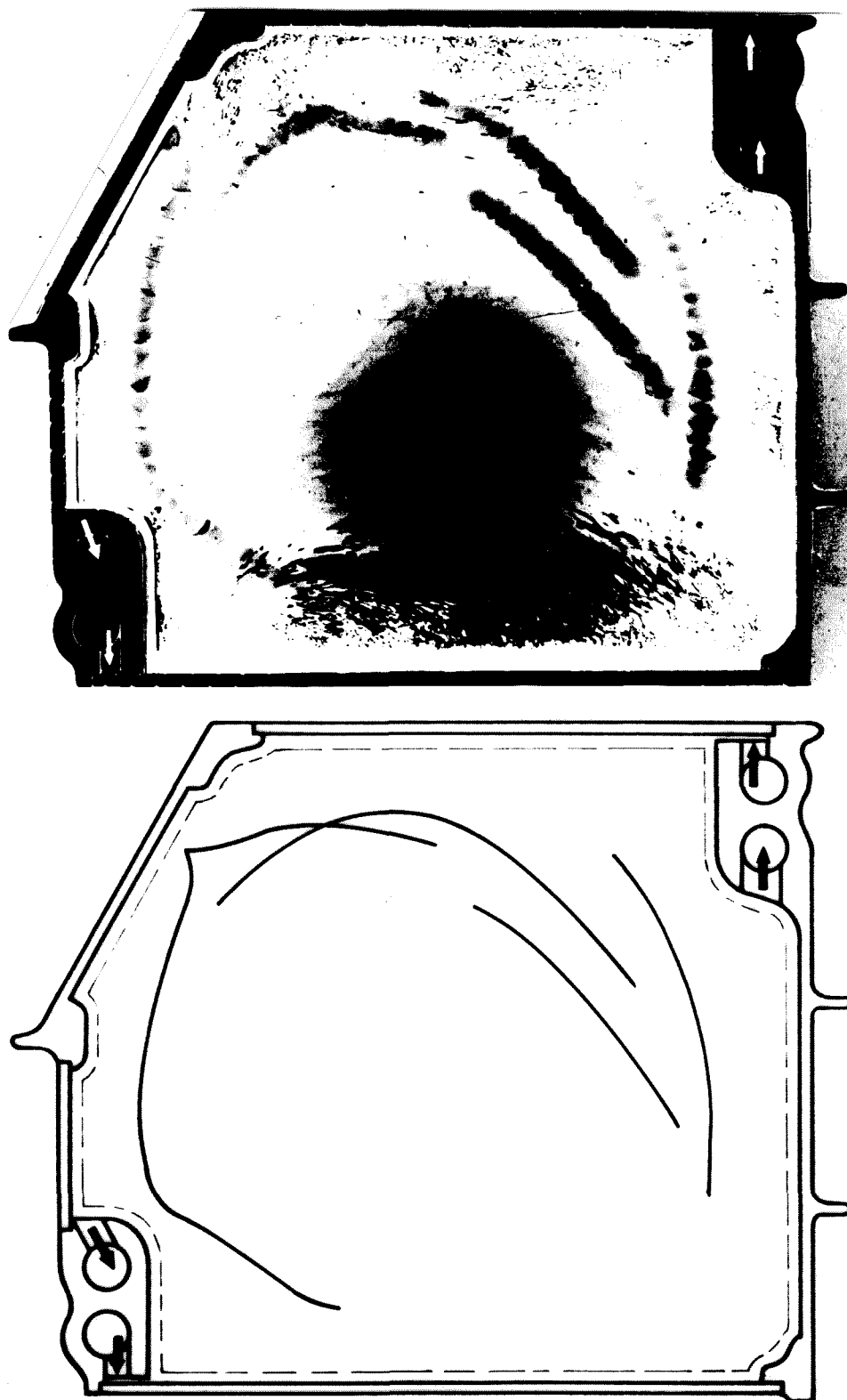


Fig. 10. Ensayos de verificación del sistema de limpieza del FPM. Visualización del movimiento de partículas más densas que el fluido de trabajo. Trazadores: esferas de cristal translúcido.

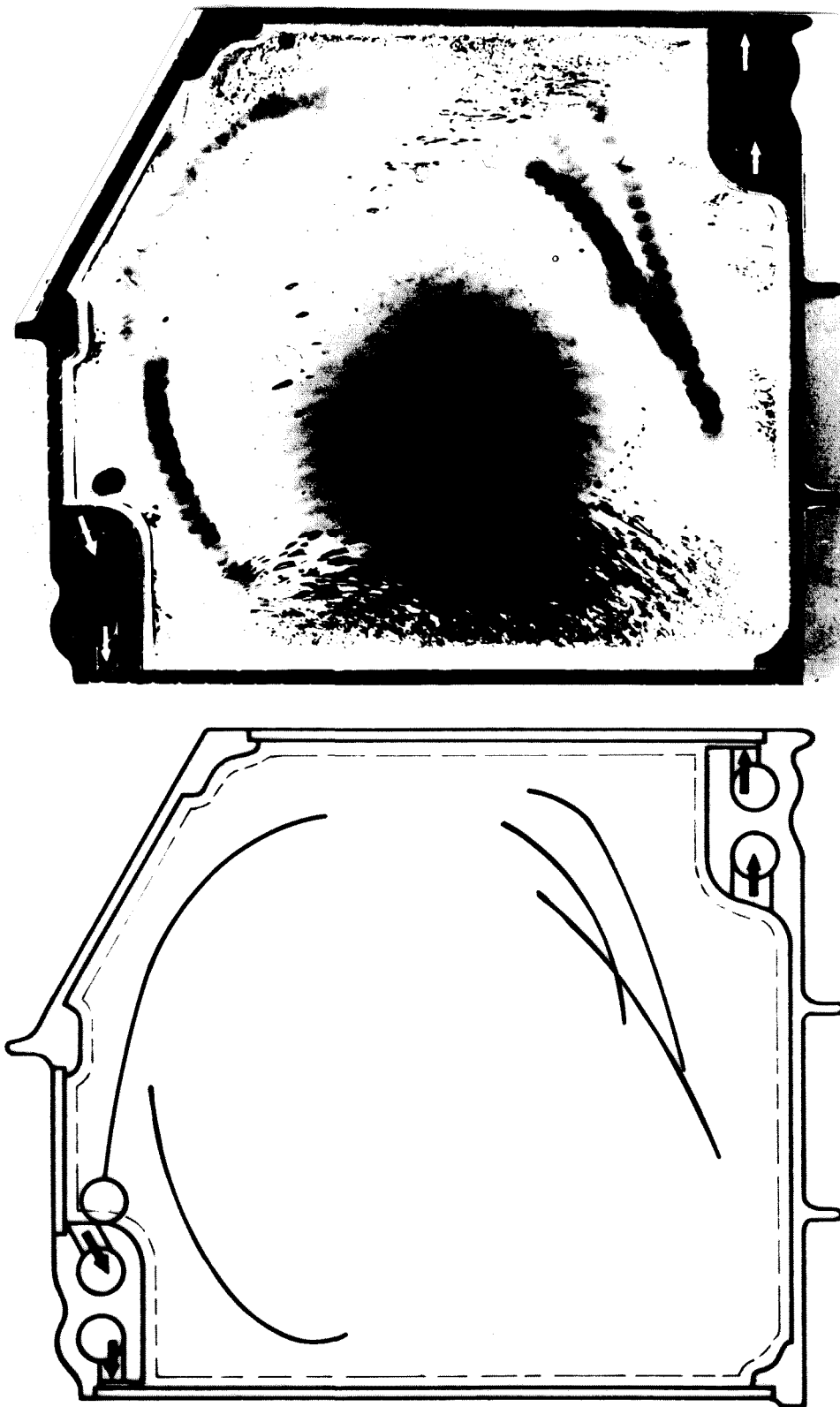


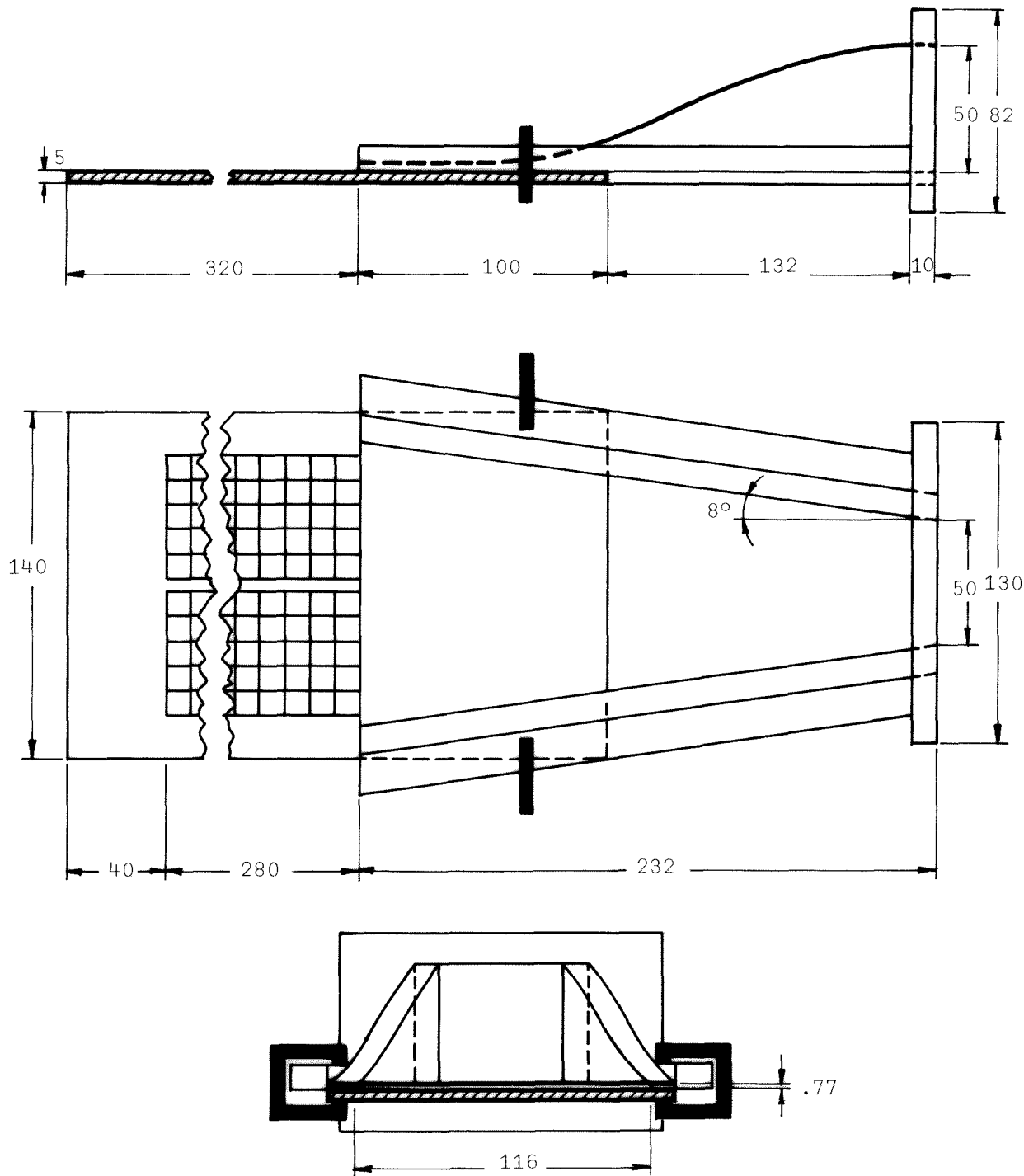
Fig. 11. Ensayos de verificación del sistema de limpieza del FPM. Visualización del movimiento de partículas más densas que el fluido de trabajo. Trazadores: esferas de cristal translúcido.

#### 5.4. LIMPIEZA DE UNA SUPERFICIE PLANA MEDIANTE CHORROS PARIETALES

El objeto de este apartado es evaluar la capacidad del sistema de limpieza del FPM para arrastrar las masas de líquido que se depositen sobre las paredes de la cámara de ensayos. Dado que la gravedad terrestre no permite que se pueda experimentar con gotas de líquido de un tamaño superior a unos pocos milímetros, el fin de los ensayos se ha limitado a verificar el poder de arrastre de gotas de líquido de pequeño volumen depositadas sobre una superficie plana cuando la superficie está barrida por un chorro parietal de características similares a las de los chorros de limpieza de la cámara del FPM, lo que permitirá estimar la eficacia del mencionado sistema de limpieza y estimar la capacidad de barrido de masas líquidas mayores, bien sean gotas o masas distribuidas sobre una superficie (manchas).

El proceso básico seguido en los ensayos es el siguiente: sobre una superficie plana de cristal se deposita una gota de líquido. A continuación se barre la superficie con un chorro tangente a la misma y se anota el comportamiento de la gota, en particular la distancia recorrida en función del tiempo y el estado final de la superficie.

Para generar un chorro de aire parietal se ha diseñado y construido una tobera (Fig. 12) con un área de salida de  $.89 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ . Las paredes laterales y la inferior son rectas y la superior (construida con metacrilato transparente de  $10^{-3} \text{ m}$  de espesor) curvada según una ley sinusoidal, la ranura de descarga tiene una altura de  $.77 \times 10^{-3} \text{ m}$  y una



Cotas en mm.

Fig. 12. Limpieza de una superficie plana con un chorro parietal.  
Tobera de descarga y zona de ensayos.

longitud de .116 m. Para evitar discontinuidades en la sección de salida, la superficie de cristal donde se realizan los ensayos continúa más allá de la sección de salida del chorro, formando la pared inferior del último tramo de la tobera. La zona de ensayos está dividida longitudinalmente en dos pistas, una de las cuales se recubre con una pintura hidrófoba (Creep Barrier FC-721, fabricado por 3M Co.).

La instalación completa, tal como se muestra en la Fig. 13, está formada por un ventilador centrífugo Gruber Sulzer (no visible en la figura) que descarga en una tobera convergente, parte del flujo de aire se canaliza a través de un tubo de acomodación hacia un Venturi (conectado a un micromanómetro Fuess de alcohol) de donde pasa a la tobera descrita en el párrafo anterior y sale por la ranura barriando la superficie de cristal. El resto del flujo de aire sale directamente de la tobera convergente a la atmósfera y, para evitar perturbaciones en la zona de pruebas, es desviado hacia arriba mediante un deflector. La velocidad de salida del chorro parietal se controla variando el área de salida del chorro secundario. En la Tabla 4 se resumen las características del equipo utilizado.

En una fase previa a los ensayos de verificación, se procedió a calibrar el chorro explorando el campo de velocidades con un anemómetro de hilo caliente. Las mediciones se hicieron en un chorro parietal de baja velocidad, a diferentes alturas sobre la superficie y diversas distancias de la ranura de salida. Los perfiles de velocidades obtenidos se muestran en la Tabla 5.

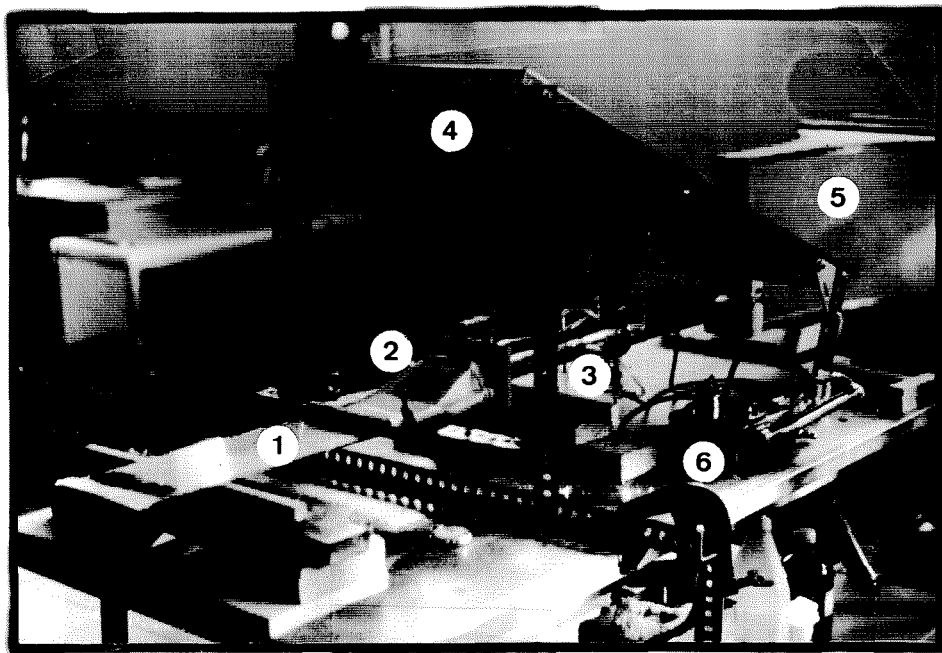
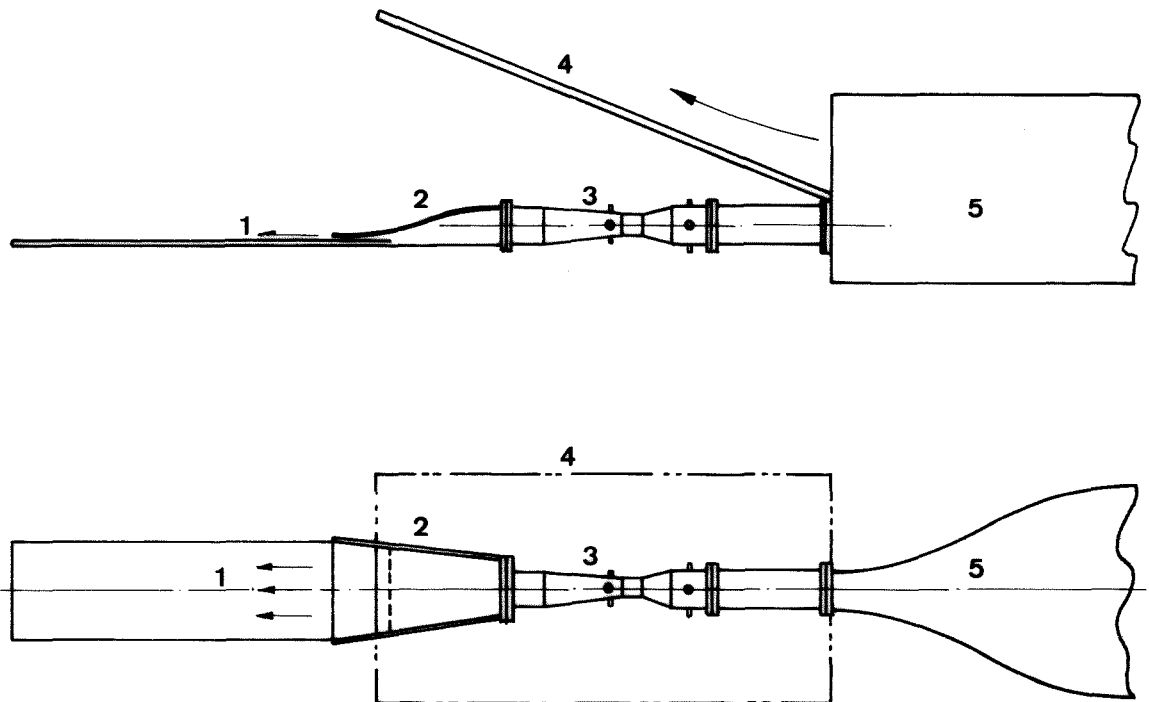


Fig. 13. Instalación para los ensayos de barrido de gotas sobre una superficie plana mediante un chorro parietal. 1: zona de ensayos. 2: tobera de descarga. 3: Venturi. 4: deflector. 5: tobera convergente. 6: micromanómetro.

