

REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS

PUBLICACION TECNICA DEL CUERPO DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

DIRECTOR

D. MANUEL MALUQUER Y SALVADOR

COLABORADORES

LOS INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

SE PUBLICA LOS JUEVES

Dirección y Administración: Plaza de Oriente, 6, primero derecha.

Estudio del remanso producido en una corriente de agua al construir una presa.

La modificación que en el perfil longitudinal de la lámina de agua de un río se introduce mediante la construcción de una presa es punto menos que imposible determinarla *a priori* exactamente, pues depende de una porción de elementos sumamente variables y algunos desconocidos, cuya influencia aislada, aunque se pueda tener en cuenta al plantear la cuestión en ecuaciones diferenciales, hacen que éstas no sean integrables y, por tanto, que no se pueda llegar á la ecuación finita que prácticamente resolverá el problema.

Entre todos estos elementos hay dos cuya influencia notoria destaca sobre la de todos los demás; tales son la altura de la presa y la pendiente de la corriente, con los cuales, y suponiendo un régimen uniforme en un canal de sección rectangular constante, se han obtenido aplicando la teoría del movimiento variando las fórmulas que podemos llamar exactas. Estas fórmulas son muy complicadas y hacen que su aplicación sea difícil y laboriosa, por lo cual se han sustituido en la práctica por otras sencillas fundadas en datos empíricos relacionados con el resultado más interesante, que es la longitud de río en la cual se deja sentir la influencia de la presa.

Poirée sostiene que la longitud teóricamente infinita de un remanso no ha rebasado nunca prácticamente el punto de cota sobre la coronación de la presa igual á la altura de éste sobre el agua; supone que sin error sensible la curva de remanso es una parábola de eje vertical tangente al perfil de la lámina de agua en el punto límite anterior, y cuyo vértice es el punto más alto de la presa, parábola que puede sustituirse por un arco de círculo tangente á la horizontal en el segundo de los dos puntos anteriores y á la lámina de agua en otro punto muy próximo al primero, que se obtiene tomando sobre el perfil de la corriente, á partir de la intersección con la horizontal de la coronación de la presa una distancia igual á la de estos dos puntos.

Colombo cree que la influencia alcanza solamente hasta una cota del río igual á la de la coronación de la presa y que por tanto la forma del remanso es una línea horizontal. Funk promedia las dos hipótesis anteriores y supone el límite del remanso en una cota sobre la coronación igual á la mitad de la altura de la presa sobre el agua y que la forma de la curva es una parábola análoga á la de Poirée.

Cuando la elevación producida por la presa en el lugar de su

emplazamiento es pequeño, las fórmulas de Poirée y de Funk están de acuerdo con lo que sucede en la realidad; tanto más cuanto menor sea la altura, pero á medida que ésta aumenta, el error va siendo cada vez mayor y la curva de remanso va tendiendo á ser una línea horizontal con arreglo á la teoría de Colombo. Esto es natural y evidente, pues una presa que resalte poco sobre el nivel ordinario de la lámina de agua constituye un obstáculo para la marcha normal de la corriente obligando á ésta á verter por encima de la coronación, en cuyo punto la pendiente será nula, pero que irá aumentando paulatinamente hacia aguas arriba hasta alcanzar la del régimen uniforme, y esta variación es sensiblemente proporcional á la longitud, por lo cual resulta la curva parabólica, y aunque la corriente haya perdido su uniformidad sigue siendo continua. Ahora bien, cuando la altura de la presa es mayor ya deja de tener lugar la proporcionalidad antes citada y el aumento es sumamente lento al principio, en algunos casos insensible, y solamente en las inmediaciones de la intersección de la horizontal con la lámina de agua es cuando empieza el crecimiento rápido. Esto es debido á que una presa de altura no es un sencillo obstáculo para la corriente, sino una verdadera obstrucción de ésta, y el remanso se convierte en un depósito ó embalse de superficie libre horizontal que se enlaza con la inclinada del río por medio de una curva, y la corriente pierde su continuidad, originándose aguas abajo de la presa otra de régimen completamente nuevo, que sólo depende del objeto á que se destine dicha presa.

