

Estudio hidráulico en modelo reducido del tiempo de residencia del agua en su circulación a través de una vasija^(*)

Por J. P. MARTIN VIDE
J. DOLZ RIPOLLES
y L. BERGA CASAFONT

Departamento Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental (Sección de Hidráulica e Hidrología).
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
Universidad Politécnica de Cataluña.

Este artículo presenta una metodología para el estudio del tiempo de residencia de un fluido en su circulación a través de una vasija llena del mismo fluido. La investigación se realiza en modelo reducido utilizándose técnicas de trazadores. Asimismo se presentan y discuten los resultados obtenidos al aplicar esta técnica a un caso concreto.

La metodología presentada en este artículo fue puesta a punto y utilizada para estudiar el comportamiento hidráulico del foso de combustible gastado de la Central Nuclear Vandellós II.

1. INTRODUCCION

En la ingeniería civil, la ingeniería industrial y la ingeniería química se presentan diferentes problemas que tienen en común el estudio del movimiento de fluidos en el interior de recipientes o vasijas. En este trabajo nos interesaba conocer las características generales del flujo en el caso en el que se proyecta la introducción continua de un caudal en una vasija mediante un chorro y la extracción continua de un caudal igual por otro punto, de manera que el volumen total de fluido en la vasija permanece constante.

La Mecánica de Fluidos y la Hidráulica han formulado en términos generales las ecuaciones del movimiento de los fluidos. Sin embargo su integración mediante modelos numéricos, con la correcta simulación de las condiciones de contorno, presenta en numerosos casos grandes dificultades. Por otra parte, la Hidráulica ha desarrollado las técnicas de ensayo en modelo a escala (o reducido) y su correspondiente sustento teórico: la teoría de la semejanza. Los modelos así definidos, modelos físicos,

fuertemente potenciados por el actual desarrollo de la instrumentación, son la mejor forma de abordar un gran número de problemas todavía inasequibles a los modelos numéricos.

Una buena aproximación al estudio general de la circulación de un fluido refrigerante a través de una vasija se puede obtener mediante un modelo físico enfocado desde un punto de vista macro-hidrodinámico. En efecto, prescindiendo del estudio del régimen de temperaturas en el interior de la vasija, determinadas medidas macroscópicas pueden aportar una valiosa información para estudiar comparativamente la eficacia de dos sistemas distintos de refrigeración.

Si, por ejemplo, se pudiese determinar qué fracción del fluido introducido en el instante origen de tiempos ha salido ya de la vasija al cabo de cierto tiempo o bien que probabilidad tiene una partícula introducida en aquel instante de permanecer todavía en la vasija en cierto instante posterior, se estaría midiendo indirectamente con qué eficacia actúa el sistema de refrigeración.

El empleo de un modelo exclusivamente hidrodinámico en lugar de uno completo (término) está justificado siempre que el mecanismo físico predominante de la refrigeración sea la

(*)Se admiten comentarios sobre el presente artículo que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de enero de 1989.

mezcla del caudal frío y la masa caliente por acción del chorro, es decir por su cantidad de movimiento, por lo que se excluyen los movimientos convectivos, en los que el movimiento y el transporte de calor se deben a la diferencia de temperatura (y densidad).

En este artículo presentamos un método para el estudio en modelo reducido del tiempo de residencia del fluido en una vasija. Este método fue puesto a punto, y utilizado por el Departamento de Ingeniería Hidráulica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Cataluña con objeto de realizar un estudio del comportamiento hidráulico del foso de combustible gastado de la Central Nuclear Vandellós II.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y DE SU RESOLUCION

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriormente expuestas nos planteamos el análisis

del tiempo de residencia del agua en el interior de la vasija con dos posibles esquemas de entrada del agua, tal como se muestra en la figura 1.

Puede observarse que se consideran dos hipótesis en cuanto a los puntos de entrada del agua en la vasija (descarga 1 y descarga 2). Para cualquiera de estas dos hipótesis la salida del agua (aspiración) se realiza por el mismo punto. La diferencia principal entre ambas soluciones consiste en la posición relativa entre puntos de descarga y punto de aspiración. Esta diferencia favorece la posibilidad de una vía directa entre descarga y aspiración en la hipótesis 1, de manera que podría quedar disminuida la capacidad de refrigeración del caudal introducido en la vasija. El caudal circulante es de 0.30 metros cúbicos/segundo.

