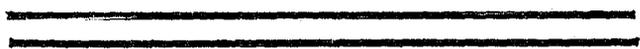


Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERIA

26

176



UNA PROPUESTA DE DISEÑO DE CANALES DE ALI-
NEAMIENTO CURVO EN REGIMEN SUPERCRITICO

ESTUDIO TEORICO Y EXPERIMENTAL.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
I N G E N I E R O C I V I L
P R E S E N T A:

JOSE DE JESUS RAMOS SALINAS



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

C O N T E N I D O.

Lista de símbolos, notaciones y abreviaturas	2
CAPITULO I	
<u>Antecedentes históricos.</u>	5
CAPITULO II	
<u>Planteamiento del problema.</u>	
Repaso sobre las ecuaciones generales del movimiento del agua	14
Enunciado de las hipótesis de trabajo	19
CAPITULO III	
<u>Descripción de las instalaciones para los ensayos y equipo de medida.</u>	22
CAPITULO IV	
<u>Descripción de los fenómenos observados.</u>	
Resultados cualitativos	33
Resultados cuantitativos	35
CAPITULO V	
<u>Conclusiones y recomendaciones.</u>	
Conclusiones de carácter general	44
Recomendaciones para el diseño. Desarrollo de un ejemplo	47
BIBLIOGRAFIA	69

LISTA DE SIMBOLOS.Notaciones y abreviaturas.

a, b, c , constantes.

a , aceleración total

a_x , aceleración en la dirección X

a_y , aceleración en la dirección Y

a_z , aceleración en la dirección Z

b , ancho de la plantilla de un canal

c , celeridad de una onda.

$\frac{D}{Dt}$, derivada total

e , base de los logaritmos naturales

E , energía específica

f , función

F , número de Froude

g , aceleración de la gravedad

h , tirante

H , carga total, energía por unidad de peso

i, j, k , vectores unitarios en las direcciones

x, y, z , respectivamente.

k_1, k_2, \dots, k_n , constantes.

L , longitud

m , coeficiente métrico

n , coeficiente de rugosidad de Manning

P , presión

Q	,	gasto volumétrico
r	,	radio
R	,	número de Reynolds
S	,	pendiente de la línea de energía
S_f	,	pendiente de la plantilla del fondo
t	,	tiempo
V	,	velocidad
V_c	,	velocidad crítica
V_n	,	velocidad media en régimen uniforme
V_x	,	velocidad según la dirección X
V_y	,	velocidad según la dirección Y
V_z	,	velocidad según la dirección Z
V	,	volumen
X	, Y , Z	, coordenadas rectangulares
α		ángulo plano, aceleración angular
γ		peso específico
δ		espesor de la capa límite
θ		ángulo plano
μ		coeficiente de viscosidad dinámica, ángulo
ν		coeficiente de viscosidad cinemática.
ρ		densidad de masa
ρ		radio de la espiral, radio de curvatura
σ		esfuerzo normal
τ		esfuerzo tangencial
ϕ		función, función potencial
ψ		función de corriente

ω , velocidad angular
div, divergencia
grad, gradiente
rot, rotacional
 ∇^2 , operador de Laplace

CAPITULO I

ANTECEDENTES HISTORICOS:

FORCHHEIMER (1)* señala que el primer autor que se ocupó sistemáticamente del estudio de los codos curvos fué J. WEISBACH, quien publicó los resultados de sus trabajos en el Lehrbuch der Ingenieurie Nr. 1 en 1845. Sus investigaciones se redujeron al estudio de la pérdida de carga en el codo, habiendo llegado a conclusiones limitadas en sus aplicaciones prácticas, pero abriendo el camino a nuevas investigaciones que se desarrollaron inicialmente en Francia con SAINT VENANT y BOUSSINESQ; en Inglaterra con J. THOMPSON, y posteriormente, en Alemania y en los EE. UU.

El razonamiento seguido para la determinación de la pérdida de carga en codos curvos, consiste en establecer que las partículas de agua, por efecto de su propia inercia, continúan el movimiento en la dirección original antes de adoptar la nueva. Al principio, solo se consideró este factor que hace aparecer una fuerza centrífuga que deforma el movimiento y se establecieron principios teóricos y experimentales para medir la pérdida de carga en el codo. Pero el hecho es mucho más rico en consecuencias. A lo largo del tiempo, se establecieron hipótesis acerca del cambio de la cantidad de movimiento de las partículas con su consiguiente cambio en la distribución de velocidades en planos normales al eje del codo. Luego se establece la aparición de torbellinos por efecto de frotamientos internos, debidos a la viscosidad, y los frotamientos del líquido contra las paredes, frotamientos que acarrearán una pérdida de energía cinética que se disipa en forma de calor. Profundizando más en la aparición de la fuerza centrífuga, se establece que las trayectorias de las partículas líquidas no solo tienden a adoptar la forma de la curva, con el consiguiente intercambio de cantidad de movimiento, sino que aparecen componentes de velocidad contenidas en el plano de la sección recta del codo. Estas componentes, sumadas a la corriente principal, conforman un movimiento helicoidal que se prolonga a lo largo de la tubería

* Los números entre paréntesis se refieren a la bibliografía citada al final.

(y no solamente en el tramo curvo como lo había supuesto WEISBACH originalmente), movimiento que será amortiguado por efecto de la misma viscosidad, después de haber recorrido una cierta distancia hacia aguas abajo del codo. La intensidad del movimiento helicoidal y la producción de torbellinos dependen esencialmente del diámetro de la tubería, de la naturaleza de las paredes, del radio de curvatura del codo y del número de Reynolds del flujo.

Este problema ha sido abordado por numerosos autores de los que consultamos y citamos algunos (2-8). No obstante, aún cuando se han desarrollado métodos teóricos y experimentales de mucho valor para estudiar el movimiento helicoidal en el interior de tuberías bajo presión, la atención se ha orientado preferentemente a la determinación de la pérdida de carga por efecto de la singularidad.

El estudio del flujo del agua en canales de alineamiento curvo debe tener otro planteamiento, pues importa tanto la determinación de la pérdida de carga, como la aparición de todos los otros fenómenos mencionados para los codos, que alteran el flujo y hacen más complejo el fenómeno.

J. THOMPSON (*) en Inglaterra trata por vez primera el flujo helicoidal al estudiar el movimiento del agua en ríos y canales en el año de 1876, proponiendo en sus hipótesis el efecto de corrientes secundarias transversales. Los estudios fueron confirmados por ENGELS, SCHOKLITSCH y otros; sobre todo, para explicar la formación de meandros en los cauces naturales, fundándose en las características tridimensionales del flujo del agua en los ríos y estableciendo el principio del no paralelismo.

Examinando las diferentes teorías relacionadas con la formación de meandros se deduce, en primera aproximación, que la erosión y el azolve en un cauce natural son función de la aceleración o deceleración de la corriente. El problema consiste entonces en determinar las condiciones de existen

(*) Citado por Ven Te Chow en su libro: *Open Channels Hydraulics.*- Mc.Graw Hill Book Co. (1959)

cia de los cambios de velocidad en una región particular de un río natural o de un canal acondicionado. Como el flujo es uniforme por hipótesis, el estudio de las aceleraciones o deceleraciones locales permanentes, hará intervenir circulaciones secundarias, es decir, pondrá de manifiesto trayectorias tridimensionales de las partículas líquidas (*)

Por efecto de una erosión o de un azolve en un río natural, o por una curva proyectada en un canal artificial, las líneas de corriente son forzosamente desviadas de su trayectoria inicialmente rectilínea, para adoptar una trayectoria curva que genera una fuerza centrífuga.

La aparición de esta fuerza centrífuga origina una deformación de la su perficie libre que se manifiesta por la formación de una pendiente transversal en el plano de agua y contribuye igualmente a la formación de corrientes helicoidales secundarias.

LELIAVSKY (11) presenta una fórmula desarrollada por F. GRASHOF, cuyo razonamiento teórico constituye una primera aproximación del cálculo del fenómeno y consiste en lo siguiente: (Fig. 4)

(*) Es muy importante hacer notar que estudios relativamente recientes llevados a cabo por SHUKRY (9) en 1950 y LEVY (10) México, 1964, muestran que las circulaciones secundarias existen en canales de alineamiento recto, aunque se manifiestan con menor intensidad que para canales curvos; sugiriendo que son provocados por las condiciones iniciales del flujo, por las condiciones de frontera y por efectos de nacimiento de turbulencias en el interior de la capa límite; estos fenómenos aún distan de ser explicados satisfactoriamente.

SHUKRY: usó para medir con una sonda esférica de su invención los componentes transversales de la velocidad. (Figs. 1, 2 y 3)

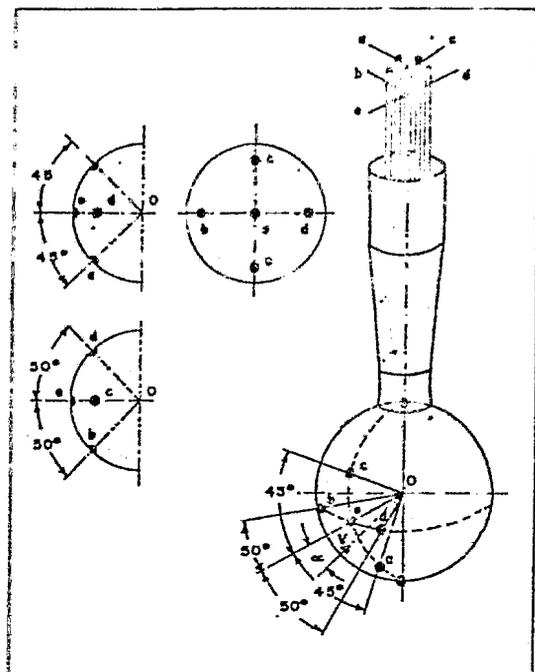


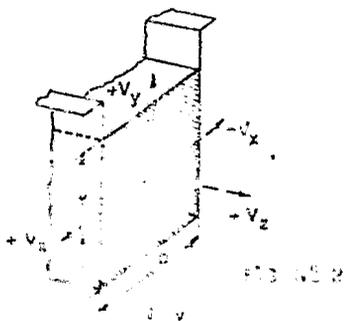
FIG. N.º 1

PITOT ESFERICO o
SONDA ESFERICA.

Para medir el módulo y la dirección de la velocidad de un movimiento tridimensional se utiliza la "sonda esférica", con la que se obtienen hasta cinco tomas de presión. Haciendo girar la sonda alrededor de su eje vertical se determina la posición en la que las tomas b y d proporcionan la misma lectura; en esta posición el plano vertical que contiene al vector velocidad coincide con el plano que pasa por las tomas a, c y e. Luego, se leen las presiones indicadas en las tomas a, b, c, e, y utilizando los diagramas construidos durante la graduación del instrumento, se determinan el ángulo α que la velocidad forma con la horizontal y el módulo de la velocidad.

Tomado de:

ENCICLOPEDIA SALVAT DE
LAS CIENCIAS. (1968).
TOMO 13, MECANICA.



