

ASPECTOS TECNICOS DE LA EXPERIMENTACION HIDRO- DINAMICA EN ESCALA REDUCIDA

Por ENRIQUE BECERRIL
Y ANTON-MIRALLES

INGENIERO DE CAMINOS
CANALES Y PUERTOS



Aliviadero de la presa de Venda Nova (Portugal). — Adaptación a una presa arco-gravedad de un aliviadero con depresión uniforme debajo de la lámina. Trampolines de lanzamiento con curvatura en los cajeros del lado izquierdo para desviar y voltear la lámina, a fin de incorporarla al cauce de modo conveniente y logrando una mayor superficie de contacto con el aire para aumentar así la emulsión. Predominio de las ondas de peso y escasa disipación de energía. Semejanza perfecta, sin perjuicio de la mayor emulsión de aire en la realidad.

Escala, 1:100. $R = 132\ 000$.



En homenaje de recuerdo y agradecimiento a los Profesores Gómez Navarro y González Quijano.

Después de aludir a la profunda evolución de la Mecánica de Flúidos, expónense los principios hidrodinámicos que constituyen los fundamentos del ensayo sobre modelos, y las normas que el autor deduce como aplicables en su propia actuación experimental en el laboratorio. Se ilustran los resultados con comparaciones fotográficas de esas experiencias y de la realidad. Incidentalmente se alude a las fórmulas de fricción del movimiento turbulento, señalándose la correspondencia aproximada entre la clásica y empírica de Manning y las de los modernos autores. Termina el autor insistiendo en la necesidad de concentrar los esfuerzos, a fin de construir un gran Laboratorio Central, aconsejando la actuación coordinada con los Servicios de Obras Públicas.

EN el período histórico comprendido entre la fecha que este número conmemora y el actual momento, ¡qué profundas han sido las transformaciones de la Ciencia y de la Técnica! En la gigantesca evolución, ni aun los principios básicos han sido respetados. Tres postulados fundamentales: la conservación de la energía, la conservación de la materia, la independencia espacio-tiem-

po, han sido derrocados. La visión física, a la vez que se amplía, se formula en principios de universalidad creciente, adquiere mayor variedad. El mundo del conocimiento es cada vez más vasto y más complejo.

La Mecánica de los Flúidos es una de las ramas de la Física que más profundamente han evolucionado. La consideración analítica de ca-

tos abstractos (teoría del fluido perfecto) y la expresión abreviada y empírica, útil para el cálculo de elementos utilitarios o industriales, que constituían, en la primera mitad del siglo XIX, el acervo de los conocimientos en este dominio, recibieron, como nuevo aliento, el influjo del sentido físico de la escuela de Reynolds y el resplandor del genio de Boussinesq todavía en aquella centuria.

Pero la transformación decisiva no se operaría hasta la llegada de la nueva investigación, ya marcada por fechas del nuevo siglo y acuciada por la prisa de la técnica aviatoria.

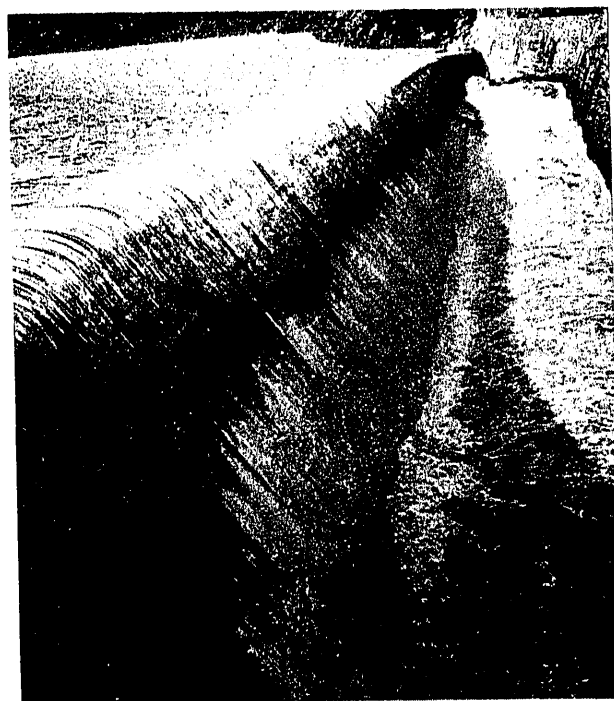
Dos nuevos instrumentos van a ser utilizados: el análisis dimensional y la experimentación sistemática. Si ésta despierta con Engels y se perfecciona con Rehbock y otros investigadores que ponen a punto la técnica de la observación y de la medida, Buckingham enuncia su teorema π , base de aquel análisis, y las nuevas armas, recién forjadas, en manos de Ludwig Prandtl producen la sistematización de los conceptos y la ordenación lógica inicial en el caos empírico-matemático de aquella Hidráulica que, con gracia indudable, ha titulado Kármán, discípulo y continuador ilustre de la obra de Prandtl, la *ciencia de las constantes variables*, por alusión a sus cuadros de coeficientes. El ciclo es rapidísimo. En 1905 formula Prandtl la teoría de la capa límite; de 1915 da-

tan el teorema π y las investigaciones de Gibson sobre el resalto, y desde esta fecha hasta 1930 se centra la evolución fundamental, en coincidencia con la época de estudios en la Escuela de la mayor parte de los actuales Ingenieros de Caminos, que ya oímos formular las nuevas ideas, junto a los principios tradicionales, de boca del ilustre Prof. D. Pedro González Quijano, autor, en 1930, de una Memoria presentada al Congreso de Navegación de Venecia, sobre la teoría de la semejanza (*).

En 1927 correspondió al que suscribe el honor de realizar en la Escuela de Caminos, con la colaboración de D. Rafael Spottorno, bajo los auspicios de la Sociedad Saltos del Alberche, y para el estudio de un aliviadero fijo, los primeros ensayos sobre modelo reducido llevados a cabo en España.

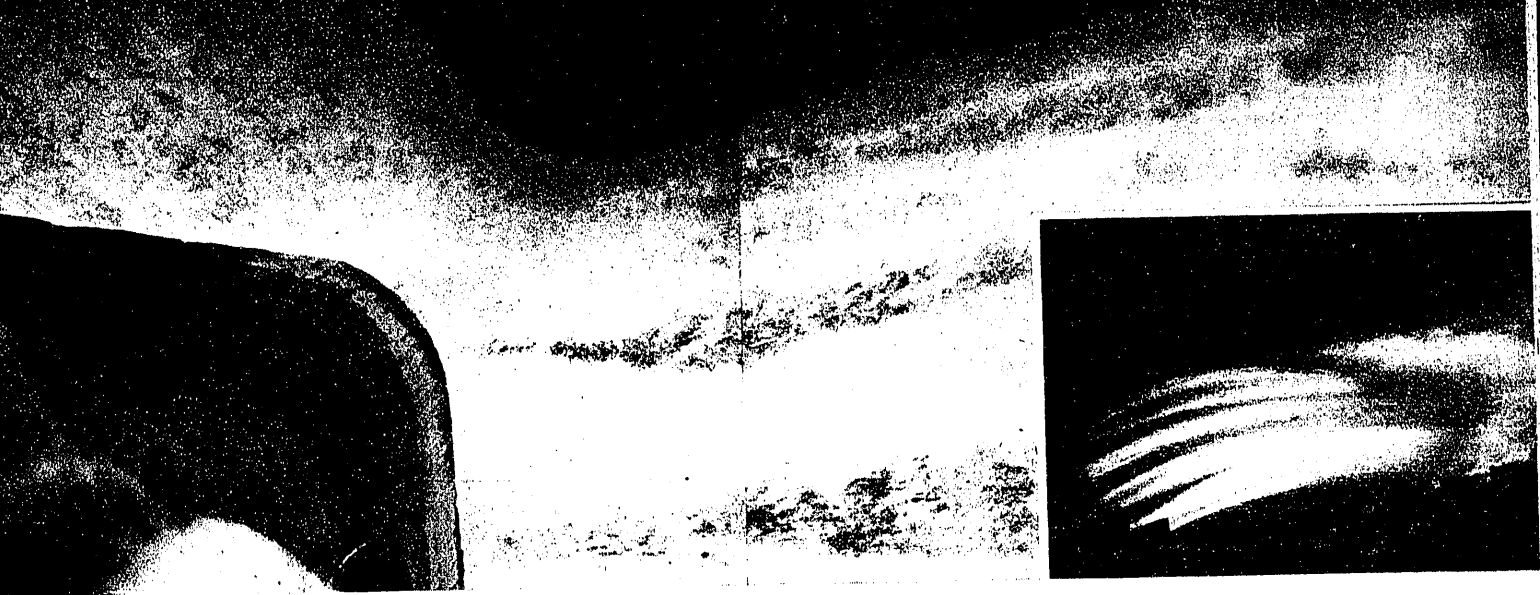
Desde entonces acá, en los laboratorios de la Escuela y en los de algunos Servicios oficiales y de entidades particulares se han estudiado numerosos problemas, unas veces teóricos, otras de aplicación inmediata a las obras públicas, y los laboratorios han ido creando su propia técnica, que