Tabla 4

Equipo utilizado en los ensayos de limpieza mediante un chorro parietal.

Denominación Fabricante	Características y/o comentarios
Tobera Lamf	Véase la Fig. 12
Venturi y tubo de acomodación Lamf	<p>Construido e instalado de acuerdo con las Normas ISO (Recommandation ISO R 781, 1968).</p> <p>Diámetro del cuello cilíndrico, <math>d=.037</math> m. Diámetro del cilindro de entrada, <math>D=.049</math> m. Longitud del tubo de acomodación, <math>L=.318</math> m.</p> <p>La expresión que relaciona el gasto volumétrico de aire, <math>Q</math>, con la diferencia de presión, <math>\Delta p_v</math>, es</p> $Q = C \frac{\pi \frac{d^2}{4}}{\sqrt{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4}} \sqrt{2 \frac{\Delta p_v}{\rho}},$ <p>donde <math>\rho</math> es la densidad del aire y la constante vale, para los valores de <math>Q</math> de los ensayos, <math>C=.96</math>.</p>
Tobera convergente Lamf	Utilizada para canalizar el flujo de aire suministrado por el ventilador.
Micromanómetro tipo Fuess de alcohol R. Fuess, Berlin	<p>Escala: de 0 a <math>1.6 \times 10^4</math> Pa Precisión: <math>\pm .5</math> Pa Este micromanómetro se usa para medir el gasto a través del Venturi.</p>
Ventilador centrífugo Gruber Sulzer movido por un motor ASEA/CES Gruber Hermanos S.A., Bilbao	<p>Potencia: <math>3.7 \times 10^3</math> W Régimen: 2880 r.p.m.</p>

Según Rajaratnam existe solución de semejanza para el campo de velocidades de un chorro parietal; esto quiere decir que los perfiles de velocidades serán idénticos si se eligen como variables  $U/U_m$  y  $b/b_m$ , siendo  $U$  la velocidad,  $b$  la distancia vertical sobre la superficie, y siendo  $U_m$  y  $b_m$ , pa

ra cada perfil de velocidades, la velocidad máxima y la altura donde la velocidad vale  $U_m/2$  y la pendiente  $\partial U/\partial b$  es negativa [04] (véase la Fig. 14). En la Tabla 5 se recogen también los valores de  $U/U_m$  y  $b/b_m$ , cuya representación gráfica se muestra en la Fig. 14. Como se observa, todos los puntos se agrupan sobre una curva, lo que garantiza que el chorro utilizado para los ensayos se comporta como lo que en la literatura se conoce como chorro parietal plano; en dicha figura se ha representado también la solución de semejanza obtenida a partir de los datos experimentales de Förthmann [04], observándose una buena correlación entre ambas series de datos.

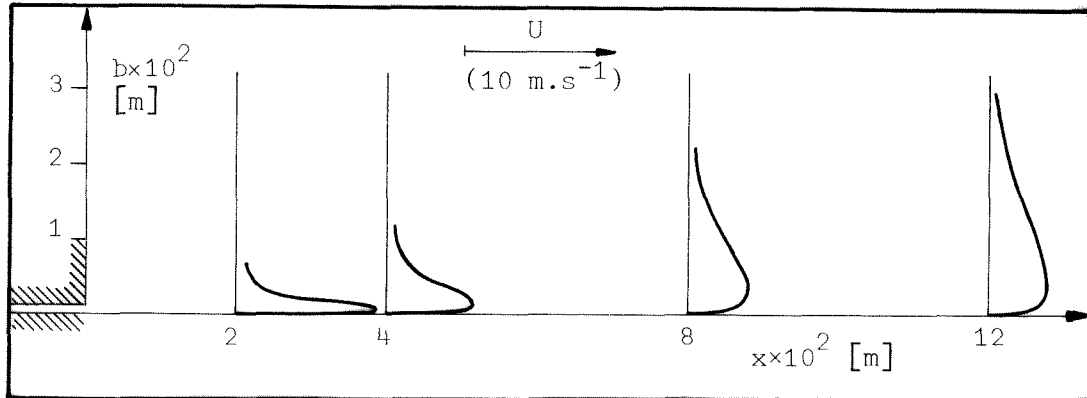
El proceso seguido en cada uno de los ensayos de verificación realizados, se inicia con la preparación de la superficie o su limpieza, caso de que hubiera quedado contaminada por algún ensayo anterior. La superficie se limpia primeramente con un limpiacristales comercial y a continuación se eliminan los restos de éste con un algodón empapado en diclorometano ( $CH_2Cl_2$ ). La limpieza de la superficie termina aquí. Falta, por último, pintar una de las pistas longitudinales con el líquido hidrófobo FC-721.

Para depositar las gotas sobre la superficie, se cierra la sección de salida del chorro y se deja caer, con una jeringuilla, un cierto volumen prefijado de líquido, anotándose su posición (distancia a la boca del chorro), forma y dimensiones tal como se indica en la Fig. 15. Entonces se abre la salida del chorro y se anota, cada cierto tiempo, la posición del borde de avance de la gota y cuantos comentarios

Tabla 5

Campo de velocidades en un chorro de aire parietal<sup>1</sup>.

Altura de la ranura de salida,  $b_o = .77 \times 10^{-3}$  m.



x	2	4	8	12
$x/b_o$	26	52	104	156
$b_m$	1.95	4.9	11.8	16.4
$U_m$	9.7	5.9	4.1	3.8

b	U	$b/b_m$	$U/U_m$	U	$b/b_m$	$U/U_m$	U	$b/b_m$	$U/U_m$	U	$b/b_m$	$U/U_m$
.5	9.36	.26	.99									
1	8.88	.51	.93	5.76	.20	.98	3.39	.08	.83	2.76	.06	.73
2	4.58	1.03	.48	5.66	.41	.96	3.92	.17	.96	3.53	.12	.93
3	2.02	1.54	.21									
4				4.00	.82	.68	3.92	.34	.96	3.72	.24	.98
6				1.88	1.27	.32	3.50	.51	.85	3.53	.37	.93
8				1.00	1.63	.17	3.06	.68	.75	3.31	.49	.87
10							2.50	.85	.61	3.17	.61	.83
12							1.96	1.02	.48	2.76	.73	.73
14							1.49	1.19	.36	2.40	.85	.63
16							1.00	1.36	.24	1.88	.98	.49
18							.46	1.53	.11	1.59	1.10	.42
20							.44	1.69	.11	1.49	1.22	.39
22							.34	1.86	.08	1.12	1.34	.29
24										.81	1.46	.21
26										.61	1.59	.16
28										.46	1.71	.12
30										.34	1.83	.09

<sup>1</sup> Todas las velocidades en la Tabla están dadas en  $m.s^{-1}$  y las distancias en cm.

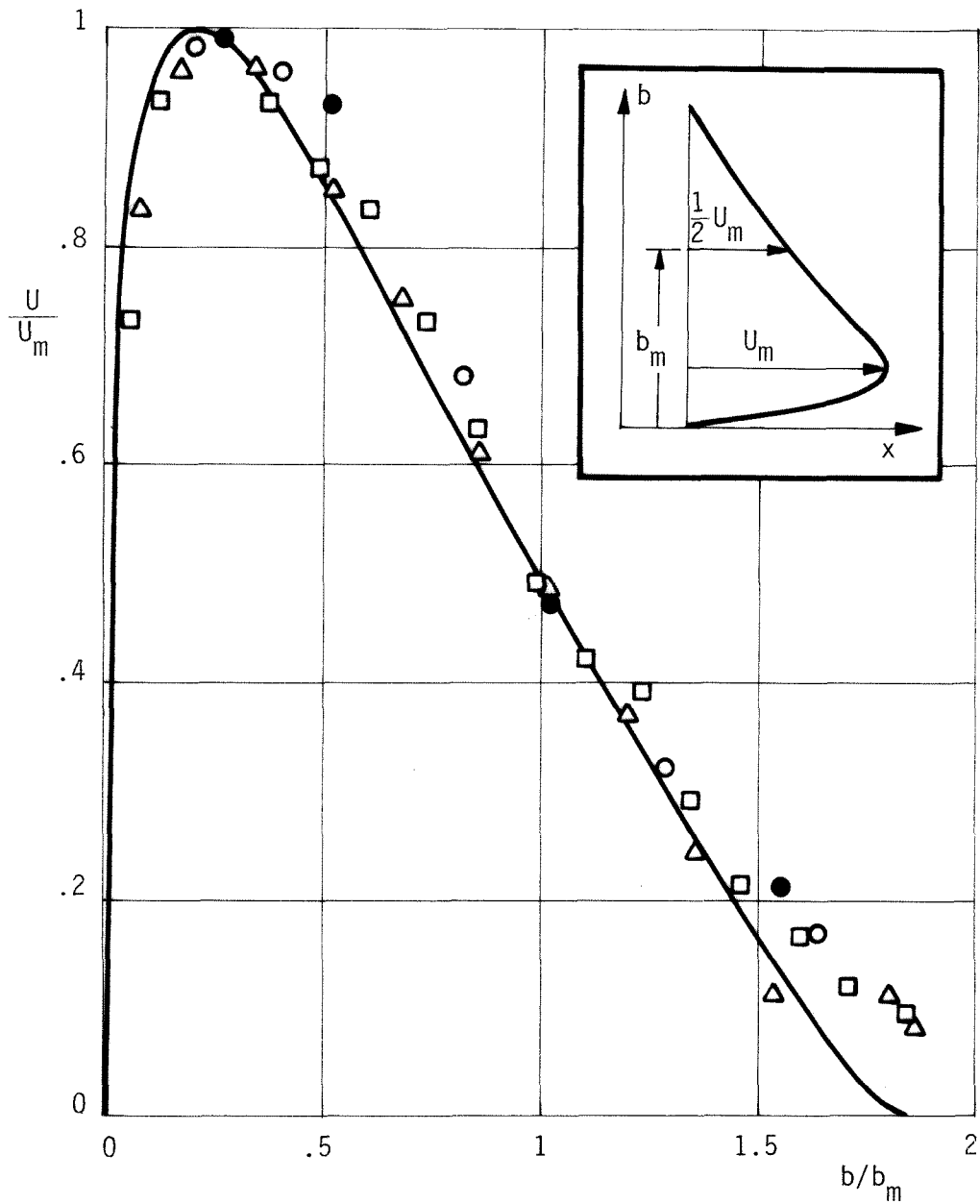


Fig. 14. Semejanza de los perfiles de velocidades en un chorro parietal. La línea continua corresponde a la solución de Förthmann [04]. Los puntos experimentales corresponden a perfiles de velocidad medidos a diferentes distancias de la boca de salida del chorro de acuerdo con el siguiente código (véase Tabla 5).

$x/b_0$	26	52	104	156
Clave	●	○	△	□

sugiera la evolución del experimento.

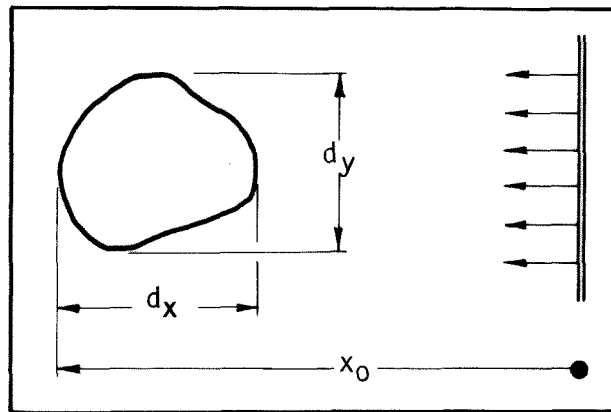


Fig. 15. Definición de la forma, tamaño y posición inicial de las gotas;  $x_0$  es la distancia desde el borde de avance de la gota a la sección de salida del chorro.

En las páginas siguientes se presentan, en primer lugar, las condiciones en que se realizaron los ensayos (Tabla 6) y a continuación (Tablas 7 a 11) los resultados de los mismos. Para cada ensayo, en las tablas se recoge el código del ensayo, la forma y dimensiones iniciales de la gota (según se ha definido en la Fig. 15), la posición del borde de avance en el instante  $t$ ,  $x_t$ , y la distancia recorrida hasta ese instante,  $x_t - x_0$ .

A la vista de los resultados se observa que el comportamiento de las gotas de agua es muy diferente según la superficie esté pintada o no con FC-721. Sobre la superficie no pintada, al abrir la ranura del chorro e incidir sobre la gota, ésta se pone en movimiento dejando tras de sí una estela tanto más pequeña cuanto menor es la velocidad de la gota (en la Fig. 16 se muestra la forma típica adoptada por las gotas de agua y Dimetil-Silicona al avanzar barridas por el

Tabla 6

Limpieza de una superficie plana mediante un chorro parietal. Condiciones de los ensayos.

Código del ensayo	A	B	C	D	E
Líquido	Agua Desmineralizada			Dimetil Silicona <sup>1</sup>	
Volumen de las gotas $V \times 10^9$ [m <sup>3</sup> ]	~14			~10	
Temperatura del aire [°C]	16.5	17	18	18.5	
Gasto volumétrico $Q \times 10^3$ [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	3.11		3.32	2.63	2.88
Velocidad de salida <sup>2</sup> [m.s <sup>-1</sup> ]	34.9		37.3	29.6	32.4

<sup>1</sup> Nombre comercial: 47 V 20 (L-8300), fabricada por Siliconas Hispania S.A.; viscosidad:  $2 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup> (20 cs).

<sup>2</sup> Calculada como el cociente entre el gasto y el área de salida del chorro ( $.89 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>).

chorro de aire). El movimiento de la gota es muy rápido al principio, llegando incluso, en algunos casos, a romperse la estela en un rosario de pequeñas gotas. También es posible, cuando la gota está próxima a la ranura, que se desprendan pequeñas gotas de la principal que son arrastradas -volando- por la corriente de aire.













En la Fig. 17 se representan las distancias recorridas por las gotas en cada prueba en función del tiempo, adimensionalizadas respectivamente con la distancia total recorrida y el tiempo empleado en recorrerla (sólo se han representado los casos en los que se hicieron tres o más mediciones; esto excluye las gotas inicialmente depositadas lejos de la ranura, que apenas son desplazadas por el chorro). Co-

Tabla 7

Limpieza de una superficie plana con un chorro de aire<sup>1</sup>.

Superficie: Vidrio no tratado.

Líquido: Agua desmineralizada.

Ens. Núm.	Forma	dx dy		Tiempo [min]							Notas
				0	1/2	1	2	3	4	5	
A 1		.9	$x_t$	2.3	11.4	12.4	13.7	14.2	14.4	14.5	2
		1.2	$x_t - x_0$	0	9.1	10.1	11.4	11.9	12.1	12.2	
A 2		.9	$x_t$	3.1	13.3	14.3	15.7	16.3	16.7	16.8	2
		.8	$x_t - x_0$	0	10.2	11.2	12.6	13.2	13.6	13.7	
C 3		.9	$x_t$	4.3	11.8	12.9	13.9	14.7	15.1	15.2	2
		1.2	$x_t - x_0$	0	7.5	8.6	9.6	10.4	10.8	10.9	
A 4		.9	$x_t$	4.4	11.4	12.2	12.6	12.8			
		.8	$x_t - x_0$	0	7.0	7.8	8.2	8.4			
A 5		.8	$x_t$	5.5	14.2	15.1	15.6	15.8			2
		.9	$x_t - x_0$	0	8.7	9.6	10.1	10.3			
C 6		.7	$x_t$	6.2	10.6	10.7	10.8				
		.7	$x_t - x_0$	0	4.4	4.5	4.6				
C 7		.9	$x_t$	6.2	11.3	12.4	12.6	12.8	13.1	13.2	
		1.0	$x_t - x_0$	0	5.1	6.2	6.4	6.6	6.9	7.0	
A 8		.6	$x_t$	6.3	13.0	13.1					2
		.6	$x_t - x_0$	0	6.7	6.8					
B 9		.9	$x_t$	6.5	11.2	11.7	11.9				
		.7	$x_t - x_0$	0	4.7	5.2	5.4				
B 10		.8	$x_t$	7.3	10.7	10.8	10.8	10.9			
		.8	$x_t - x_0$	0	3.4	3.5	3.5	3.6			
B 11		.7	$x_t$	7.6	10.1	10.7	10.8				
		.8	$x_t - x_0$	0	2.5	3.1	3.2				
C 12		1.0	$x_t$	7.8	9.6	9.8	9.9				
		.7	$x_t - x_0$	0	1.8	2.0	2.1				

(Continúa en la página siguiente)

<sup>1</sup> Todas las distancias en la Tabla están dadas en cm.













<sup>2</sup> La gota inicial se fragmenta en varias gotas de menor tamaño. Los números en la Tabla indican la posición de la mayor de las gotas resultantes.

Tabla 7 (Continuación)

Limpieza de una superficie plana con un chorro de aire<sup>1</sup>.

Superficie: Vidrio no tratado.

Líquido: Agua desmineralizada.

Ens. Núm.	Forma	dx dy		Tiempo [min]						Notas	
				0	1/2	1	2	3	4		5
C 13		.8	$x_t$	8.2	10.1	10.4	10.5				
		1.0	$x_t - x_0$	0	1.9	2.2	2.3				
B 14		.7	$x_t$	8.3	11.0	11.0	11.1				
		.8	$x_t - x_0$	0	2.7	2.7	2.8				
B 15		.6	$x_t$	9.3	10.8	12.0	12.2				
		.6	$x_t - x_0$	0	1.5	2.7	2.9				
B 16		.6	$x_t$	10.3	12.1	12.5					
		.6	$x_t - x_0$	0	1.8	2.2					
A 17		.7	$x_t$	10.3	12.5	12.6					
		.7	$x_t - x_0$	0	2.2	2.3					
A 18		.7	$x_t$	11.3	12.1	12.4	12.5				
		.8	$x_t - x_0$	0	.8	1.1	1.2				
A 19		.7	$x_t$	12.5	12.8	12.9					
		.7	$x_t - x_0$	0	.3	.4					
C 20		1.1	$x_t$	12.6	13.1	13.2					
		.9	$x_t - x_0$	0	.5	.6					
A 21		1.0	$x_t$	12.8	13.1						
		.8	$x_t - x_0$	0	.3						
B 22		.8	$x_t$	13	13.1						
		.9	$x_t - x_0$	0	.1						
A 23		.7	$x_t$	14.2							
		.8	$x_t - x_0$	0							
B 24		.9	$x_t$	14.6	14.7						
		.9	$x_t - x_0$	0	.1						













<sup>1</sup> Todas las distancias en la Tabla están dadas en cm.

Tabla 8

Limpieza de una superficie plana con un chorro de aire<sup>1</sup>.

Superficie: Vidrio tratado con FC-721

Líquido<sup>2</sup>: Agua desmineralizada.