SECCION RECTA DEL CANAL CON
EL ARRESTO DE LA VELOCIDAD

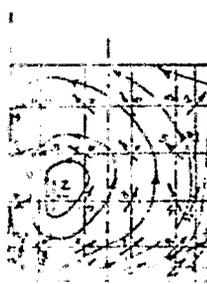
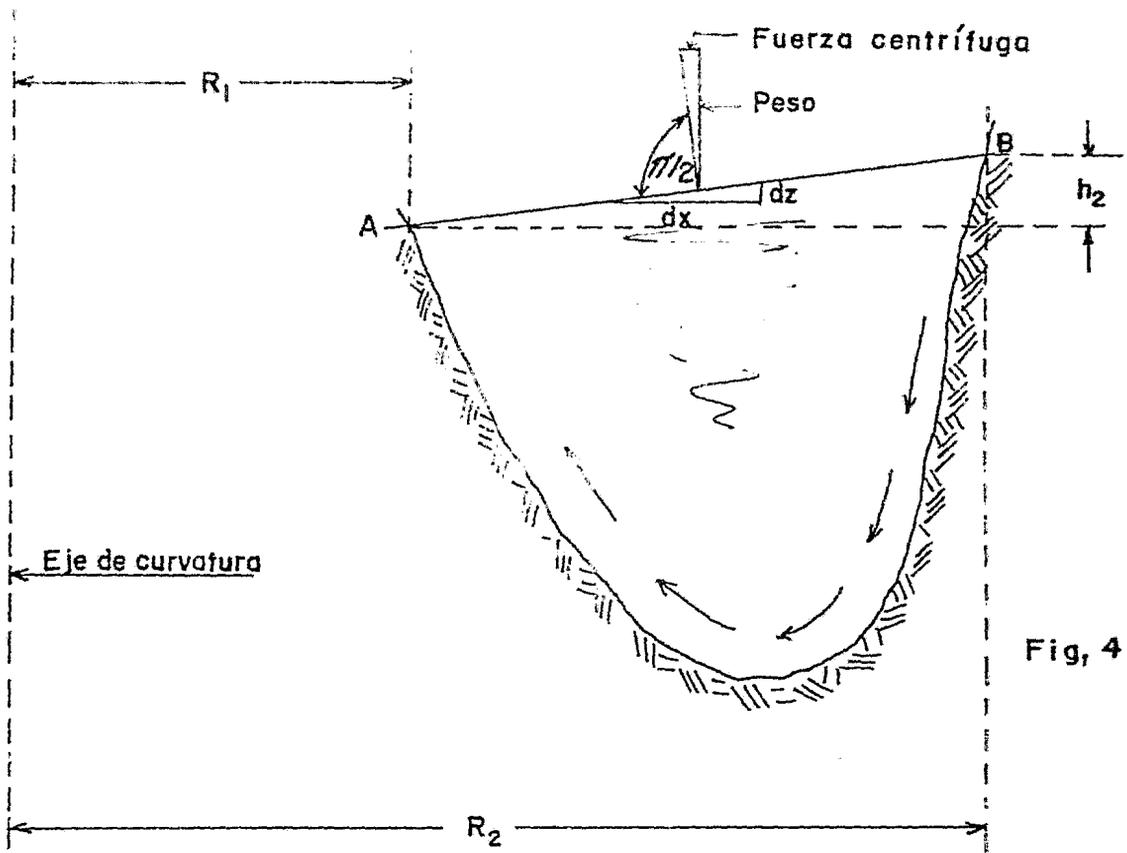


FIG. N.º 3

MAGNITUDES Y DIRECCIONES DE LAS
COMPONENTES TRANSVERSALES DE
LA VELOCIDAD (en cm/s).



Fig, 4

La fuerza centrífuga en la parte superior de la sección vale:

$$F = \frac{W}{g} \frac{Vn^2}{R} \quad \text{en donde:}$$

W = peso del agua, (ahora se diría: en el volumen de control con siderado)

g = Aceleración de la gravedad,

Vn = Velocidad superficial,

R = Radio de curvatura.

La superficie del agua debe ser perpendicular a la resultante de la fuerza centrífuga y del peso, por consiguiente, su pendiente transversal $\frac{dz}{dx}$ debe ser igual a la relación de la fuerza centrífuga al peso, es decir:

$$\frac{dz}{dx} = \frac{\frac{W}{g} \frac{Vn^2}{R}}{W} \quad \text{ó} \quad dz = Vn^2 \frac{dR}{R}$$

Integrando esta ecuación diferencial se tiene:

$$gz = Vn^2 \text{Ln} R + \text{constante}$$

La constante de integración se calcula por las condiciones de frontera en el punto A, por consiguiente:

$$\text{si } Z = 0 ; R = R_1 \quad \text{y la constante vale}$$

$$C = -Vn^2 \text{Ln} \frac{R}{R_1}$$

La ecuación de la superficie libre puede escribirse entonces:

$$Z = \frac{Vn^2}{g} \text{Ln} \frac{R}{R_1}$$

y la diferencia de niveles entre las dos márgenes sería:

$$h_{2-1} = \frac{Vn^2}{g} \text{Ln} \frac{R_2}{R_1}$$

Esta expresión, a la que se le ha concedido mucho crédito, fué satisfactoriamente confirmada por medidas experimentales efectuadas en algunos tramos curvos del río RHIN, con ayuda de escalas limnimétricas para medir los niveles, y baterías de molinetes, para las velocidades.

Debe tomarse en cuenta que las velocidades medidas, fueron exclusivamente las velocidades superficiales; sin embargo, sobre una vertical, existe un "perfil" de velocidades, pues si todas las velocidades sobre la vertical fueran iguales, el movimiento helicoidal no se formaría porque la distribución de presiones sobre la margen cóncava resultaría hidrostática.

En todo caso, la velocidad disminuye con la profundidad (*). La presión adicional debida al efecto centrífugo, disminuye entonces desde la su-

(*) Se ha comprobado experimentalmente que el máximo de velocidad, medido en la sección recta de un río natural o de un canal artificial, generalmente se presenta en la superficie libre o en las partes altas, cercanas a ella.

perficie hasta el fondo y la distribución de presiones dinámicas no es hidrostática.

El exceso de presión hidrostática es en parte el origen de la circulación transversal que, compuesta con el flujo principal, produce el movimiento helicoidal que caracteriza al flujo del agua en las curvas.

Este razonamiento, confirmado por la experiencia es solo aplicable a los regímenes fluviales (o subcríticos).

Resulta muy ilustrativo señalar que la presencia del movimiento helicoidal de las partículas líquidas no es apreciable a simple vista. Para cuantificarlo, han sido necesarios largos y pacientes estudios y el desarrollo del ingenio humano, para inventar dispositivos capaces de medir las componentes transversales del movimiento. Estos dispositivos se conocen con el nombre de corrientómetros (12), de sondas esféricas, de anemómetros de placa caliente y de velocímetros laser (13, 14). (En el capítulo correspondiente al trabajo experimental de este estudio, se describen algunas de las propiedades de estos instrumentos).

En regímenes torrenciales o supercríticos, el fenómeno relacionado con la existencia de movimientos helicoidales de las partículas y la aparición de una pendiente transversal en la superficie del agua en un canal curvo, se manifiesta con mucho mayor intensidad. Al problema de por sí complejo, se agrega la aparición de ondas transversales de gravedad, que se reflejan sobre las márgenes del tramo curvo y se prolongan extensamente en los tramos rectos que siguen a la curva.

Entre los muchos investigadores que se han ocupado del problema en los últimos treinta años, IPPEN (15, 16), KNAPP (17); DAWSON (18); KOCSE (19); GARBPECHT (20-22); KALINOUSHKINE (23); FOGGI (24); CHAO-LIN (25, 26); LIGGETT (24); POSEY (28) proporcionan elementos de análisis de gran valor, para llegar a una interpretación teórica del problema.

Además de la hipótesis de la fuerza centrífuga, se introducen otros

relacionadas con la influencia de la viscosidad sobre las paredes y el fondo, y sobre la distribución de las velocidades. En lo relativo a la producción de ondas transversales, se establecen analogías con las ondas elásticas y con las ondas de choque que aparecen en el flujo supersónico de gases:

Finalmente, por lo que se refiere a la existencia de movimientos vorticosos en el seno del agua sometida a un flujo supercrítico, LEVI, en un interesante trabajo desarrollado en el Laboratorio de Hidráulica de la Secretaría de Recursos Hidráulicos en Tecamachalco, apunta el principio de lo que puede constituir el origen del fenómeno de la producción del movimiento helicoidal cuando se generan turbulencias por efecto de la inestabilidad de la capa límite. Sus trabajos y observaciones en buen número de modelos reducidos y en canales experimentales lo conducen a expresar: "la presencia de bandas de energía reducida, uniformemente espaciadas en el chorro de un deflector, llevó a considerarlas engendradas por esas estrías paralelas que suelen ondular la superficie de toda lámina vertiente, las que a su vez resultaron, ser vórtices longitudinales superficiales". "Esos vórtices no parecen nacer cerca de la cresta vertedora, pero sí se puede apreciar, cerca del piso del canal de acceso, a cierta distancia de la cresta, la formación de filamentos vorticosos paralelos a la corriente, que nacen dentro de la capa límite". "Parece verosímil que las estrías de la lámina sean una prosecución de esos filamentos".

"De ser cierto, nos hallaríamos ante un caso en que diminutos movimientos helicoidales engendrados en el interior de la capa límite pueden transformarse en poderosos vórtices superficiales".... (Op. cit. en Bibliografía al final del capítulo. Pág. 244)

Es posible apreciar que desde el planteamiento original, en 1845, hasta la fecha, han transcurrido más de 130 años y es indudable que se han logrado progresos notables. Los propios PRANDTL y NIKURADSE, hace 50 años se ocuparon del origen del movimiento helicoidal (Nebenstromungen, secondary flow), al estudiar algunas singularidades en conductos cerrados. Muchos otros investigadores han contribuido, como sucede en todo desarrollo científico, a dibujar una o varias piezas de este complejo rompecabezas.

Para concluir con esta nota histórica (deliberadamente breve), conviene enfatizar en que solo indirectamente se ha mencionado que el número de FROUDE resulta un parámetro fundamental en todo el estudio. En efecto, a la necesidad de considerar el número de REYNOLDS como uno de los parámetros esenciales en los codos curvos, aparece la necesidad de que el número de FROUDE juegue un papel análogo en el estudio de los canales curvos. Pero no puede, y en rigor, no debe ignorarse la influencia de la viscosidad aún para grandes números de FROUDE. La reflexión de LEVI acerca de los "diminutos movimientos helicoidales engendrados en el interior de la capa límite" ha abierto un camino que será sumamente fructuoso, si se encuentran los hilos conductores de las investigaciones. Pero conviene insistir en que este trabajo esté encaminado a proporcionar criterios de cálculo a los proyectistas de un reducido número de obras hidráulicas y que, frecuentemente, se limitarán los desarrollos demasiado generales, o muy teóricos, en favor de una comprensión más rápida de algunos fenómenos y de una aplicación más práctica. En última instancia, serán los mismos utilizadores los que resulten los mejores críticos del trabajo.

CAPITULO 2

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA2.1. Repaso sobre las ecuaciones generales del movimiento del agua.

Las condiciones generales del movimiento del agua, bajo los efectos de las fuerzas de inercia, de gravedad, de presión y de viscosidad, son descritas por las ecuaciones de NAVIER-STOKES, cuya expresión reducida tiene la forma:

$$\frac{DN}{Dt} = f - \frac{1}{\rho} \text{grad } p + \nu \nabla^2 N \quad (1)$$

El símbolo $\frac{DN}{Dt}$ es una derivada total y representa la aceleración sustancial de la partícula; f es la acción de las atracciones o fuerzas de cuerpo; ρ es la densidad de masa del agua; p es la presión; ν es la viscosidad cinemática del agua y el símbolo ∇^2 es el operador de Laplace, aplicado aquí a la función velocidad N .