(*) "Experimentación hidráulica sobre modelos". REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS, núm. 2 586, 1 diciembre 1931.



Aliviadero de la presa del Charco del Cura (Saltos del Alberche, S. A.). Año 1927.

Aliviadero fijo en canal, con incorporación lateral. Fenómeno regido por la ley de conservación de la cantidad de movimiento, con disipación turbulenta. Escala, 1:100. $R = 300\,000$. Semejanza perfecta.



Aliviadero de la presa de Las Conchas (Fuerzas Eléctricas del Noroeste, S. A.). Año 1943.

Presa aliviadero con protección de pie con trampolín de doble lanzamiento. Escasa disipación de energía. Semejanza perfecta, excepto en cuanto a la emulsión de aire, muy marcada en la realidad. A pesar del intenso trabajo, la conservación de los dientes y borde de lanzamiento es perfecta, después de cinco años de servicio. Escala, 1:100. $R = 200\,000$

no es sino el conjunto de reglas de interpretación científica de los resultados de la experimentación.

Si las jóvenes generaciones de Ingenieros de Caminos están familiarizadas con los conceptos de la Hidráulica moderna, no es menos cierto que, por simple razón cronológica, son muchos los *seniors* que no tuvieron ocasión de explorar este nuevo campo. Y con la declaración previa de que la Ingeniería es una actuación profesional en que la vocación, la intuición física y el dominio del cálculo son los primeros valores, junto a los cuales el conocimiento de una fórmula moderna y aun el de toda una teoría pueden tener un valor despreciable, permítase que, con afectuosa dedicación y como una prolongación de la función docente, expresemos aquí algunas ideas sobre los nuevos conocimientos, para deducir la justificación de aquellas reglas de interpretación experimental a que antes aludíamos, tal como las venimos aplicando en el ensayo de modelos reducidos.

Empecemos por recordar (*) que la semejanza dinámica perfecta, que exige la simultánea proporcionalidad entre las fuerzas actuantes en el prototipo y el modelo, es imposible de conseguir en la práctica con líquidos reales, por la incompatibilidad de las ecuaciones en que intervienen los parámetros geométricos, cinemáticos y diná-

micos. Sin embargo, cuando una cierta modalidad del fenómeno tiene influencia característica y predominante, puede supeditarse a ella la semejanza, y así ocurre en la práctica de la Ingeniería, en que el peso es la fuerza que de ordinario ha de ser tenida en cuenta, por lo que la condición llamada de Froude:

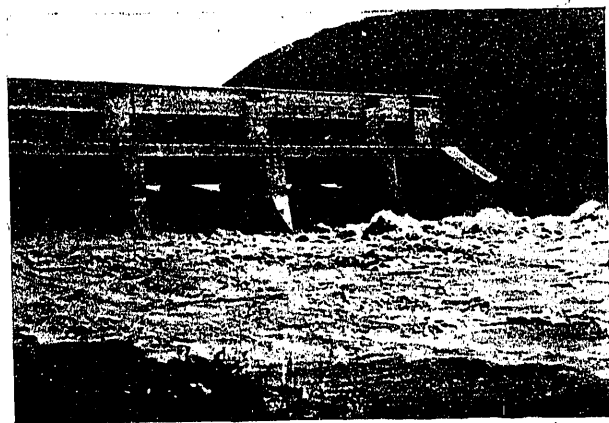
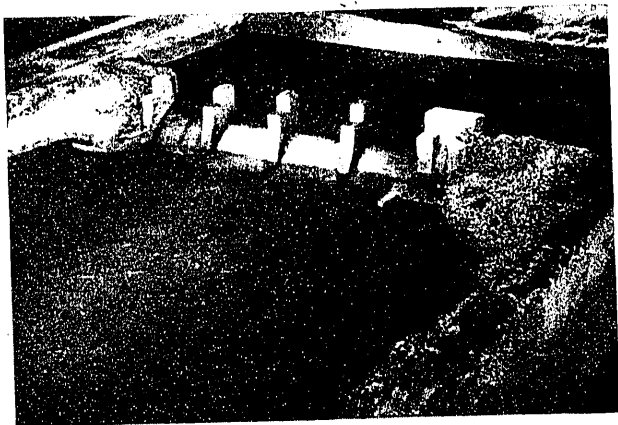
$$\frac{v^2/a}{\gamma/\rho} = \frac{v'^2/a'}{\gamma'/\rho'}$$

determina la escala. Si se trabaja con idéntico líquido y en el campo terrestre, la condición se reduce a:

$$\lambda_v = \lambda_a^{1/2},$$

de la cual se derivan las escalas de las diversas magnitudes físicas que intervienen. Ahora bien: las perturbaciones que al movimiento llevan las otras propiedades de los líquidos (viscosidad, tensión superficial y elasticidad) influyen o alteran la semejanza, viniendo medidas las influencias respectivas por parámetros adimensionales característicos (números de Reynolds, Weber y Cauchy-Mach); la estimación previa de estas influencias perturbadoras, los medios de liberarse de ellas, cuando es posible (o al menos de reducirlas al mínimo), y, en último término, las correcciones que puedan exigir los resultados, son la esencia de la técnica de la experimentación.

(*) Para la más fácil interpretación, puede consultarse una obra moderna de Hidráulica; por ejemplo, H. Rouse: *Hidráulica*, traducida por A. Sémelas, 1951, o bien nuestros Apuntes de clase.



Aliviadero de la presa de Almoguera (Unión Eléctrica Madrileña). Año 1943.

Protección de pie de presa con disipación mediante trampolín sumergido. Disipación de energía localizada. Excelente coincidencia incluso en la previsión de erosiones en el cauce. Escala, 1:100. $R = 140\,000$.

Refiriéndonos al caso más frecuente de ensayo de fenómenos que en la realidad tienen lugar en régimen turbulento, señalemos que la disipación de energía se produce mediante un proceso en que la agitación interviene, con su mecanismo de intercambio de cantidades de movimiento, para crear fuertes gradientes locales e instantáneos, actuando la viscosidad como última fuerza en la fase mecánico-térmica de la disipación. Por esto, la semejanza exige la identidad del esquema dinámico dependiente de la distribución de la turbulencia.

