

EXPERIMENTOS SOBRE ALGUNOS MOVIMIENTOS DE LOS LÍQUIDOS

POR M. FERNÁNDEZ BOLLO, J. HERNÁNDEZ RUBIO Y J. VICENS, ALUMNOS DE LA ESCUELA DE CAMINOS

Publicamos a continuación la Memoria presentada en el curso 1940-41 por estos alumnos de tercer año de nuestra Escuela, sobre trabajos de investigación hidráulica que realizaron, y que dió lugar a que se les concediera el Premio Gómez Navarro, por lo que felicitamos a los autores y al ilustre ex Profesor, que, al crear este Premio, fomenta tan interesantes actividades.

PARTE TEÓRICA

1. Generalidades sobre el estudio de los movimientos, clasificándolos por sus dimensiones.

De los distintos movimientos que estudia la Hidráulica, los que más aplicación tienen son los bidimensionales.

Esto se debe a que aunque todos los movimientos se realizan en un espacio de tres dimensiones, suele ser posible estudiarlos reduciéndolos a movimientos en dos dimensiones, más asequibles al cálculo y a las representaciones gráficas.

En ciertas ocasiones, como, por ejemplo, en los valores medios en tuberías, se puede simplificar más aún el estudio, reduciéndolo a una sola dimensión. Así se llega a la máxima sencillez, pero esto sólo puede hacerse en muy pocos casos.

Algunas veces es preciso abordar el problema en tres dimensiones, aunque entonces es difícil obtener una solución analítica y sólo suele ser viable la resolución experimental.

2. Idea del método analítico.

El método analítico se plantea casi siempre con ayuda de las ecuaciones de Euler, que para líquidos perfectos (incompresibles y sin viscosidad) nos dan infinitos movimientos posibles para cada contorno.

Pero estos movimientos quedan determinados si damos una ley de distribución de las rotaciones de las partículas, vectores remolino. Sabemos que de la cantidad, tan grande como queramos, de distribuciones de vectores remolino, el que menos energía precisa es el irrotacional, de vector remolino nulo en todo el campo; luego todo movimiento de líquidos perfectos tenderá a ser irrotacional.

En un movimiento irrotacional, se cumple:

$$\frac{d^2 \phi}{dx^2} + \frac{d^2 \phi}{dy^2} = 0,$$

siendo ϕ la función primitiva de la velocidad.

De aquí se deduce que las soluciones serán las

funciones armónicas que cumplan las condiciones en el contorno. Por el teorema de existencia de la función armónica, conocidos los valores en el contorno, queda demostrado, indirectamente, que el movimiento es único y que siempre existe solución.

La investigación de esta solución tiene gran importancia práctica, porque la distribución de velocidades se puede asimilar a la irrotacional en la mayor parte de los casos. Bastará que $\frac{v \cdot d}{\nu}$ adquiera un

valor muy grande, presentándose entonces la turbulencia, que hace que la distribución de velocidades medias sea muy análoga a la irrotacional, aunque se produce una degradación de energía importante. Este último caso es el que se presenta casi siempre en la realidad, ligeramente modificado por la formación de la capa límite.

En los líquidos viscosos e incompresibles, las ecuaciones de Euler se modifican introduciendo los esfuerzos tangenciales, con lo cual obtenemos las ecuaciones de Navier-Stokes, que pocas veces permiten llegar a resultados analíticos.

En este caso se producen esfuerzos tangenciales dentro del líquido, que originan rotaciones de las partículas, más apreciables en las proximidades de los puntos de parada.

3. Movimiento del líquido viscoso entre dos láminas.

Uno de los pocos casos de fácil solución es el del movimiento entre dos láminas próximas rigidamente unidas.

Planteándolo en la forma indicada, tendremos:

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{z^2 - b^2}{2\mu} \cdot \frac{\partial}{\partial x} (p + \pi h) \\ v &= \frac{z^2 - b^2}{2\mu} \cdot \frac{\partial}{\partial y} (p + \pi h) \end{aligned} \right\}$$

o bien, si designamos por d la diferencial en el sentido de la velocidad,

$$v = \frac{z^2 - b^2}{2\mu} \cdot \frac{\partial}{\partial s} (p + \pi h),$$

y tendremos para la velocidad media:

$$v_m = - \frac{b^2}{3\mu} \cdot \frac{\partial}{\partial s} (p + \pi h) = k \cdot \frac{\partial}{\partial s} (p + \pi h)$$

equivalente a la anulación del Laplaciano.