Para evaluar cuantitativamente y de manera macroscópica las dos propuestas de descarga, es decir sin entrar en los detalles del flujo en el interior de la vasija, se empleó un trazador iónico (cloruro sódico) inyectado de forma prác-

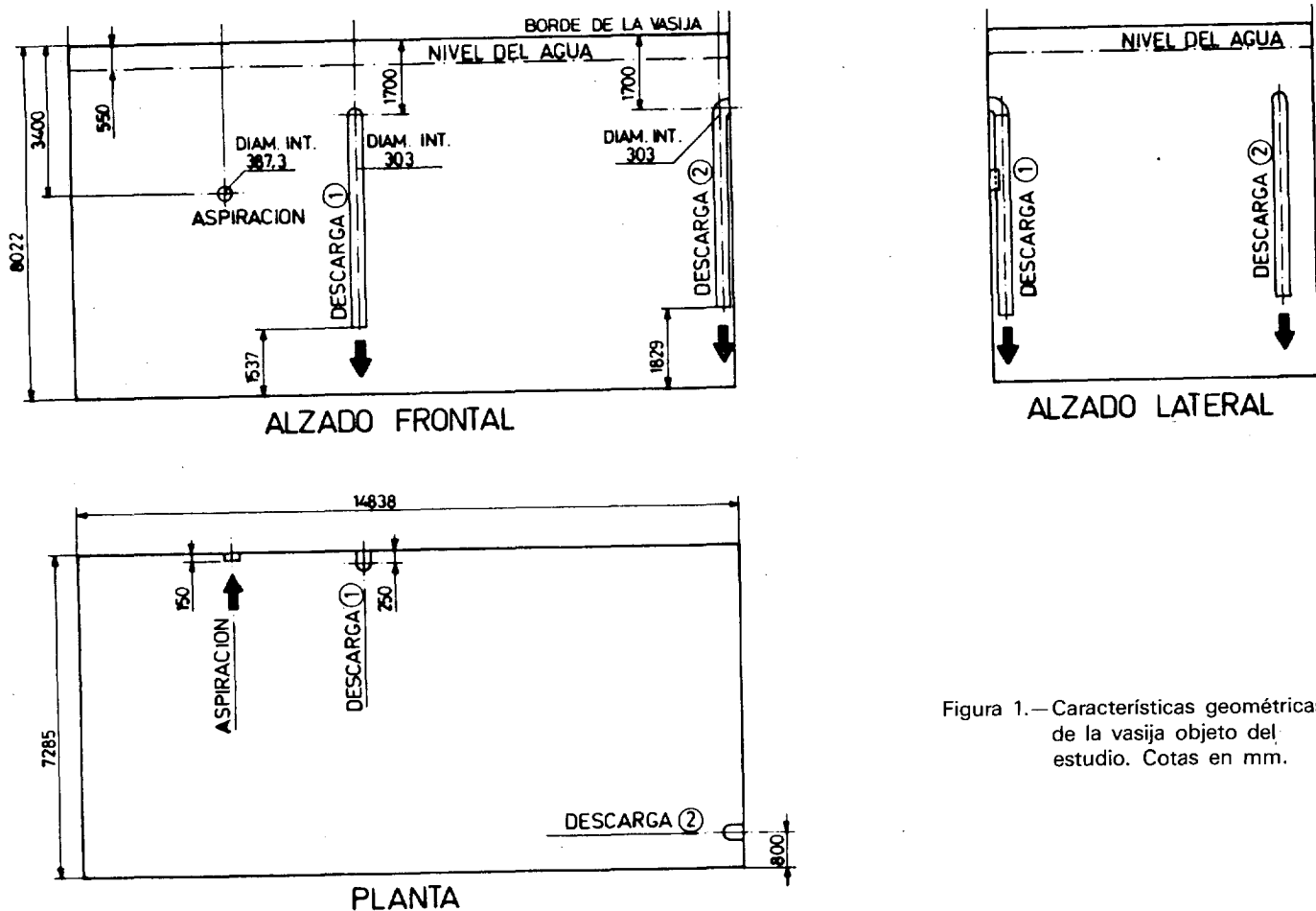


Figura 1.— Características geométricas de la vasija objeto del estudio. Cotas en mm.

ticamente instantánea en el caudal de entrada y registrándose su concentración del trazador en el agua, a causa de su sencillez y de la facilidad de conseguir registros gráficos continuos.

A partir de las curvas experimentales concentración/tiempo en la aspiración se obtiene, tal como se desarrolla en el apartado 5, la curva que nos proporciona el porcentaje de partículas con un tiempo de residencia inferior o igual a uno dado. Esta curva ha sido el instrumento básico para la cuantificación de los resultados y la comparación entre las dos alternativas propuestas.