En dos grandes grupos deben clasificarse estos fenómenos:

a) Integran el primero aquellos cuya característica es la localización particular de la pérdida de carga, relacionada con la existencia de remolinos o rodillos, de contornos determinados por superficies de discontinuidad, cuya forma se define por los puntos de despegue, bien queden éstos localizados en bordes angulosos, bien por una condición de presión:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0.$$

En todo caso, la pérdida de energía es expresable en la forma:

$$\Delta h = K \frac{V^2}{2g};$$

siendo K un parámetro que depende de la configuración, y, en consecuencia, si ésta permanece semejante, K tendrá, en cada caso, un valor constante.

El desarrollo perfecto del esquema turbulento se alcanza, en los procesos con borde anguloso, para valores relativamente bajos del número de Reynolds, del orden de 10^4 ; en los que dependen del régimen de presiones en contornos curvos son necesarias magnitudes de R del orden de 10^5 .

b) El segundo grupo es aquel en que la acción de la viscosidad produce, en un proceso continuo y uniforme, a lo largo de la pared, una capa límite que, propagándose hacia el interior, determina el régimen turbulento general. La distribución de la turbulencia puede caracterizarse por la distancia de mezcla, l , que prácticamente resulta independiente de R , en tuberías lisas, cuando $R \geq 10^5$.

Si se admite que la resistencia tangencial del contorno, para una cierta configuración dinámica, es proporcional a la presión cinética

$$\tau = \frac{f}{4} \rho \frac{V^2}{2},$$

se deduce que la pendiente motriz, que mide la disipación de la energía por unidad de longitud y por unidad de peso, puede expresarse en la forma:

$$I = \frac{f}{D} \frac{V^2}{2g};$$

siendo f un parámetro sin dimensiones, cuyo valor es dependiente del número de Reynolds y de la rugosidad relativa del conducto:

$$f = \varphi \left(R \frac{D}{\varepsilon} \right),$$

si bien estas influencias no se ejercen con igual intensidad ni aun con simultaneidad en todo el campo experimental.

Los estudios modernos, especialmente los llevados a cabo por la escuela de Prandtl, han tendido a reunir en leyes universales las que rigen la resistencia al movimiento (*). Para medir la aspereza absoluta se utiliza un parámetro lineal, que es el diámetro del grano de la arena equivalente según la escala de las utilizadas por Nikuradse para dar rugosidad artificial a la superficie interior (**). Excusamos otros detalles y damos el gráfico núm. 1 trazado por Colebrook y White para tuberías comerciales, con indicación de las fases: laminar o viscosa (V), turbulenta lisa (TL),

turbulenta intermedia (TI) y turbulenta rugosa (TR); esta última es la única en que rige la ley cuadrática, por ser f una constante de la tubería no dependiente de la viscosidad ni, en consecuencia, de su medida relativa expresada por el número de Reynolds:

$$R = \frac{VD}{\nu/\rho}$$

En esta zona la expresión que determina f es la siguiente:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \frac{D}{\epsilon} + 1,14, \quad [1]$$

cuya estructura logarítmica, derivada de determinados supuestos en la integración de los esfuerzos tangenciales, ha sido y sigue siendo objeto de vivas controversias; digamos que las fórmulas correspondientes a las tuberías son aplicables, al menos en primera aproximación, a conductos cerrados o abiertos no circulares, mediante la introducción del espesor medio a que luego aludiremos.

Lo últimamente expuesto nos sirve a su vez para fijar un criterio de la elección de escala de los modelos de canales o tuberías. Consideremos una sección de forma dada; admitamos la posibilidad de realizar, con la variación de escala geo-

(*) Las fórmulas de la circulación en tuberías han sido objeto de estudio en reciente artículo de Blench (T. Blench: "Les formules d'écoulement de l'hydraulique pratique", *La Houille Blanche*, núm. 4, año 1952), cuya lectura aconsejamos.

Y a propósito, ¿convendrá aceptar la palabra "escurrimiento" por "écoulement", como han hecho los sudamericanos? La precisión técnica ganaría ciertamente, pero no la estética del lenguaje. Sobre éste, como sobre otros muchos términos técnicos, sería interesante la opinión de las autoridades lingüísticas, pero, en el rigorismo que hoy exige la técnica, no puede seguirse hablando, ambiguamente, de *circulación*.

(**) No debe pretenderse establecer relación directa entre la altura de las asperezas de un material y el valor de ϵ que corresponde; éste es un parámetro determinado en la forma que se indica.

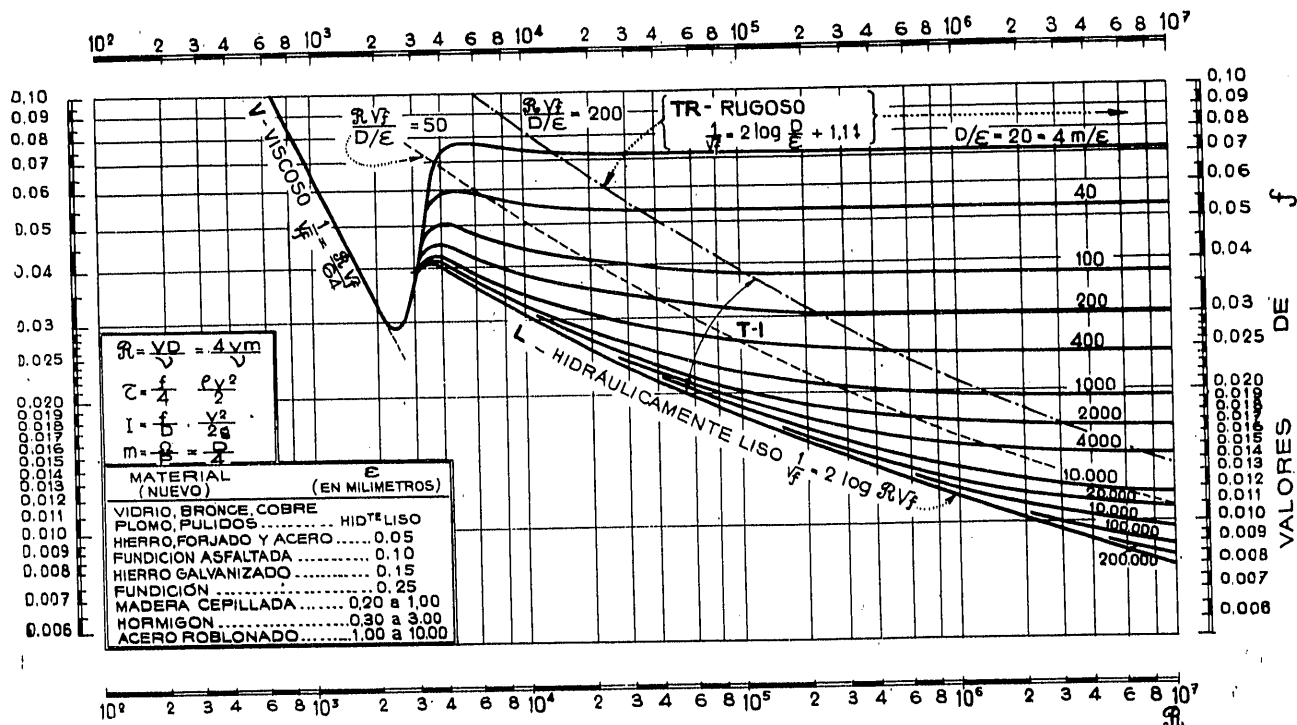
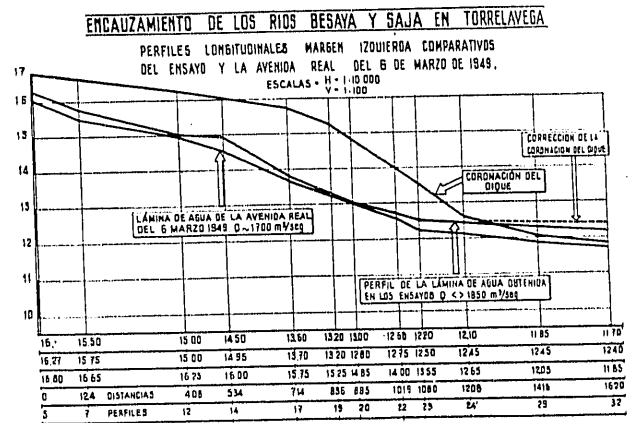
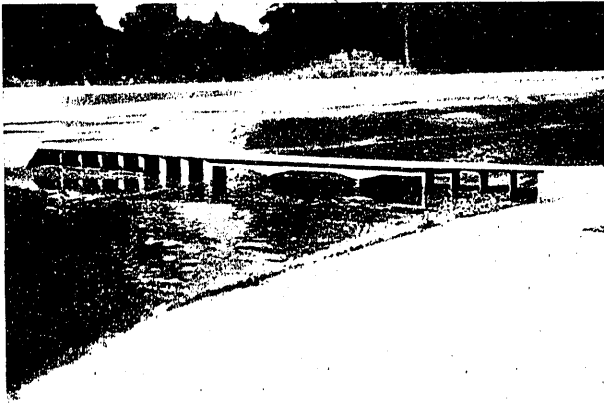