Esta deducción supone que la velocidad sea suficientemente pequeña para despreciar la energía cinética.

La irrotacionalidad se refiere a las dos direcciones

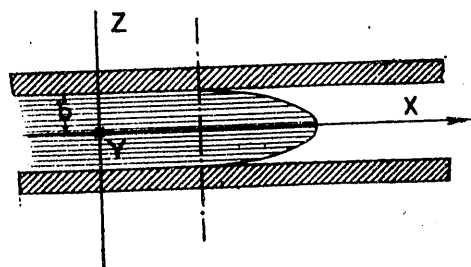


Figura 1.

nes $O X$ y $O Y$, ya que en la $O Z$ el movimiento es rotacional, como puede apreciarse en la figura 1.

Esto equivale a que todos los vectores remolino estén contenidos en el plano $X Y$.

Por tanto, mientras la velocidad no pasa de cierto límite, las rotaciones de las partículas no dan componentes en este plano.

Si se alcanzan velocidades mayores, las rotaciones aparecen y llega a presentarse la turbulencia para valores aún más altos.

Este es el fundamento de un método para obtener imágenes de un movimiento irrotacional si se observa el movimiento desde puntos suficientemente alejados en la dirección de las Z , y con velocidad adecuada.

4. Aplicación del contorno, fijo, formado por las dos láminas, al estudio de la filtración.

El sistema de láminas constituye un medio para estudiar movimientos de filtración bajo dos aspectos distintos:

1.º Si la filtración es lenta, la ley de Darcy se cumplirá con bastante aproximación, y la distribución de velocidades será la correspondiente a una función armónica.

En muchos casos bastará con emplear un contorno que nos determinará la función armónica, si podemos hacer que las velocidades de entrada y salida sean correctas.

2.º Si se pretende estudiar la filtración como se produce en realidad en los terrenos permeables, podemos disponer un material de características adecuadas entre las láminas y establecer en él la filtración.

Así tendremos un movimiento completamente análogo al real, e incluso podemos estudiar el efecto de una falta de homogeneidad reproduciéndola a la escala correspondiente.

5. Aplicación del mismo contorno al estudio de corrientes guiadas.

Otra aplicación posible es la determinación de la superficie libre en una conducción descubierta, cuya solera podemos variar a voluntad.

Este estudio es de gran interés didáctico y teórico, aunque desde el punto de vista de la aplicación inmediata es menos importante, ya que la influencia de las paredes modifica el movimiento.

Muchas veces es fácil determinar esta influencia, y procediendo con precauciones operatorias adecuadas, es posible obtener resultados prácticos.

PARTE EXPERIMENTAL

1. Disposición experimental adoptada para trabajar entre las dos láminas.

Desde hace años se realizan bastantes experimentos relativos a la circulación entre dos láminas. Así, entre otra infinidad de experimentadores podemos citar: Hele-Shaw (circulación irrotacional alrededor de obstáculos delgados, con cinco líneas de corriente coloreadas); Schaffernak (Viena), para el estudio de circulaciones, comprobando el método de materiales y sumideros, coloreando una lámina horizontal con gránulos de permanganato. Thornton, para el estudio de la circulación en medios de permeabilidad variable, etc.

Con estos antecedentes, durante el pasado curso 40-41, el interés por la experimentación hidráulica que supo despertar en su clase nuestro competente y



Figura 2.

distinguido profesor D. Enrique Becerril, nos impulsó a abordar la realización práctica de las ideas expuestas en la parte teórica, en la cual obtuvimos los resultados que se exponen más adelante, bajo su di-

rección y merced a su apoyo constante y decidido, que siempre agradeceremos.

Así, al terminar las vacaciones de Navidad de 1940, poseíamos un primer "aparato" (fotografía número 2).

Constaba de dos latas de conserva, que actuaban como depósitos de entrada y salida de 20 cm. de altura y 7 cm. de diámetro, y de dos cristales de 30×20 , sosteniendo todo el conjunto una base de madera. Coste total: cuatro pesetas con ochenta céntimos.

La alimentación se hacía con un sifón y pinza de Mohr, para regular; el desagüe, con un frasco de Woulf, dos sifones y otras dos pinzas de Mohr que permitían conservar el nivel constante.

La única coloración se hacía en un punto de la entrada, con un tubo afilado de vidrio.