Para apreciar los detalles que define la ecuación (1), conviene descomponer la velocidad N en sus proyecciones N_x , N_y , N_z , sobre un sistema de ejes trirrectangulares; conviniendo en que el eje Z , ascendente, se orienta según la vertical del lugar, podemos escribir:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_x}{\partial t} + N_x \frac{\partial N_x}{\partial x} + N_y \frac{\partial N_x}{\partial y} + N_z \frac{\partial N_x}{\partial z} = \\ = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 N_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 N_x}{\partial z^2} \right) \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_y}{\partial t} + N_x \frac{\partial N_y}{\partial x} + N_y \frac{\partial N_y}{\partial y} + N_z \frac{\partial N_y}{\partial z} = \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 N_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 N_y}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_z}{\partial t} + N_x \frac{\partial N_z}{\partial x} + N_y \frac{\partial N_z}{\partial y} + N_z \frac{\partial N_z}{\partial z} = \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g z + \nu \left(\frac{\partial^2 N_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 N_z}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

La ecuación de continuidad, que traduce la conservación de la masa y la incompresibilidad del agua:

$$\frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial N_y}{\partial y} + \frac{\partial N_z}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

junto a las tres ecuaciones anteriores, permite establecer un sistema de cuatro ecuaciones con las incógnitas p , N_x , N_y , N_z .

Para determinar físicamente las soluciones del sistema anterior, es necesario conocer, además, las condiciones iniciales en que se desarrolla el fenómeno, y las condiciones de frontera. Desafortunadamente, estas ecuaciones revisten una dificultad matemática muy grande y solo han podido ser resueltas en algunos casos particulares.

El problema que nos ocupa, tiene una dificultad adicional: la expresión de la aceleración de las partículas líquidas, debe hacer aparecer explícitamente la influencia de las curvaturas de los canales; consiguientemente, se debe presentar esa aceleración en su forma más general:

$$a = \frac{\partial v}{\partial t} + \text{grad} \frac{v^2}{2} + \text{rot } v \times v \quad (6)$$

en esta forma se distinguen:

- la aceleración local: $\frac{\partial v}{\partial t} \quad (7)$

- la aceleración convectiva: $\text{grad.} \frac{v^2}{2} \quad (8)$

- la aceleración de CORIOLIS: $\text{rot } v \times v \quad (9)$

Ahora bien, si esta aceleración total se proyecta sobre los ejes de referencia, obtenemos las componentes a_x, a_y, a_z , cuyos valores desarrollados son, respectivamente:

$$a_x = \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial x} +$$

$$+ \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) v_z - \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) v_y \quad (10)$$

$$a_y = \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial y} +$$

$$+ \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) v_x - \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) v_z = \dots$$

$$\begin{aligned}
 a_z = & \frac{\partial N_z}{\partial t} + N_x \frac{\partial N_x}{\partial z} + N_y \frac{\partial N_y}{\partial z} + N_z \frac{\partial N_z}{\partial z} + \\
 & + \left(\frac{\partial N_z}{\partial y} - \frac{\partial N_y}{\partial z} \right) N_y - \left(\frac{\partial N_x}{\partial z} - \frac{\partial N_z}{\partial x} \right) N_x \quad (12)
 \end{aligned}$$

en donde se identifican, en los segundos miembros, los términos de aceleración local, aceleración convectiva y aceleración de CORIOLIS para cada dirección.

LEVI (10) dice al respecto: "La aceleración local es la que puede observarse en un volumen de control sumamente pequeño, determinando la variación con el tiempo de las velocidades de las partículas que pasan sucesivamente por él "... La aceleración convectiva resulta de la variación en magnitud de la velocidad de las partículas a lo largo de sus trayectorias, sin tener en cuenta el efecto de cambios de dirección". "La aceleración de CORIOLIS resulta de estos últimos; por tanto suele aparecer en movimientos curvilíneos...." "Por ejemplo, un codo en una tubería provoca la aparición, en el seno del fluido que la recorre, de líneas vorticosas azimutales, y, consecuentemente engendra aceleraciones de CORIOLIS $\text{rot } \vec{v} \times \vec{v}$ en el sentido normal a la pared"....

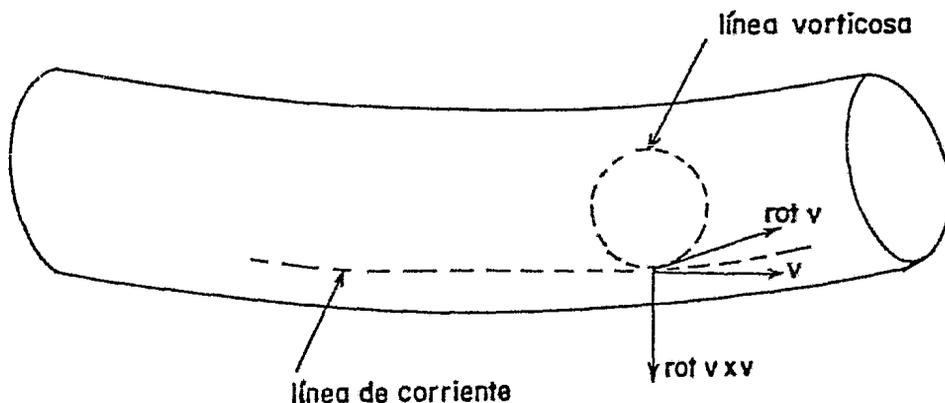


Fig. 5

Los términos entre paréntesis de las ecuaciones (10), (11) y (12) representan precisamente las componentes de $\rho \mathbf{v} \times \mathbf{v}$, según las tres direcciones del sistema de referencia.

Para la obtención de estas ecuaciones, se partió de la hipótesis de que los esfuerzos tangenciales que se producen al moverse el agua, son funciones lineales de la velocidades de deformación, de acuerdo a la ley de NEWTON de viscosidad y los esfuerzos normales son la suma de la presión de una función de las velocidades de deformación.

En las soluciones conocidas, tales como la del flujo laminar a través de un tubo circular y la del flujo en capas límite, por ejemplo, se han eliminado muchos términos en base a las hipótesis acerca de la distribución de presiones y velocidades acerca de la influencia de la viscosidad en las diferentes regiones del flujo, pues las ecuaciones (2-4), con las aceleraciones puestas en la forma (10-12) presentan dificultades matemáticas insuperables a la hora actual.

Será necesario, por consiguiente, que para nuestro problema, se introduzcan nuevas hipótesis que tiendan a eliminar algunos términos de cada ecuación con el propósito de poderlas abordar más cómodamente, pero también para que puedan resultar aplicaciones prácticas.

2.2. Enunciado de las hipótesis de trabajo.

2.21. Hipótesis acerca de las propiedades físicas del agua e hipótesis geométricas.

- a) El agua tiene una viscosidad muy pequeña y sus efectos solo se manifiestan en capas muy delgadas en las regiones de contacto con las paredes sólidas. (Los términos de la forma $\gamma \nabla^2 v$ cuentan poco comparados con los restantes).
- b) En una primera aproximación el fenómeno se estudiará en secciones geométricas cuyos cortes, perpendiculares al radio de curvatura, admiten un eje de simetría según el eje del canal. (Secciones rectangulares y, posteriormente, secciones trapeziales).
- c) La pendiente de la plantilla del canal se considerará invariable a lo largo de todo el desarrollo de la curva y de los tramos rectos de acceso y salida de la misma, con el propósito de no introducir variaciones rápidas del régimen en espacios reducidos. (Los términos de la forma $\frac{\partial v}{\partial t}$ serán prácticamente nulos.)

2.22 Hipótesis acerca de la distribución de velocidades:

- a) De acuerdo a los estudios de SHUKRY y de LEVY, el movimiento helicoidal de las partículas líquidas se presenta en canales de alineamiento recto. Por consiguiente, cualquier curvatura proporcionada al alineamiento del canal, tenderá a intensificar dicho movimiento. Sin embargo, las fórmulas del tipo MANNING, STRICKLER y otras se adaptan satisfactoriamente (i) en los tramos rectos de canales trabajando en regímenes subcríticos; se considerará entonces que la velocidad media de entrada a la curva, es la que proporciona una de esas fórmulas.

Las partículas sólidas describen trayectorias helicoidales e inestables en la sección cóncava.

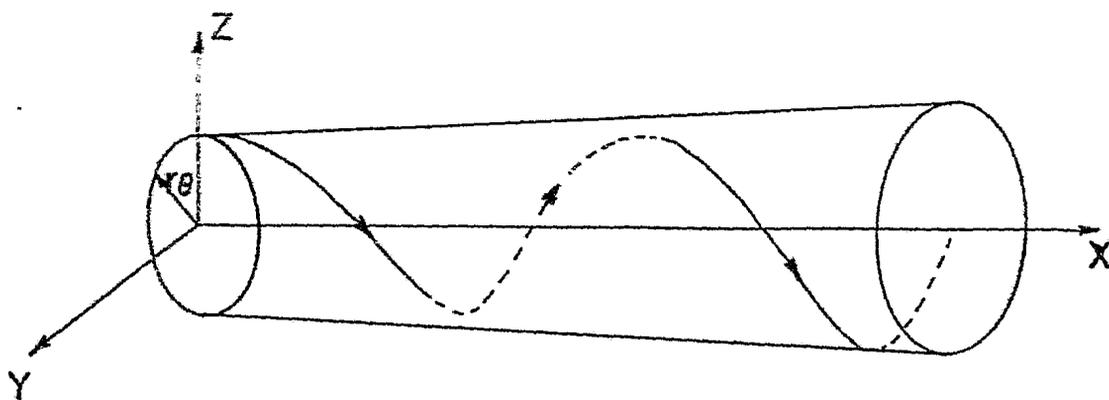


Fig. 6

La ecuación del cono para el sistema de referencia es:

$$y^2 + z^2 = k_1 (x - a)$$

en donde k_1 es una constante que depende de la abertura del cono y a es la abscisa al origen del vértice del cono.

Las hélices cónicas se generan de manera que un punto sobre la superficie del cono se desliza al mismo tiempo que gira en proporción constante, es decir:

$$\frac{\text{arco deslizado}}{\text{arco girado}} = m \quad (\text{constante})$$

Sobre un punto de abscisa dada, la sección recta del cono es un círculo de radio r ; si el punto ha de girar un ángulo α y desplazarse una distancia x , entonces:

$$m = \frac{x}{r \alpha}$$

o bien

$$\alpha = \frac{x}{m r}$$

Las proyecciones de la hélice sobre los planos XY y XZ son:

En el plano $X Y$:

$$y = r_0 \operatorname{sen} \frac{x}{m r} e^{k_2 x}$$

En el plano $X Z$:

$$z = r_0 \operatorname{cos} \frac{x}{m r} e^{k_3 x}$$

en donde r_0 es el radio de la circunferencia con que el cono corta al plano YZ y k_2, k_3 , constantes que dependen del agrandamiento que vaya a sufrir la abertura del cono cuando pasa de un tramo recto del canal, a un tramo curvo.

c) Para curvas circulares con radios muy grandes y para algún tipo de curvas espirales, $k_2, k_3 \rightarrow 0$ (k_2 y k_3 tienden a cero), es decir, la hélice tiende a ser cilíndrica.

d) Las curvas espirales de ecuación: $\rho = a e^{m\theta}$

encauzan mejor el movimiento del agua que las curvas circulares.

El trabajo experimental, que se describe más adelante, permitirá confirmar o infirmar estas hipótesis, proporcionándonos las formas apropiadas de manejo de las ecuaciones del movimiento del agua para el problema que nos ocupa. Naturalmente, podrán ampliarse o restringirse y podrán aparecer otras nuevas, sobre todo aquellas relacionadas con la forma de la superficie libre y la distribución de presiones.

CAPITULO III.

DESCRIPCION DE LAS INSTALACIONES PARA LOS ENSAYOS Y EQUIPO DE MEDIDA.

Generalidades.

El plan de trabajo para el desarrollo experimental de la investigación comporta tres etapas en las que se estudiarán familias de curvas circulares y espirales, de manera a poder medir la influencia de las siguientes variables:

- Pendiente del canal.
- Curvatura y radio de curvatura.
- Forma geométrica.
- Rugosidad de las paredes y del fondo.