3. SEMEJANZA Y ESCALA

Dada una semejanza geométrica entre un prototipo y su modelo, existen diversos criterios para el ensayo del modelo, que provienen de la teoría de la semejanza hidráulica. Cada ley de semejanza toma como criterio mantener igual, par a puntos homólogos de prototipo y modelo, la relación entre la fuerza predominante en el movimiento (fuerzas de peso, fuerzas viscosas, tensión superficial o fuerzas elásticas) y las fuerzas de inercia.

En el caso que nos ocupa (chorro turbulento de un fluido incompresible en el seno del mismo fluido) las fuerzas de presión y las fuerzas de inercia adquieren preponderancia frente al resto, ya que las fuerzas viscosas son despreciables frente a las de inercia siempre que el grado de turbulencia sea suficientemente elevado (Dat y Forradé, 1978).

La teoría de la semejanza afirma para este caso, que el caudal de ensayo del modelo se puede escoger libremente (es independiente de la escala geométrica). La semejanza con el prototipo será correcta si se asegura en el modelo un régimen turbulento suficientemente desarrollado (Becerril, 1960 y Osuna, 1978).

El modelo se construyó en metacrilato a la escala 1:13.8. Esta escala se eligió atendiendo a razones de operatividad (evitar tamaños excesivamente grandes y excesivamente pequeños), y constructivas (existencia de tuberías comerciales de metacrilato para las conducciones de descarga y aspiración). La instalación hidráu-

lica auxiliar se diseñó para un caudal máximo de 1 l/s.

Para tener la seguridad de que las condiciones de semejanza eran las correctas se comprobó experimentalmente que los resultados finales no variaban con el caudal de ensayo dentro de un amplio margen de caudales (Kobus, 1980). Este hecho muestra que el grado de turbulencia alcanzado en el modelo es lo bastante elevado para poder desprestigiar las fuerzas viscosas y confirma la naturaleza de la semejanza (Fox y Gex, 1956). En el modelo se operó con un caudal de ensayo de 0.43 l/s., valor incluido en el rango anterior y para el que adicionalmente se mantiene igual en puntos homólogos al cociente fuerzas de inercia/fuerzas de gravedad (número de Froude).

4. DESCRIPCION DE LA INSTALACION

La instalación puesta a punto para este estudio se muestra en la figura 2 y comprende, además del modelo (fig. 3):

- Depósito acumulador de 5 metros cúbicos alimentado por un suministro exterior de agua.

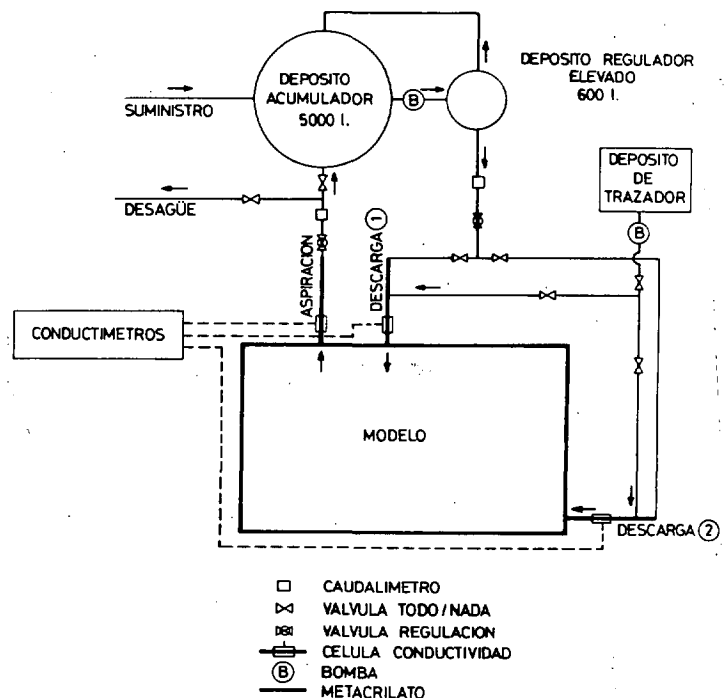


Figura 2.—Esquema de la instalación.