Este primer ensayo nos permitió apreciar la importancia de la elección del colorante.

El permanganato usualmente empleado, se hunde por su gran densidad. La tinta china, que parece indicada por su color, obstruye los conductos capilares por tratarse de una suspensión.

De estos ensayos se deduce que el colorante ha de ser muy intenso y ligero, condiciones que cumple el grupo de las anilinas, y dentro de éstas conviene emplear una que no se oxide, por tener bastante oxígeno en su composición para no precipitar con el aire, y que no reaccione con el metal de las conducciones.

De las existentes en el mercado resultó más adecuada el sulfocianuro de trifenilosanilina (violeta), que hemos empleado después en la mayoría de los casos.

Construido este primer "aparato" y obtenidos con él algunos resultados interesantes, se pasó a la construcción de algo más completo.

Una vez decidida la posición vertical para las lá-

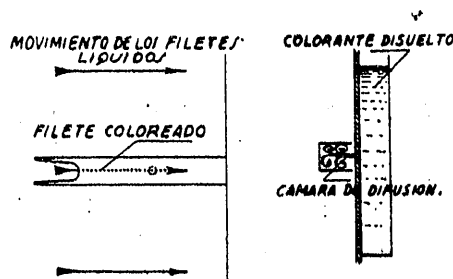


Figura 3.

minas, quedaba un campo más extenso a la experimentación; faltaban por determinar:

1. Condiciones de la corriente entre las láminas, a saber: Separación y magnitud de las mismas; disposiciones de entrada y salida; regulación.

2. Procedimiento para colorear las partículas que pasen por puntos determinados.

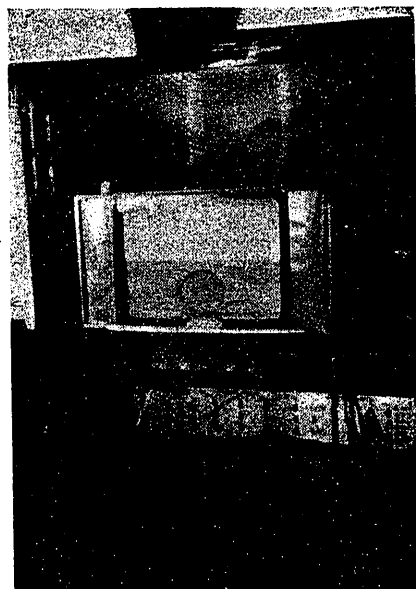


Figura 4.

Para la primera condición se adoptó:

Separación: 2,5 mm. que da valores suficientemente pequeños, de $\frac{v \cdot a}{u}$.

Magnitud: 75×100 cm., limitada, porque para este tamaño las lunas corrientes en el mercado ya trabajan a carga de rotura.

Entrada y salida: Embocadura de forma hidrodinámica con circulación en toda la altura.

Regulación: Mecanismo eléctrico automático, que se compone de dos partes:

a) Regulación propiamente dicha: resultó excesivamente sensible, por lo que se emplea poco.

b) Indicadores automáticos de seguridad.

Para la segunda condición se adoptó un tubo con orificios laterales y pequeñas cámaras de difusión del color, como se puede apreciar en la figura 3, provisto de 34 cámaras a 2 cm. de distancia y con orificios de 0,0036 cm. de diámetro.

La dificultad principal se encuentra en el calibrado de los orificios y en el ajuste de las cámaras.

La disposición final del aparato es la representada en la figura número 4. Como puede apreciarse en ella, en la pantalla, iluminada por transparencia, se puede observar el fenómeno y vigilar su marcha, siendo fácil la obtención de fotografías.

Los contornos precisos se pueden construir con tubo delgado de goma o con papel secante. Estos últimos son los más cómodos y más herméticos, ya que el entumecimiento del papel los ajusta perfecta-

to. Los ensayos en régimen variable son de interpretación más complicada.

Dentro de la gran cantidad de ensayos realizados, podemos indicar los siguientes:

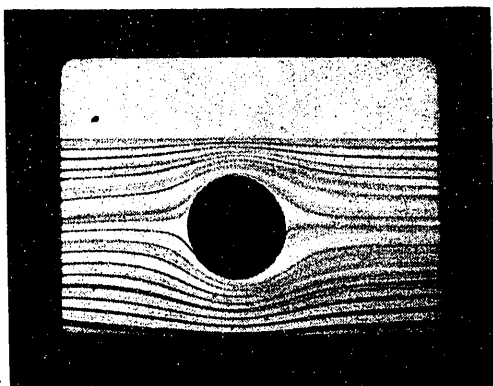


Figura 5.