No obstante todo lo dicho, se acostumbra en la práctica á aplicar cualquiera de las tres hipótesis anteriores sino de una manera arbitraria, fundándose en razones de otro orden muy diferente; así, por ejemplo, se adopta por algunos la de Poirée, por fijar ésta un límite máximo que pone al autor del proyecto al abrigo de todas las reclamaciones posibles, mientras que otros optan por la de Colombo porque así puede tener el máximo de altura en la presa, y, por tanto, mayor utilidad en el aprovechamiento á que se destina, y, por último, la mayoría, siguiendo un criterio ecléctico, emplean la fórmula de Funk por ser un promedio entre dos límites extremos. Pero hoy día, en que los grandes saltos de agua están adquiriendo excepcional importancia y ha habido necesidad de variar la legislación, considerándolos de derecho como obra de utilidad pública, puesto que siempre lo han sido de hecho, y se concede la expropiación forzosa á los terrenos inundados por el remanso de la presa, así como á los pequeños aprovechamientos en él comprendidos, resulta que los proyectos se hacen en otras condiciones procurando buscar siempre el máximo de utilidad con la mayor economía posible, libres por

completo de los entorpecimientos muchas veces insuperables que antes podían poner los dueños de terrenos y de aprovechamientos contruados ó en proyecto, por lo cual un elemento tan importante como es el conocimiento del remanso de la presa no debe fiarse á fórmulas empíricas tan contradictorias y arbitrarias como las que hemos citado, sino que debe hacerse un estudio todo lo más racional posible, aunque dentro de la certeza de que no puede ser nunca exacto. Esto, como vamos á demostrar á continuación, no es tan difícil como parece á primera vista después de leer las fórmulas exactas, que son las que obtiene Flamant en su tratado de Hidráulica.

La fórmula que se obtiene aplicando la teoría del movimiento variado á un canal rectangular de sección constante de pendiente uniforme i de altura H de su lámina de agua es

$$\frac{is}{H} = \frac{h_0 - h}{H} + \left(1 - \frac{\alpha i}{bg}\right) \left[\psi\left(\frac{h}{H}\right) - \psi\left(\frac{h_0}{H}\right) \right] \quad (1)$$

En la cual s y h representan, respectivamente, la distancia según la pendiente del canal de un punto cualquiera al emplazamiento de la presa y la altura sobre el fondo, h_0 la elevación del agua producida por la presa, α y b dos coeficientes análogos á los de Bazin en el cálculo de canales, g la aceleración de la gravedad, y, por último, ψ representa simbólicamente una función cuya expresión es

$$\psi(x) = \frac{1}{6} \log \frac{x^2 + x + 1}{(x-1)^2} - \frac{1}{3} \sqrt{3} \arccot \frac{2x+1}{3} \quad (2)$$

Con la cual Bresse ha formado una tabla de valores que figuran al final de su tratado de Hidráulica y en el de Flamant (tabla XIII), lo cual facilita extraordinariamente las aplicaciones.

La fórmula (1) se puede simplificar haciendo las sustituciones siguientes:

$$\frac{s}{H} = y \quad \frac{h}{H} = x \quad 1 - \frac{\alpha i}{bg} = K$$

Con lo cual se convierte en

$$iy = x_0 - x + K [\psi(x) - \psi(x_0)]$$

Que teniendo en cuenta que en la práctica K difiere poco de la unidad, podemos escribirla en la forma siguiente:

$$y = \frac{x_0}{i} - \frac{\psi(x_0)}{i} - \frac{x}{i} + \frac{\psi(x)}{i}$$

Haciendo respectivamente

$$C = \frac{x_0}{i} - \frac{\psi(x_0)}{i}$$

$$y_1 = -\frac{x}{i}$$

$$y_2 = \frac{\psi(x)}{i}$$

tenemos

$$y = C + y_1 + y_2 \quad (3)$$

que nos dice que la curva de remanso para una pendiente determinada i se obtiene, sumando á una constante C , cuyo valor depende exclusivamente de la elevación de la presa, dos funciones de x , que son las mismas para todos los casos.

Si sobre dos ejes coordenados, OX y OY (fig. 1.^a), representamos gráficamente las funciones anteriores, tendremos que la y_1 corresponde á la recta AB , que pasa por el origen y tiene una inclinación i con el eje OY , y la y_2 á la curva CD asintótica, con

relación al eje OX y á la recta EF paralela á OY , cuyo trazado puede hacerse sin dificultad por medio de la tabla de Bresse; después de multiplicar sus abscisas por el número, $\frac{1}{i}$, y sumando las de las dos funciones y_1 é y_2 , tendremos, en definitiva, la curva MN , que suponiendo á AB horizontal, nos da la forma general de la curva de remanso para la pendiente i (*).