Ens. Núm.	Forma	dx dy	Tiempo [min]								Notas	
			0	1/2	1	2	3	4	5	6		
A		.9	$x_t$	4.3	4.8	5.0	5.1	5.4	5.5	5.7	5.9	3
1		1.2	$x_t - x_o$	0	.5	.7	.8	1.1	1.2	1.4	1.6	
B		.8	$x_t$	6.4	6.7	6.9	7	7.1	7.3	7.4	7.5	3
2		1.2	$x_t - x_o$	0	.3	.5	.6	.7	.9	1.0	1.1	
C		.7	$x_t$	6.5	6.8	7.0	7.1					
3		.8	$x_t - x_o$	0	.3	.5	.6					
C		1.3	$x_t$	8.9	9.2	9.3	9.4	9.5				
4		.7	$x_t - x_o$	0	.3	.4	.5	.6				
C		1.2	$x_t$	8.9	9.3	9.4	9.5					
5		.5	$x_t - x_o$	0	.4	.5	.6					
B		.7	$x_t$	9.5	9.8	9.8	9.9	10.0				
6		.9	$x_t - x_o$	0	.3	.3	.4	.5				
A		.9	$x_t$	9.5	9.7	9.8	10.0	10.1				
7		1.1	$x_t - x_o$	0	.2	.3	.5	.6				
A		.9	$x_t$	9.7	9.9	10.0	10.1	10.2				
8		.9	$x_t - x_o$	0	.2	.3	.4	.5				
C		1.3	$x_t$	12.5	12.6							
9		.7	$x_t - x_o$	0	.1							
A		.6	$x_t$	13.5	13.7	13.8						
10		1.1	$x_t - x_o$	0	.2	.3						
A		.8	$x_t$	15	15.2	15.3						
11		.8	$x_t - x_o$	0	.2	.3						
B		.7	$x_t$	16.5	16.6	16.7						
12		.7	$x_t - x_o$	0	.1	.2						

<sup>1</sup> Todas las distancias en la Tabla están dadas en cm.

<sup>2</sup> En esta Tabla se recogen los casos en los que el líquido moja la superficie

<sup>3</sup> De la gota inicial se desprende una gota menor que sale fuera del campo observado.

Tabla 9

Limpieza de una superficie plana con un chorro de aire.

Superficie: Vidrio tratado con FC-721

Líquido<sup>1</sup>: Agua desmineralizada.

Ensayo	$x_o \times 10^2$ [m]	Comentarios
A	2.3	Rota en 3 gotas. La mayor, con un diametro del orden de 2 mm sale del campo de observación en menos de 2 s, las dos pequeñas tardan unos 50 s en salir.
A	3.7	Rota en 7 gotas, dos de un diametro próximo a 1 mm que salen del campo en menos de 2 s. Las pequeñas permanecen en su posición después de la rotura hasta evaporarse.
A	7.1	No se rompe la gota. Sale del campo de observación antes de 2 s.
A	7.1	
A	7.5	
A	8.1	
A	11.0	
B	11.1	
B	11.4	
A	12.0	
B	12.0	
A	12.6	
B	13.1	
A	18.2	
B	19	
B	19.2	
B	23.2	

1











En esta Tabla se recogen los casos en los que el líquido NO moja la superficie. El diametro de las gotas es de  $3 \times 10^{-3}$  m aproximadamente.

Tabla 10

Limpieza de una superficie plana con un chorro de aire<sup>1</sup>.

Superficie: Vidrio no tratado.

Líquido: Dimetil Silicona (20 cs).

Ens. Núm.	Forma	dx dy		Tiempo [min]						Notas		
				0	1/2	1	2	3	4		5	6
E 1		.9	$x_t$	2.3	11.5	14.2	17.6	20.1	22.2	23.8		
		1.1	$x_t - x_o$	0	9.2	11.9	15.3	17.8	19.9	21.5		
E 2		1.2	$x_t$	3.5	13.0	16.1	20.0	22.7	22.4	26.9		
		1.1	$x_t - x_o$	0	9.5	12.6	16.5	19.2	20.9	23.4		
E 3		.7	$x_t$	4.5	13.8	17.0	20.1	21.6	23.2	25.9	27.6	2
		.8	$x_t - x_o$	0	9.3	12.5	15.6	17.1	18.7	21.4	23.1	
E 4		1.0	$x_t$	5.4	13.5	16.6	22.0	22.9				
		1.2	$x_t - x_o$	0	8.1	11.2	16.6	17.5				
E 5		1.2	$x_t$	6.5	13.9	16.7	20.8	23.8	26.1	28.2	2	
		1.0	$x_t - x_o$	0	7.4	10.2	14.3	17.3	19.6	21.7		
D 6		1.0	$x_t$	7.3	13.5	19.6	22.1	24.0	25.7			
		1.1	$x_t - x_o$	0	6.2	12.3	14.8	16.7	18.4			
E 7		1.1	$x_t$	8.5	14.3	16.8	20.0	22.3				
		1.2	$x_t - x_o$	0	5.8	8.3	11.5	13.8				
D 8		1.2	$x_t$	9.6	15.1	17.7	21.3	23.7	25.8			
		1.2	$x_t - x_o$	0	5.5	8.1	11.7	14.1	16.2			
E 9		1.1	$x_t$	10.7	15.3	17.7	20.8					
		1.1	$x_t - x_o$	0	4.6	7.0	10.1					
D 10		1.3	$x_t$	11.7	15.5	17.9	20.7	22.8	24.7	26.2	27.6	
		1.1	$x_t - x_o$	0	3.8	6.2	9.0	11.1	13.0	14.5	15.9	

(Continúa en la página siguiente)

<sup>1</sup> Todas las distancias en la Tabla están dadas en cm.





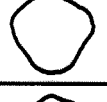
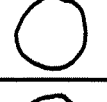



<sup>2</sup> La gota sale del campo de observación.

Tabla 10 (Continuación)

Limpieza de una superficie plana con un chorro de aire<sup>1</sup>.

Superficie: Vidrio no tratado.

Líquido: Dimetil Silicona (20 cs).

Ens. Núm.	Forma	dx dy		Tiempo [min]							Notas	
				0	1/2	1	2	3	4	5		6
E		1.2	$x_t$	12.6	17.4	19.9	23.3	25.6	27.6			
11		1.2	$x_t - x_0$	0	4.8	7.3	10.7	13.0	15.0			
D		1.1	$x_t$	13.5	16.8	18.8	21.7	24.0	25.8	27.3		
12		1.2	$x_t - x_0$	0	3.3	5.3	8.2	10.5	12.3	13.8		
D		1.1	$x_t$	15.5	18.3	20.1	22.8	24.9	26.9	28.5		2
13		1.2	$x_t - x_0$	0	2.8	4.6	7.3	9.4	11.4	13.0		
D		1.3	$x_t$	17.7	20.4	22.3	25.0	27.0	28.8			2
14		1.2	$x_t - x_0$	0	2.7	4.6	7.3	9.3	11.1			
E		1.1	$x_t$	18.3	20.7	22.3	24.5	26.1	27.4	28.3		2
15		1.2	$x_t - x_0$	0	2.4	4.0	6.2	7.8	9.1	10.0		
D		1.1	$x_t$	19.4	21.7	23.4	25.8	27.9				
16		1.1	$x_t - x_0$	0	2.3	4.0	6.4	8.5				
E		1.2	$x_t$	20.4	22.6	24.2	26.4	28.0				
17		1.1	$x_t - x_0$	0	2.2	3.8	6.0	7.6				
D		1.1	$x_t$	21.6	23.7	25.3	27.4					
18		1.1	$x_t - x_0$	0	2.1	3.7	5.8					
D		1.2	$x_t$	22.6	24.5	26.0	28.0	29.7				2
19		1.2	$x_t - x_0$	0	1.9	3.4	5.4	7.1				

<sup>1</sup> Todas las distancias en la Tabla están dadas en cm.

<sup>2</sup> La gota sale del campo de observación.

Tabla 11

Limpieza de una superficie plana con un chorro de aire<sup>1</sup>.

Superficie: Vidrio tratado con FC-721

Líquido: Dimetil Silicona (20 cs).

Ens. Núm.	Forma	dx dy		Tiempo [min]					Notas
				0	15	30	45	60	
E 1	○	.4	$x_t$	2.3	14.7	18.5	23.5	24.4	2
		.5	$x_t - x_o$	0	12.4	16.2	21.2	22.1	
E 2	○	.4	$x_t$	3.8	15.5	21.5	24.3		2
		.6	$x_t - x_o$	0	11.7	17.7	20.5		
E 3	○	.5	$x_t$	3.9	15.5	20.5	23.4	26.4	2,3
		.5	$x_t - x_o$	0	11.6	16.6	19.5	22.5	
E 4	○	.5	$x_t$	5.2	15.5	21.3	24.2		2
		.5	$x_t - x_o$	0	10.3	16.1	19.0		
D 5	○	.5	$x_t$	7.3	16.4	21.5	23.8		2
		.5	$x_t - x_o$	0	9.1	14.2	16.5		
E 6	○	.5	$x_t$	8.3	17.0	21.5	23.5	24.0	2,3
		.5	$x_t - x_o$	0	8.7	13.2	15.2	15.7	
D 7	○	.5	$x_t$	9.2	17.8	22.7	23.8		2
		.6	$x_t - x_o$	0	8.6	13.5	14.6		
E 8	○	.5	$x_t$	10.2	17.5	21.7	23.7		
		.5	$x_t - x_o$	0	7.3	11.5	13.5		
D 9	○	.5	$x_t$	11.1	19.1	23.8	27		2
		.5	$x_t - x_o$	0	8.0	12.7	15.9		
E 10	○	.5	$x_t$	12.2	18.8	22.3	24.5	26.4	2,3
		.6	$x_t - x_o$	0	6.6	10.1	12.3	14.1	

(Continúa en la página siguiente)











- <sup>1</sup> Todas las distancias en la Tabla están dadas en cm.
- <sup>2</sup> La gota inicial fragmenta en varias gotas menores. Los números en la Tabla indican la posición de la más avanzada de las gotas resultantes.
- <sup>3</sup> La gota sale del campo de observación.

Tabla 11 (Continuación)

Limpieza de una superficie plana con un chorro de aire<sup>1</sup>.

Superficie: Vidrio tratado con FC-721

Líquido: Dimetil Silicona (20 cs).

Ens. Núm.	Forma	dy		Tiempo [min]					Notas
		dy		0	15	30	45	60	
D 11		.8 .5	$x_t$ $x_t - x_o$	13.4 0	20.0 6.6	24.1 10.7	25.3 11.9	26.2 12.8	
E 12		.6 .5	$x_t$ $x_t - x_o$	14.2 0	21.6 7.4	24.5 10.3	27.1 12.9		2,3
D 13		.5 .6	$x_t$ $x_t - x_o$	15.2 0	21.8 6.6	24.4 9.2	26.4 11.2	27.7 12.5	2
E 14		.6 .6	$x_t$ $x_t - x_o$	16.2 0	22.7 6.5	24.7 8.5	28.0 11.8		3
D 15		.5 .5	$x_t$ $x_t - x_o$	17.3 0	23.3 6.0	24.6 7.3	27.0 9.7	27.8 10.5	2
E 16		.5 .5	$x_t$ $x_t - x_o$	18.2 0	23.1 4.9	24.4 6.2	25.5 7.3	27.2 9.0	3
D 17		.5 .5	$x_t$ $x_t - x_o$	19.3 0	24.3 5.0	26.6 7.3	27.7 8.4		
E 18		.5 .6	$x_t$ $x_t - x_o$	20.3 0	23.4 3.1	27.2 6.9			
D 19		.5 .5	$x_t$ $x_t - x_o$	21.3 0	24.5 3.2	27.9 6.6			3
D 20		.5 .6	$x_t$ $x_t - x_o$	22.3 0	25.3 3.0	28.2 5.9			3

<sup>1</sup> Todas las distancias en la Tabla están dadas en cm.

<sup>2</sup> La gota inicial fragmenta en varias gotas menores. Los números en la Tabla indican la posición de la más avanzada de las gotas resultantes.

<sup>3</sup> La gota sale del campo de observación.

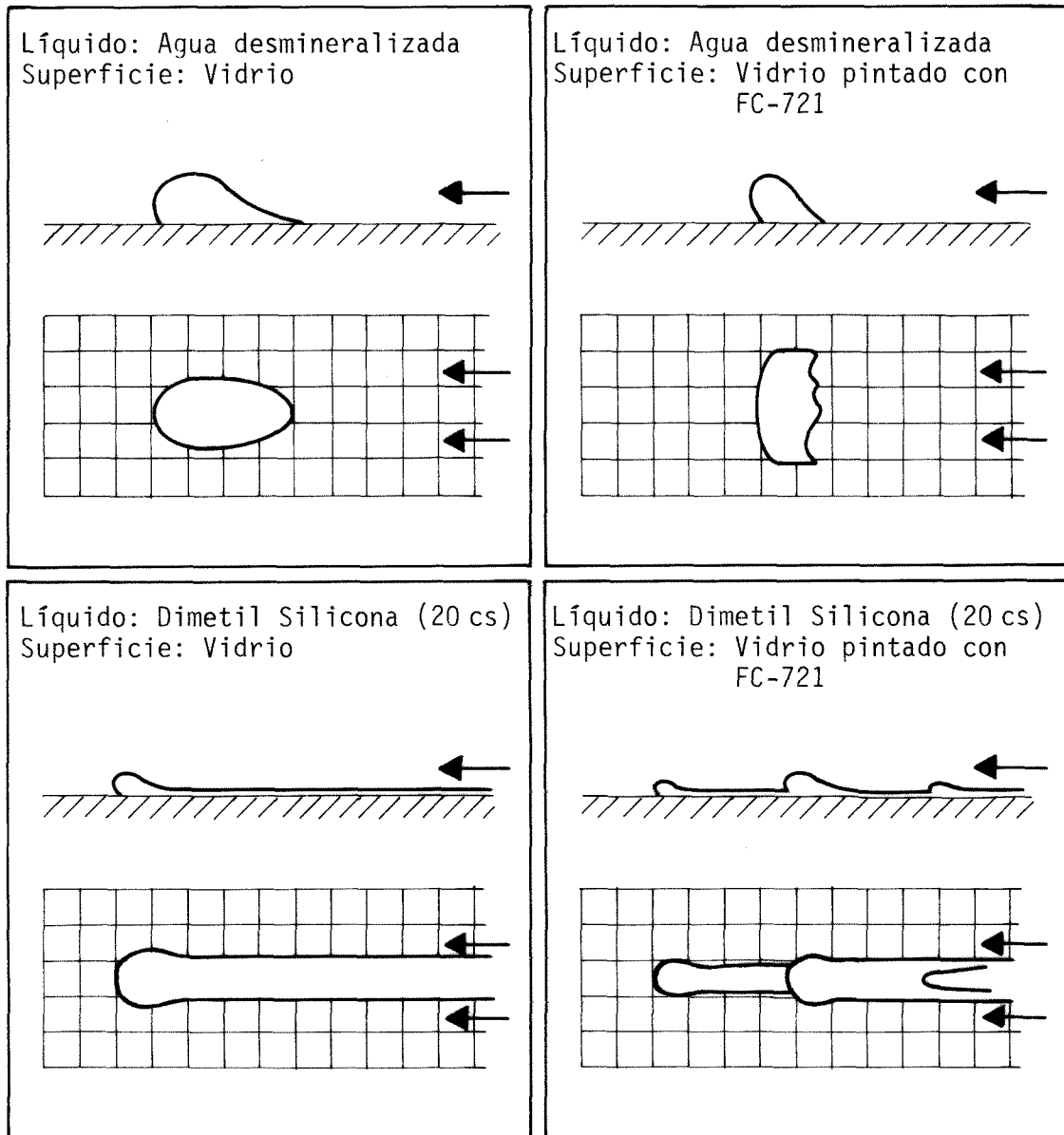


Fig. 16. Forma típica de avance de pequeñas gotas de líquido sobre una superficie plana barrida por un chorro parietal. Los dibujos son sólo a título indicativo, con la escala vertical muy exagerada.

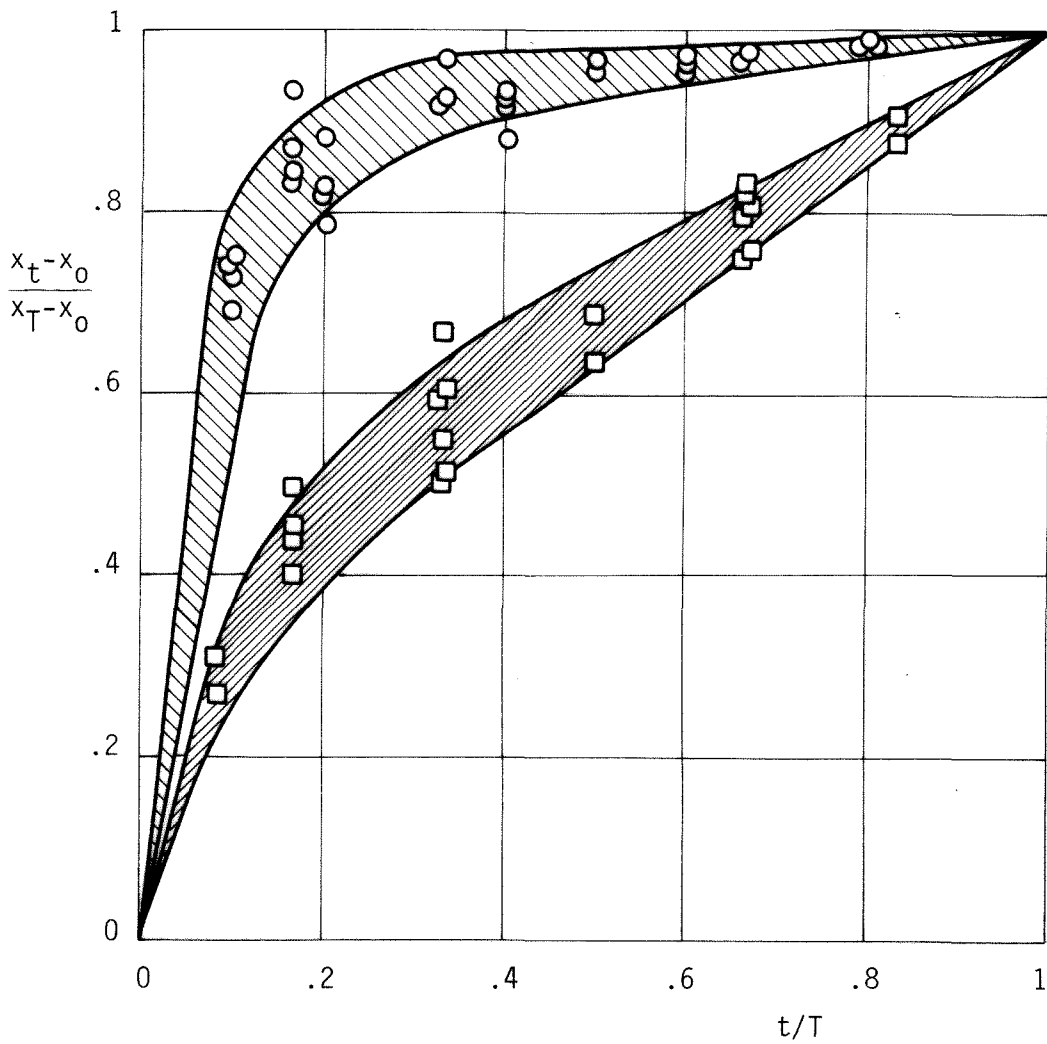


Fig. 17. Distancia recorrida (adimensionalizada con la distancia total) en función del tiempo (adimensionalizado con el tiempo total del recorrido). Líquido: gotas de agua des mineralizada sobre una superficie plana de vidrio no tratado (  $\circ$ ,  $\square$  ) y tratado con FC-721 (  $\bullet$ ,  $\blacksquare$  ).

mo se muestra en la figura, las gotas hacen prácticamente casi todo su recorrido en la primera quinta parte del tiempo total. El que la velocidad decrezca con el tiempo es debido, en primer lugar, a que al principio -estela grande- la superficie de la gota es mayor, por lo que la evaporación es elevada y el volumen de la gota disminuye ofreciendo menor resistencia al aire, y en segundo lugar a que la velocidad en el chorro es menor conforme nos alejamos de la sección de salida.