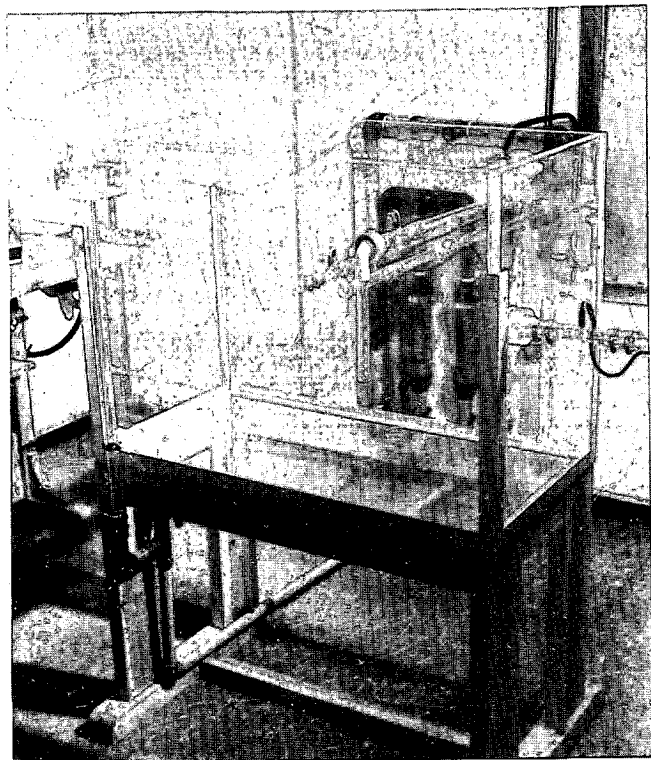


Figura 3.—Fotografía del modelo.

- Depósito regulador elevado, de 0.6 metros cúbicos, alimentado desde el depósito acumulador mediante una bomba. La misión de este depósito regulador es mantener una altura de carga de agua constante a efectos de conseguir la estabilidad de los caudales durante los ensayos. Esta carga constante se logra mediante un rebosadero en el depósito regulador que descarga al depósito acumulador.
- Instalación de descarga. El agua procedente del depósito regulador es conducida a una de las tuberías de descarga 1 y 2.
- Instalación de aspiración. El agua procedente del modelo es llevada al depósito acumulador o desaguada al exterior.
- Caudalímetros tipo flotámetro, empleados para medir y controlar el caudal de descarga y aspiración.
- Dispositivo inyector de trazador. Este dispositivo incorpora un caudal constante de trazador durante un cierto tiempo, a cualquiera de las dos tuberías de descarga. El

caudal y tiempo de inyección pueden ser fijados a voluntad. El trazador puede ser iónico (cloruro sódico) u óptico (anilina).

- Equipo de medida de conductividad. En las tuberías de descarga y aspiración se han instalado sendas células conductimétricas conectadas a dos conductímetros y un registrador gráfico, donde se obtiene la medida de la variación temporal de la conductividad del agua que entra y sale del modelo.

5. ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL TRAZADOR EN EL MODELO

Si en el instante $t = 0$ introducimos en el modelo (a través de una de las tuberías de descarga) una cantidad M_0 de trazador, y en la tubería de aspiración se mide de una forma continua la concentración del trazador $C(t)$ en el agua extraída del modelo, podríamos dibujar la curva concentración/tiempo, pero para el estudio que nos ocupa es más interesante obtener la variación de $C(t)/C_0$ en función de un tiempo $T = t/t_0$ (figura 4) siendo:

C_0 la concentración inicial que teóricamente existiría en la vasija suponiendo mezcla homogénea e instantánea, con lo que $C_0 = M_0/V$, donde V es el volumen de agua contenido en el modelo de la vasija.

t_0 el tiempo teórico de renovación del agua del modelo: $t_0 = V/Q$, donde Q es el caudal constante que circula.

De esta manera se expresa mediante variables adimensionales la variación temporal de la concentración del trazador a la salida del modelo.

La masa M de trazador extraída por la tubería de aspiración en un tiempo t contado a partir del instante en que se ha inyectado dicho trazador ($t = 0$), será:

$$M = \int_0^t Q C dt$$

Por tanto, dividiendo por M_0 (masa total de trazador, inyectada en el instante inicial):

$$\frac{M}{M_0} = \int_0^t \frac{Q}{M_0} C dt \int_0^t \frac{V}{C_0 V} C dt =$$

$$\int_0^t \frac{C}{C_0} \frac{1}{t_0} dt = \int_0^t \frac{C}{C_0} d\left(\frac{t}{T_0}\right) = \int_0^t \frac{C}{C_0} dT$$

Se obtiene el valor de $M/M_0(T)$ que representa el porcentaje de partículas con un tiempo de residencia en el modelo igual o inferior a T , y que es igual al área rayada que se muestra en la figura 4.

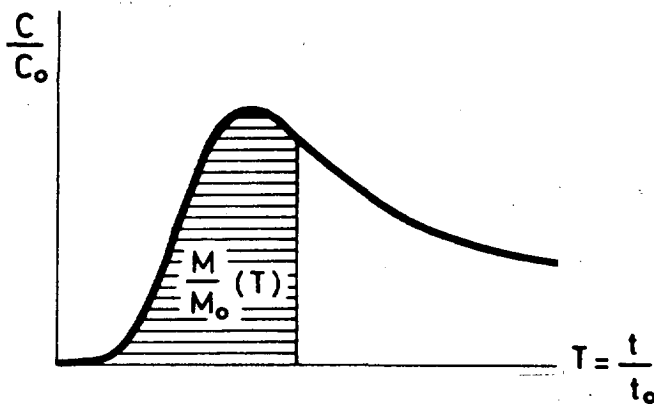


Figura 4.—Concentración de trazados en la tubería de aspiración.