Determinadas estas variables, es decir, construída la instalación que las conserva fijas, se desarrollan las experiencias para diferentes gastos, midiendo directamente los niveles de la superficie libre, las presiones que se ejercen en el fondo y en las paredes, las velocidades en diferentes puntos de cada sección transversal y calculando los parámetros adimensionales que permitan un análisis sistemático y racionalizado del fenómeno, observando además, en forma directa, el flujo del agua a todo lo largo de la instalación.

La instalación típica para cada serie de ensayos, está compuesta por un tanque alimentador provisto de un vertedor triangular con abertura de 90° , como dispositivo para el control de gastos. Este tanque a su vez es alimentado directamente de un tanque de carga constante con el propósito de eliminar las posibles fluctuaciones producidas en el bombeo. Se dispone por el momento de un caudal superior a 100 litros/segundo y es susceptible de aumentarse en caso de que el estudio lo requiera.

Del tanque alimentador y previa tranquilización, el agua se conduce por

un canal de 30 m. de longitud, sección recta trapecial con taludes 0.5:1 y pendiente del fondo $S = 0.0033$. Aún cuando este canal de alineamiento estrictamente recto pudiera suponerse que es una obra que no tiene que ver con el estudio de los canales de alineamiento curvo, constituirá un elemento de apreciación de la existencia de flujo helicoidal en canales rectos y, en tal caso, de la medida de la intensidad de dicho flujo.

Este canal descarga en otro tanque en el que puede verificarse un segundo aforo, de acuerdo a las necesidades de precisión y rango de confianza que se aprecia en el primer aforo.

De aquí se alimenta lo que hemos denominado un canal testigo. Se trata de un canal de curvatura circular en el que se busca medir los efectos del cambio de dirección, valiéndose del procedimiento clásico de tomarlos mediante curvas circulares. Está compuesto de tres tramos: el primero es un tramo recto cuya longitud dependerá de la curvatura que se imponga al segundo, uniéndose en tangente y buscando desde luego que el flujo del agua se haya normalizado para que entre sin perturbaciones al tramo curvo (o por lo menos, con el mínimo de ellas). Enseguida se desarrolla el tramo curvo y se conecta en tangente con otro tramo de salida con longitud variable, con el propósito de medir hacia aguas abajo los efectos que deja el cambio de dirección. En este canal se han colocado tomas de presión en el fondo y en las paredes en secciones transversales distantes entre ellas 1.50 m (o el arco que desarrolle la curva en 15° , según la distancia que resulte menor).

El agua que conduce este canal se vierte a otro tanque para alimentar de aquí, sin influencias que haya dejado el flujo anterior, al canal que ha sido trazado en una curva espiral logarítmica, con sus tramos rectos de acceso y de descarga, y con pendiente de fondo, forma geométrica y rugosidad idénticas a las del canal testigo.

La forma general de la ecuación de la espiral trazada sobre un plano que tiene la pendiente del fondo del canal, responde a la expresión, en coordenadas polares:

$$\underline{p = a e^{m\theta}}$$

en donde ρ es el radio vector medido a partir de un polo fijo u origen; a es un coeficiente de longitud o de extensión de la espiral, expresado en metros para que ρ quede expresado en metros; e , es la base de los logaritmos naturales; θ es el ángulo que define la posición del radio vector, expresado en radianes; m es el coeficiente del argumento y su magnitud relativa tiene influencia para que la espiral se abra más o menos aprisa. Cada vuelta completa de la espiral representa 2π radianes o 360° . Conviene hacer notar que el ángulo θ está medido en el sentido horario, pues la espiral se abre en esa dirección. Sin embargo, en nada cambia la ecuación si dicho ángulo se mide en el sentido antihorario, solamente que la espiral se abrirá en esta otra dirección.

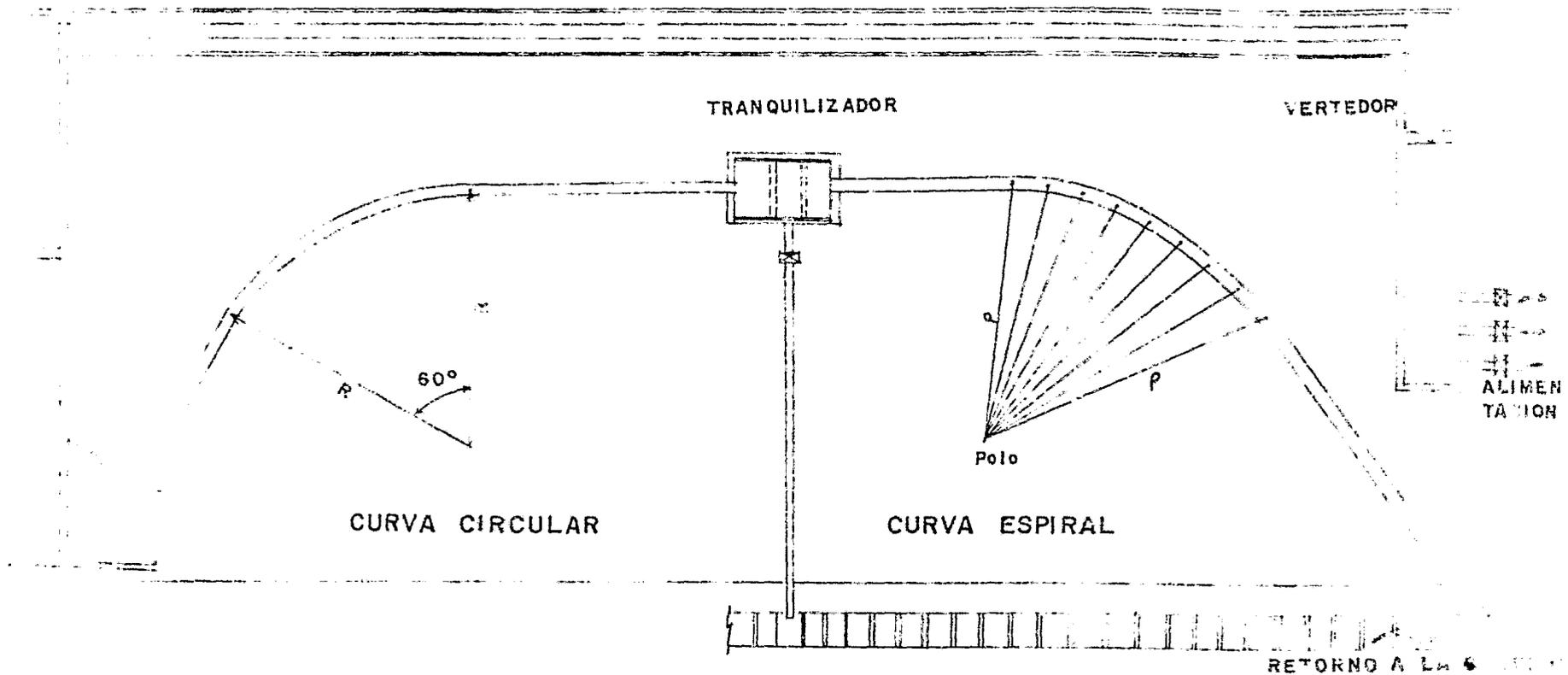
Las otras espirales analíticas de uso frecuente, tales como

la espiral de ARQUIMEDES:	$\rho = a\theta$
la espiral parabólica:	$\rho^2 = a^2\theta$
o la espiral hiperbólica:	$\rho\theta = a$

tienen propiedades diferentes a la logarítmica y no parecen ofrecer soluciones satisfactorias al fenómeno.

El agua fluye por este canal y vierte a un canal de retorno hacia la cisterna de almacenamiento, de donde se bombea al tanque elevado, cerrando el circuito.

La concepción de las instalaciones en la forma descrita, tiene la ventaja de poder realizar mediciones simultáneas en ambos canales, además de presentar objetiva y prácticamente el flujo del agua en dos conducciones que han recibido diferente tratamiento teórico para atender al mismo problema.



MODELOS DE ESTUDIO
 CURVAS CON DEFLEXION DE 60°

Fig. 7

CONSTRUCCIONES.

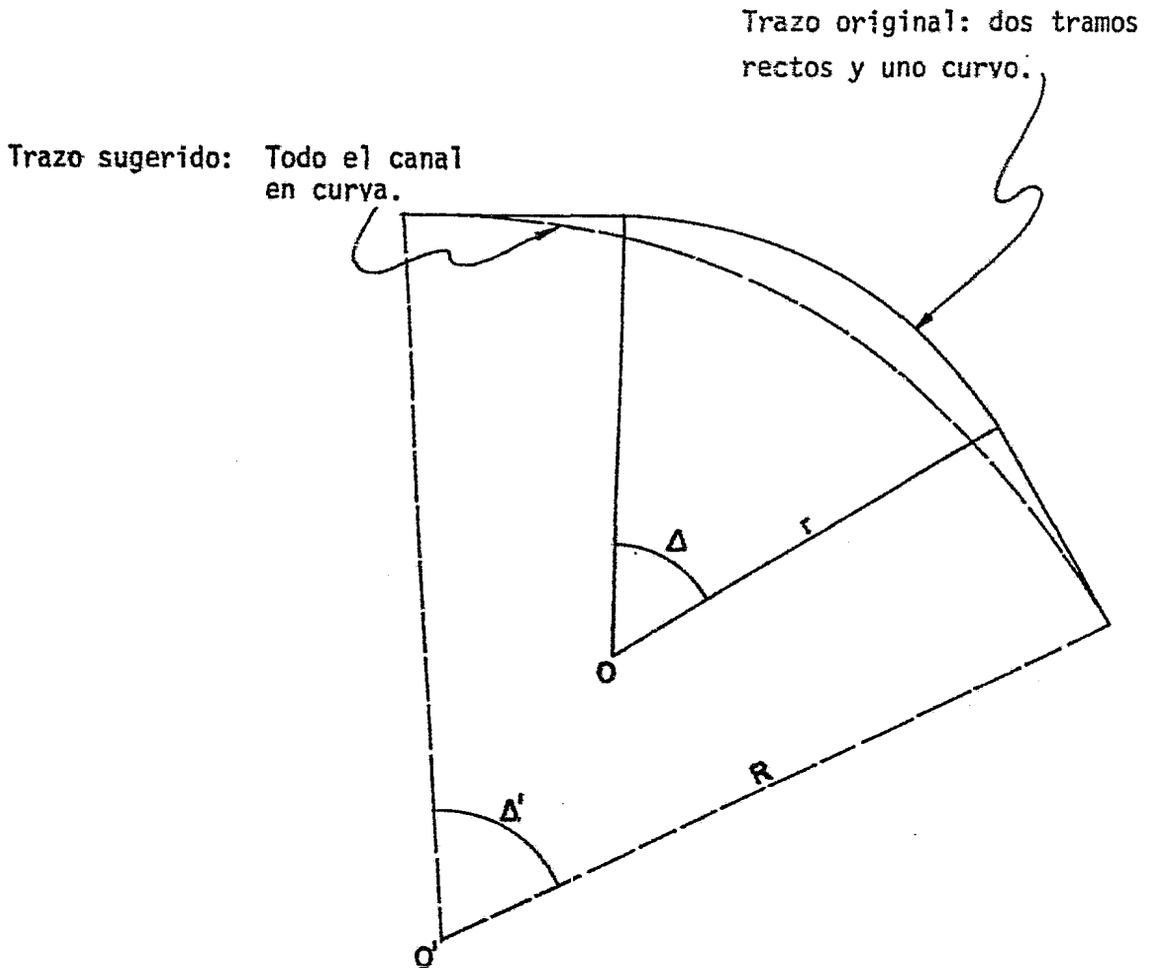
La primera serie de ensayos comprende el estudio de las familias de curvas cuya deflexión es de 60° . La instalación, como se ha mencionado antes, consta de dos canales de estudio, uno trazado en curva circular y otro trazado en una espiral logarítmica (Fig. 7)

Las curvas cuya deflexión sea inferior a 60° pueden asimilarse fácilmente a un tramo de éstas. A la fecha, se han construido 6 canales, con posibilidades de hacer variar la pendiente del fondo de manera a producir un espectro amplio de flujos, con números de FROUDE de 1 a 7

Los ensayos realizados en los cuatro primeros canales mostraron que el tramo recto de entrada tiene mucha importancia en el comportamiento posterior del flujo al provocar ondas casi estacionarias que perturban todo el movimiento y que no pueden evitarse.