En la Fig. 18 se representa la distancia total recorrida en función de la posición inicial. Como se ve, las gotas no se mueven si inicialmente se colocan a una distancia superior a .15 m de la boca del chorro (la única forma de limpiar estas gotas es evaporándolas).

Sobre la superficie tratada con FC-721 pueden ocurrir dos casos. Si la gota no moja a la superficie, el chorro la arrastra rápidamente, saliendo del campo de observación en un tiempo inferior a 2 s, cualquiera que sea su posición inicial (véase la Tabla 9). Si la gota moja a la superficie, su comportamiento es muy distinto; puede llegar a romperse al igual que ocurría sobre la superficie no tratada si inicialmente se coloca cerca de la ranura pero, en cualquier caso, se desplaza muy lentamente y casi siempre avanza en un frente plano sin apenas estela (Fig. 16), esto explica que la curva de distancias en función del tiempo sea más suave (Fig. 17), pues no hay grandes variaciones en la superficie de la gota y además ésta no se desplaza una distancia lo suficientemente grande (Fig. 19) como para que las condiciones

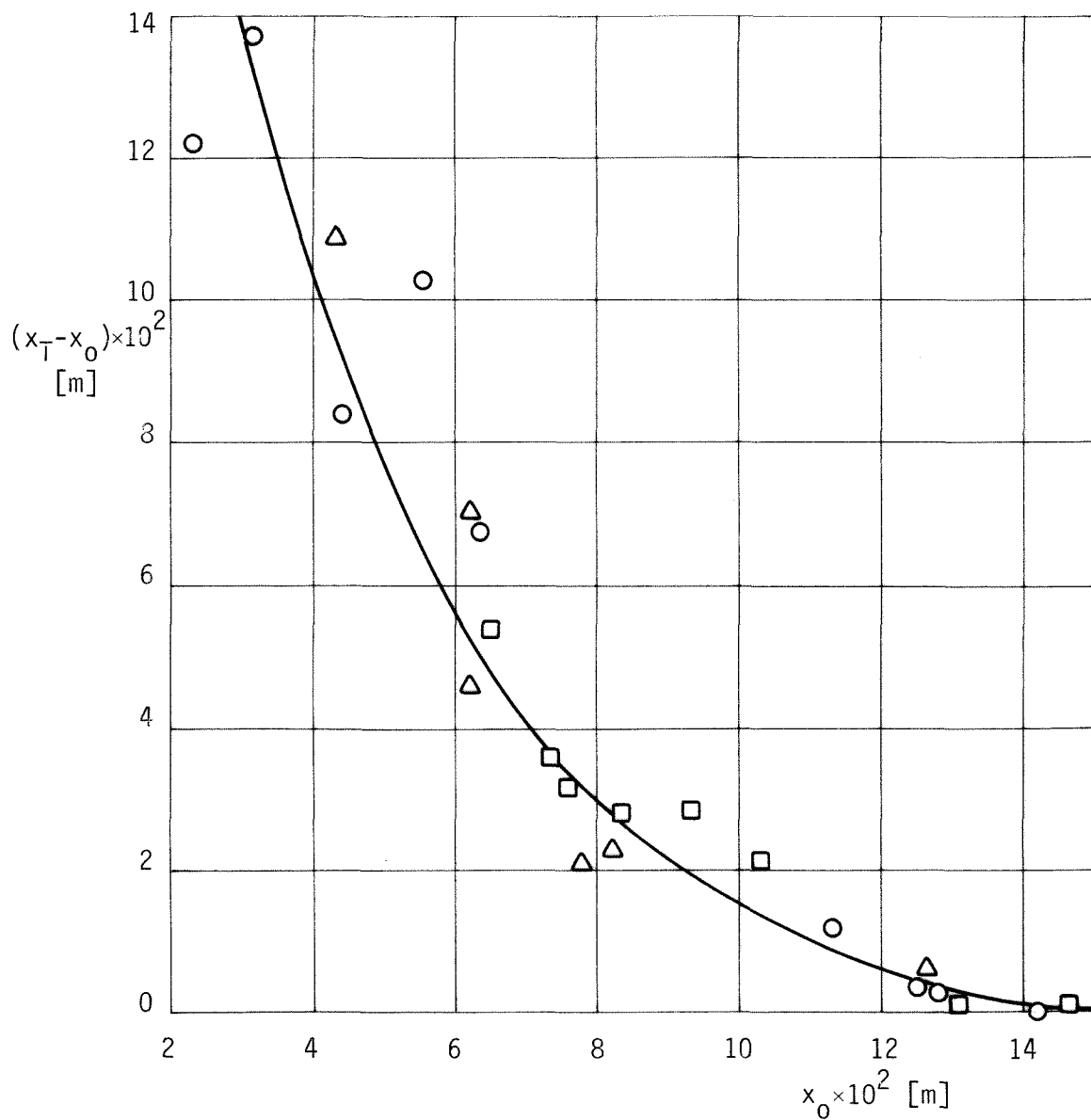


Fig. 18. Distancia total recorrida,  $x_T - x_0$ , en función de la posición inicial,  $x_0$ . Líquido: gotas de agua desmineralizada sobre una superficie plana de vidrio. Los símbolos indican el código del ensayo (véase Tablas 6, 7 y 8) según la siguiente clave:

- Ensayo A
- Ensayo B
- △ Ensayo C.

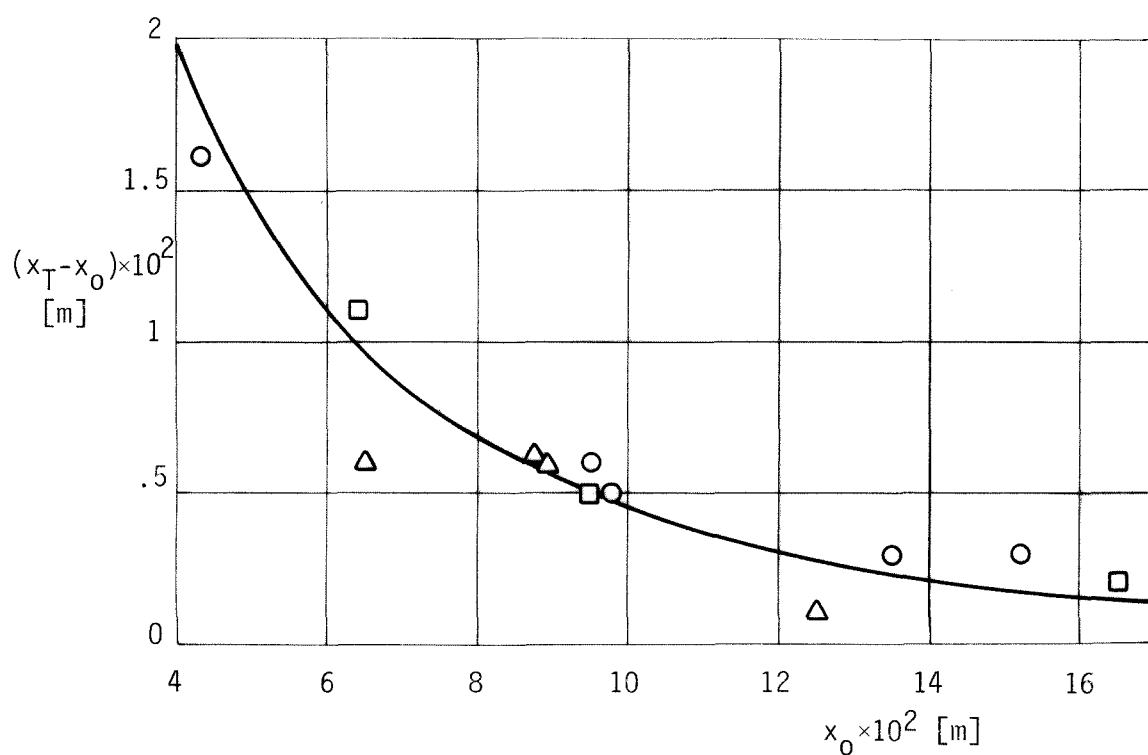


Fig. 19. Distancia total,  $x_T - x_0$ , en función de la posición inicial,  $x_0$ , Líquido: gotas de agua desmineralizada sobre una superficie plana de vidrio pintado con FC-721. Los símbolos indican el código del ensayo (véase Tablas 6, 7 y 8) según la siguiente clave:

- Ensayo A
- Ensayo B
- △ Ensayo C.

del chorro varíen apreciablemente. En resumen, en este caso las gotas no se mueven o permanecen muy cerca del lugar donde han sido depositadas, debiendo ser eliminadas de la superficie por evaporación. El aspecto de la superficie, una vez evaporada la gota, es como si la pintura hidrófoba hubiera cristalizado; esto sugiere que tal vez el líquido FC-721 sea disuelto o atacado por el agua o probablemente que el agua se introduce entre la superficie de vidrio y la película de recubrimiento.

Las diferencias de comportamiento, según la superficie esté pintada o no con FC-721, son menores en el caso de la Dimetil-Silicona. En ambos casos las gotas, al ser sopladadas por el chorro, avanzan de forma análoga, dejando tras de sí una estela que se extiende desde la posición inicial de la gota, aunque sobre la superficie pintada es frecuente que las gotas se rompan en otras menores, avanzando cada una de ellas sobre la estela de la anterior semejando un tren de gotas (Fig. 16). Debido a la estela, las gotas al avanzar van disminuyendo continuamente su volumen, lo que unido a la disminución de la velocidad del chorro con la distancia, ocasiona que la velocidad de avance vaya decreciendo suavemente con el tiempo (véase la Fig. 20 donde se ha representado la distancia recorrida adimensional en función del tiempo adimensional). Las gotas no llegan a pararse (al contrario de lo que ocurría con el agua) sino que siguen avanzando hasta que su altura es del orden de la que tiene la estela (de un modo gráfico podría decirse que la gota avanza hasta que desaparece convertida en estela) y el aspecto final es de una larga

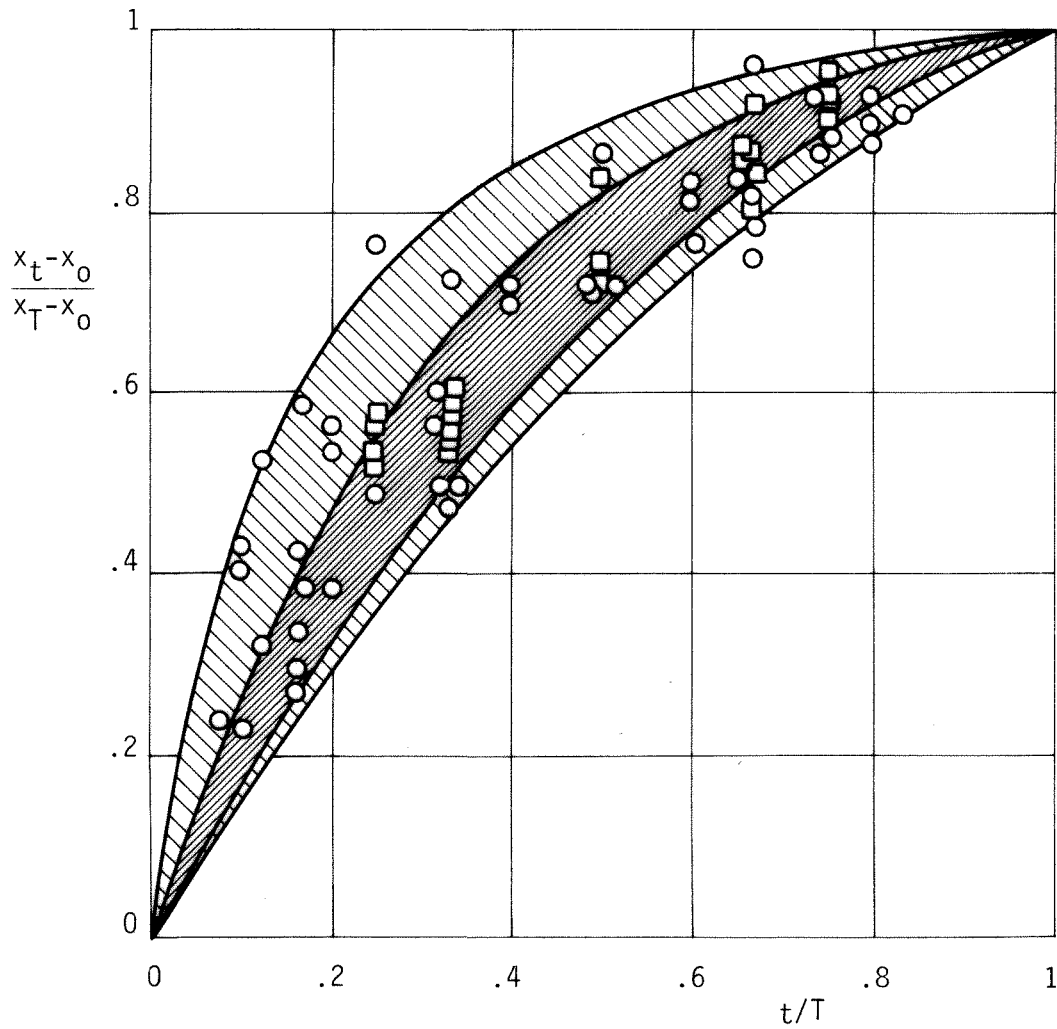


Fig. 20. Distancia recorrida (adimensionalizada con la distancia total) en función del tiempo (adimensionalizado con el tiempo total del recorrido). Líquido: gotas de Dimetil Silicona (20 cs) sobre una superficie plana de vidrio no tratado (  $\circ$ ,  $\text{diagonal lines}$  ) y tratado con FC-721 (  $\square$ ,  $\text{cross-hatch}$  ).

banda de Dimetil-Silicona extendida a lo largo de la superficie, banda que se debe limpiar manualmente si se pretende restablecer las condiciones iniciales de la superficie.

Dado que la distancia recorrida por cada gota depende en gran medida del volumen inicial (además de la posición) y éste puede oscilar alrededor del valor nominal ( $10^{-8}$  m<sup>3</sup>) los puntos representativos de cada ensayo en el plano distancia recorrida - posición inicial no muestran tendencia alguna a agruparse en torno a una línea, como ocurre en el caso del agua. Sin embargo, representando la distancia recorrida durante un cierto intervalo de tiempo en función de la posición inicial (Figs. 21 y 22), los datos experimentales muestran que existe una dependencia entre la distancia recorrida y la posición inicial. La línea de trazos en la Fig. 21 (superficie no tratada) que corresponde a la distancia total recorrida, se ha dibujado por interpolación de las curvas inferiores. Como se deduce al comparar ambas figuras, la velocidad de avance es mucho mayor cuando la superficie está pintada con FC-721 (Fig. 22). Queda por último volver a señalar que el rasgo dominante en todas las pruebas realizadas con Dimetil-Silicona es el alto grado de contaminación de la superficie después de haber barrido las gotas.

Todos los ensayos mencionados hasta ahora estaban dirigidos a comprobar la capacidad de arrastre del chorro. Se puede esperar que si las gotas son mayores, su comportamiento no difiera mucho del observado en las gotas pequeñas. Presumiblemente serán arrastradas con más facilidad por la corriente debido a su mayor volumen, aunque es posible que

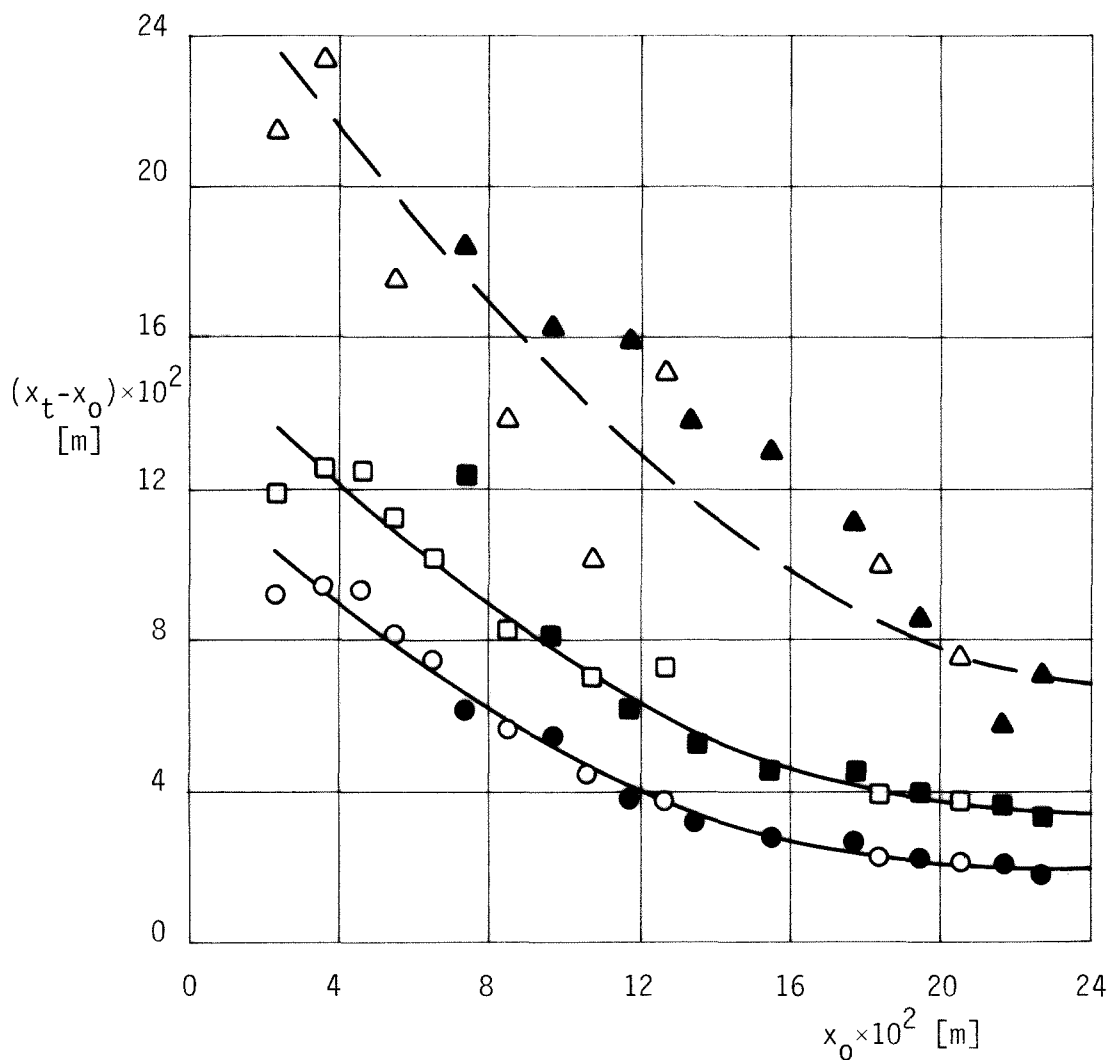


Fig. 21. Distancia recorrida,  $x_t - x_0$ , en función de la posición inicial,  $x_0$ . Líquido: gotas de Dimetil Silicona (20 cs) sobre una superficie plana de vidrio. Los símbolos indican el tiempo transcurrido y el código del ensayo (véase Tablas 6, 10 y 11) según la siguiente clave:

Tiempo [min]	1/2	1	$T^1$
Ensayo: D	●	■	▲
E	○	□	△

<sup>1</sup> Tiempo transcurrido hasta que se para la gota.