Gráfico núm. 1.—Representación de la ley de Kármán-Nikuradse.



Encauzamiento de los ríos Besaya y Saja (SNIACE), Torrelavega (Santander). Año 1946.

Modelo con deformación de escalas para estudio de la influencia del dique de la margen derecha. Se presenta una fotografía del desagüe de la avenida por el puente de acceso, obtenida sobre el modelo, y perfiles longitudinales registrados para avenidas de 1 800 m³/seg. en el modelo y 1 700 en la realidad.

Buena coincidencia general y exactitud en las previsiones, si bien un modelo mayor hubiera aumentado la precisión.

Escala: H = 1 : 150, V = 1 : 100. R = 50 000.

métrica, otra variación correlativa o proporcional del tamaño de la rugosidad. Mientras el número de Reynolds sea suficientemente alto para mantener el fenómeno en la categoría TR, será evidente la subsistencia de la semejanza para aquellos fenómenos sólo dependientes del peso, a virtud de la igualdad del número de Froude; es decir, en el caso de experimentación con el mismo líquido para la condición $\lambda_t = \lambda^{1/2}$.

Pero cuando el número de Reynolds desciende y el fenómeno se aproxima a aquel espacio en que las influencias de la viscosidad vienen a modificarlo, la semejanza geométrica no basta a mantener la semejanza dinámica; la estructura y dimensiones relativas de la capa límite se alteran, las leyes de distribución de velocidades se modifican y la constancia del valor de f desaparece.

La frontera dentro de los regímenes TR y TI se admite, con frecuencia, coincidente con la línea (véase gráfico núm. 1):

$$\frac{R \sqrt{f}}{D/\lambda} = 200.$$

A efectos prácticos, puede admitirse su desplazamiento hasta:

$$\frac{R \sqrt{f}}{D/\lambda} = 50,$$

con lo que el máximo error que respecto a f se comete así es del orden del 7 por 100 por exceso.

Por otra parte, la determinación de la pérdida de carga unitaria, precisamente para la zona

TR del diagrama, ha sido habitualmente llevada a cabo, hasta las nuevas investigaciones, por medio de fórmulas empíricas, entre las cuales ha alcanzado notoria preferencia la llamada de Manning, que en unidades métricas se escribe:

$$I = \frac{V^2 n^2}{m^{4/3}}; \quad [2]$$

siendo m el espesor medio hidráulico (*) y n un coeficiente arbitrario de rugosidad, tomado de la escala de Ganguillet-Kutter, y de dimensiones $TL^{-1/3}$ (**); de aquí que:

$$f = \frac{8 g n^2}{m^{1/3}}. \quad [3]$$

Es evidente la disparidad estructural de las fórmulas [1] y [2]; no es fácil, sin embargo, afirmar que la superioridad teórica de la primera vaya acompañada de una categórica superioridad experimental, porque la medida de la rugosidad es necesariamente imprecisa o incierta en uno y otro caso, y porque los coeficientes de rugosidad de Manning (n) han entrado hace tiempo en la

(*) m es el espesor medio hidráulico = $\frac{\text{área}}{\text{perímetro de fricción}}$ designado así por representar, efectivamente, el espesor de una capa uniforme que frota sobre el contorno, debiendo rechazarse la vieja e imprecisa designación *radio hidráulico*, ya que m es, como es sabido, igual a $D/4$. Tampoco debe utilizarse la designación "profundidad hidráulica media" (*hydraulic mean depth*), que algunos autores de habla inglesa han adoptado para evitar aquella inexactitud. (Este punto fué objeto de propuesta del autor al Congreso de la "Association Internationale pour Travaux Hydrauliques", celebrado en Grenoble el año 1949).

(**) En la escala de Froude, $\lambda_n = (\lambda_a)^{1/6}$.

AFOROS DE LOS RIOS

SEGURA, TAJO Y HENARES EN BAJAS AGUAS

Sabido es que los datos que mas importan conocer al llevar á cabo una obra de fábrica en un rio, son el de sus mas bajas y mas altas aguas; y que en algunas naciones se observa diariamente la altura de su superficie, sobre escalas establecidas de antemano en sitios adecuados, formándose catálogos de inestimable valor.

Por desgracia no tiene esto lugar aún entre nosotros y si hoy me atrevo á publicar algunas mediciones hechas por mí, es solo con el objeto de llamar la atencion de los ingenieros hácia estas interesantes observaciones que á veces cuestan poco de adquirir y que tan útiles son en ciertos casos.

Prescindiendo de lo indispensables que son cuando se trata de establecer un puente, una presa, etc. ocurre con frecuencia que el ingeniero tiene que informar sobre artefactos que se quieren establecer ó sobre canales que han de derivarse con especialidad para los riegos. En uno y otro caso la base ó punto de partida es siempre el caudal de aguas que lleva el rio sobre todo en el estiage, que es por lo general en los meses de julio, agosto, setiembre y parte de octubre: pues bien, si con antelacion no están conocidos estos volúmenes, es difícil que la tramitacion del expediente se preste á hacer las observaciones necesarias para emitir un concienzudo parecer, y tal empresa que con solo saber las aguas que hay disponibles se calificaria de ridícula quimera ó de consumada utopia, podrá pasar desapercibida resultando gravísimos perjuicios á los que de buena fé se lanzan en estas construcciones. Es de desear, por lo tanto, que se fije la atencion sobre la necesidad de estudiar la marcha ó régimen de nuestros rios emprendiéndose observaciones simultáneas que nos den á conocer su caudal de aguas, sus desniveles, sus diferentes velocidades etc. como seria tambien de desear que estas observaciones se estendieran á los puertos y supieramos de sus mareas, de sus corrientes, vientos reinantes etc. algo mas de lo poquisimo que puede inquirir el ingeniero cuando, con la premura que es costumbre, se le manda terminar un proyecto en breve espacio.