De esta manera los últimos dos canales se construyeron sin el tramo recto de entrada y sin el tramo recto de salida, trazando todo el canal en curva pero tratando de conservar las mismas secciones de entrada y de salida; es decir, los mismos puntos de arranque y de desfogue y adaptándose sensiblemente al trazo original.

Este cambio acarrea obviamente una modificación de la curvatura y del radio. No obstante, con unos tanteos se llega a esta adaptación sin mayores problemas.



Los modelos de estudio han sido construídos materializando los canales con métodos y materiales de construcción denominados clásicos en los modelos hidráulicos, es decir, fundamentalmente tabiques, arena, cemento, placas de plástico, impermeabilizantes, pintura y formas de lámina de acero. Los acabados interiores de los canales fueron lijados para proporcionar coeficientes de rugosidad del fondo y las paredes del orden de 0.008 de la escala de Manning.

Las dificultades mayores se encontraron en la construcción de la curva espiral. Como no resulta posible construir de una sola vez ambos márgenes del canal, es necesario proceder por partes y de aquí se derivan algunos pequeños problemas de continuidad. Por otra parte, el empleo de diferentes

materiales como cemento y placas de acrílico, de forma plana, han hecho que se tenga que prescindir de colocar tomas de presión en las paredes del canal trazado en espiral. Aquí las medidas se harán con ayuda de tubos de PITOT. Las mismas tomas de presión en el resto de la instalación plantean ciertos problemas que debieron ser atendidos durante el proceso de construcción. Una toma de presión debe ser tan amplia como lo requiera la brevedad del tiempo de respuesta a las fluctuaciones de esa variable. Pero si esa abertura es muy grande, creará perturbaciones adicionales en el flujo del agua. Se debe conciliar entonces el tamaño de los agujeros y su número, con el rango de precisión en la respuesta. Según sea el resultado de las medidas con estas tomas de presión, circulares, con diámetro interior de 0.477 cm., podrá optarse, en nuevas construcciones, en medir esta variable introduciendo tubos de PITOT, aunque el proceso experimental resulte más tardado.

EQUIPO DE MEDIDA:

Además de las medidas de presión, es necesario desarrollar un dispositivo que permita la medición de las velocidades y de los niveles en diferentes secciones rectas, a lo largo de todo el canal.

Para la medida de las velocidades se dispone de una batería de cuatro micromolinetes del tipo BEAUVERT, de alta precisión, cuyo principio de funcionamiento es como sigue:

- Una hélice de plástico, calibrada, insensible a los choques, indeformable a las temperaturas ordinarias y de paso hidráulico de 8 cm. cuando tiene cuatro palas y de 20 cm. cuando tiene seis palas, se inmerge en el fluido en movimiento mediante un pernoñe y un soporte apropiado.
- La detección de la velocidad de rotación se realiza con ayuda de un circuito electrónico que pasa a través de la hélice y que detecta el raso, en cada vuelta, a un punto fijo de la hélice. La señal eléctrica generada por la hélice.

- Una caja receptora, asociada al captador recibe la señal que proviene del circuito electrónico y acciona un contador totalizador a razón de una undad por cada vuelta completa de la hélice.
- Con una gráfica de calibración (o con la fórmula del micromolinete) se pude calcular la velocidad del agua en función del número de vueltas regis--trado en un tiempo determinado.

Los micromolinetes se usan normalmente para medir la velocidad en una corriente que se propaga paralelamente al eje de la hélice, es decir, la velocidad que se detecta, es la velocidad según la dirección del eje del ca---nal. Las componentes transversales de la velocidad no pueden ser detectadas con este procedimiento, pero las velocidades longitudinales pueden compararse de una sección a otra y con hipótesis apropiadas, deducir la influencia de la curvatura. No obstante, estos dispositivos tienen sus limitaciones para velocidades superiores a 2.0 m/s.

Con mucha frecuencia se registraron velocidades superiores a 3.5 m/s. Entonces se procedió a medir las con tubos de Pitot simples que fueron previamente calibrados en el canal de pruebas del Laboratorio de Hidráulica de la S.A.R.H. de Tecamachalco. Como en este canal de pruebas también está limitada la velocidad del carrito en donde se calibran los tubos (o los molinetes), se procedió a una serie de pruebas de extrapolación en el canal de pendiente variable del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de Guanajuato.

Estas pruebas consistieron en lo siguiente:

Se alimentó al canal de pendiente variable con un gasto conocido y se procedió a comprobar las velocidades con los tubos de Pitot y los micromolinetes.

Para este canal de sección rectangular y paredes líclicas el gasto conocido debe ser igual a:

$$Q = A_1 \bar{v}_1$$

en donde A_1 , es el área de la sección recta y \bar{v}_1 la velocidad media del flujo.

A partir de unos cuantos tanteos se podían obtener puntos en donde las velocidades resultaban las mismas que el valor de \bar{v}_1 medidas ambas tanto con un tubo de Pitot como con un micromolinete. A partir de la localización de estos puntos, se podía aumentar el valor de la velocidad conservando el mismo gasto, aumentando la pendiente del canal. De esta manera, subía la columna de agua en el tubo, lo que representaba un aumento en la carga de velocidad. Midiendo el tirante podía determinarse una nueva área. Como el gasto permanecía constante, la nueva velocidad media podía deducirse de la expresión:

$$\bar{v} = \frac{Q}{A}$$

la que había de compararse con la velocidad calculada por la expresión

$$v = C \sqrt{2gh}$$

en la que C es el valor de la constante obtenida de las pruebas directas.

Sin grandes fluctuaciones los puntos experimentales obtenidos se alinean convenientemente con los valores teóricos esperados por la extrapolación, lo que nos permite asegurar que las medidas de velocidad realizadas posteriormente en los canales de investigación tienen un buen grado de aproximación. (Fig. 9)

En todos los registros en que se anotan velocidades inferiores a 2 m/s., éstas fueron medidas indistintamente con micromolinetes o con tubos de Pitot, habiendo encontrado afortunadamente una buena concordancia entre ellas. Cuando las velocidades fueran superiores a este valor, solo fueron medidas con los tubos de Pitot.

Las medidas de velocidad realizadas con ayuda de los micromolinetes, anotan los valores más exactos, con una excepción, a saber, en los casos en que

res de medida se encontraron fluctuaciones de esta variable que, representadas en % frecuentemente superaban al 10%, en particular, en algunas regiones en donde aparecían ondas transversales. Durante todas las experiencias también se registraron los valores mínimos, y muchas veces los valores promedio. No obstante, consideramos que los más importantes por consignar son los valores máximos, ya que de ellos dependerá la altura que se dé a la corona de los taludes.

Con el propósito de tener medidas de niveles más confiables, el laboratorio ha adquirido un limnógrafo de punta vibrante que permite el registro gráfico y continuo de los niveles.

Este limnógrafo denominado NIVIBRON 50 es un aparato de precisión que permite medidas de nivel con aproximación de 0.5 mm.

Utiliza un detector de punta vibrante, suspendido de un hilo metálico conectado a un servomecanismo que sigue el nivel del agua. Este mecanismo transmite mecánicamente la información de la cota de agua a un transductor eléctrico ligado a un registrador gráfico. Los ensayos de la próxima memoria irán acompañados de los registros gráficos hechos con este aparato.

GRAFICA DE CALIBRACION DE LOS TUBOS DE PITOT

SIMBOLOGIA

• CANAL DE CALIBRACION EN EL LABORATORIO DE TECAMACHALCO

* LABORATORIO DE HIDRAULICA DE LA UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

1.00

0.75

0.50

0.25

0

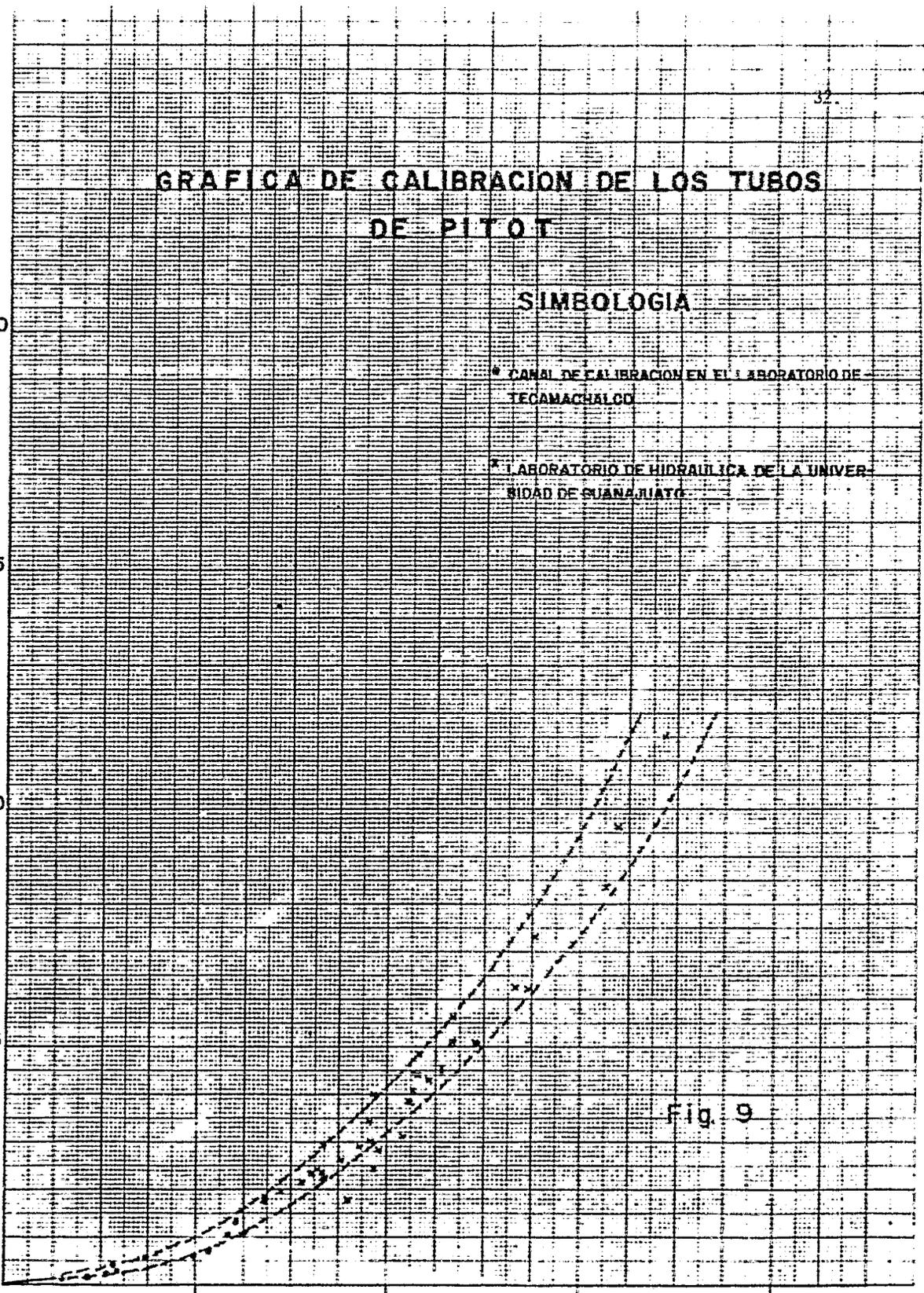
1

2 VELOCIDADEN M/S 3

4

CARGA "h" EN M.