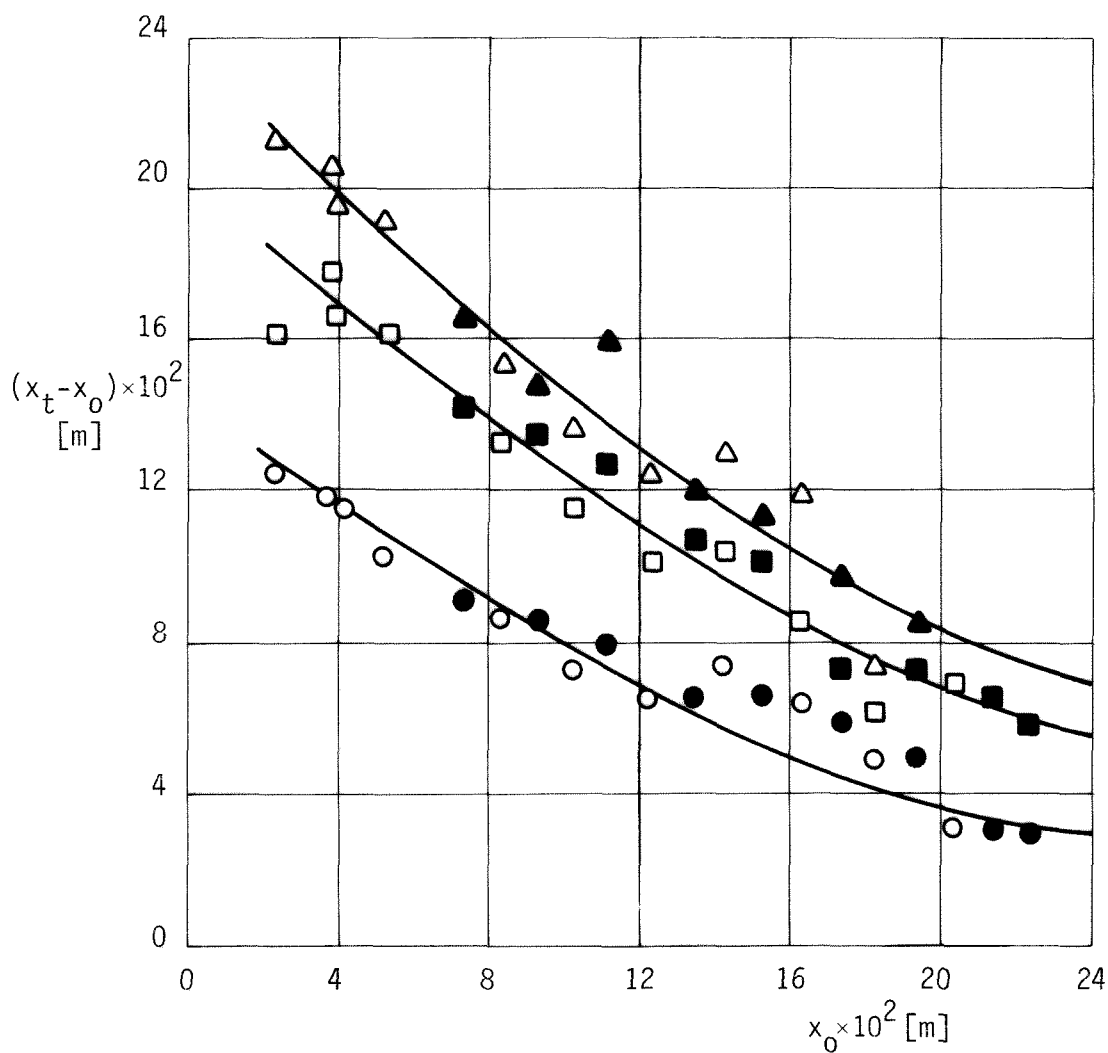


Fig. 22. Distancia recorrida,  $x_t - x_0$ , en función de la posición inicial,  $x_0$ . Líquido: gotas de Dimetil Silicona (20 cs) sobre una superficie plana de vidrio pintado con FC-721. Los símbolos indican el tiempo transcurrido y el código del ensayo (véase Tablas 6,10 y 11) según la siguiente clave:

Tiempo [s]	15	30	45
Ensayo D	●	■	▲
E	○	□	△

se fragmenten en un cierto número de gotas menores, de incidir de lleno el chorro sobre ellas.

Un aspecto más preocupante es el hecho de que en el FPM las bocas de extracción estén en paredes perpendiculares a las de los chorros. Se podrían haber hecho ensayos para comprobar la capacidad de arrastre del chorro de gotas situadas en una pared perpendicular al plano de salida y la razón de no hacerlos es que en el FPM la distancia del chorro a la pared es del orden de .15 m y a esa distancia el chorro es poco efectivo para desplazar gotas de muy poco volumen, como se deduce de los ensayos realizados. El único experimento realizado en este sentido ha sido comprobar si gotas de agua sopladas por el chorro podían superar un obstáculo. Los ensayos se han realizado sobre vidrio pintado con FC-721, colocando a una cierta distancia de la ranura de salida y paralelamente a ésta una placa de cristal de  $10^{-3}$  m de espesor también pintada con FC-721. En la Tabla 12 se resumen los resultados obtenidos (sólo se consideran los casos en que la gota no moja la superficie).

#### 5.5. CONCLUSIONES

Una vez finalizados los ensayos de verificación, teniendo en cuenta que, debido a las limitaciones impuestas por el campo gravitatorio, los resultados que se obtienen en las pruebas de evaluación representan sólo una parte de la respuesta global que se obtendría con el equipo funcionando en las condiciones de diseño (gravedad nula o despreciable) y juzgando las características del sistema únicamente bajo el

Tabla 12

Barrido de gotas mediante un chorro parietal en presencia de un obstáculo.

1. Condiciones de los ensayos

Líquido	Agua desmineralizada. Gotas aproximadamente esféricas con un diámetro de $3 \times 10^{-3}$ m.
Superficie	Vidrio tratado con FC-721
Obstáculo	Placa de vidrio de $10^{-3}$ m de espesor pintada con FC-721
Chorro	Temperatura del aire: 18.5 °C Velocidad de salida: 29.6 m.s <sup>-1</sup>

2. Resultados cualitativos <sup>1</sup>

Posición inicial de la gota $x_0 \times 10^2$ [m]	Distancia del obstáculo a la ranura de salida del chorro, $d \times 10^2$ [m]		
	10	13	16
4	3 (C)	4 (C)	4 (A)
6	4 (D)		3 (B)
8	3 (D)	3 (D)	3 (E)
10		2 (E)	3 (E)
12		2 (E)	2 (E)
14			2 (E)

<sup>1</sup> La cifra en la izquierda de las casillas indica el número de ensayos realizados. Las letras entre paréntesis de la derecha indican el comportamiento típico de las gotas, de acuerdo con la siguiente clasificación:

(A)	Las gotas se rompen; ninguna de las gotas resultantes supera el obstáculo, quedando adheridas al mismo.
(B)	Las gotas no se rompen, quedan adheridas al obstáculo.
(C)	Las gotas se rompen en varias, algunas de las cuales (las más grandes) superan el obstáculo; las pequeñas quedan adheridas en él.
(D)	Las gotas no se rompen, superan el obstáculo pero dejando parte del líquido adherido al mismo.
(E)	Las gotas no se rompen, superan el obstáculo.

punto de vista de la limpieza efectiva de la cámara (sin entrar en discusión sobre las prestaciones de los diversos sub sistemas: separador líquido-aire, cambiador de calor, etc.), los rasgos más significativos que definen el comportamiento del sistema de limpieza son los siguientes:

1º) El modo de centrifugación de masas líquidas es en ge neral adecuado para la misión que debe realizar, aun que el sistema no garantiza la extracción de todo el líquido flotante en el interior de la cámara (recuér dese que podrían quedar gotas en las proximidades del eje de la cámara, o bien cerca de los salidas de los chorros de aire donde existen zonas de recirculación del fluido).

2º) La capacidad de los chorros de aire para arrastrar gotas de líquido adheridas a las paredes decrece rá pidamente con la distancia (véanse las Figs. 18, 19, 21 y 22) y este efecto es aún más acusado en las pa redes perpendiculares a los chorros. Es de esperar que el sistema de barrido permita extraer una gran parte del líquido del interior de la cámara, pero es probable que una parte no despreciable del mismo per manezca, a pesar de todo, adosado a las paredes, prin cipalmente en los rincones de la cámara de ensayos (zonas de remanso).

3º) El aspecto más alarmante, dado que los experimentos en el FPM se realizarán con Dimetil-Silicona (DMS), es la contaminación de las superficies (cada gota de DMS deja tras de sí al desplazarse una estela que no

es barrida por el chorro). Algunas de las paredes de la cámara de ensayos del FPM son ventanas a través de las cuales se filmará la evolución de los experimentos y estas superficies quedarán manchadas de Dimetil-Silicona, con la consiguiente no uniformidad en las propiedades ópticas que esto significa. La limpieza de las paredes, al menos de las ventanas de observación, deberá hacerse manualmente con el consiguiente peligro de dañar el recubrimiento hidrófobo de utilizarse alguno en el FPM (respecto al recubrimiento, los ensayos realizados no muestran una clara ventaja en favor de pintar la superficie con FC-721: las gotas mojan menos y son barridas más rápidamente, pero queda una estela al igual que sobre la superficie no pintada).

En resumen, el sistema de limpieza permite centrifugar y extraer de la cámara casi la totalidad del líquido, pero no garantiza el pleno cumplimiento de las normas de seguridad espacial al respecto ya que es posible que una parte no insignificante del líquido permanezca en el interior (aún en forma de gotas flotantes). El sistema, además, no evita la intervención de al menos un operador en el proceso de limpieza.

Queda fuera del objetivo de los ensayos realizados establecer si otros sistemas de limpieza -distintos al descrito en este capítulo- podrían ofrecer mejores prestaciones, pero quizás quepa preguntarse, a la vista de los resultados obtenidos, si se debería incorporar o no en futuros FPM un

sistema de limpieza semejante al considerado, habida cuenta de la penalización que supone sobre la masa total del Módulo (en el proyecto actual la masa del sistema de limpieza es del orden del 20% de la masa total del FPM).

#### REFERENCIAS

1. Alessio, C. y otros, "Fluid Physics Module", ESA Contract No. 3122/77/F/HGE (SC), Final Report (77 - Rvo 325), Dec. 1977.
2. Ceronetti, G., & Rovera, G., "The Fluid Physics Module. A Contribution to Material Sciences and Physics in Space", en "Material Sciences in Space", ESA SP-142, June 1979, pp. 137-147.
3. Batchelor, G.K., "An Introduction to Fluid Dynamics", Cambridge University Press, London, 1967, pp. 594 y 597.
4. Rajaratnam, N., "Turbulent Jets", Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, 1976, Chap. 10.

6. EXPERIMENTO PATRON PARA ESTUDIOS DE VISUALIZACION

### 5. EXPERIMENTO PATRON PARA ESTUDIOS DE VISUALIZACION

#### 6.1. NECESIDAD DE LOS ENSAYOS

La parte más importante de la información que se obtendrá en la experimentación espacial en el FPM estará contenida en las fotografías obtenidas durante el desarrollo de los experimentos.

De dichas fotografías se pretende extraer información suficiente para determinar el campo de velocidades existente en cada instante.

Las imágenes contenidas en dichas fotografías serán las producidas por el sistema de visualización [1], que se muestra en la Fig. 1; el sistema de iluminación crea un plano meridiano iluminado en el seno del fluido de manera que las

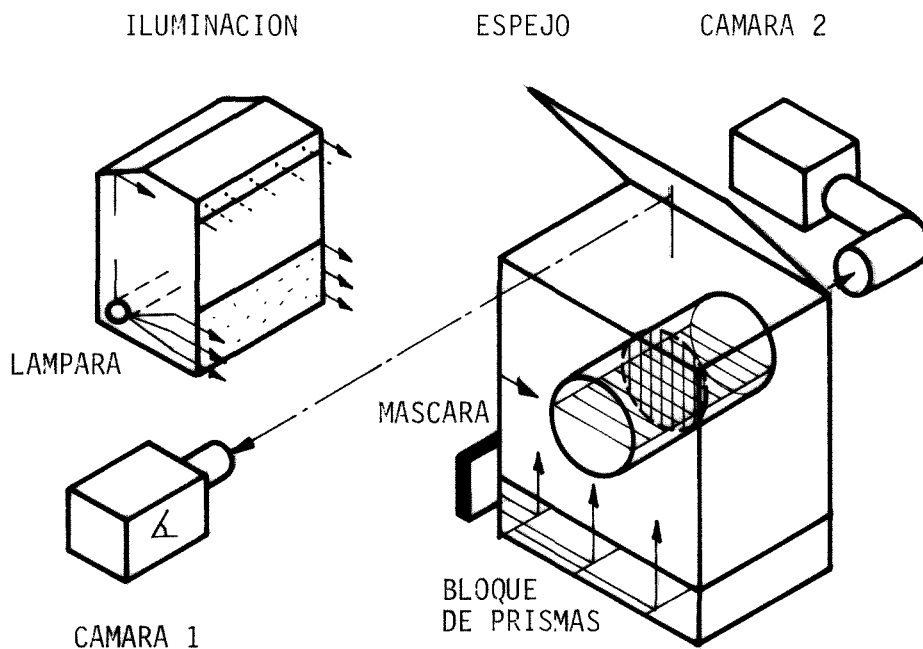


Fig. 1. Esquema simplificado del sistema de visualización.

partículas (trazadores sólidos) previamente añadidas al líquido, que están situadas en dicho plano, y sólo ellas, estarán intensamente iluminadas, pudiendo ser fotografiadas por la cámara de filmación gracias a la luz reflejada por las mismas.

Los puntos luminosos generados en el plano meridiano no originan en las fotografías, dependiendo del tiempo de exposición con que se tomen las imágenes, unas líneas luminosas que representan las trayectorias de partículas que pasen por el plano iluminado.

El cálculo del campo de velocidades será posible gracias a dichas líneas, que permitirán deducir tanto el módulo como la dirección del vector velocidad (proyectado en dicho plano).

De la acertada elección del trazador depende la posibilidad de la posterior interpretación de las fotografías y la precisión del cálculo del campo de velocidades.

La elección del tipo de trazador ha sido ya hecha anteriormente en función de criterios de comparación con las posibilidades existentes, y exige ahora su verificación y la determinación de ciertos parámetros de decisiva importancia como son el tamaño óptimo del trazador a emplear y la concentración en que debe utilizarse. Del primero depende la cantidad de luz que refleja el trazador y estará relacionado por tanto con el tiempo de exposición que se emplee para la toma de fotografías. Del segundo depende la cantidad de información que pueda obtenerse sobre el campo de velocidades. Una concentración pequeña de trazador generaría una insuficiente

cantidad de información, mientras que una concentración excesiva crearía problemas a la hora de interpretar las imágenes. Así pues, el problema planteado crea la necesidad del empleo de un aparato experimental que reproduzca movimientos similares a los esperados que sean perfectamente reproducibles y predecibles, para la obtención de fotografías que sirvan de comparación, siendo las únicas variables del experimento la concentración del trazador y su tamaño.

Después de muchos ensayos, el experimento estándar elegido para la comparación de fotografías ha sido la inyección de un chorro axial laminar (bajo número de Reynolds) en el seno del mismo fluido (chorro sumergido) contenido en un recipiente cilíndrico, que reproduce la forma de la zona flotante, dado que, a efectos del sistema de visualización, lo importante es la forma cilíndrica que la interfase adoptará en la mayoría de los experimentos en el Spacelab.

La elección del chorro laminar es debido a que éste es estable, lo que garantiza su reproductividad, siendo conocido el campo de velocidades en la mayor parte del campo fluido [2].

## 6.2. APARATO EXPERIMENTAL

Los criterios empleados para el diseño del aparato para verificación de los trazadores han sido los siguientes:

- Similitud del sistema de visualización al del F.P.M., tanto en el de iluminación como en el de captación de imágenes (tamaño del plano iluminado, intensidad de iluminación, tiempos de exposición).

- Movimiento fluido similar al esperado en la inyección en la zona flotante, con el mismo líquido (Dimetil Silicona) y rango de velocidades.

- Reproducibilidad del experimento. Dado que el chorro laminar generado es estable, no aparecen inestabilidades que darían lugar a la aparición de movimientos turbulentos sobre los que no habría ningún control.

El aparato que se ha construido de acuerdo con los criterios anteriores se muestra en la Fig. 2, y consta de un sistema de iluminación que crea el plano meridiano iluminado, de un sistema de captación de imágenes (cámara fotográfica), de un sistema de inyección y de una cámara de ensayo (cilindro donde está situado el fluido en el que tiene lugar la inyección). Las dimensiones del mismo pueden encontrarse en la Fig. 3.

El sistema de iluminación está compuesto de un proyector y de un diafragma. El primero, de 100 W. de potencia, proyecta la imagen de una rendija de luz dentro de la cámara de ensayo enfocada en el plano que contiene el orificio de inyección, quedando de esta forma iluminado el plano meridiano, siendo las dimensiones de la zona iluminada 90 mm × 52 mm de diámetro.

La ranura situada entre el proyector y la cámara de ensayos se encarga de evitar que reflexiones inconvenientes entren en el campo del objeto.