Es evidente que M/M_0 para $T = 0$, y $M/M_0 = 1$ para $T = \infty$. Por tanto, el área encerrada por la curva C/C_0 y el eje de abscisas (figura 4) es igual a la unidad. La forma de la curva M/M_0 será la mostrada en la figura 5.

Así pues, la curva $M/M_0(T)$, objetivo del trabajo experimental, proporciona el elemento

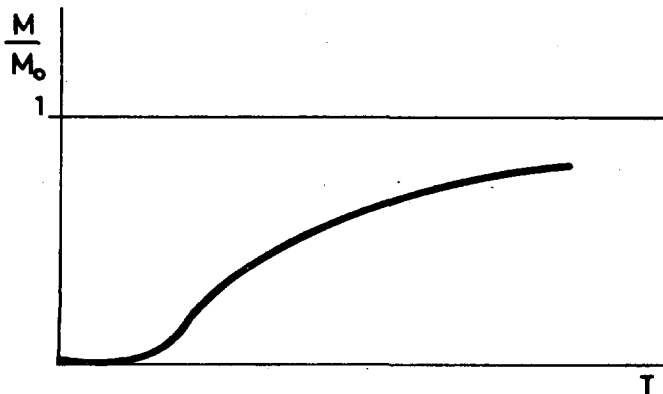


Figura 5.—Curva M/M_0 .

básico para el estudio del tiempo de residencia de las partículas de agua en el modelo.

Si analizamos las curvas desde un punto de vista estadístico, C/C_0 puede interpretarse como la función de densidad del tiempo de residencia de las partículas de agua en el modelo M/M_0 como la función de distribución.

Una vez realizada la inyección de trazador y transcurrido un tiempo T_1 suficientemente largo para que se haya conseguido una mezcla homogénea dentro del modelo, y por tanto, la concentración sea la misma en todo punto, la concentración registrada a la salida será igual a la existente en el interior del modelo y se verificará que:

$$-V dC = C Q dt.$$

por tanto:

$$-\frac{dC}{C} = \frac{Q}{V} dt = \frac{1}{t_0} dt = dT$$

integrando:

$$C = C_1 e^{-T/T_0} \dots \dots \dots (1)$$

siendo C_1 la concentración en el instante T_1 .

6. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Una vez calibrados los instrumentos de medida (caudalímetro, conductímetro y dispositivo inyector del trazador), se siguió la siguiente metodología experimental.

1. Determinación de la relación entre la magnitud medida (conductividad) y la magnitud objeto de análisis (concentración) en las condiciones de trabajo.

2. Ensayo del modelo con una inyección prácticamente instantánea de una masa de sal constante y registro continuo de la conductividad del agua extraída del modelo por la tubería de aspiración.

3. Transformación de la curva conductividad/tiempo en la curva concentración/tiempo, $C(t)$.

4. Repetición de los pasos 1, 2 y 3 diez veces para cada hipótesis.

5. Obtención de la curva media $C(t)$.

6. Transformación de estas curvas en las

correspondientes curvas adimensionales $C(t)/C_0 - T$.

7. Integración de la curva C/C_0 para obtener M/M_0 .

Dado que se comprobó experimentalmente y de forma reproductiva que para $T > 0.25$, C/C_0 decrece exponencialmente según la ecuación (1), las curvas conductividad/tiempo se obtuvieron hasta el instante $t = 0.25 V/Q$.

7. RESULTADOS Y DISCUSION

Los resultados obtenidos se muestran en las gráficas de la figura 6.

Las curvas C/C_0 son la media de diez curvas experimentales obtenidas para cada una de las dos hipótesis ensayadas (tubería de descarga en 1 o en 2). Las curvas M/M_0 han sido obtenidas integrando las curvas C/C_0 medias. Todas ellas llegan hasta el valor $T = 0.25$. De este valor en adelante C/C_0 decrece exponencialmente y su integral M/M_0 , como ya se ha

señalado, crece asintóticamente hacia la unidad.