Para una determinada altura de presa $x_0 = OP$, no tendríamos más que trasladar horizontalmente la curva MN paralelamente á sí misma, hasta que el punto Q de intersección de ésta con la paralela á OX , trazada por P , se confunde con este mismo punto, lo cual equivale á añadir la constante C de la fórmula (3); pero resulta más cómodo en la práctica no cambiar de posición la curva y trasladar los ejes coordenados hasta que P se confunda con Q y el trozo de curva MN , desde este punto á la derecha, representa el perfil del remanso correspondiente á una presa de coronación Q en una corriente cuyo perfil normal es la recta EF .

Con esta figura podemos comprobar las consideraciones previas que habíamos hecho respecto á la influencia de la altura de la presa en la forma del remanso. En efecto, para valores pequeños de x_0 el punto Q ocupará posiciones análogas á la Q en la parte de la curva MN , en que su curvatura es más sensible y su separación de la horizontal Q_1H_1 es bien notoria en todos sus puntos.

Por el contrario, para valores grandes de x_0 , el punto Q , que se corre hacia la izquierda, tanto más cuanto más alta sea la presa, vendrá á la parte de curva en que ésta tiende á rectificarse, y suponiendo sea Q_2 la posición del punto, el perfil en las inmediaciones de éste se confunde con la horizontal Q_2H_2 , y la parte curva sólo se acusa en la intersección de ésta con el perfil rectilíneo de la corriente uniforme, ó sea con la recta EF .

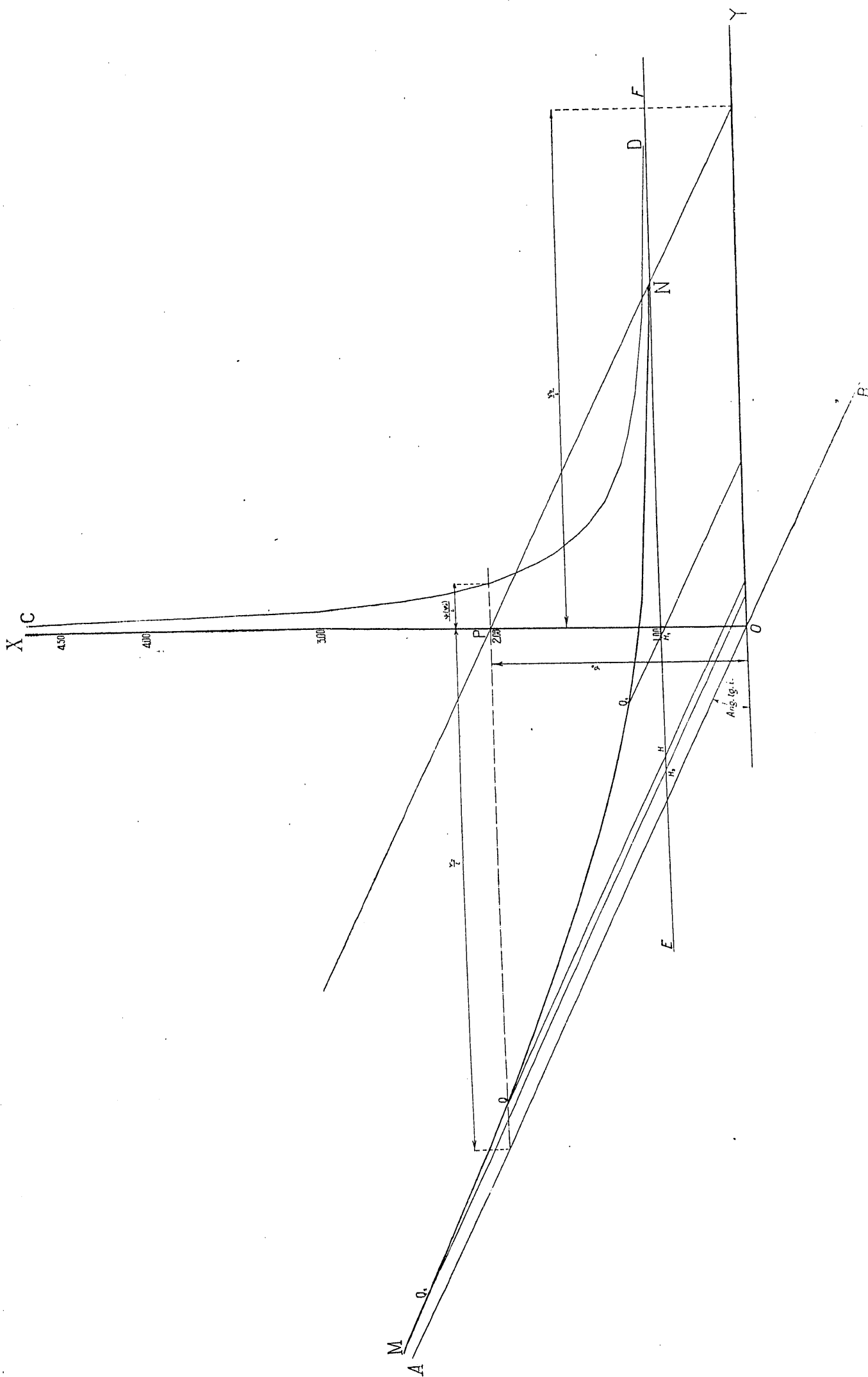
En la figura 2.^a hemos aplicado todo lo dicho á un caso particular en que i tiene por valor 0,0005 y la altura H de la lámina de agua del canal es un metro; el perfil de la corriente uniforme está representado por la recta OY , cuya inclinación con la horizontal OH es la anterior i , pero con una escala de verticales 1.250 veces mayor que la de horizontales, con lo cual la perpendicular OX á OY se confunden sensiblemente con la vertical que pasa por O , puesto que el ángulo ξ que ha de formar en el dibujo con la horizontal está definido por