El sistema de captación de imágenes está formado por una cámara fotográfica de 35 mm dispuesta a una distancia del objeto análoga a la existente en el FPM entre éste

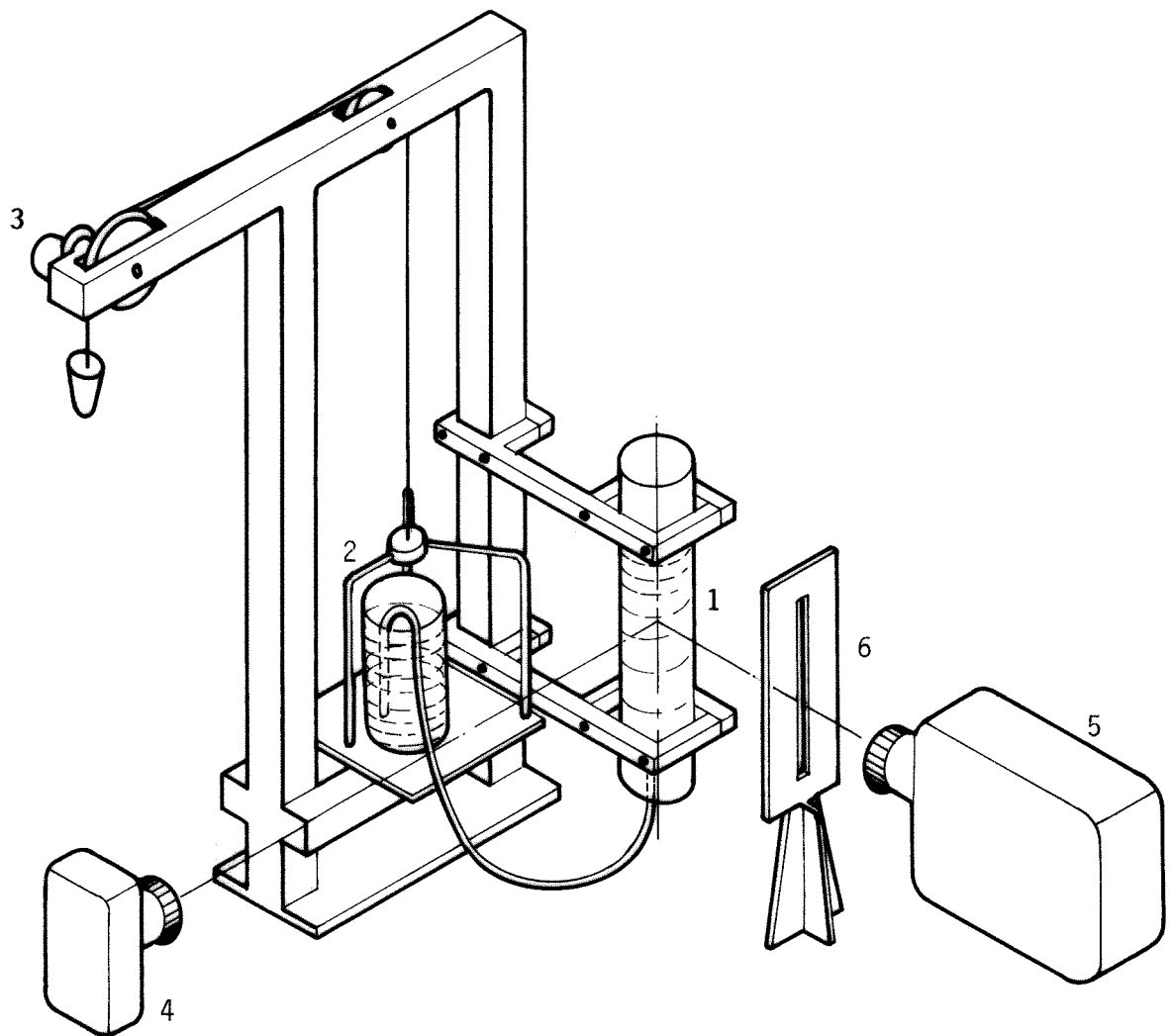


Fig. 2. Esquema del aparato. 1: Cámara de ensayo; 2: depósito de líquido; 3: motor elevador; 4: cámara fotográfica; 5: proyector; 6: diafragma.

y la cámara de cine (Fig. 3).

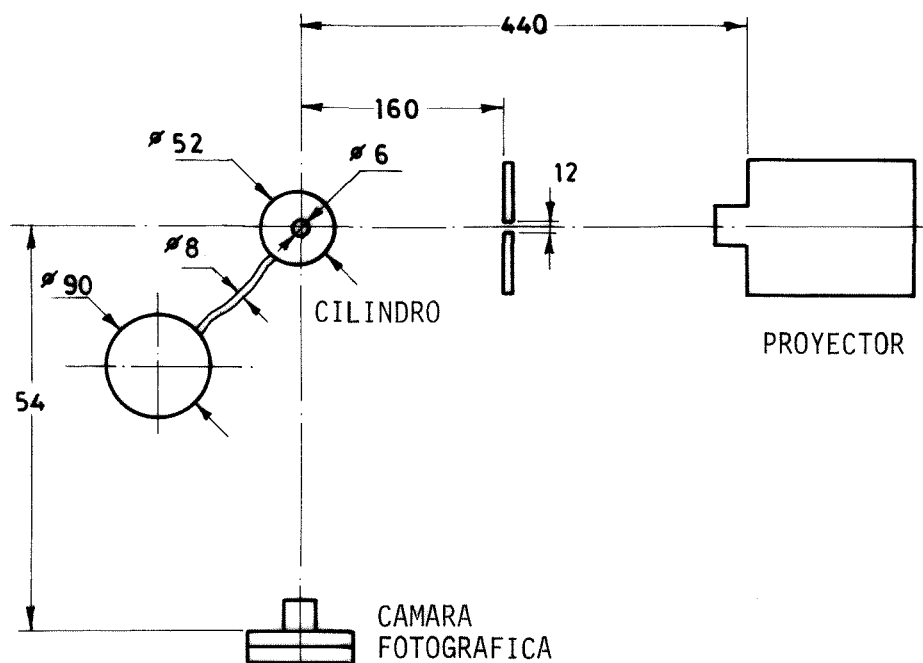


Fig. 3. Características geométricas del aparato. Cotas en milímetros.

El sistema de inyección está compuesto de un depósito móvil (de altura regulable) que, por la acción de la gravedad, alimenta a través de un tubo flexible al conducto de inyección que desemboca en la parte inferior de la cámara de ensayo. El depósito va provisto de un agitador en su parte inferior que se encarga de homogeneizar la mezcla de trazadores y líquido. El movimiento de elevación del depósito se consigue gracias a la acción de un motor a través de un juego de poleas situado en la parte superior del soporte del aparato. Para facilitar la acción del motor el peso de las partes móviles (depósito y agitador) está compensado por medio de un contrapeso.

La cámara de ensayo es un cilindro de vidrio sujeto al soporte por sus partes superior e inferior, siendo en esta última donde va acoplado el conducto de inyección. Inicialmente contiene una cierta cantidad de líquido en cuyo seno descarga el chorro creado por la diferencia de niveles entre el líquido del depósito y el de la cámara de ensayo. Dentro de esta cámara es donde el sistema de iluminación crea un plano meridiano iluminado. Próxima a dicha cámara de ensayo se ha dispuesto una regla milimetrada que permite evaluar de una manera directa la escala de la fotografía, así como determinar las posibles distorsiones del sistema óptico.

Con el dispositivo así construido, pueden obtenerse, en función de la diferencia de alturas, velocidades medias de inyección del orden de .1m/s. Dicha diferencia de alturas depende del tiempo transcurrido desde el arranque del motor y de la velocidad ascensional del depósito, factores ambos que pueden variarse para controlar el rango de velocidades.

La gran accesibilidad que presenta la configuración elegida permite acomodar la cantidad conveniente de líquido, y variar la concentración de trazadores de la manera más simple posible: añadiendo unas gotas de la preparación valorada. Sin embargo, desde el primer momento se advirtió la necesidad de poner gases protectoras en la boca del depósito y de la columna de líquido, para evitar la entrada de partículas de polvo que, con el tiempo, provocaban una opalescencia que deterioraba el contraste entre los trazadores brillantes y el fondo oscuro del líquido transparente.

### 6.3. ESTUDIO TEORICO

Con objeto de ayudar en el diseño del aparato y en la comparación posterior de los resultados experimentales, se ha llevado a cabo un análisis teórico de la configuración elegida, cuyos parámetros relevantes se representan esquemáticamente en la Fig. 4, que sirve además para introducir la nomenclatura a utilizar.

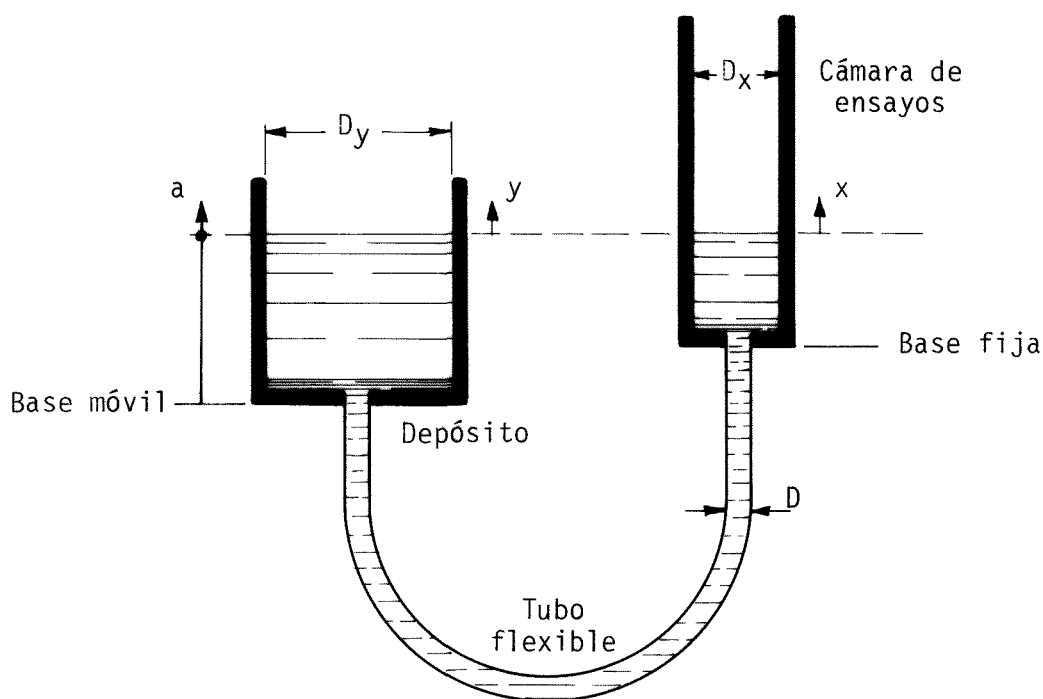


Fig. 4. Diagrama esquemático de la instalación en la configuración inicial.

Los datos del problema son los diámetros del depósito, el cilindro y el tubo,  $D_y$ ,  $D_x$  y  $D$ , respectivamente, y la ley de ascenso del depósito,  $a(t)$ , que va a ser lineal, hasta una altura máxima  $a_1$  impuesta por las dimensiones máximas del aparato, tal como se representa en la Fig. 5.

Para el análisis del movimiento global tomaremos como incógnitas las alturas de las superficies libres del de

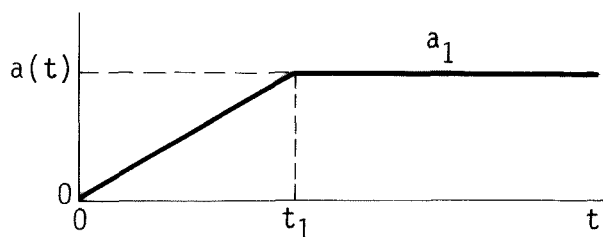


Fig. 5. Velocidad impuesta al depósito.

pósito y el cilindro,  $y(t)$  y  $x(t)$ , y la velocidad media en el tubo de inyección  $V(t)$ . Para resolver el problema es necesario conocer la pérdida de presión desde el depósito al cilindro, que depende de varios efectos: entrada en el conducto, fricción en las paredes del tubo, y descarga en el cilindro. Como hipótesis fundamental para este estudio, se supondrá que existe en todo momento una relación:

$$V = k(y-x) \quad , \quad (1)$$

siendo  $k$ =constante, cuya aplicabilidad deberá ser determinada en la experimentación. Esta hipótesis está basada en suponer que el movimiento en el tubo va a ser laminar (se verá que el número de Reynolds es de unos 50) y que el tubo es recto y suficientemente largo como para considerar únicamente la pérdida de presión en él, que vendrá dada por la fórmula de Poiseuille

$$\Delta p = \frac{64}{Re} \frac{L}{D} \frac{1}{2} \rho V^2 \quad . \quad (2)$$

La ecuación de continuidad nos proporciona las relaciones de velocidades (en función de los diámetros):

$$(\dot{a}-\dot{y})D_y^2 = \dot{x} D_x^2 = V D^2 \quad (3)$$

con las condiciones iniciales

$$a(0) = x(0) = y(0) = V(0) = 0 \quad . \quad (4)$$

Eliminando  $V$  e  $y$  con las dos ecuaciones en (4) y sustituyendo en (1) se obtiene la ecuación diferencial:

$$\dot{x} + \frac{x}{T} = \frac{a(t)}{T[1+(D_x/D)^2]} \quad (5)$$

con la condición inicial

$$x(0) = 0 \quad , \quad (6)$$

donde se ha sustituido  $k$  por  $T$ , estando relacionados por:

$$T = \frac{(D_x/D)^2}{k[1-(D_x/D_y)^2]} \quad . \quad (7)$$

La solución de la homogénea,  $\dot{x} + \frac{x}{T} = 0$ , es

$$x = A e^{-t/T} \quad , \quad (8)$$

aunque para especificar la solución particular es necesario dividir en dos tramos el intervalo de variación de  $t$ , obteniéndose los resultados que figuran en la Tabla 1, donde se han añadido los correspondientes valores para la  $y(t)$  y la  $V(t)$ ; estas funciones tienen la forma representada en la Fig. 6.

#### 6.4. VERIFICACION

Una vez puesta a punto la instalación se procedió a verificar su comportamiento real. En principio se pensó que se alcanzaría la velocidad estacionaria al final del período de ascenso del depósito, pero las mediciones mostraron que no se llegaba mas que a un 75% de su valor máximo, lo

Tabla 1

Fórmulas que dan el movimiento de las superficies libres del cilindro y el depósito,  $x$  e  $y$ , y de la velocidad media de inyección,  $V$ .

$0 \leq t < t_1$	$t_1 \leq t < \infty$
$a = \dot{a} t$	$a = a_1$
$x = \frac{\dot{a}}{b} [t - T(1 - e^{-t/T})]$	$x = \frac{a_1}{b} + (x_1 - \frac{a_1}{b}) e^{-(t-t_1)/T}$
$y = a - \frac{\dot{a}}{b} (b-1) [t - T(1 - e^{-t/T})]$	$y = a_1 - \frac{a_1}{b} (b-1) + (x_1 - \frac{a_1}{b}) (b-1) e^{-(t-t_1)/T}$
$v = \frac{\dot{a}c}{b} (1 - e^{-t/T})$	$v = \frac{a_0 - bx_1}{Tb} c e^{-(t-t_1)/T}$

siendo  $b = 1 + (D_x/D_y)^2$ ;  $c = (D_x/D)^2$ .

Los valores numéricos del ensayo son:  $D = 6$  mm.;  $D_x = 52$  mm.;  $D_y = 90$  mm  
 $\dot{a} = 4$  mm/seg.;  $a_1 = 155$  mm.;  $T = 38.6$  seg. (determinado en el ensayo).

La representación gráfica se encuentra en la Fig. 6.

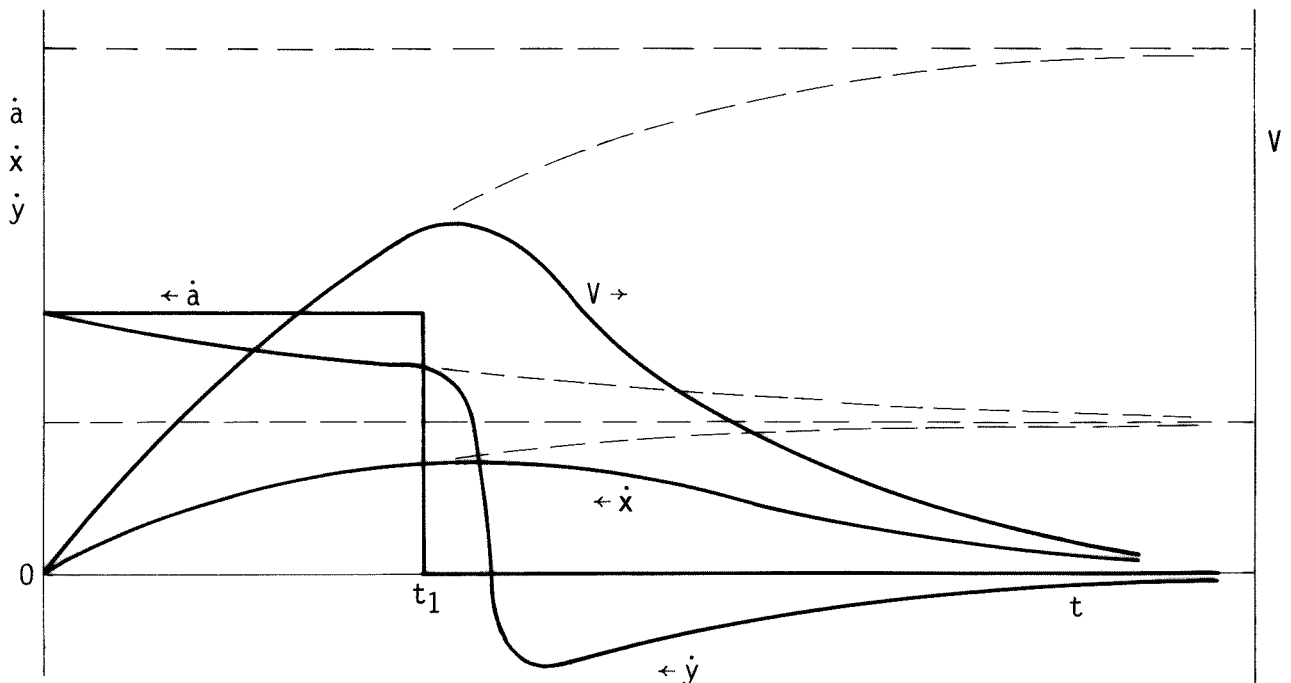


Fig. 6. Variación de las velocidades del depósito,  $\dot{a}$ ; de su superficie libre,  $\dot{y}$ ; de la velocidad media en el conducto de inyección,  $V$ , y de la velocidad de ascenso de la superficie libre en el cilindro,  $\dot{x}$ , en función del tiempo.

cual se atribuye a una infravaloración del efecto de la curvatura del tubo flexible que conecta el depósito al cilindro en el coeficiente de pérdida de presión.

De todos modos, lo importante era disponer de las curvas reales de funcionamiento, las cuales se obtuvieron con gran precisión y se muestran en la Fig. 7.

Como se mencionó en el análisis teórico, la constante  $k$  de la fórmula (1) se evalúa a partir de los datos experimentales. Para ello se ha elegido en la Fig. 7 un punto, el correspondiente a

$$\left. \begin{aligned} a &= 143 \text{ mm} \\ t &= 35 \text{ seg} \\ y &= 132 \text{ mm} \\ x &= 36 \text{ mm} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

y con la ayuda de la ecuación

$$x = \frac{\dot{a}}{b} [t - T(1 - e^{-t/T})] \quad , \quad (10)$$

con  $x = 36 \text{ mm}$ ,  $\dot{a} = 4 \text{ mm/seg}$  y  $t = 35 \text{ seg}$ , se ha calculado  $T$ , que ha resultado ser:

$$T = 38.6 \text{ seg} \quad . \quad (11)$$

Este es el tiempo característico del período no estacionario inicial, que ha resultado coincidir con el tiempo de ascenso del depósito  $t_1 = 38 \text{ seg}$  (suponíase que resultaría algo menor).