Fig. 9



CAPITULO IV

DESCRIPCION DE LOS FENOMENOS OBSERVADOS.

1. RESULTADOS CUALITATIVOS:

En el flujo supercrítico del agua en canales de alineamiento curvo deben considerarse los efectos de las componentes transversales de la velocidad, como fué previsto en los resultados teóricos del capítulo II.

El flujo en este caso es un flujo espacial en el que las corrientes secundarias o corrientes transversales no pueden despreciarse. De acuerdo al trazo de los canales, tanto en curva circular como en una curva espiral, el agua se mueve en ambas con trayectorias cuya descripción geométrica y analítica resultan muy difíciles de precisar. La hipótesis de trayectorias helicoidales a lo largo del canal resulta cierta, pero las hélices descritas por el movimiento de las partículas líquidas son inestables en el tiempo y en el espacio.

Un hecho se muestra evidente: la componente longitudinal de la velocidad no sigue el alineamiento del canal provocando una fuerte asimetría en el flujo así como ondas transversales. Estas ondas modifican el perfil de la superficie libre y alteran la distribución de velocidades a todo lo largo del canal. En efecto, en la margen que da al extradós del canal, el agua comienza a sobreelevarse a partir del punto de curvatura, sobreelevación que llega a duplicar el valor del tirante en la región en donde la fuerza centrífuga se manifiesta con mayor intensidad.. Esta región corresponde a un desarrollo de la curva de aproximadamente 18°. El valor doble del tirante en el extradós, con relación al tirante medio que presenta el flujo al tomar la curva, no corresponde necesariamente al valor doble del tirante medio de entrada en el tramo recto.

Siguiendo siempre sobre el extradós, pasada la región de máxima fuerza

centrífuga", el tirante fluctúa sin seguir una tendencia determinada: disminuye y vuelve a aumentar pero en ningún otro lugar a lo largo del desarrollo del canal se pudo medir un tirante mayor que ese. Para efectos de redacción, llamaremos a esa región "Zona de tirante máximo en el extradós".

Conviene hacer notar de paso que las velocidades longitudinales medidas sobre la margen del extradós, aún cuando fluctuantes, tienen una tendencia a aumentar hacia aguas abajo, pero sin llegar a normalizarse el régimen. De no existir la curva, el flujo gradualmente variado parecería como el flujo en un canal con pendiente pronunciada que tendería a normalizarse después de haber alcanzado un desarrollo suficiente para hacerse régimen uniforme (Perfil de la superficie libre del tipo S2)

La existencia de la curva intensifica el valor de las componentes transversales de la velocidad que, aún cuando no hemos podido cuantificar, alteran el flujo de forma evidente.

Hacia el centro del canal, el tirante comienza a disminuir en la dirección del flujo hasta la zona de tirante máximo en el extradós. Pasada esta zona, fluctúa en torno a un valor medio que resulta siempre inferior al del tirante en el extradós.

El valor del tirante en el intradós presenta fluctuaciones que pueden ir... de 1 a 12!. Sin embargo son tirantes que nunca alcanzan el valor máximo del tirante en el extradós.

Algunas definiciones clásicas, como número de FROUDE en la sección recta del canal, dejan de tener sentido, pues al relacionar los tirantes y las velocidades correspondientes a las márgenes y al centro, se encuentran variaciones notables en el valor numérico de este parámetro para una misma sección recta. En efecto, las medidas realizadas en algunos ensayos prueban que al aplicar la definición del número de FROUDE en la margen del extradós se obtiene un valor del orden de 7, mientras que en el intradós solo se alcanza el valor 3.5.

Que el número de FROUDE en el intradós sea la mitad del valor de este parámetro comparado con el del extradós, en la misma sección recta del canal, de ninguna manera quiere decir que en una margen el régimen es la mitad de lo supercrítico que en la otra, pues se trata de un mismo fenómeno.

Hemos revisado la bibliografía reciente acerca de estudios análogos y en todos ellos se hace referencia a la velocidad media del flujo para el cálculo del número de FROUDE. En todo rigor, cuando hablamos de velocidad en el extradós o en el intradós, nos estamos refiriendo a una velocidad media en cada una de estas márgenes pues frecuentemente el valor anotado corresponde al valor promedio de las velocidades en tres o más puntos de la margen a que se hace referencia. Pero existe una diferencia tan grande en lo que pasa en ambas márgenes que parece que fueran dos regímenes diferentes, si se emplea el criterio de definición del régimen a partir del número de FROUDE.

En otras palabras, la asimetría del régimen, a pesar de la simetría geométrica, obliga a establecer criterios diferentes a los usuales, relacionados con un tirante medio y una velocidad media en una sección recta.

2. RESULTADOS CUANTITATIVOS

En cada serie de ensayos se comenzaba por establecer un régimen en el que conservaba constante al gasto.

Sobre distintas secciones del canal, previamente definidas, se hicieron medidas de velocidad y de tirantes en la margen derecha, en el centro y en la izquierda.

Las medidas de tirante se realizaron con ayuda de limnómetros, anotando los valores máximos que se presentaron. Sin excepción, en todos los lugares de medida se encontraron fluctuaciones de tirante variable que, representadas en $\%$ frecuentemente superaban el 10%, en particular, en algunas regiones en donde aparecían ondas transversales. Durante todas las expé--

riencias también se registraron los valores mínimos, y muchas veces los valores promedio. No obstante, consideramos que los más importantes por consignar son los valores máximos, ya que de ellos dependerá la altura que se dé a la corona de los taludes.

Como puede apreciarse en las gráficas en las que se reproduce esta variable en ordenadas, contra las estaciones en abscisas, aún cuando hay diferencias en los valores registrados para las márgenes y para el centro, antes del punto de curvatura de la curva, los tres valores se mantienen en torno a un valor medio que va decreciendo en el sentido del flujo (Figs. 10 y 11).

Pasado el punto de curvatura la fuerza centrífuga se deja sentir en la margen del extradós aumentando el tirante y aumentando también la velocidad. Esto solo puede explicarse y además se aprecia experimentalmente, por la correlativa disminución del tirante y de la velocidad en la margen del intradós, para una misma sección recta del canal.

Como quedó dicho previamente, el tirante aumenta en la margen del extradós a medida que se desarrolla la curva y alcanza un valor máximo, una vez que se han desarrollado unos 18° de la curva, ángulo que depende también del ancho de la plantilla del canal de experimentación.

Al analizar los registros de tirantes para toda la gama de gastos ensayada, se puede observar que esta tendencia es generalizada, es decir, el valor del gasto influye en el valor relativo del tirante (a mayor gasto, mayor tirante) pero no hace cambiar la forma de distribución en las márgenes y en el centro. A título de ejemplo se muestran gráficas de variación de los tirantes con respecto a las estaciones, dos para curva circular y dos para curva espiral. (Fig. 10-13).

Por lo que se refiere a los velocímetros, estas fueron medidas con mira de velocidad de BEAUVERT de alta precisión, pero con algunas limitaciones para velocidades suaves, por lo que se usaron.

Con mucha frecuencia se registraron velocidades superiores a 3.5 m/s. Entonces se procedió a medirlas con tubos de Pitot estables que fueron previamente calibrados en el canal de pruebas del Laboratorio de Hidráulica de la S.A.R.H. de Tecamachalco.

(Ver más atrás: Equipo de medida)

Se cuenta con registros de velocidades longitudinales y tirantes para 17 secciones rectas a lo largo del desarrollo de 6 canales diferentes, con pendientes longitudinales de la plantilla del fondo de 0.03; de 0.10 y de 0.14. Para cada sección recta se hicieron medidas de esas variables en ambas márgens y en el centro. Las fluctuaciones de la velocidad sobre una misma vertical mostraron ser menos importantes que las variaciones de esta variable cuando se pasa a otro punto (u otra vertical) en la misma sección recta del canal. En las bitácoras de registro se dan medidas para más puntos de los tres que se describen en las tablas A, B, C y D que acompañan a este escrito solo a título de ejemplo.

Al analizar los resultados de los experimentos se puede señalar que los canales con trazo en espiral reproducen condiciones de flujo mejor variadas que los canales trazados en curvas circulares. Esta afirmación se puede apoyar en el hecho de que al comparar las medidas de los tirantes en ambas márgens existen diferencias que pueden estimarse proporcionalmente de 3 a 1 y excepcionalmente de 4 a 1 en el canal de trazo espiral, mientras que estas diferencias son comunes y a veces sobrepasan esta proporción en los canales trazados en curva circular. No obstante hay que aceptar que el trazo espiral no consigue normalizar el régimen, entendiéndose por normalización del régimen el hecho de obtener tirantes iguales en ambas márgens.

Por otra parte, los dos canales trazados todos en curva, es decir, sin la tangente de entrada, proporcionaron una ligera turbulencia en el funcionamiento global del sistema, que puede asociarse al comparar las medidas de los tirantes a lo largo del desarrollo de los canales.

contrarrestar el efecto de la fuerza centrífuga sería la de proponer una sobre-elevación en la plantilla en el lado de la margen del extradós.

Hemos hecho lo anterior en dos de los canales de prueba (curva circular y curva espiral; pendiente del fondo $S = 0.14$) y, desde luego, hemos apreciado una mejoría en el flujo, en particular, para gastos importantes en el canal de pruebas (del orden de 40 l/s.) Pero esta mejoría podría no representar ventajas desde el punto de vista constructivo, pues hay que trabajar en otra forma las plantillas de los canales.

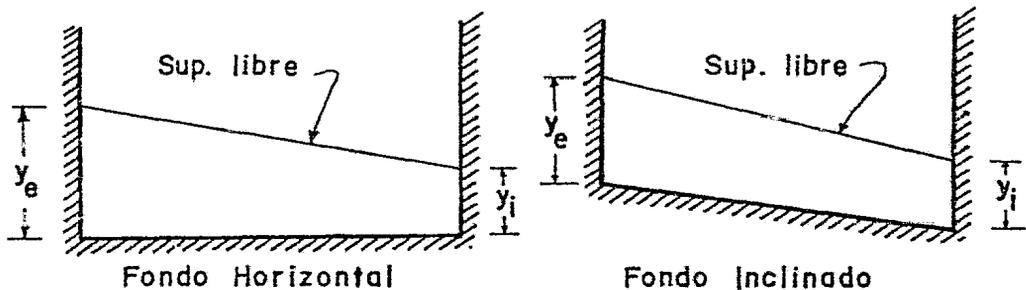


Fig. 14

Al arreglar la plantilla con una sobre-elevación en la margen del extradós (o descendiendo la margen del intradós) el flujo del agua presenta menos diferencias relativas de tirante entre ambas márgenes. Pero la margen del extradós debe tener una altura igual a la suma del tirante, más la sobre-elevación, más el bordo libre; en todo caso podría preverse, desde el punto de vista constructivo, dejar las excavaciones más profundas del lado del intradós.

Los fenómenos descritos son producto de la observación y medida sistemáticas de una gran cantidad de experiencias. Desafortunadamente hay variables que no hemos podido medir por falta de instrumental apropiado y que seguramente podrían aclarar el problema y obtener nuevas experiencias, o aprovechar mejor las ya hechas. En efecto: ¿cuál podrá ser la intensidad de la fuerza centrífuga? ¿De qué magnitud son los componentes transversales de la velocidad?