Interin esto se verifica, creo útil el que cada cual diga lo que haya visto ó hecho y de ahí el que yo empiece por aquellos rios que la casualidad ó mis ocupaciones me han conducido á aforar.

Rio Segura. El aforo tuvo lugar el 16 de agosto de 1853, cerca del pueblo de Molina llevando el rio 5,089 metros cúbicos por segundo. Por uno y otro lado corrían paralelas á él dos acequias para los riegos, las cuales son próximamente iguales y conducian, entre las cuatro, 3^{m.c.},652 por 1"; de suerte que entre el rio propiamente dicho y las acequias principales iban en dicho día 8^{m.c.},741 por segundo. Con solo este dato y considerar la grande estension de las huertas de Murcia y Orihuela fácilmente se colige la angustia de aquellos regantes en la época del estío.

Rio Tajo. Su medida la efectué el 13 de agosto de 1854 inmediato á Aranjuez y detrás y un mas abajo de la casa llamada del Labrador; es decir bastante agua arriba del puente colgado y mucho antes de que se le incorpore el Jarama. Llevaba 10^{m.c.},908 por segundo. Las acequias que arrancan de la presa contigua al puente de la Reina y que corren paralelamente á él daban paso á un volúmen de 8^{m.c.},690 por 1" de consiguiente entre las unas y el otro iban 18^{m.c.},598 por segundo.

Rio Henares. La medicion está hecha el 23 de julio de 1858 en el sitio llamado del Serranillo poco mas de un cuarto de legua, rio arriba de Guadalajara. El caudal que llevaba el Henares era de 2^{m.c.},130 por segundo. No iba acequia alguna lateral que distrajese agua de su cauce.

Claro es que estas mediciones hechas en un solo día del año no representan las mas bajas de estos rios; pero de todos modos indican la estraordinaria inconstancia de su caudal, porque al paso que en los meses de invierno merecen estas corrientes el nombre de rios y sus horrorosas avenidas arrastran las obras mas sólidas, se los ve en verano reducidos á las mas exiguas proporciones, burlando las esperanzas mas lisonjeras y animosas.

Un estado tal de cosas es digno de un detenido estudio, y si á los hechos que hoy se palpan pudieran reunirse estensas observaciones sobre la evaporacion y lluvia de nuestras diferentes provincias, quizás se viniera á concluir la inminente necesidad en que nos hallamos de reproducir el arbolado en parages que se han roturado con so-

brada ligereza y acudir en fin á todos los medios posibles para lograr mayor constancia y uniformidad en los hidrometeoros. La reparticion de las lluvias en nuestro pais es irregular hasta el extremo; la facilidad con que corre a precipitarse en el rio principal de la cuenca ilimitada por demás; porque no encuentra mas que terrenos labrantíos que ningun obstáculo oponen á su marcha: crear esos obstáculos y regularizar aquellas es el efecto inmediato del arbolado.

En el dia, para hacer posibles los riegos en la mayor parte de las localidades de España, hay que acudir á vastos pantanos donde pueda almacenarse el agua que ha de alimentarlos casi en su totalidad durante los meses en que son mas precisos. Los gastos que esto origina son inmensos y si á ellos se unen las indemnizaciones que las empresas de riegos tienen que otorgar á los propietarios de esa multitud de molinos que con tanta prodigalidad como grave detrimento de la agricultura se conceden por do quier diariamente, fácil es venir en conocimiento de las contrariedades que imposibilitan, por ahora, en nuestro pais una infinidad de empresas utilísimas y lo ocasionado que es todo esto para alucinar incautos y hacerlos emprender obras cuyos resultados financieros esten muy lejos de corresponder á sus esperanzas y á sus sacrificios pecuniarios.

En España se ha hecho mucho en materia de aguas de algunos años acá y están concluidos trabajos legislativos de indisputable mérito; pero queda aún muchísimo por hacer y queda lo mas penoso y lento, cual es el levantar el plano de nuestros principales rios y sus mas importantes afluentes, haciendo estensivo este trabajo á las zonas regables

en cada cuenca; emprender con constancia la serie de esperiencias de que antes se ha hablado; regularizar y estender los sindicatos de riegos en las comarcas que mas disfrutan de ellos y están por lo general administrados de una manera anómala; no hacer las concesiones de riegos *por superficie regable* sino por *cantidad de agua* fija é invariable; no autorizar la concesion de nuevos molinos ó fábricas en ciertos parajes que se prevea pueden ser regados con ventaja y algunas otras menos importantes.

Todo esto sé muy bien que es obra del tiempo y que hay medidas entre ellas que exigen algun personal, pero hay que decidirse á empezar alguna vez y luego podrá irse perfeccionando y ampliando.

El conocimiento de nuestras cuencas hidrográficas es trabajo muy lento, pero que hay al fin que acometer, porque solo comisiones especiales que radiquen en el pais pueden proporcionar esos datos á que no han de descender los encargados de levantar la carta de España por una parte y á que tampoco pueden aspirar los que lo están de la Estadística y Catastro.

El establecimiento de escalas en los puentes de las carreteras y en todos aquellos parages que se juzgase oportuno, es cosa sencillísima y á muy poca costa se podrian obtener datos precisos y prolijos de que hoy se carece. En fin la buena voluntad y el buen deseo tienen irresistible fuerza y en esta ocasion no habian por cierto de desmentirla.

JOSÉ ALMAZAN.

(De *Revista de Obras Públicas*, núm. 15. Año VI. 1858.)