La respuesta de la vasija para tiempos inferiores a $T = 0.25$ a la descarga del caudal trazado se refleja en las curvas C/C_0 . Para la hipótesis 1, el máximo que se produce alrededor de $T = 0,055$, señala la existencia de una vía preferente (o de circulación rápida) de pequeña magnitud en el movimiento del agua. El mínimo relativo que sigue al máximo refuerza esta idea, pues representa la llegada por dicha vía del agua no trazada tras el fin de la inyección de trazador. Por el contrario para la hipótesis 2 no se presentan con igual claridad máximo ni mínimo. No se puede hablar por tanto de una vía preferente de recirculación más rápida.

Como consecuencia de esta diferencia al cabo de $T = 0.25$ es mayor la masa de trazador extraída en la hipótesis 1 que en la 2, y por lo tanto los tiempos de residencia de las partículas serán menores en la hipótesis 1.

El carácter adimensional de los resultados facilita la aplicación directa al prototipo de la in-

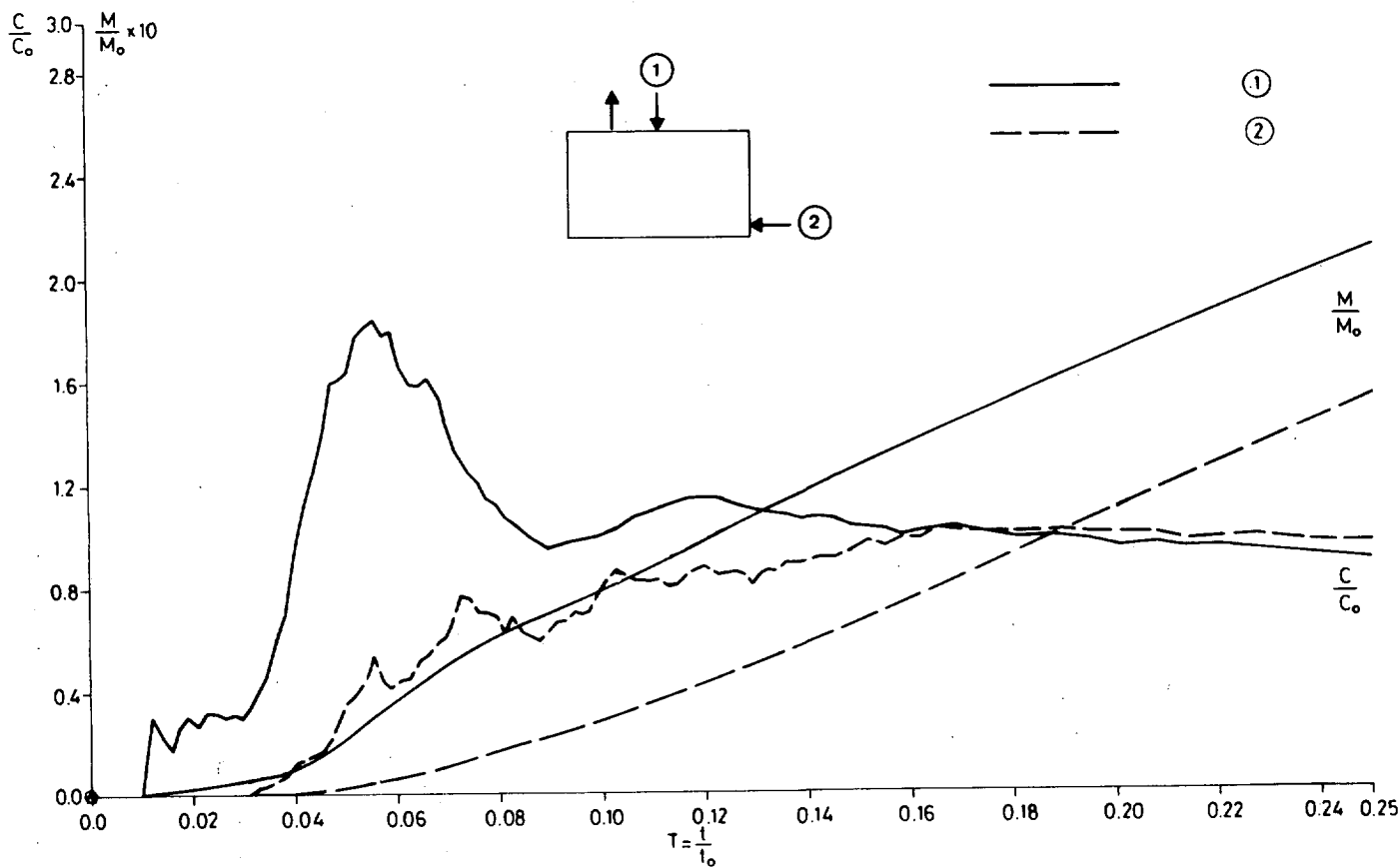
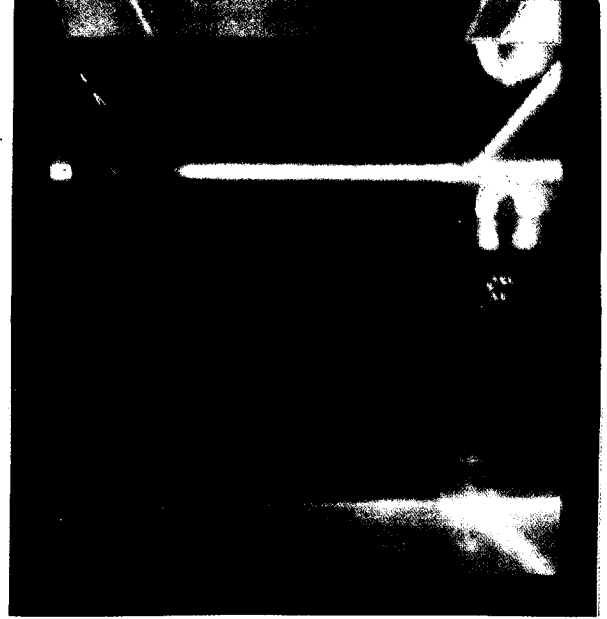
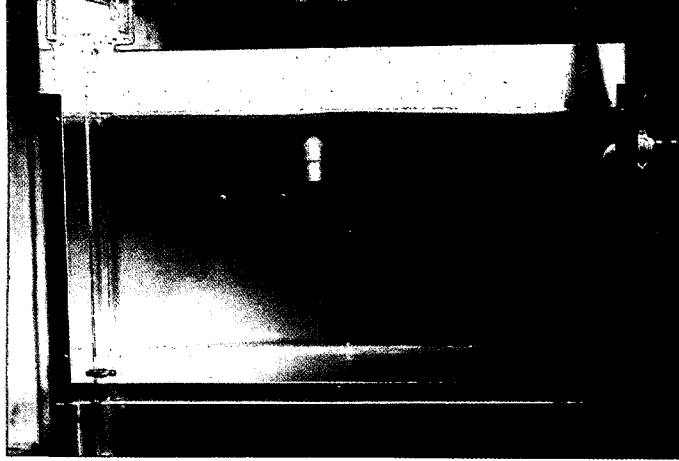