Los efectos de cada una de las variables, medidas correctamente en los casos experimentales, o en los prototipos construidos, se podrían verificar y rectificar las hipótesis de trabajo.

curva circular

$Q=37,2 \text{ l/s}$

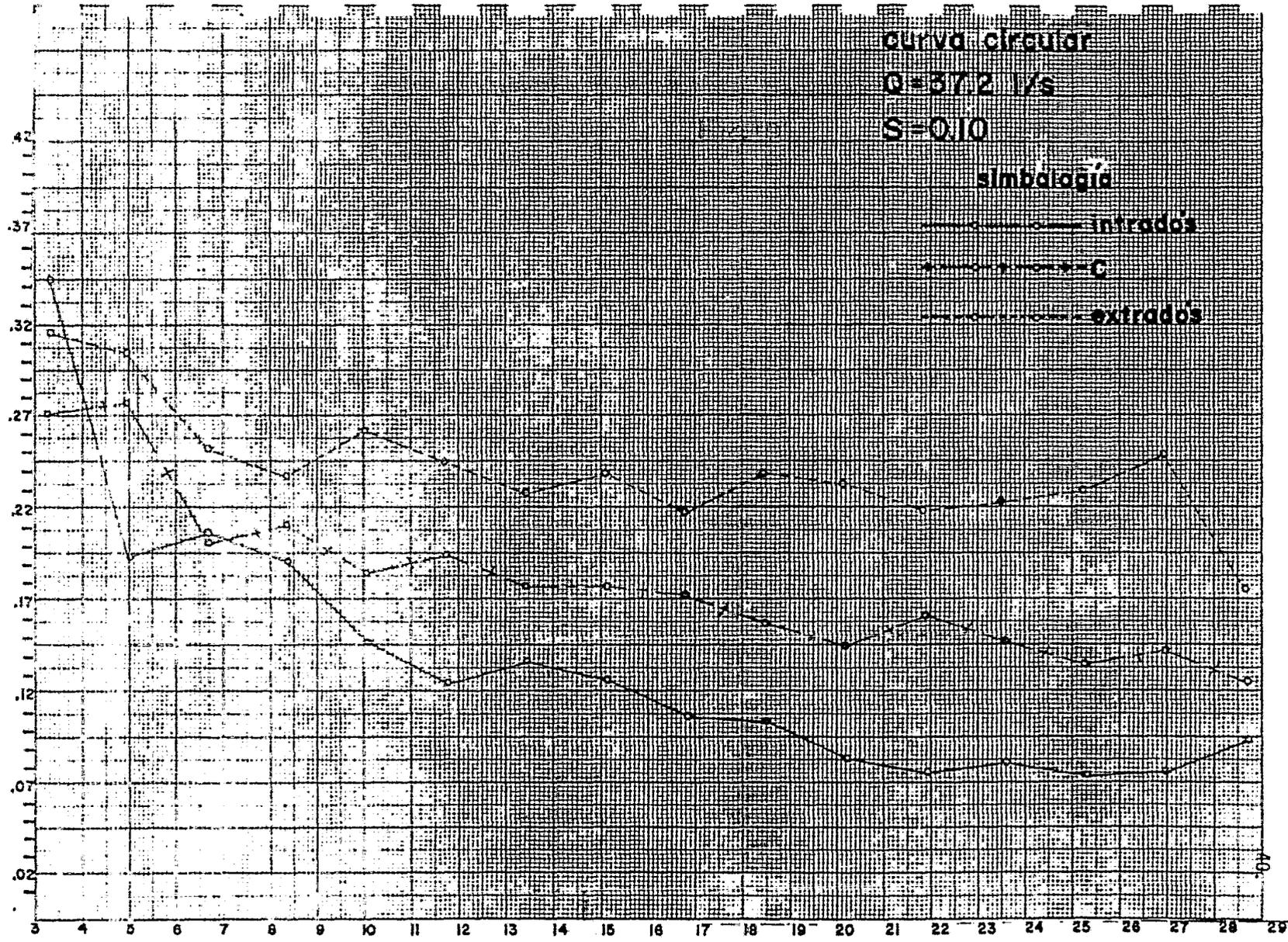
$S=0,10$

simbología

intradós

C

extradós



curva circular

$\Omega = 50.6$ 1/s

$S = 0.14$

simbología

—○— intrados

—●—

—△— extrados

y/b

.35

.30

.25

.20

.18

.10

.05

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

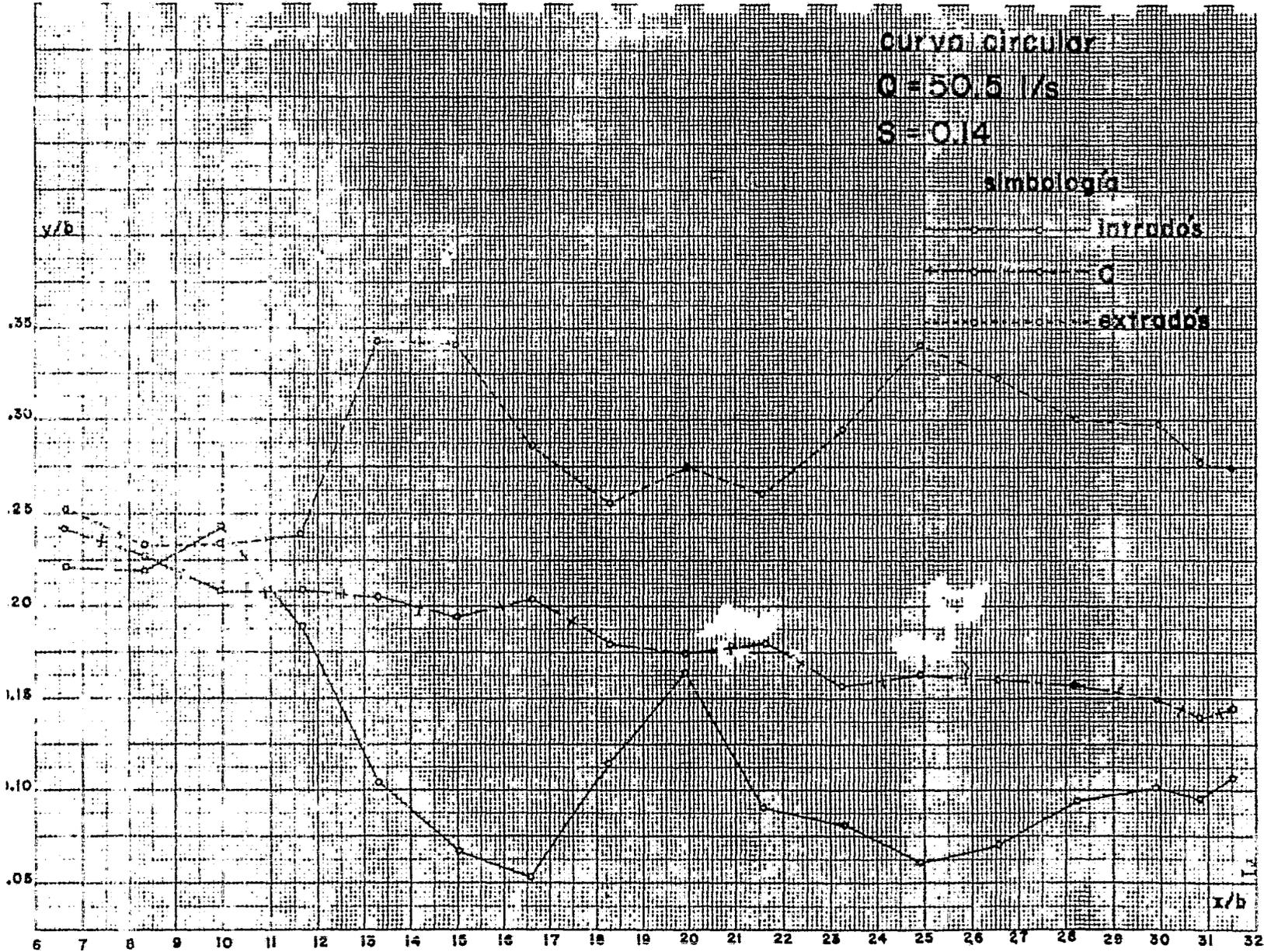
29

30

31

32

x/b



curva espiral

$Q = 36.9 \text{ l/s}$

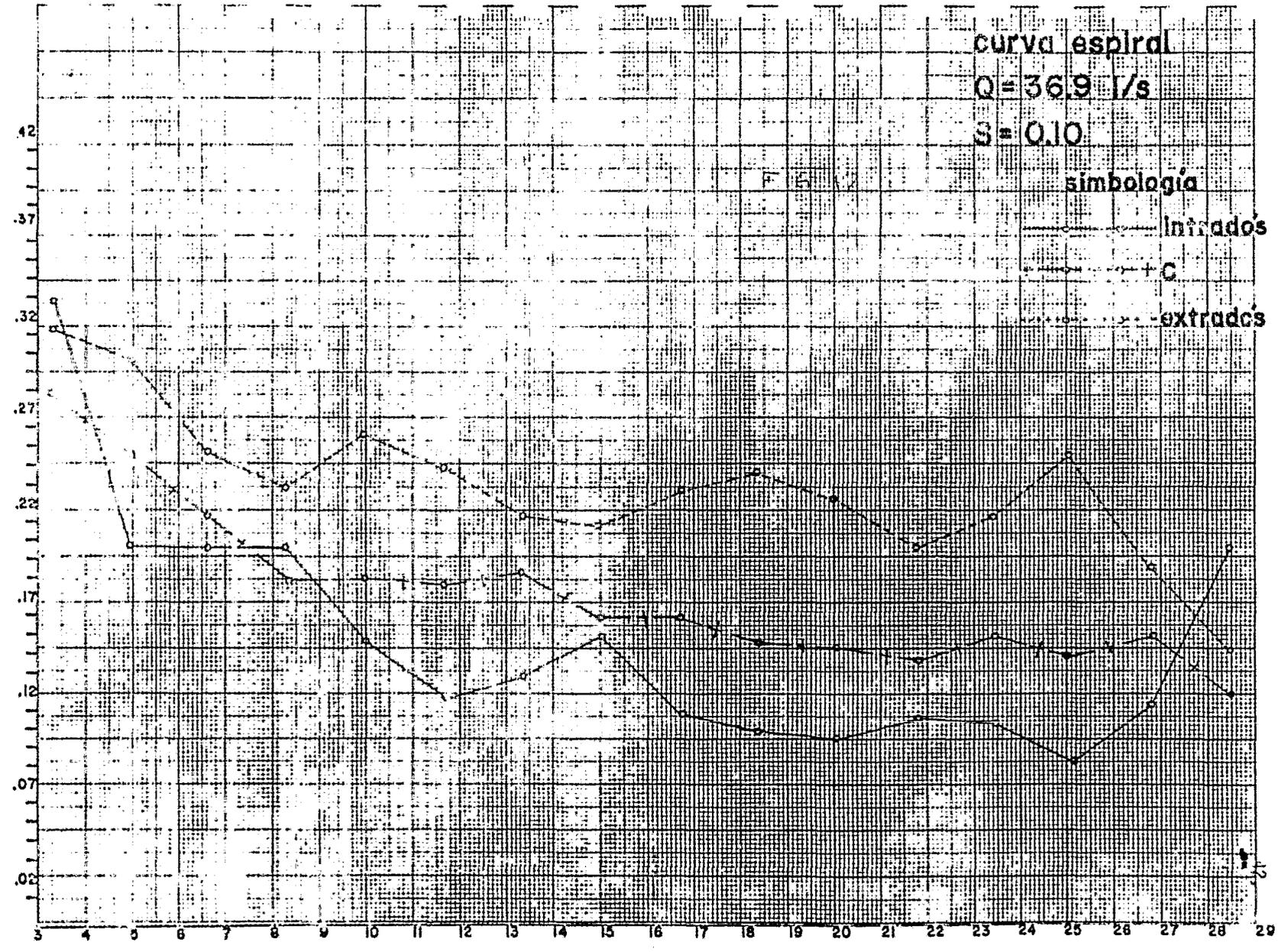
$S = 0.10$

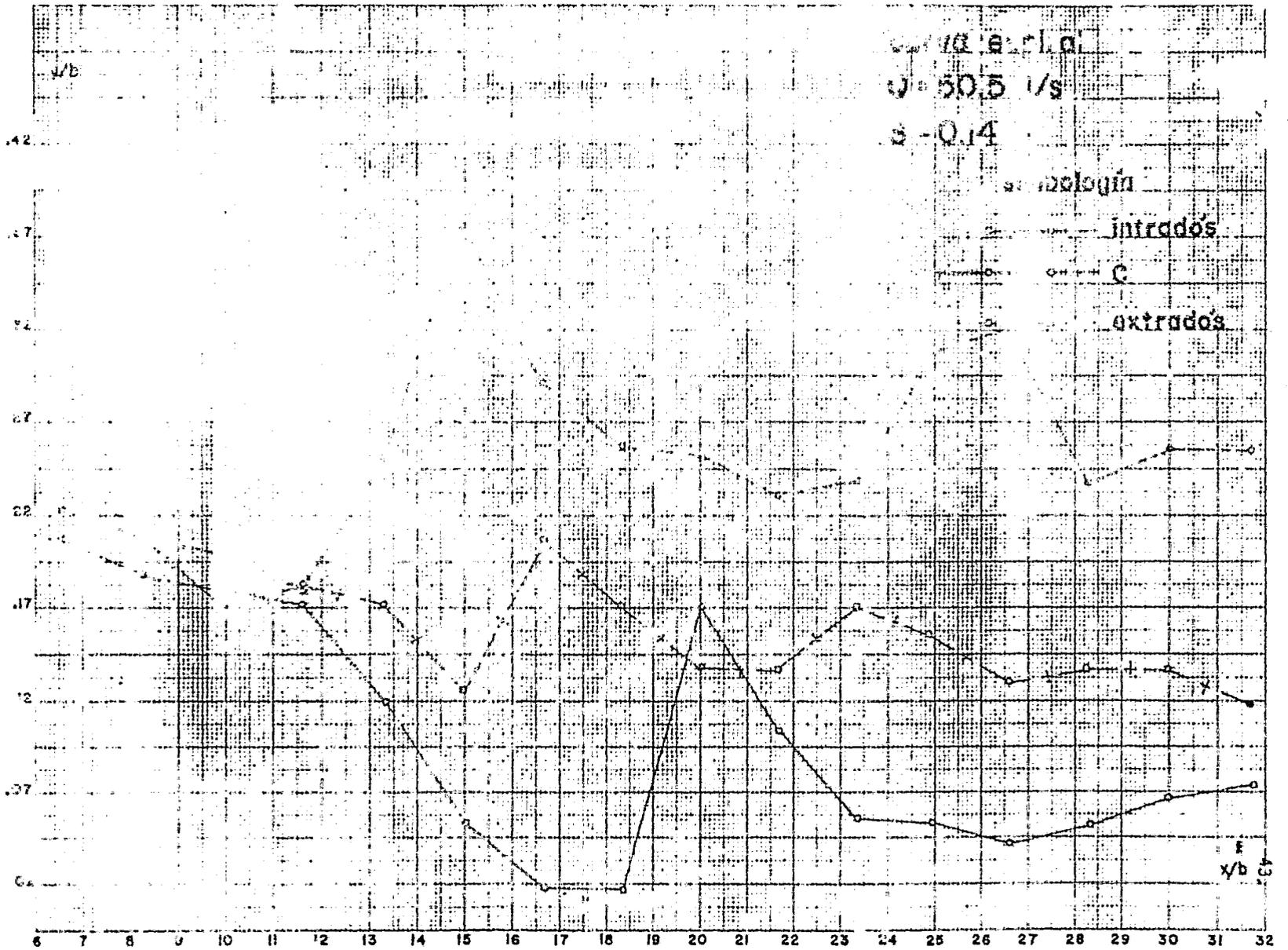
simbología

—○— Intradós

—+— C

—x— extradós





CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. CONCLUSIONES

El flujo del agua en canales de alineamiento curvo trabajando en régimen supercrítico constituye una parte de un problema muy complejo de flujo gradual y espacialmente variado. Los resultados de medida de tirantes y velocidades permiten establecer las siguientes conclusiones generales.

1. Para gastos pequeños el régimen es muy irregular. Ninguna de las formas de trazo -circular o espiral-, hacen posible el establecimiento de un régimen medianamente normalizado, pues hay regiones en el intradós que apenas si llevan agua. Estos gastos pequeños deberán ser considerados como un tercio del gasto de diseño o inferiores y no debe esperarse un funcionamiento regular del canal trazado en curva.

2. Para gastos comprendidos entre un tercio y dos tercios del gasto de diseño del canal, el flujo sigue siendo irregular y cualquiera de las dos curvas satisface por igual esta forma de flujo. Conviene, sin embargo, hacer notar que el movimiento manifiesta menos irregularidades que para gastos pequeños y que la diferencia entre los valores del tirante de la margen del extradós, comparados con los del intradós, es menos acusada que para gastos pequeños.

3. Para gastos cercanos al de diseño, o un poco superiores (10%), el funcionamiento del canal en trazo espiral acusa menos irregularidades que el canal de trazo circular, por lo menos, para las condiciones en que efectuamos nuestra gama de ensayos. En la zona de tirante máximo en el extradós, que se presenta invariablemente en la misma región, puede medirse una pendiente promedio de la superficie libre del agua, que siempre es superior al valor esperado por la teoría simple de la fuerza centrífuga.

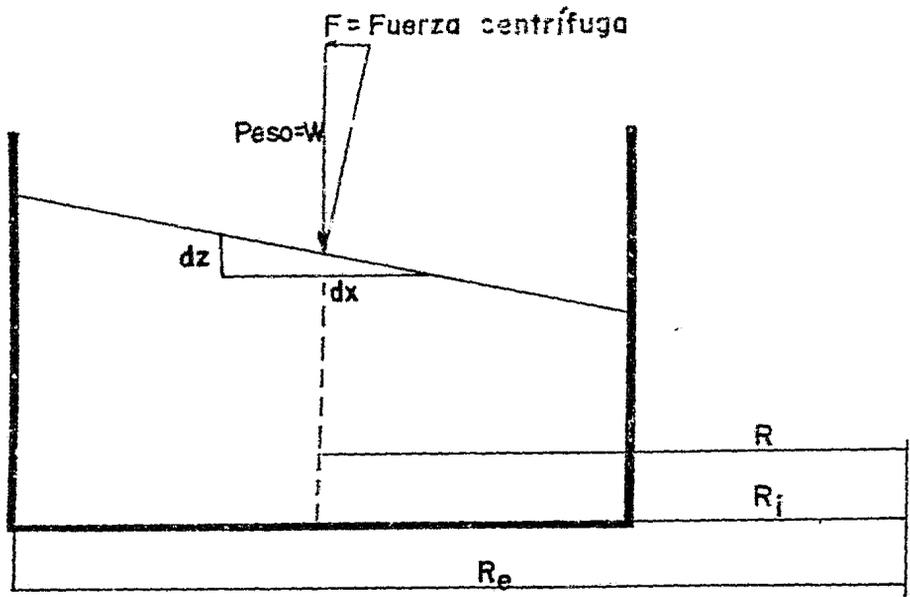


Fig. 15

$$\frac{dz}{dx} = \frac{\frac{W}{g} \frac{V^2}{R}}{W} = \frac{V^2}{gR}$$

En rigor, la superficie libre no es plana como puede apreciarse en los esquemas que se anexan a este informe. Por consiguiente, este valor de la pendiente es a título indicativo, pues la forma de la superficie libre resulta una superficie que no hemos podido precisar hasta el momento. (Fig.21-24)

4. Las curvas espirales proporcionan una mejoría en el flujo pero no pueden llegar a normalizarlo por el hecho de que a la entrada de los canales y por consiguiente, de las curvas, el régimen no está normalizado.