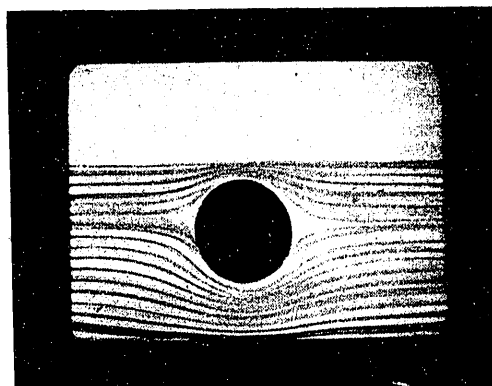


Figura 6.

mente. En cambio, los de goma se pueden emplear varias veces.

2. Ensayos realizados sobre movimiento irrotacional.

Con la disposición adoptada se pueden ensayar casi todos los movimientos de interés en régimen permanente o variable.

Solamente algunos contornos especiales exigen otros procedimientos, como el de la medida de potenciales en una hoja de materia de elevada resistencia, sobre el cuál también hemos realizado trabajos durante el mismo curso.

Pero tienen un interés preponderante los fenómenos en régimen permanente, para los cuales se ponen de manifiesto todas las condiciones del movimien-

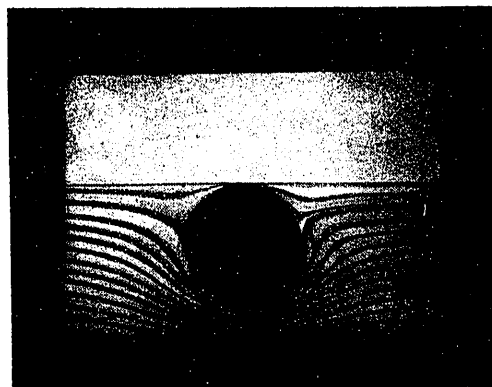


Figura 7.

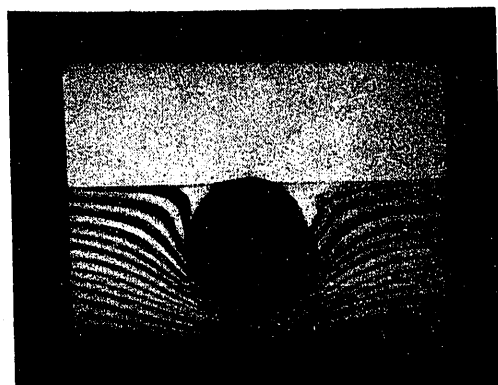


Figura 8.

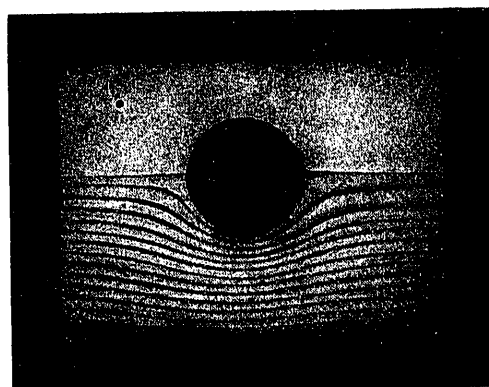


Figura 9.

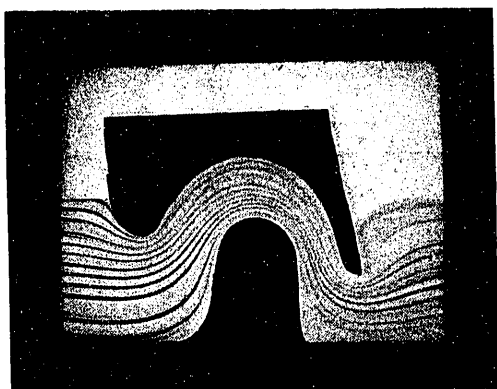


Figura 10.

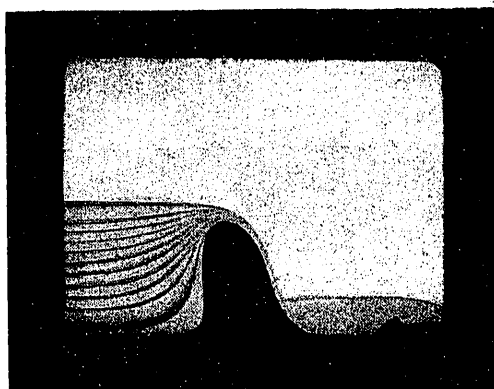


Figura 13.