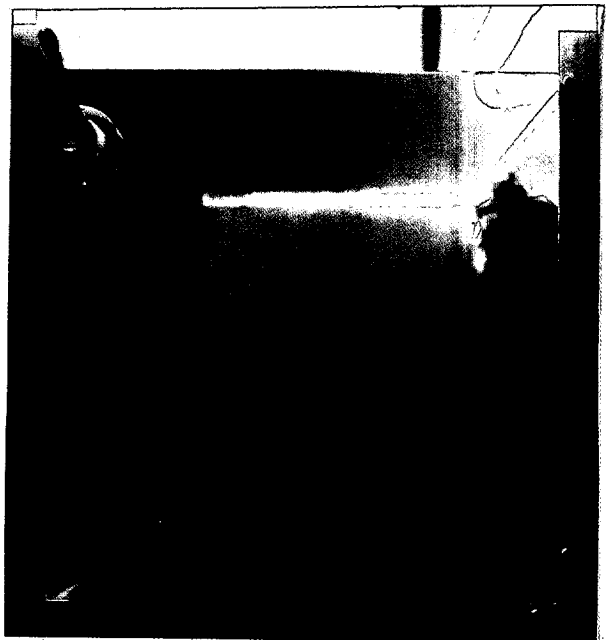
Figura 6.—Curvas C/C_0 y M/M_0 .