$$\text{tang } \xi = \frac{1.250}{i} = \frac{1.250}{0,0005} = 2.500.000$$

Por otra parte, para medir longitudes según la dirección inclinada OY hay que medir sus proyecciones sobre OX en la escala de horizontales y dividir las por el coseno del ángulo cuya tangente es i , y como este ángulo es sumamente pequeño, su coseno es sensiblemente la unidad, y en la práctica basta, pues, con medir estas proyecciones horizontales para tener las distancias inclinadas.

Con ayuda de las tablas de Bresse hemos dibujado los perfiles correspondientes á los valores de x_0 de 2, 3,50, 5 y 10 metros, así como las parábolas de Poirée y de Funk correspondientes á los mismos, y de su observación detenida deducimos que para $x_0 = 2$, ó sea para una presa de 2 metros de altura sobre el fondo de una corriente de un metro de profundidad, ó bien para una corriente cualquiera, una presa de una altura igual al doble de su profundidad, resulta que el perfil del remanso obtenido por la fórmula de Flamant coincide sensiblemente con la parábola de

(*) Hemos dibujado únicamente los puntos de las curvas CD y MN , correspondientes á valores de x mayores de la unidad, pues los menores corresponden á los remansos por depresión.



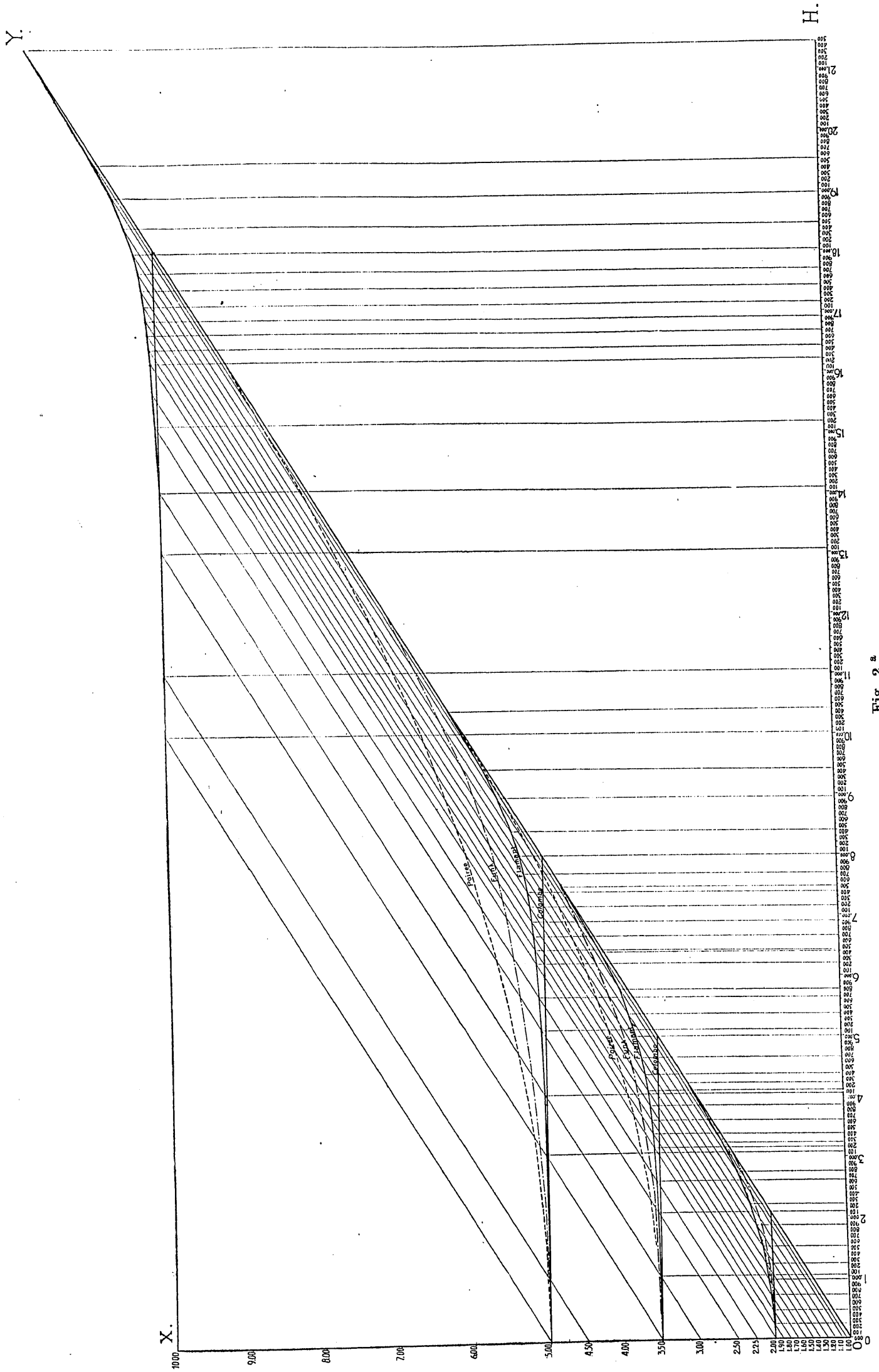


Fig. 2.^a

Poirée, quedando la de Funk por bajo. Si la altura de la presa es de 3,50 veces la lámina de agua de la corriente normal, tanto la parábola de Poirée como la de Funk dan perfiles muy distintos del obtenido racionalmente, aproximándose más el de Funk, lo cual nos dice que para algún valor de x_0 , comprendido entre los dos anteriores dicha parábola coincidirá con la curva exacta. Para alturas mayores, lo erróneo de estas parábolas resulta bien manifiesto.