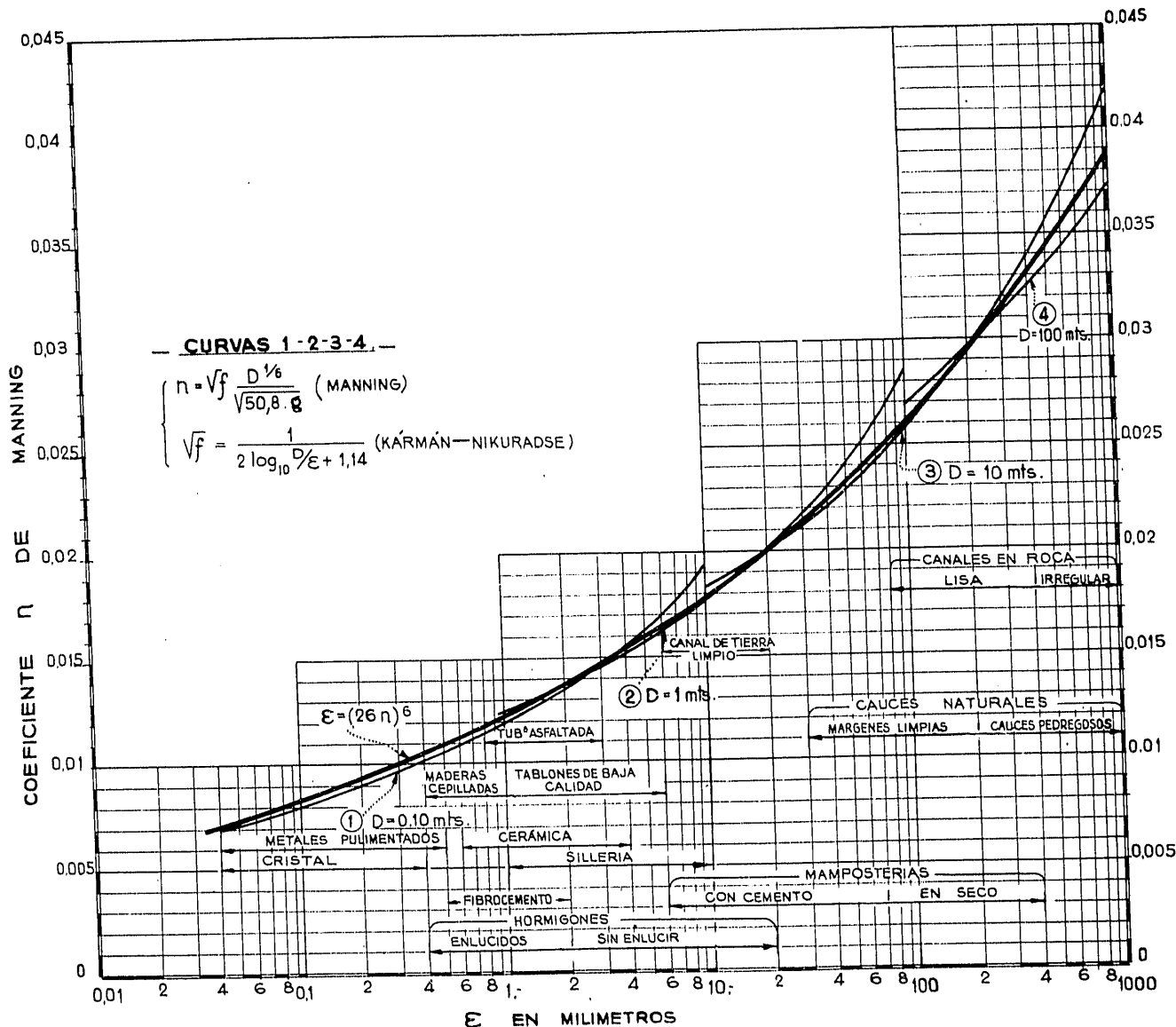


Gráfico núm. 2. — Correspondencia entre los coeficientes de Manning y los de Kármán-Nikuradse. La fórmula $\varepsilon = (26n)^6$ resulta bien adaptada.

estimación intuitiva y sensible del Ingeniero, que, en cambio, aún no matiza, de ordinario, la escala de las ε , y no es lo mismo tomar un valor de una tabla empírica que juzgar mediante la comparación mental con los datos subjetivos de la propia experiencia. Por esta razón el correlacionar estas dos fórmulas tiene evidente utilidad práctica, y para ello procedemos, por nuestra parte, como sigue:

La ley logarítmica de Kármán-Nikuradse

$$f = \frac{1}{(2 \log D/\varepsilon + 1.14)^2}$$

establece una correspondencia biunívoca entre la rugosidad relativa ε/D y el factor de fricción f , parámetros ambos carentes de dimensiones.

La ley de Manning supone análoga dependencia [3] respecto del cociente $\frac{n^2}{m^{1/3}}$, o bien $\frac{n^2}{D^{1/3}}$, puesto que $D = 4 m$.

Dado que ambas fórmulas proceden a interpretar un mismo fenómeno físico, es legítimo presumir que existirá una relación entre los valores de n y ε , de tal modo que $\frac{n^2}{m^{1/3}}$ carezca de dimensiones, o sea que $n^6 \sim \varepsilon$.

No resulta, sin embargo, esta relación tan perfecta y sencilla; eliminando f entre las [1] y [2] quedaría:

$$n = \frac{D^{1/6}}{(2 \log D/\varepsilon + 1.14) \cdot \sqrt{50.8 \cdot g}}$$

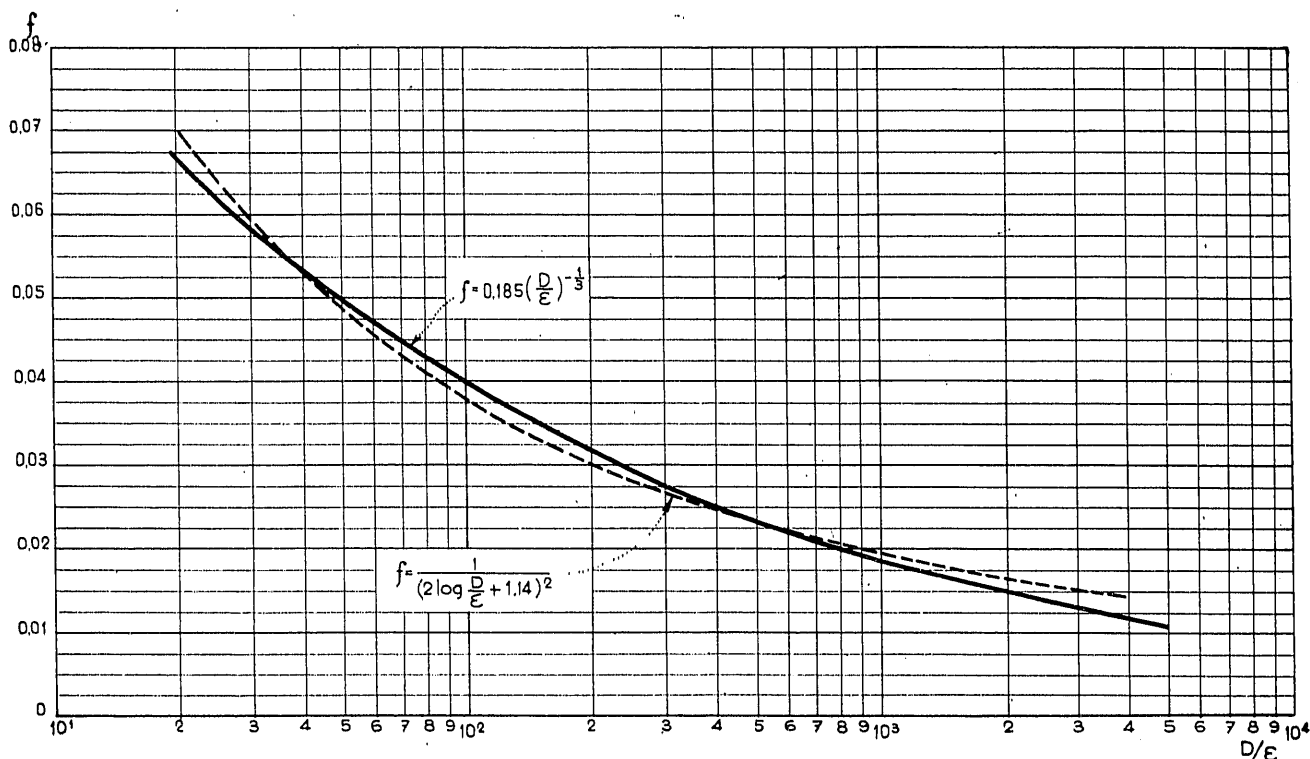


Gráfico núm. 3. — Comparación entre los valores de f , según Kármán-Nikuradse, con los de la fórmula simplificada.

que depende a la vez de ε y D . Ahora bien: dentro del campo de validez de la función, la variación con D es suficientemente reducida para que podamos prescindir de ella, procediendo a una interpolación que cubra las zonas de validez práctica y que relacione así directamente n y ε (*).

Como justifica el gráfico número 2, la ley $\varepsilon = (26n)^6$ resulta perfectamente adecuada, derivándose de ella las siguientes expresiones aproximadas del factor de fricción y de la pendiente motriz, de gran sencillez y completo rigor dimensional:

$$f = 0,185 \left(\frac{\varepsilon}{D} \right)^{1/3};$$

$$I = 0,185 \frac{\varepsilon^{1/3}}{D^{4/3}} \frac{V^2}{2g};$$

en el sistema métrico esta última se simplifica aún:

$$I = 0,00944 \left(\frac{\varepsilon}{D} \right)^{1/3} \frac{V^2}{D} = \frac{1}{106} \left(\frac{\varepsilon}{D} \right)^{1/3} \frac{V^2}{D}.$$

(*) Es muy interesante el artículo del Sr. Carril, REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS, mayo 1953. El valor que obtiene para ε en una superficie de mortero centrifugado es de 0,36 mm. Nosotros calcularíamos, más bien, $\varepsilon = 0,5$ mm., con coeficiente de Manning $n = 0,011$; la discrepancia es muy pequeña y, en todo caso, la lisura muy satisfactoria.