3

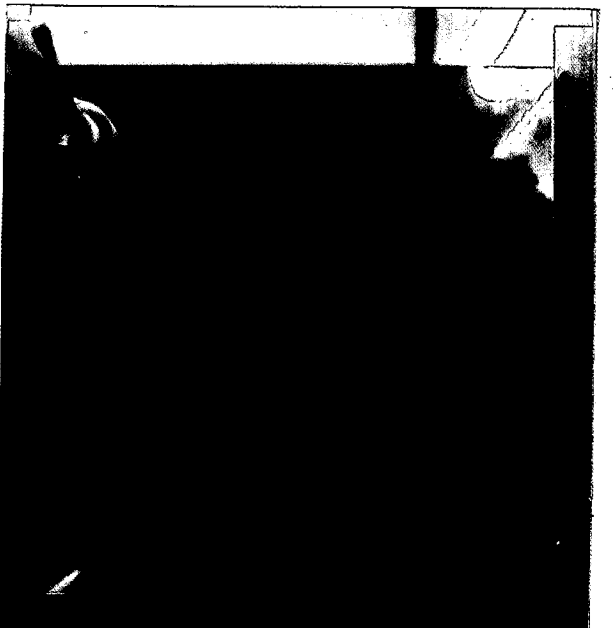
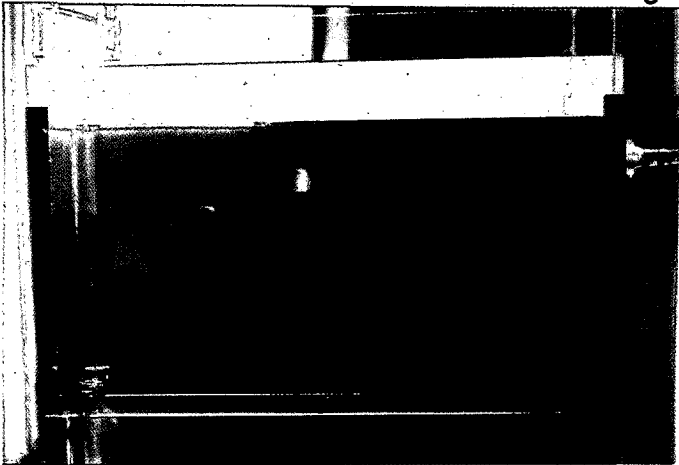


2



4

5



6

Figura 7.

formación del modelo. Así por ejemplo, el tiempo t_α tal que el α por 100 de partículas tienen un tiempo de residencia inferior a él, se encontrará extrayendo de la curva M/M_0 el valor de T tal que $M/M_0 = \alpha/100$ (para $T > 0.25$ se utiliza la integral de la ecuación (1)). Este valor T_α es válido también para el prototipo por ser adimensional. Despejando

$$t_{\alpha p} = \frac{V_p}{Q_p} t_\alpha$$

donde el subíndice p indica valores del prototipo (V_p : volumen; Q_p : caudal).

De este modo se han obtenido los siguientes valores:

		Hipótesis	
		①	②
	t_{10}	0,088	0,139
	t_{50}	0,52	0,57
	t_{80}	1,19	1,23

Tabla 1.—Valores del tiempo t_α en horas, para el prototipo tal que un α por 100 de partículas permanece en el prototipo un tiempo inferior a él.

A tenor de estos resultados cabe señalar que los tiempos de residencia medios (t_{50}) son semejantes en ambas hipótesis, a pesar de que dada la situación de la descarga en la hipótesis 1 podía esperarse un tiempo de residencia notablemente inferior en este caso. También se pone de manifiesto que los fenómenos observados en los primeros minutos (vía preferente) tienen una repercusión relativamente pequeña en los tiempos de residencia medios.

La observación del comportamiento hidráulico de la vasija de una manera cualitativa se ha realizado visualizando el flujo con un trazador colorante (anilina) (figura 7). Cabe destacar que el plano horizontal del fondo actúa co-

mo un repartidor del agua hacia los laterales de la vasija, y que posteriormente debido a las paredes verticales se produce un refluo hacia los puntos de aspiración.

BIBLIOGRAFIA

1. BECERRIL, E.: «Hidromecánica». Ed. Dossat. Madrid 1960. Cap. 27.
2. DAT, J.; FORRADE, C.: «Sur la similitude des écoulements provoqués par des jets». La Houille Blanche, 6, 1978, pp. 435-442.
3. FOX, E. A., GEX, V.E.: «Single-phase blending of liquids». A.I.Ch.E. Journal, 2, 1956, pp. 539-544.
4. KOBUS, H.: «Hydraulic Modelling». Verlag Paul Parey. Hamburg. 1980. Cap. 5.
5. OSUNA, A.: «Hidráulica». Servicio Publicaciones. E.T.S. Ingenieros de Caminos. Madrid. 1978. Cap. 18.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Asociación Nuclear Vandellós (ANV) las facilidades ofrecidas para la publicación del presente trabajo.

Departamento de Ingeniería Hidráulica Marítima y ambiental. Sección de Ingeniería Hidráulica e Hidrológica (Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos). Universidad Politécnica de Cataluña.

Los autores forman parte de un grupo de trabajo que ha desarrollado desde su formación diferentes líneas de investigación en el campo de la Ingeniería Hidráulica. Dichas líneas se centran, principalmente, en el estudio numérico-experimental del flujo en lámina libre. Así, cabe destacar la labor realizada en el campo del movimiento no permanente en cauces con aplicación al estudio numérico-experimental de la propagación de avenidas en ríos y redes de alcantarillado.

En el Laboratorio de la Sección de Ingeniería hidráulica e Hidrológica, se han realizado diversos estudios en modelo reducido de diferentes obras hidráulicas.