Todo lo dicho anteriormente es, como hemos visto, suponiéndose un canal de sección rectangular constante y dependiente uniforme, y sería muy necesario estudiar además, para las aplicaciones, la influencia que pueden tener las variaciones de sección y de pendientes, la inclinación de las márgenes, las curvas, la posición de las derivaciones de agua, etc., todo lo cual, si se quisiera tener en cuenta al plantear el problema teóricamente, lo complicarían extraordinariamente; y aun suponiendo que se pudiera integrar las ecuaciones diferenciadas, basta compensar que se tendría que llegar a una ecuación todavía más difícil que la que se llega con la hipótesis de sección rectangular constante, para desistir del intento, por lo que deben estudiarse prácticamente la influencia de todos los elementos citados, no solamente sobre obras construídas, sino sobre canales de ensayo en laboratorios de hidráulica.

Por lo pronto, en la práctica no hay más remedio que dividir el tramo de río en varios, con arreglo a la diversidad de pendientes, anchuras y profundidades que presente, procurando que en cada uno de ellos estén lo mejor definido posible estos elementos, levantando perfiles transversales y deduciendo ó midiendo el caudal ó velocidad, con lo cual tendremos datos suficientes para calcular H , y después de hacer el estudio del tramo inmediato a la presa, la elevación de la lámina de agua que resulte en su extremo producirá en el siguiente un efecto análogo al de una presa de la misma altura, y así sucesivamente.