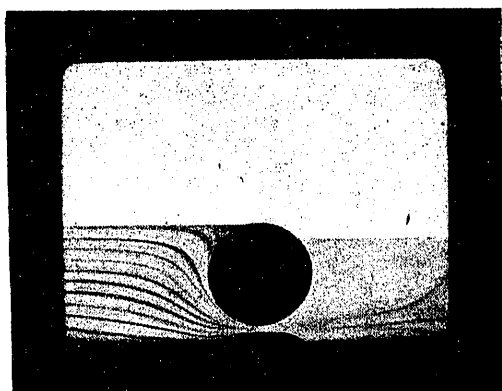


Figura 11.

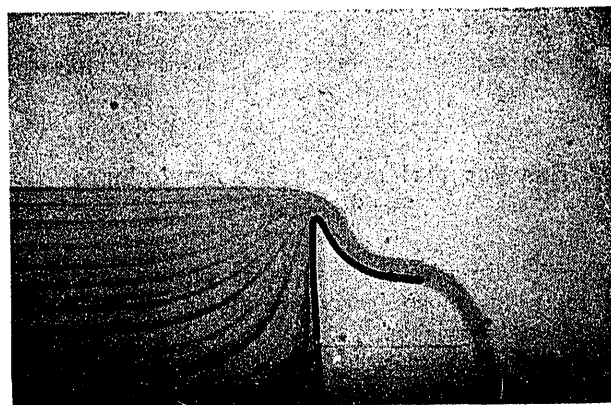


Figura 14.

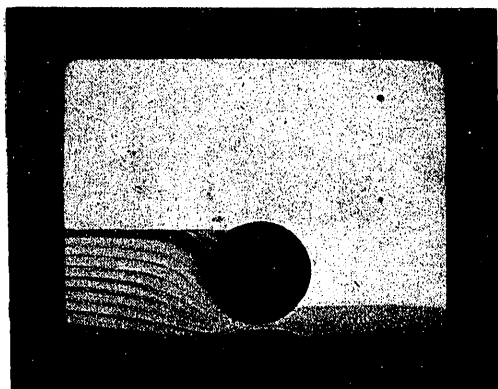


Figura 12.

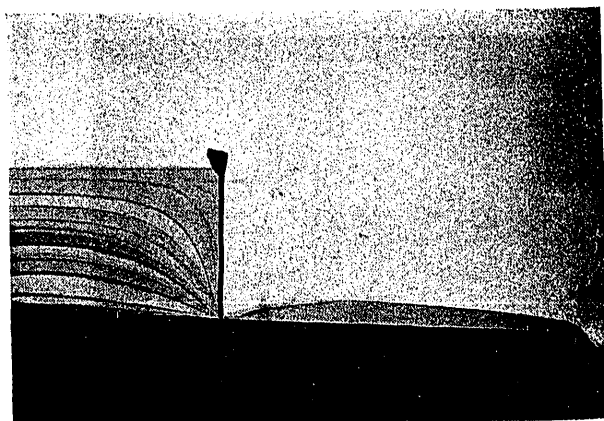


Figura 15.

Movimiento alrededor de un cilindro sumergido.

Podemos considerar varios casos: 1.º, cilindro próximo al eje del contorno del líquido (fig. 5). En este caso los puntos de parada se encuentran en un diámetro y la red de circulación coincide con la conocida red teórica.

2.º En él se ve cómo estos puntos sufren un desplazamiento hacia la superficie más próxima (fot. 6).

3.º Este desplazamiento se acentúa (fot. 7).

4.º El cilindro está en contacto con una pared y los puntos se confunden (fot. 8).

5.º Cuando ya el cilindro ha cruzado la pared, los puntos de parada se separan y al quedar solo medio cilindro se produce una circulación análoga a la primera (fig. 9).

Movimiento en el interior de un sifón.

Las líneas de corriente siguen una distribución casi perfectamente irrotacional, como puede observarse en la fotografía núm. 10.

Circulación aguas arriba de una compuerta cilíndrica con solera elevada (fots. 11 y 12).