Volviendo ahora a la expresión de la línea límite entre las categorías (TI) y (TE), que escribíamos en la forma:

$$\frac{R\sqrt{f}}{D/\varepsilon} = 50,$$

teniendo en cuenta la expresión aproximada que hemos obtenido para f , y sustituyendo, pue-

$$R\sqrt{f} = 100 \left(\frac{D}{\varepsilon} \right)^{1/6}$$

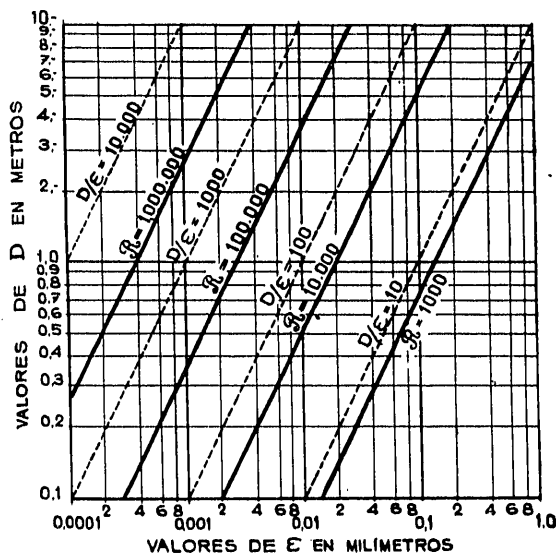


Gráfico núm. 4.

de escribirse que, como mínimo, ha de ser:

$$\mathcal{R} \approx 100 \left(\frac{D}{\varepsilon} \right)^{1/6},$$

que nos da el conjunto de valores de \mathcal{R} que se representa en el gráfico número 4.

En resumen, las normas generales de la experimentación para cauces de lecho no erosionable pueden expresarse en el siguiente cuadro, elaborado para su aplicación en la práctica del laboratorio:

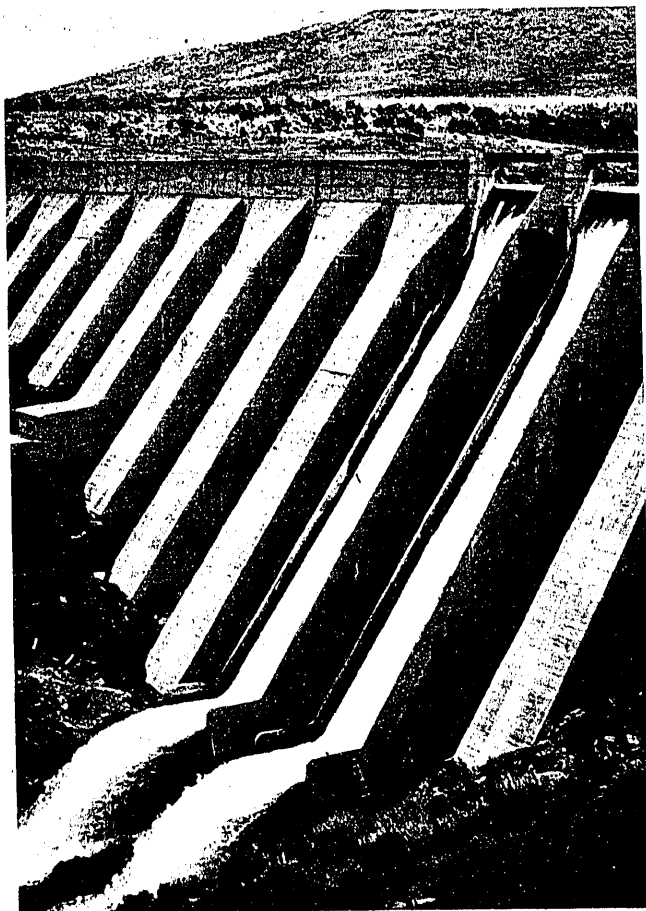
CLASIFICACIÓN DE LOS FENÓMENOS HIDRÁULICOS EN ORDEN A LA ELECCIÓN DE ESCALA DE EXPERIMENTACIÓN

| | | | | | |
|--|---|--|---|---|--|
| Fenómenos en que la fricción interviene en menor grado. Vertederos, trampolines libres, chorros. | La semejanza, según $\lambda_v = \lambda^{1/2}$, se cumple satisfactoriamente. | | | | |
| | | | | | |
| Fenómenos en que la fricción interviene de manera importante. | Fenómenos con pérdida de carga localizada. Ensanchamiento, estrechamiento, codos, resaltos. | La semejanza se consigue si la configuración turbulenta es semejante en modelo y realidad, lo que exige que \mathcal{R}_m sea, por lo menos, | 10 ³ a 10 ⁴ para separación en contornos angulosos. | | |
| | | | 10 ⁴ a 10 ⁵ Idem en contornos curvos. | | |
| | Fenómenos con pérdida de carga continua. | El parámetro de fricción varía considerablemente desde el prototipo al modelo. | Régimen V. | { Tubos capilares. Oleoductos. | { La semejanza exige la identidad de \mathcal{R} . En general, no es aplicable la escala de Froude. |
| | | | Régimen TI ₁ . | | |
| | | El parámetro de fricción es igual o comparable en el prototipo y el modelo. | Régimen TI ₂ . | { Los resultados deben ser rectificadas analíticamente. Cauces artificiales de lisura media. | { Grandes cauces artificiales lisos. Semejanza relativamente aproximada, con independencia de \mathcal{R} . |
| | | | Régimen TR. | | |

La exposición general que hacemos señala las limitaciones prácticas de la aplicación, que, como dice el Sr. González Quijano en el trabajo citado, "ponen a prueba la sagacidad del experimentador encargado de preparar el ensayo e interpretar debidamente los hechos observados"; entre los recursos utilizables está el de "generalizar el concepto de la semejanza para aumentar el número de variables disponibles"; así, por ejemplo, "puede considerarse la vertical como dimensión aparte y aplicarle una relación de semejanza especial, con lo que, sin necesidad de exagerar las dimensiones horizontales, se podría evitar que las velocidades caigan por debajo del límite que asegura el establecimiento del régimen hidráulico".

Por lo demás, y a nuestro propósito, basta lo dicho para dar una idea acerca de la complejidad que en el solo aspecto de la elección de escalas presenta la experimentación hidráulica, que por esto exige determinaciones previas deducidas de la teoría general y de la particular experiencia.

El olvido de tales reglas o su errónea interpretación pueden hacer estéril la simple buena voluntad; esto, tanto si se trabaja sobre modelos excesivamente pequeños, perturbados por la viscosidad, como si, persiguiendo el experimentar sobre un modelo *grande*, se sacrifica la uniformidad y duración del ensayo y la adecuación proporcional de los medios de regulación, observación y regis-



Aliviadero de la presa de Riofrío. (Abastecimiento de aguas de la ciudad de Segovia.) Año 1947.

Vertedero sobre dos contrafuertes de la presa terminados en trampolines de lanzamiento. Fenómeno de ondas en el canal sin disipación de energía prácticamente. Escala, 1 : 50. $R = 120\,000$. Semejanza perfecta.