La inclinación de las márgenes trae consigo el que al elevar la lámina de agua el aumento de la sección mojada es mayor, a igualdad de incremento de altura, que para paredes verticales, y por tanto, la velocidad y la pendiente que la produce serán menores y el perfil del remanso se aproximará más a la horizontal. En la práctica ocurre que las márgenes de los ríos tienen inclinación variable, pero generalmente creciente con la vertical, y el aumento de la sección mojada es muy rápido y la horizontalidad de la superficie del embalse se acentúa cada vez más.

Un elemento muy importante para tener en cuenta es la posición de la derivación de agua para cuyo objeto se construye la presa; generalmente, cuando ésta es de alguna altura, la solera del canal está por encima del lecho del río, existiendo por bajo de este plano una masa de agua en reposo que constituye un lecho líquido de la parte superior que está en movimiento y que seguramente su perfil será horizontal en las proximidades de la derivación y tangente al lecho del río en el límite del remanso, pero que pudiera muy bien tener puntos intermedios más bajos que la solera de la toma. La determinación de este perfil sería un punto muy importante estudiar en los Laboratorios de Hidráulica.

Por el contrario, cuando la presa no tiene por objeto derivar un canal sino regularizar una corriente y la salida de agua tiene lugar por la parte inferior, ocurre que la masa de agua en reposo (*) es la de la parte superior y la corriente pasa á través de

esta masa de agua como por un conducto forzado sobre cuya forma, así como sobre su influencia en el perfil de la superficie libre, será también muy conveniente hacer experiencias.

ANTONIO LÓPEZ FRANCO.

PROYECTO DE LEY

SOBRE

APROVECHAMIENTOS HIDROELÉCTRICOS

Á LAS CORTES

El desarrollo de los aprovechamientos de energía basados en corrientes de agua y su relación directa con servicios públicos, con explotaciones fabriles y con la posibilidad de ulteriores desenvolvimientos destinados á influir poderosamente en la actividad económica de España, reclaman, con notorios apremios, la actuación legislativa, para articular las disposiciones vigentes con realidades que están á la vista, y que no llegaron á preverse, ni podían sospecharse, cuando aquellas disposiciones se promulgaron.

No es necesario, sin embargo, al sentar las bases de la nueva legislación, alterar en sus fundamentos el régimen general existente en la materia, ni cabe vanagloriarse ahora, como en 1866, de emprender una obra nueva en su género en Europa. Otros países se adelantaron al nuestro en regular, con modernas normas, las explotaciones hidráulicas, singularmente en sus manifestaciones hidroeléctricas; pero es grato consignar que no ha sido preciso acudir á inspiraciones extrañas para elaborar el proyecto que sigue, sino que ha bastado desenvolver principios cardinales de la legislación autóctona de aguas para acomodarla á hechos que, sobrepasando sus límites, han surgido á su amparo, y por ley natural de crecimiento requieren ya régimen propio.

Los principios intervencionistas y tutelares, las facultades de expropiación, la subordinación de los intereses particulares y privados á los públicos y generales en que descansa el proyecto que el Ministro que suscribe tiene el honor de someter á la aprobación de las Cortes, lejos de constituir, como pudieran creer los no avisados, plagio ó afán de novedad, son lo tradicional y clásico en la materia en España. Así lo proclama la exposición de motivos de la primera ley que con carácter general la reguló, al afirmar que los principios de buena administración exigen la intervención del Poder público en el disfrute y aprovechamiento de aquellas cosas que, aunque son de uso común, no bastan para el consumo de todos, y añadir:

«La sociedad no puede abandonarlas al interés ó á la codicia individual sin ocasionar grandes perturbaciones en el orden público, y el fomento de la riqueza exige, por otra parte, que se dé preferencia á aquellos aprovechamientos que más pueden contribuir á ella, distribuyendo esos bienes comunes con la misma economía y acierto con que un prudente padre de familia distribuye los suyos.»

El mismo legislador de 1866, invocando remotos precedentes, recogía la implícita declaración en ellos contenida y aceptada ya entonces sin contradicción acerca del dominio público de todas las corrientes naturales, y el de 1879, cuando considera que la realización de un proyecto ha de ser provechosa á la conveniencia general, no repara en autorizar expropiaciones, y de igual suerte faculta para destruir fábricas, presas ú otras obras legalmente construídas ó para privar de riego ó de otro aprovecha-

(*) Tanto en un caso como en otro, al decir reposo queremos decir que la masa de agua no está sometida á movimiento ninguno de *traslación*, pues es evidente que sus moléculas estarán en continuo movimiento de remolinos y vibraciones.