El valor máximo de la velocidad media es

$$V_{\max} = 145 \text{ mm/seg} \quad , \quad (12)$$

lo que representa un gasto  $Q = 4 \text{ cm}^3/\text{seg}$ , que corresponde a un número de Reynolds de

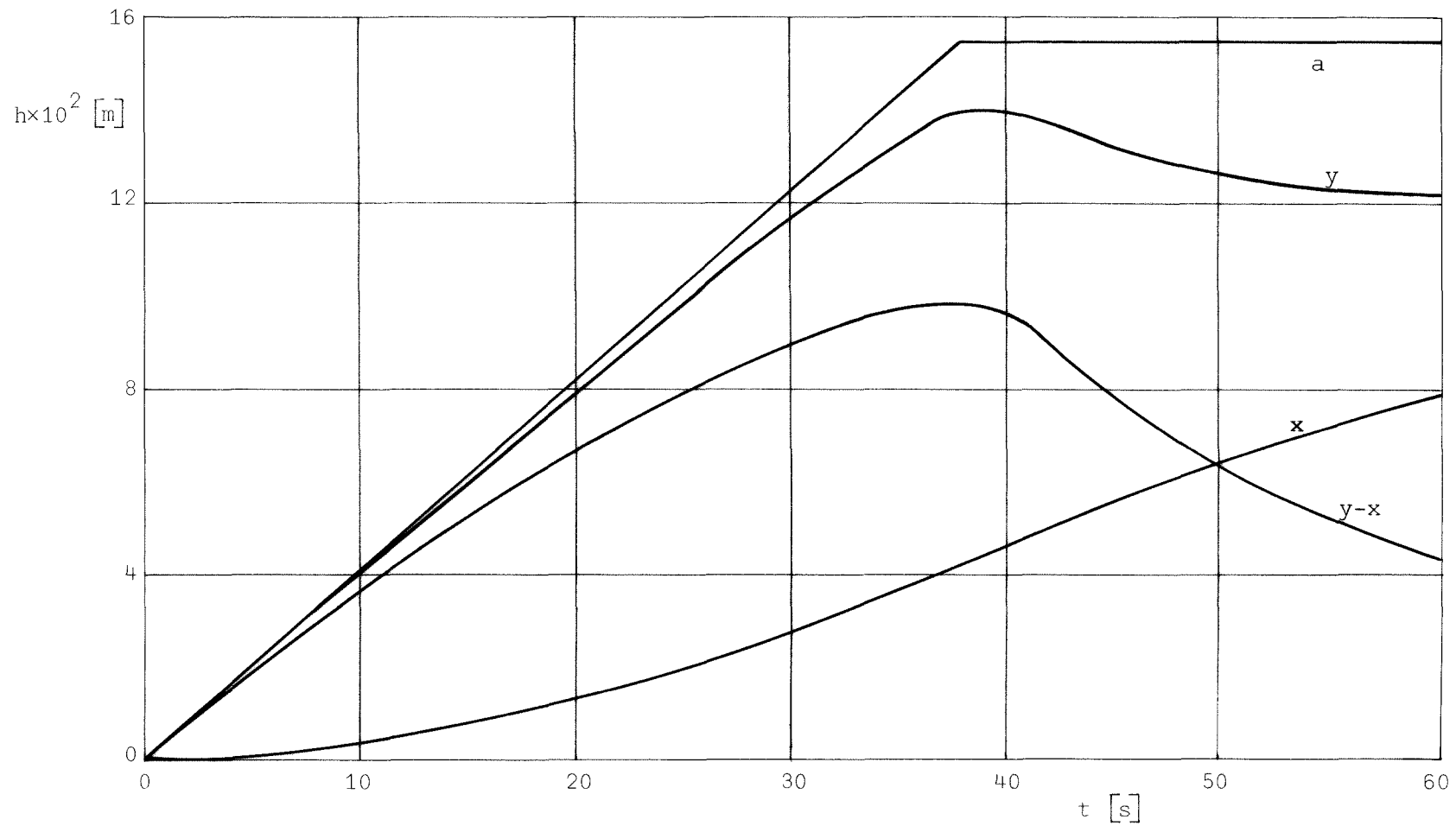


Fig. 7. Alturas  $h$  alcanzadas en función del tiempo: depósito,  $a$ ; nivel en el depósito,  $y$ ; nivel en el cilindro,  $x$ ; diferencia de niveles,  $y-x$ .

$$Re = \frac{VD}{\nu} = 43 \quad , \quad (13)$$

que corresponde a movimiento laminar en un chorro sumergido.

#### 6.5. PREPARACION DE LA MUESTRA

Para la obtención de las fotografías se emplea una mezcla del líquido de trabajo, Dimetil-Silicona (DMS), con una cierta cantidad de trazadores como elemento visualizador. En la experimentación espacial se utilizarán dos clases de Dimetil-Silicona: una de baja viscosidad (5 cs.) y otra de gran viscosidad (100 ó 1000 cs.). En los ensayos realizados en este Laboratorio se ha empleado DMS de 20 cs., que ha sido la de menor viscosidad que se ha podido obtener en el mercado nacional, disponiéndose también de DMS de 100 y 300 cs. para ensayos con líquidos de alta viscosidad. En los ensayos se ha empleado la de menor viscosidad para poder obtener las velocidades de inyección más convenientes.

En cuanto al trazador, se ha utilizado el tipo ECCOSPHERES FA-A fabricado por Emerson & Cuming, Inc.

Los trazadores de este tipo son pequeñas esferas huecas (.1 mm de diámetro) de material cerámico, cuyas principales características, proporcionadas por el fabricante, se muestran en la Tabla 2.

Los requisitos considerados en la elección son:

- Tamaño: lo bastante pequeño para que perturbe el movimiento del fluido lo menos posible, y lo bastante grande para que sea visible y tenga buena reflectividad.

- Pasividad: no reaccionar con el líquido y no absorberlo.

Tabla 2  
Características de los trazadores

Composición	Cerámica
Color	Tostado
Densidad aparente ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	400
Densidad verdadera ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	600
Factor de empaquetamiento	.620
Espesor medio de las paredes ( $\text{m.10}^6$ )	3.5
Temperatura de ablandamiento ( $^{\circ}\text{C}$ )	982
Conductividad térmica ( $\text{J.s}^{-1}.\text{m}^{-1}.\text{^{\circ}\text{C}}^{-1}$ )	.128
% de volumen deteriorado a la presión de $1.1 \times 10^7$ Pa	17.0
Distribución de tamaño de los trazadores	
Intervalo de tamaño ( $\text{m} \times 10^6$ )	% en peso
>175	5
149-175	11
125-149	19
100-125	24
62-100	35
44-62	4
<44	2

- Cohesión: pequeña o nula para evitar aglomeraciones.

- Flotabilidad: neutra, para que esté hidrostáticamente compensado con el líquido y permitir la correcta visualización del movimiento convectivo.

- Adherencia: pequeña o nula para que no se pegue a las paredes.

En este informe se estudian las características ópticas, estando actualmente en desarrollo los trabajos referentes a flotabilidad, cohesión y adherencia, dado que se requieren largos períodos de tiempo para que tengan lugar di

chos fenómenos.

La cantidad de luz que reflejan los trazadores es proporcional al cuadrado de su diámetro, por lo que se ha procedido a separar la muestra de trazador en fracciones según su tamaño, utilizando los tamices ASTM números 80, 100, 120, 140, 200 y 270, que permiten establecer unos intervalos de tamaño lo más parecido posible a los que emplea el fabricante. En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 3

Distribución de tamaño de los trazadores

Fracción número	Nº de tamiz ASTM	Intervalo de tamaño $m \times 10^6$	% en peso
1	80	>177	6.43
2	100	177-149	11.30
3	120	149-125	6.65
4	140	125-105	26.74
5	200	105-74	32.92
6	270	74-53	13.00
7	Resto	<53	2.96

Una vez separados los diferentes tamaños éstos pueden emplearse individualmente para los ensayos de visualización.

En una primera estimación pareció conveniente utilizar en los ensayos la fracción de mayor tamaño, para una mejor visualización, variando únicamente la concentración del mismo.

Otra de las características de los trazadores, de gran importancia para el análisis de su comportamiento, es

la forma. Para estimar en qué medida ésta es esférica se han observado muestras al microscopio (ver Fig. 8), comprobándose que todas las fracciones del trazador presentan una forma perfectamente esférica. La única excepción es la fracción número 7, la de menor tamaño (aquella que pasa por el tamiz 270) constituida por unas partículas esféricas y otras que son trozos de partículas mayores de aspecto irregular, lo que hará irregular su comportamiento como trazador, por lo que no parece indicado utilizarlo como tal.

En la Fig. 8 se muestran microfotografías (aproximadamente a 100 aumentos) de muestras de las diferentes fracciones del trazador. Las seis fotografías superiores corresponden a los tamaños mayores y las dos restantes pertenecen a trazadores de la fracción de menor tamaño, en la que se han distinguido dos partes bien diferenciadas variando el enfoque del microscopio: una, de partículas perfectamente esféricas, de diámetro comprendido entre 30 y 50 micras, y otra de partículas mucho más pequeñas y productos irregulares (trozos de pared procedentes de la rotura de esferas de tamaño superior).

La fracción de mayor tamaño (la número 1) ha sido empleada como trazador en la preparación utilizada en los ensayos.

El agitador situado en el fondo del depósito del líquido se encarga de garantizar que la mezcla que es inyectada en la cámara de ensayo sea perfectamente homogénea, contrarrestando la tendencia que tiene el trazador a depositarse en las paredes y subir a la superficie.

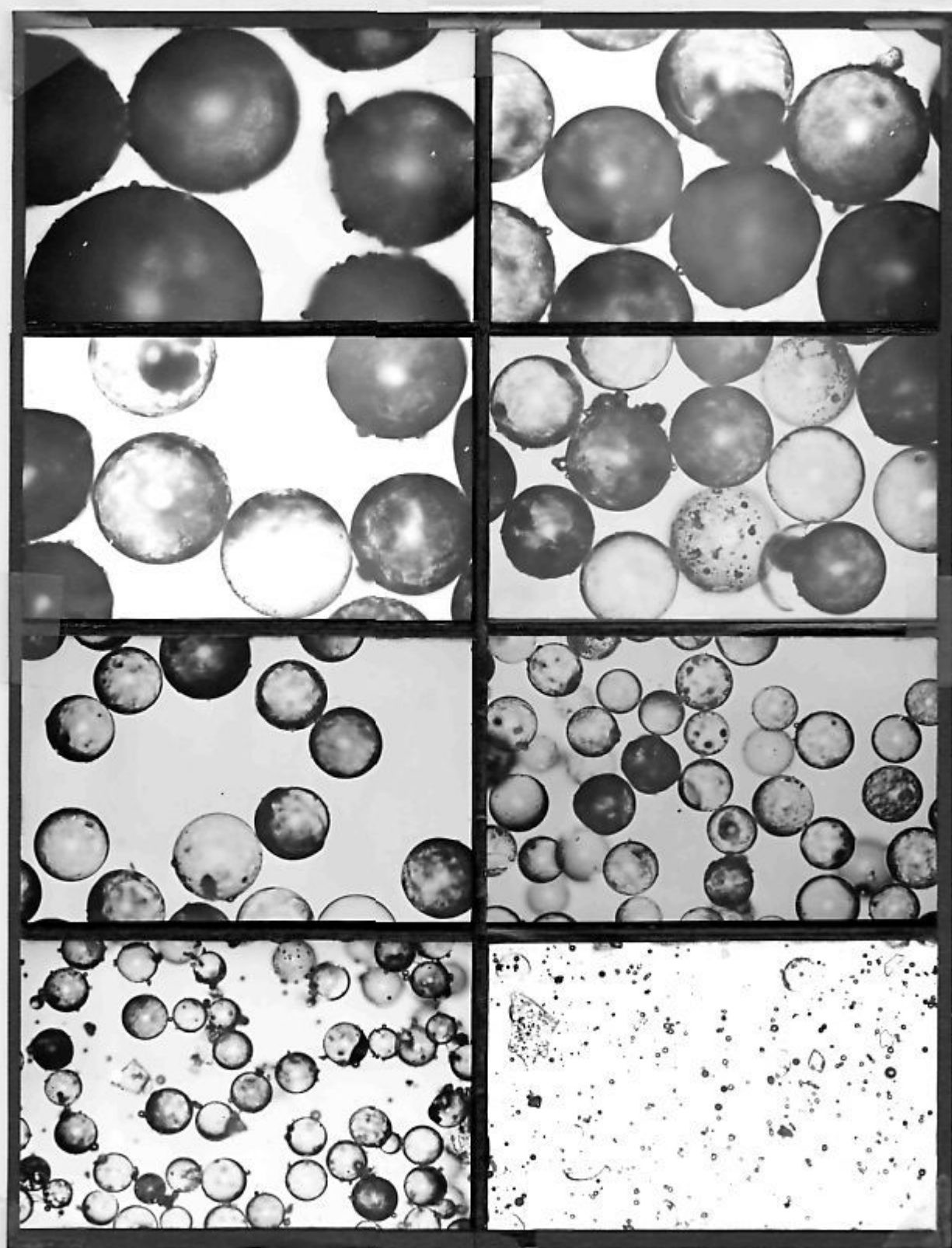


Fig. 8. Microfotografías ( $\times 100$  aproximadamente) de las diferentes fracciones del trazador.

Dadas las bajas concentraciones en las que debe utilizarse el trazador, para conseguir dichas concentraciones se preparó una mezcla patrón de 20 cm<sup>3</sup> de DMS a la que se añadieron 50 miligramos de trazador, la cual se utilizó como mezcla valorada para disolverla en líquido puro y conseguir concentraciones definidas de decenas de miligramos por litro.

#### 6.6. FOTOGRAFÍAS

Para la verificación de los trazadores se han tomado una gran cantidad de fotografías del movimiento del fluido en la cámara de ensayo, utilizando para ello mezclas de líquido y trazador de concentraciones comprendidas entre 10 y 200 mg/l.

En las Figs. 9a, 9b y 9c se muestran las fotografías obtenidas utilizando mezclas con baja, media y alta concentración de trazadores, respectivamente. La longitud de los segmentos que pueden apreciarse en las mismas viene determinado por la velocidad de las partículas y por el tiempo de exposición de las fotografías. Este último parámetro determina de una manera muy importante la cantidad y la calidad de la información contenida en las fotografías. Con un tiempo de exposición demasiado prolongado, dichos segmentos serían excesivamente largos, se mezclarían entre sí, y la confusión creada podría impedir su identificación. Por otro lado, si el tiempo de exposición fuese excesivamente corto, la longitud de los segmentos sería tan corta que no podría medirse con la necesaria precisión.

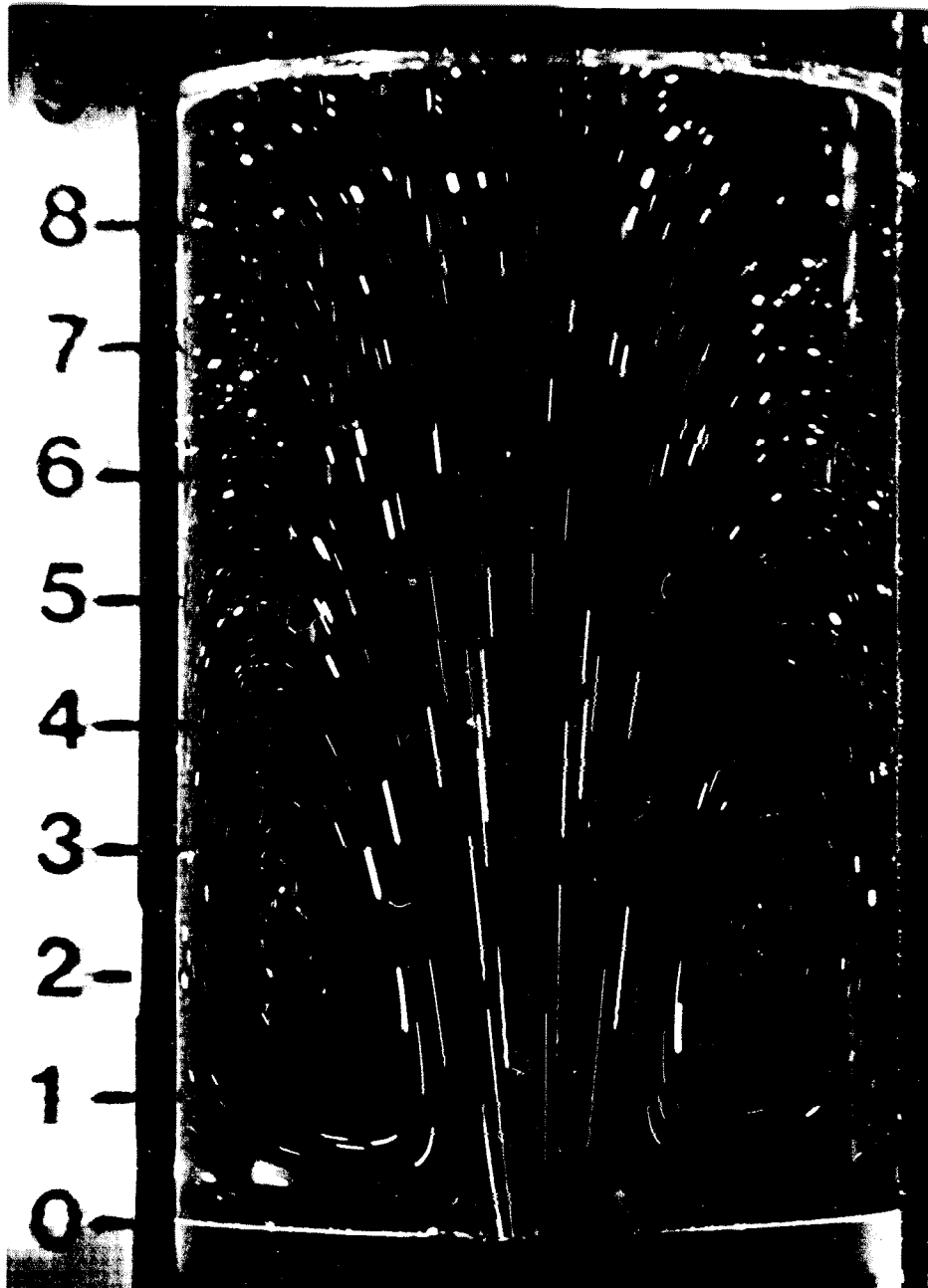


Fig. 9a. Fotografía del movimiento del líquido obtenida con una concentración del trazador de 40 mg/l. Apertura del diafragma: 2.4; tiempo de exposición: .25 s.

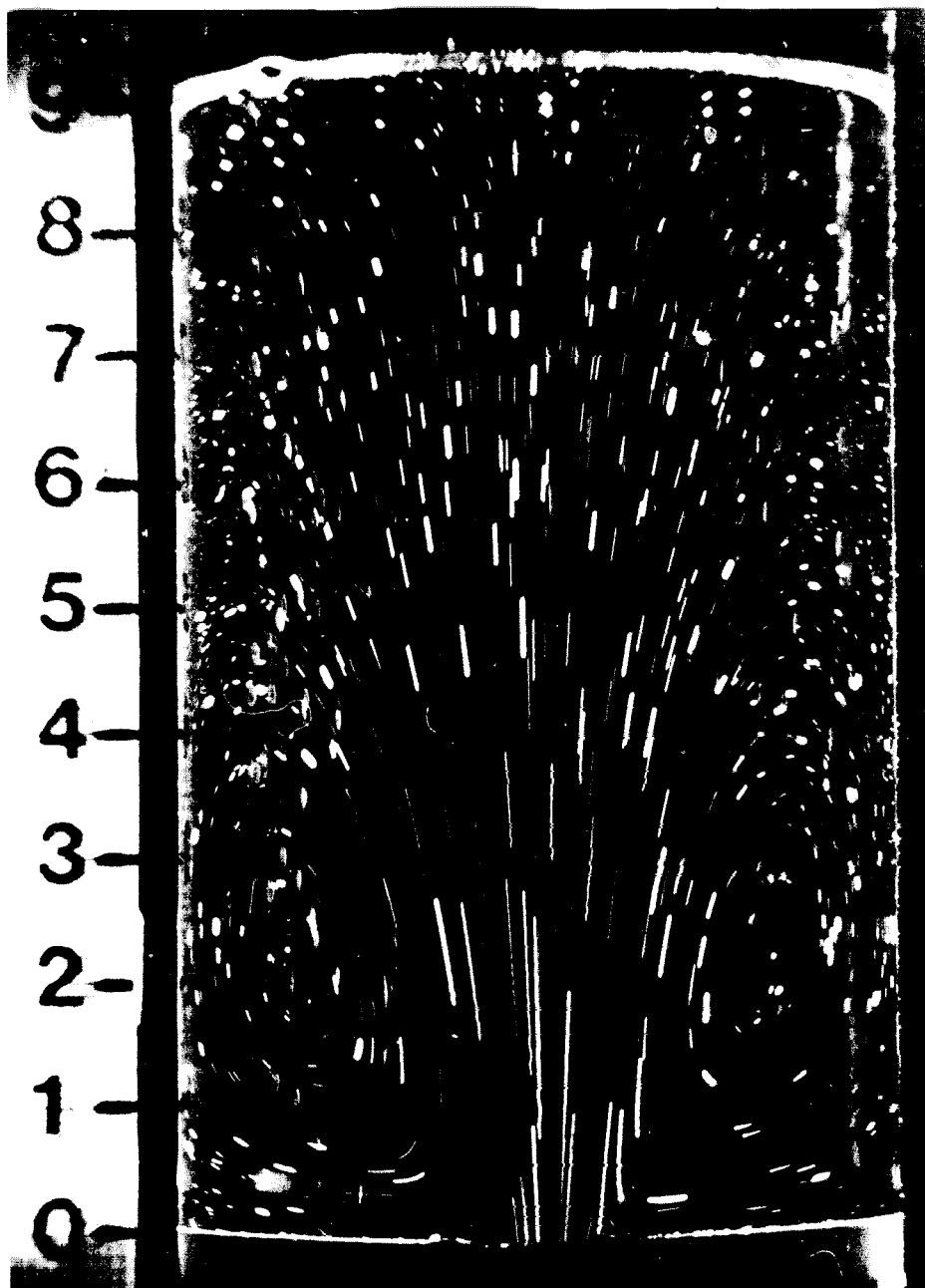


Fig. 9b. Fotografía del movimiento del líquido obtenida con una concentración del trazador de 100 mg/l. Apertura del diafragma: 2.4; tiempo de exposición: .25 s.