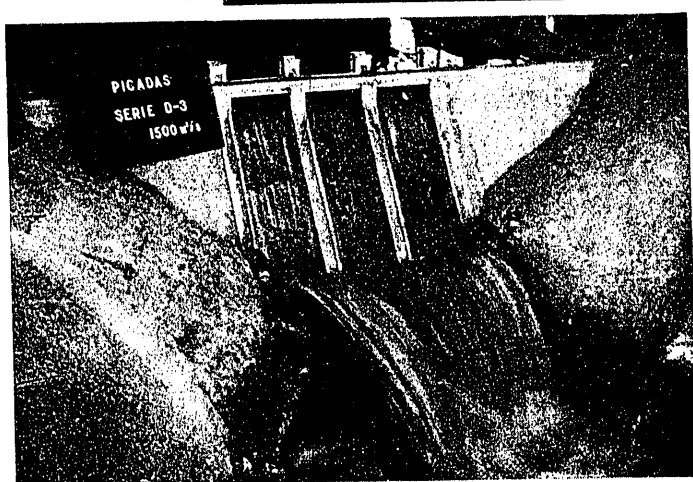
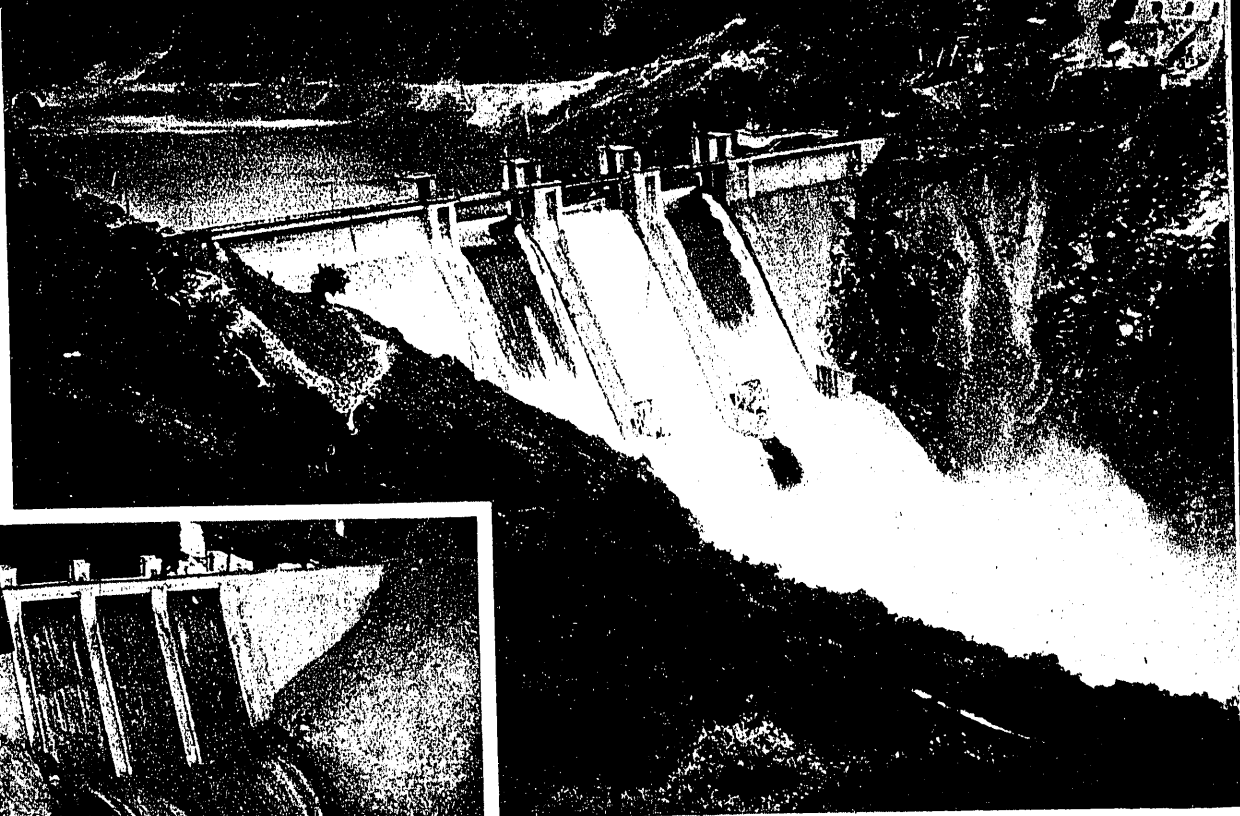
(La fotografía del modelo corresponde a una variante estudiada.)

tro, con lo que se pondría en grave riesgo la total validez de la experimentación. Con la precisión y sagacidad que caracterizan toda su obra, dice el maestro González Quijano: "Cuanto más pequeña sea la escala, el modelo será más manejable y la experimentación más cómoda, pero los errores que se cometieran en la medida vendrían afectados, al traducirse a la realidad, por un multiplicador mayor. No quiere esto decir que, en todo caso, a la mayor escala corresponde la mayor precisión, pues al tener que manejar grandes volúmenes de agua las medidas se dificultan, y en cada caso habrá un límite que será el más conveniente a este efecto".

Por esta razón, habida cuenta de la modestia

de nuestras instalaciones del laboratorio, hemos preferido, en general, utilizar modelos de tamaño moderado, si bien procurando en todo caso el cumplimiento de las condiciones mínimas de escala, según se exponen en el cuadro de la página anterior, y los resultados pueden calificarse de satisfactorios, como hemos comprobado hasta la fecha en todos aquellos casos en que la terminación de la obra nos lo ha permitido y demuestran las fotografías que, tomadas del modelo y de la realidad, ilustran este artículo.

El servicio de nuestra economía nacional, dentro de cuya general modestia es notoria la importancia — y la necesidad — del programa de obras hidráulicas, el coste considerable de la ins-



Aliviadero de la presa Las Picadas (Saltos del Alberche, S. A.) 1950. Presa aliviadero de tres vanos independientes, terminados en trampolines cilíndrico el central y helicoidales los laterales, para centrar el vertido en un cauce estrecho. Escasa disipación de energía. Semejanza perfecta. Análoga observación a la de las fotos de Las Conchas y Venda Nova. Escala, 1:100. $R = 140\,000$.

talación de un laboratorio bien dotado, la necesidad de especialización y práctica del personal, son todas razones que aconsejan la concentración del esfuerzo para la pronta realización del gran laboratorio, anejo a la Escuela de Caminos, que proyecta el Ministerio de Obras Públicas, y que constituye una urgente necesidad de nuestra Ingeniería, así como es sumamente recomendable intensificar la colaboración con los Servicios de Obras Públicas en actuación coordinada, desde las fases preliminares del proyecto hasta la resolución, si es preciso, en obra, de detalles complementarios (*), pero siempre con unidad de direc-

(*) En esta forma hemos tenido el honor y la satisfacción de colaborar con los Servicios de la Confederación del

ción técnica y utilizando en todo momento la experiencia y responsabilidad de un personal entrenado, para evitar así improvisaciones cuyo menor daño sería la pérdida del tiempo.

* * *

Es de justicia dejar constancia de la considerable aportación a la preparación de este artículo, del Ingeniero de Caminos afecto al Laboratorio de Hidrodinámica de la Escuela, D. Rafael María Guitart, a quien queremos expresar nuestro vivo agradecimiento.

Ebro, y especialmente con nuestro querido compañero René Petit, para el estudio del aliviadero de Yesa.

De igual manera se inicia la realización de los ensayos para el Pantano de Gabriel y Galán, en colaboración con la Confederación Hidrográfica del Tajo.