Se pueden comparar los resultados obtenidos con velocidades muy diferentes, como se puede apreciar por la diferencia de niveles aguas arriba y aguas abajo de la compuerta. De las dos redes de circulación puede deducirse la diferencia que hay entre las dos distribuciones de presión sobre la compuerta.

Circulación aguas arriba de un azud.

Se puede comprobar la red de circulación tan conocida del vertedero en pared gruesa (fot. 13).

Idem para un trampolín y una compuerta vertical (fots. 14 y 15).

También se pueden comprobar los trazados teóricos. En el último caso (fot. 15) se puede notar la exactitud con que se verifica la hipótesis de Kulka, de asimilación a un sumidero puntual teórico (1).

Movimiento en las proximidades de un perfil Joukowski.

En la fotografía 16 se puede apreciar el campo de velocidades alrededor de un perfil hidrodinámico en régimen irrotacional.

Estos, entre otros muchos realizados y en curso de realización actualmente por los alumnos de tercer año.

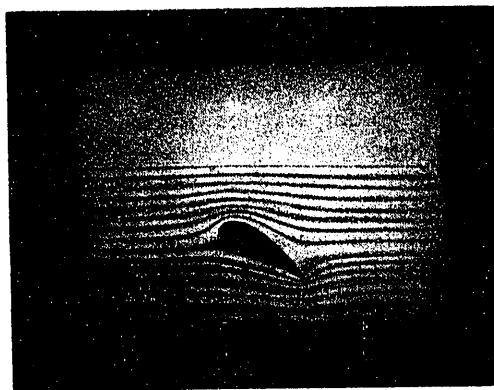


Figura 16.

3. Experimentos con fenómenos de separación importantes.

Los fenómenos de separación se presentan en muchos casos, pero son más interesantes cuando forman remolinos. Entre otros típicos tenemos los siguientes:

Salida bajo una compuerta cilíndrica.

En el caso ya citado de la figura 12, se puede observar la zona de separación que se produce aguas abajo, modificando por completo la distribución de presiones que se obtendría si se supusiera que la circulación era irrotacional. Este fenómeno es debido

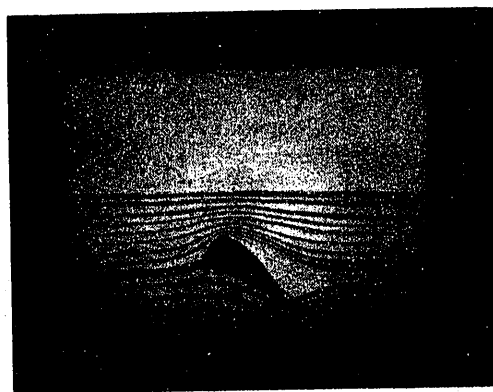


Figura 17.

a que la energía del agua se disipa en gran parte por el frotamiento contra la solera y el cilindro, no pudiendo pasar de nuevo a su forma primitiva de energía de presión.

(1) En los últimos números de *Energia Elettrica* aparecen dos interesantes artículos de Gentilini, que expone una comprobación experimental lograda por procedimientos completamente distintos.

Zona de separación detrás de un perfil Joukowski.

Se puede apreciar la existencia de esta zona en la figura 17. Resulta interesante su comparación con la figura 16, en la que prácticamente la circulación es irrotacional.

4. Superficies libres.

Estos ensayos, aunque tal vez menos interesantes, por las causas ya apuntadas, dan ideas claras sobre muchos fenómenos, como puede apreciarse en las fotografías 13, 14, 15 y 18.

Corresponden a los casos de lámina adherida, trampolín, resalto hidráulico y lámina libre, donde puede apreciarse la circulación aguas arriba de ésta.

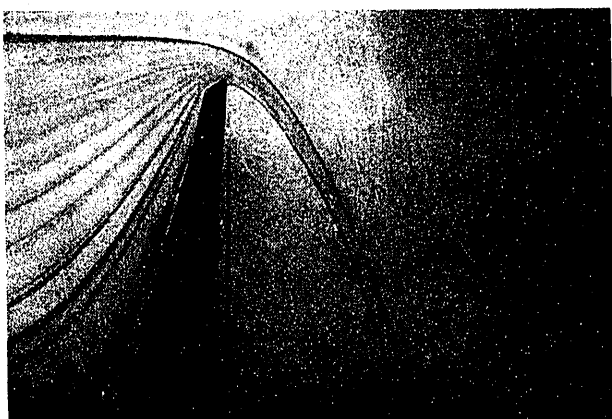


Figura 18.