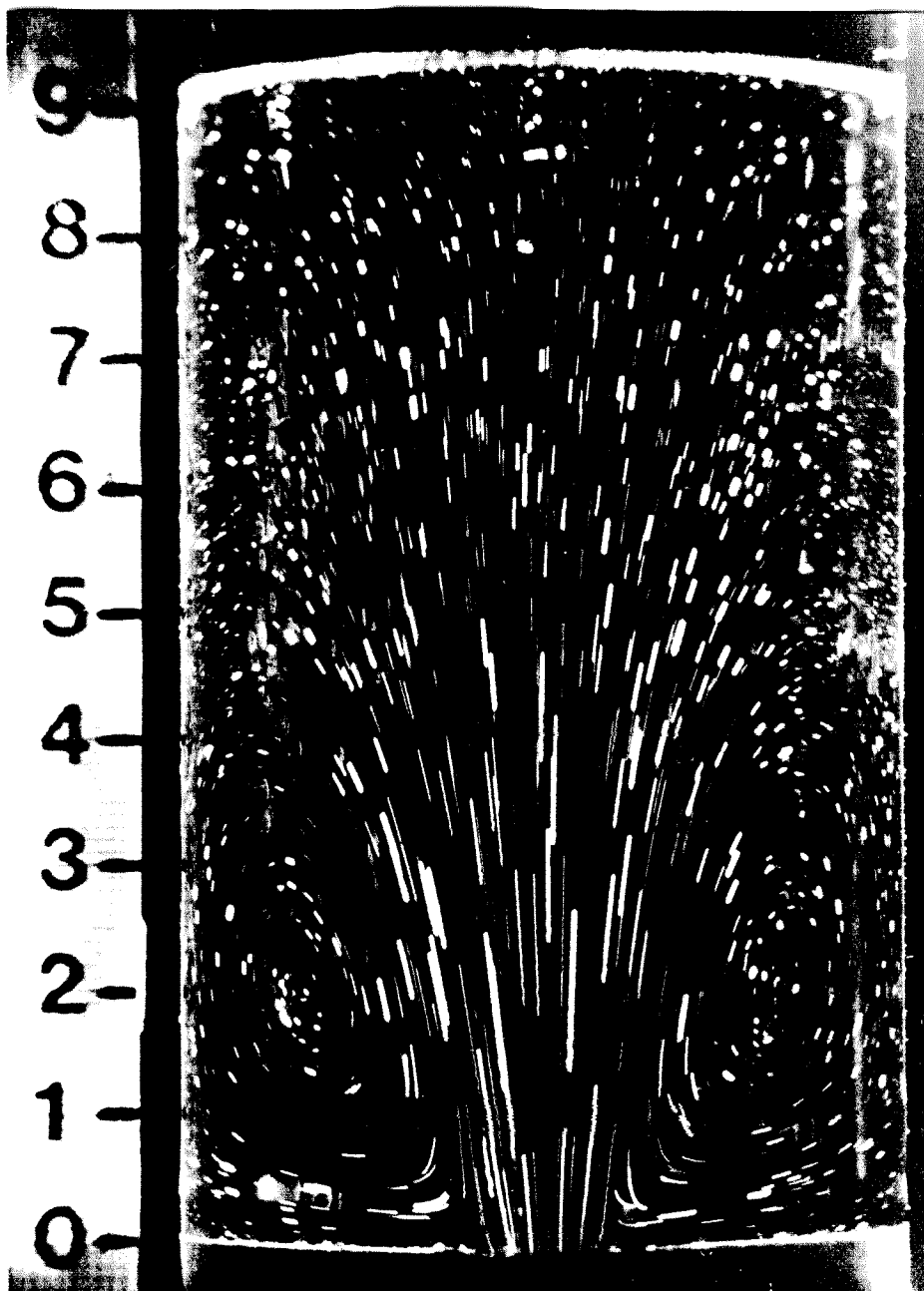


Fig. 9c. Fotografía del movimiento del líquido obtenida con una concentración del trazador de 200 mg/l. Apertura del diafragma: 2.4; tiempo de exposición: .25 s.

La velocidad máxima que pueda esperarse encontrar en el campo fluido puede estimarse si se hace la hipótesis de que el flujo a la salida del tubo de inyección es de tipo Poiseuille. En este caso, la velocidad máxima es dos veces la media. Dicha velocidad máxima, calculada con ayuda del modelo teórico expuesto, resulta ser de 290 mm/s. El perfil de velocidades del chorro tiende a uniformizarse muy rápidamente, de manera que dicha velocidad máxima no podrá encontrarse en el campo fluido considerado; por otra parte, hay que tener en cuenta que la velocidad máxima del chorro decrece rápidamente con la distancia al orificio de inyección. Teniendo en cuenta todo lo antedicho y después de varias pruebas realizadas, se ha elegido para la obtención de las fotografías un tiempo de exposición de .25 s, siendo la longitud máxima de los segmentos encontrados en ellas de 3 cm. La longitud de los segmentos permite hacer la hipótesis de que éstos son rectilíneos, lo que será de gran utilidad para cálculos posteriores.

Para determinar la concentración más adecuada, a utilizar para la obtención de fotografías de las que se pueda extraer la máxima cantidad de información, se ha efectuado el cálculo del campo de velocidades (componentes radial y axial del vector velocidad) existentes en el seno del fluido a cierta distancia del orificio de inyección, a partir de las fotografías obtenidas con diversas concentraciones de trazador.

El método utilizado ha sido calcular las proyecciones axial y radial del vector velocidad a partir de la longi

tud del segmento de trayectoria y el ángulo que forma con el eje de la cámara de ensayo, medido en las fotografías, y del tiempo de exposición. Hay que tener en cuenta que dicha longitud será:

$$l = \int_{t_0}^{t_0+T} v dt \quad , \quad (14)$$

donde  $v$  es el módulo de la velocidad de la partícula,  $t_0$  es el instante en que se abre el obturador y  $T$  el tiempo de exposición, aunque, en primera aproximación, puede considerarse que la velocidad de la partícula permanece constante durante ese pequeño intervalo de tiempo, de manera que

$$l = vT \quad ,$$

siendo  $v$  una velocidad media.

Debido a la forma cilíndrica de la interfase, las dimensiones aparentes no son las reales, sino que para obtener éstas es necesario hacer la corrección siguiente [3]:

$$r' - r = \frac{2(R' - R)}{D_x} = r' \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{(1-r'^2)(n^2-r'^2)+r'^2}} \right] \quad , \quad (15)$$

$$h' - h = \frac{2(H' - H)}{D_x} = \left[ 1 - \frac{r'^2}{\sqrt{(1-r'^2)(n^2-r'^2)+r'^2}} \right] \cdot \left[ \frac{h'}{m \sqrt{1-r'^2}} - \operatorname{tg} \operatorname{arc} \operatorname{sen} \frac{h'}{n \sqrt{h'^2+m^2(1-r'^2)}} \right] \quad , \quad (16)$$

donde  $r'$ ,  $h'$ ,  $r$  y  $h$  representan las coordenadas radial y axial aparentes y verdaderas de los puntos que se encuentran en el plano meridiano, respectivamente (adimensionalizadas con  $D_x/2$ ). El origen del sistema de coordenadas coincide con el

punto de intersección del eje óptico de la cámara con el plano meridiano.

A efectos de comparación, en la Fig. 10 se ha representado la velocidad axial,  $W$ , adimensionalizada con la velocidad máxima en la sección,  $W_{\text{máx}}$ , que poseen las partículas que en un instante dado están situadas en la sección del cilindro que dista 3 cm del orificio (cinco diámetros).

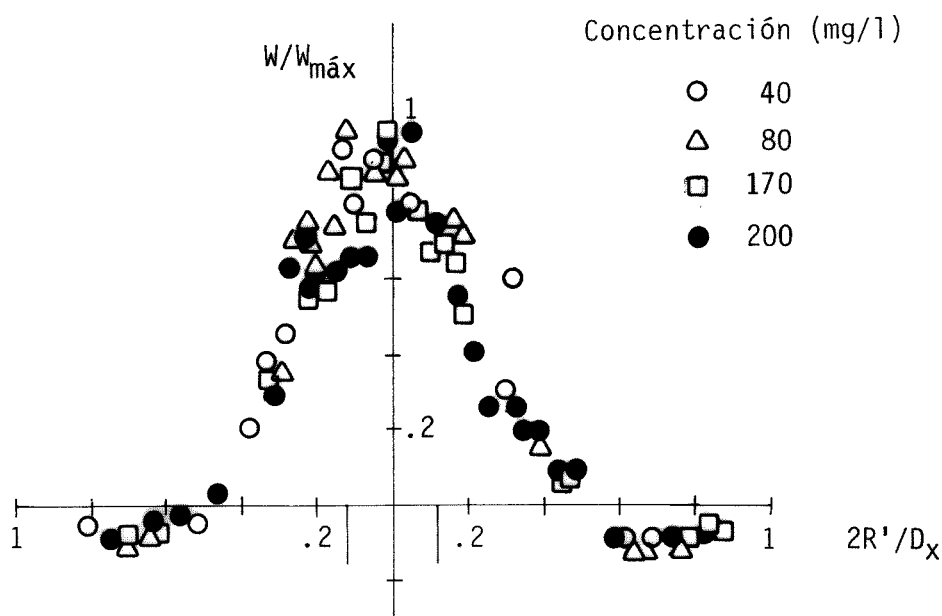


Fig. 10. Velocidad axial adimensionalizada con  $W_{\text{máx}}$ ,  $W/W_{\text{máx}}$ , en función de la posición radial adimensionalizada con el radio de la cámara de ensayo,  $2R'/D_x$ .

Aunque en las fotografías sea perfectamente visible todo el campo fluido, el efecto de lente creado por la forma cilíndrica de la interfase óptica hace que la zona central del plano meridiano se vea de mayor dimensión de la que realmente tiene (la interfase cilíndrica actúa como una lupa), mientras que la zona periférica lateral (aproximadamente un 15% del campo total) queda constreñida a una zona prácticamente indistinguible. Por esta razón en la Fig. 10 no es po-

sible que aparezcan datos de las velocidades de las partículas situadas en las franjas laterales del campo fluido. Esto representa un problema para la determinación del campo de velocidades en las proximidades de las capas límite, por lo que será necesario desarrollar algún método que no presente esta restricción (posicionar la cámara, en vez de a  $90^\circ$ , con el eje del sistema de iluminación a otro ángulo más adecuado, por ejemplo).

En el proceso de cálculo del campo de velocidades se han encontrado dificultades al medir la longitud de los segmentos, causadas por el entrelazamiento y superposición de trayectorias en la fotografía correspondiente a la máxima concentración empleada (200 mg/l), por lo que este parece ser el límite máximo de concentración para la utilización de la fracción del trazador de mayor tamaño.

Las dificultades encontradas en la obtención de una adecuada calidad en las fotografías provienen de dos puntos principales: el sistema de captación de imágenes y el sistema de iluminación. En lo referente al primero, el mecanismo de obturación de la máquina fotográfica introduce vibraciones que son las responsables de que en las imágenes de las trayectorias de los trazadores aparezca superpuesto al movimiento original un movimiento sinusoidal. La eliminación de este problema ha exigido el montaje de la cámara fotográfica en un soporte de gran rigidez y el uso de un obturador eléctrico, habiéndose utilizado la cámara Yashica FR, que va provista de dicho obturador.

Parece interesante resaltar que la superposición

de una oscilación a las trayectorias de las partículas podría emplearse como un método auxiliar para la determinación del campo de velocidades basado en la modulación que introduce (Fig. 11).



Fig. 11. Trayectorias onduladas que aparecían en los primeros ensayos, debido a la vibración que introducía el disparo de la cámara fotográfica.

El sistema de iluminación puede producir reflexiones indeseables que aparecen en las fotografías creando un ruido luminoso que destruye la información que pudiera existir en las zonas afectadas. También la luz ambiente produce este tipo de reflexiones, pero pueden eliminarse fácilmente

aislando convenientemente el aparato. En cambio las producidas por el sistema de iluminación presentan mayores dificultades para su eliminación.

En ausencia de un diafragma interpuesto entre la cámara de ensayo y el proyector, la forma cilíndrica de la interfase hace que se produzca una reflexión en ella (de la luz procedente del proyector) hacia la cámara fotográfica, creando una franja iluminada en el lado de la imagen más cercano al proyector, tal como se muestra en la Fig. 12. Además, en

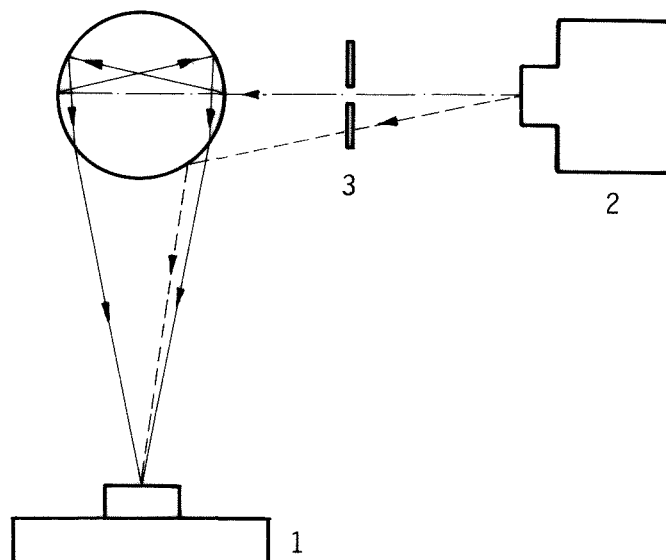


Fig. 12. Reflexiones originadas por el sistema de iluminación. 1: cámara fotográfica; 2: proyector; 3: diafragma. La línea discontinua representa un rayo eliminado por el diafragma.

la interfase iluminada por la rendija de luz (intersección del plano luminoso con la interfase cilíndrica) una fracción de esta luz se transmite y otra se refleja de una forma difusa (multidireccional); esta luz es captada por el objetivo de la máquina, ya que se refleja internamente en pun-

tos de la interfase posterior (que actúa como espejo). Estas reflexiones no pueden eliminarse, pero pueden reducirse al mínimo mediante el diafragma y eliminarse casi por completo de las imágenes utilizando un adecuado proceso de revelado contrastado.

#### 6.7. CONCLUSIONES

Se observa en la Fig. 10 que la dispersión de las medidas aumenta conforme crece la velocidad. Ello es debido a que el método empleado, que se basa en la hipótesis de que la velocidad permanece constante a lo largo del segmento de trayectoria observable e igual a la del punto de dicho segmento cuya ordenada es la de la sección considerada, es una mala aproximación en este caso. El método que se empleará para calcular, mediante ordenador, el campo de velocidades a partir de las coordenadas de los puntos de las trayectorias, no necesita hacer la hipótesis anterior sino que seguirá un proceso iterativo que permitirá obtener una mayor precisión en los cálculos. Dicho método empleará como primera hipótesis que la velocidad calculada corresponde, no a cualquier punto del segmento, sino únicamente a la del punto medio de dicho segmento. Con ayuda de la información así obtenida, se podrá hacer una primera estimación de la variación de la velocidad con sus argumentos,  $r$  y  $z$ . Utilizando esta primera estimación se podrá calcular en qué punto de cada segmento la velocidad es igual a la media calculada a partir de la longitud del segmento. Asignando ahora estas velocidades medias a los nuevos puntos, se tendrá una corrección al campo de velocidades pre

viamente calculado. Con ayuda de este campo de velocidades puede obtenerse una nueva estimación y obtener así una segunda corrección. Este proceso iterativo permitirá reducir el error de cálculo del campo de velocidades hasta que sea del mismo orden que el asociado al proceso experimental de digitalización.

El problema de no poder captar la información de las zonas próximas a la pared, requeriría una rápida y efectiva solución, debido a la importancia que tiene el conocimiento del movimiento fluido en dichas zonas. Una de las posibles soluciones podría ser el modificar la posición de la cámara fotográfica, actualmente situada a  $90^\circ$  respecto del eje del sistema de iluminación, situándola en una nueva posición a un ángulo diferente, que permitiese una mejor observación de, por lo menos, una de las zonas laterales.

El trazador utilizado para la verificación de la concentración idónea ha sido el de mayor tamaño. Una vez realizadas las microfotografías de los trazadores, puede apreciarse que existen dentro de dicha fracción tamaños muy variados, de donde se puede deducir que la imagen que presentan las trayectorias de partículas de tamaños muy diferentes, tendrían una anchura distinta debido a la diferencia entre la cantidad de luz reflejada. Estas diferencias que se observan realmente en las fotografías, así como la excesiva anchura de los trazos más gruesos, parecen aconsejar la utilización de la fracción de trazador de tamaño inmediatamente inferior, que presenta una mayor uniformidad.

Una de las posibles perturbaciones que pueden dete

riorar las propiedades de la mezcla líquido-trazador, para su uso como visualizador, es la presencia de polvo y otras partículas en el seno del líquido; dichas partículas reflejan luz, al igual que los trazadores, pero de una manera menos direccional, creando una iluminación difusa (ruido luminoso) que dificulta la identificación de las trayectorias de los trazadores. Para evitar la presencia de dichas partículas sería necesario, antes de la preparación de la mezcla, realizar el filtrado de la misma, así como una cuidadosa manipulación de la mezcla durante la experimentación; dicho filtrado puede presentar dificultades debido a la viscosidad de los aceites de silicona a emplear.

#### REFERENCIAS

1. LAMF, "Columnas líquidas en condiciones de ingravidez. Informe final 1978", CONIE Exp PDP 11/78, 1979.
2. Pai, S.I., "Fluid Dynamics of Jets", Van Nostrand, 1954.