5. Filtración.

Los resultados más interesantes hasta la fecha se han obtenido, o bien con papel secante sumergido en el agua como medio filtrante y sometiéndole a la acción del colorante que llevan las líneas de corriente, o por fotografía, utilizando un medio filtrante transparente (fot. 19).

Si se emplea el papel sacándolo de entre las láminas y dejándolo secar, se obtiene una "impresión" directa de la red de filtración. Así hemos obtenido redes en presas de tierra y otros modelos.

Y no deja de ser interesante anotar aquí que, por

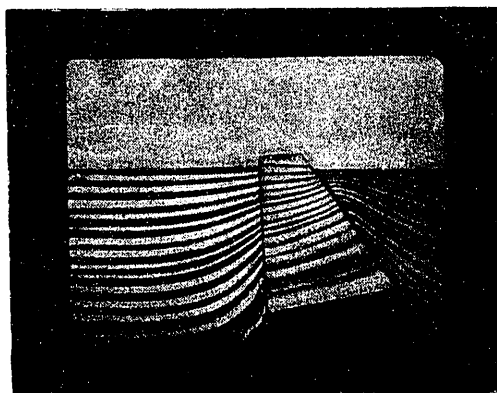
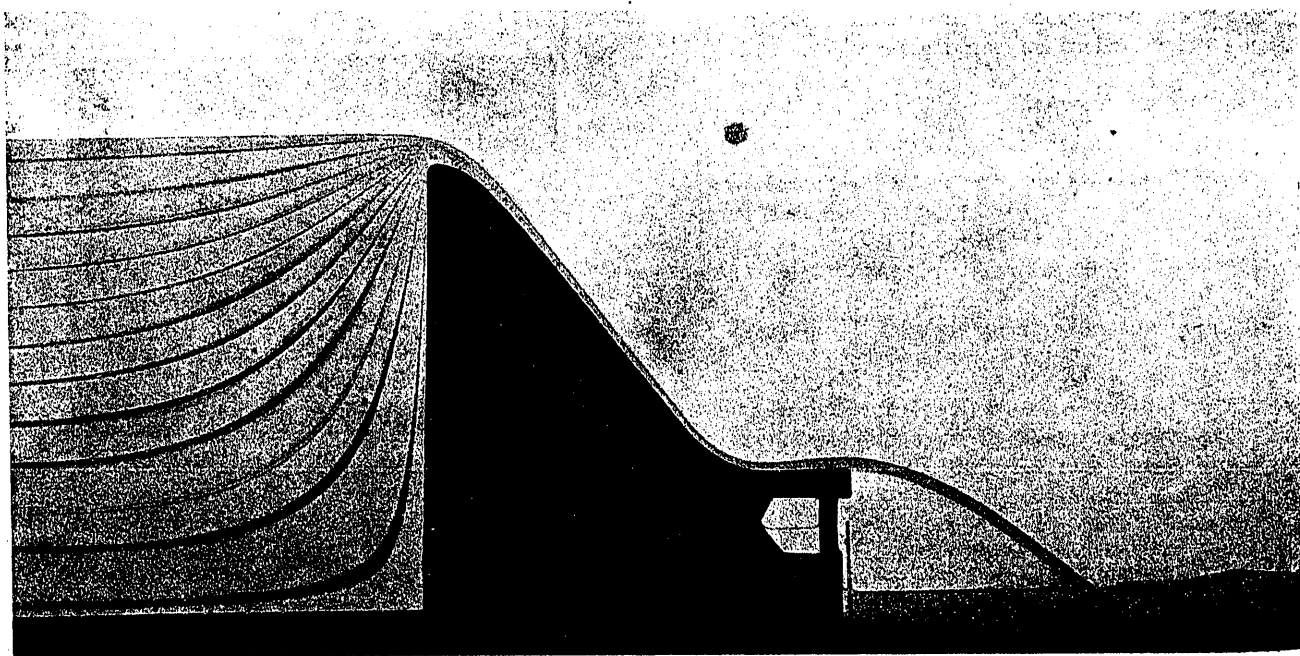


Figura 19.

este mismo procedimiento, se pueden "impresionar" campos magnéticos, puesto que, como ya observó Thornton, las ecuaciones diferenciales que corresponden a los dos fenómenos son las mismas.



Modelo de la presa de Gabrín y Galán. (Ingeniero: Sr. Caso Menac.)