En todo rigor esta será la situación general que se presente en el diseño de canales de descarga de las estructuras de excedencias en las obras de riego para el desarrollo normal y para otros fines. En efecto, todas estas obras, cuando se descargan sus excedencias por galerías o túneles, en su tan confortables por su estructura, por una cubeta colectora, por un canal de descarga encajado por una sección de control y, frecuentemente, por una dissipadora de la energía, reactiva el agua y defecto: no se normaliza.

pasar finalmente al agua a su estado natural.

Cuando resulta necesario trazar en curva el canal de descarga, el agua apenas acaba de pasar por la sección de control y difícilmente se puede hablar de un régimen normalizado; en consecuencia, cualquier dispositivo o acondicionamiento que tienda a mejorar el régimen deberá intentarse.

5. Los canales de descarga que comienzan y terminan en curva, es decir, sin los tramos rectos que constituyen las tangentes de entrada y de salida, presentan mejores condiciones de flujo, con relación a esos mismos canales trazados con tangentes de entrada y de salida. (fig. 8)

Cuando se trata de curvas circulares, trazar todo el canal en curva, es aumentar el radio de la circunferencia, lo que contribuye a mejorar el flujo. Cuando se trata de curvas espirales la mejoría resulta más evidente, pues el radio de entrada corresponde al radio de la circunferencia de la curva circular, y el radio de salida es todavía mayor.

6. Los canales en los que se ha dejado una sobre-elevación de la margen del extradós con respecto de la otra (lo que puede lograrse excavando más en la margen del intradós, Fig. 14) reproducen movimientos menos alterados que los canales que se construyen con las plantillas planas. No obstante, esta conclusión solo es válida cuando el canal lleva su gasto de diseño; de otra manera, las perturbaciones del flujo son tales, sobre todo para gastos pequeños, que hay regiones del canal que apenas si llevan agua. Conviene insistir mucho en este resultado, pues los canales de las obras de excedencias no siempre trabajan con los gastos de diseño, ya que frecuentemente trabajan con gastos menores.

Esta serie de conclusiones de carácter general, permiten establecer algunas recomendaciones de naturaleza práctica para el diseño de canales de inundación.

2. RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO:

Para los ensayos de laboratorio se construyeron canales con trazo en espiral respondiendo a la ecuación;

$$\rho = 0.2 e^{0.11513 \theta}$$

con el ángulo θ comprendido entre $8\pi \leq \theta \leq 10\pi$, es decir, una vuelta completa de la espiral a partir de la cuarta. El coeficiente del argumento $m = 0.11413$ fué obtenido de manera puramente experimental habiendo realizado varios tanteos antes de elegirlo; es muy posible que profundizando en el estudio, se pueda relacionar este coeficiente con algunas de las variables hidráulicas del problema, como es nuestro propósito hacerlo en el futuro.

Por otra parte, la espiral logarítmica goza de una propiedad que resulta de valor inapreciable tanto desde el punto de vista del cálculo, como del comportamiento del flujo del agua en canales que siguen este alineamiento. En efecto esta propiedad puede expresarse como sigue: "El ángulo μ formado por la tangente a la curva en cualquier punto de la misma y la dirección del radio vector en ese punto es siempre constante".

Este ángulo μ es menor que 90° cuando se mide hacia atrás y vale $180^\circ - \mu$ cuando se mide en la dirección en que se abre la espiral.

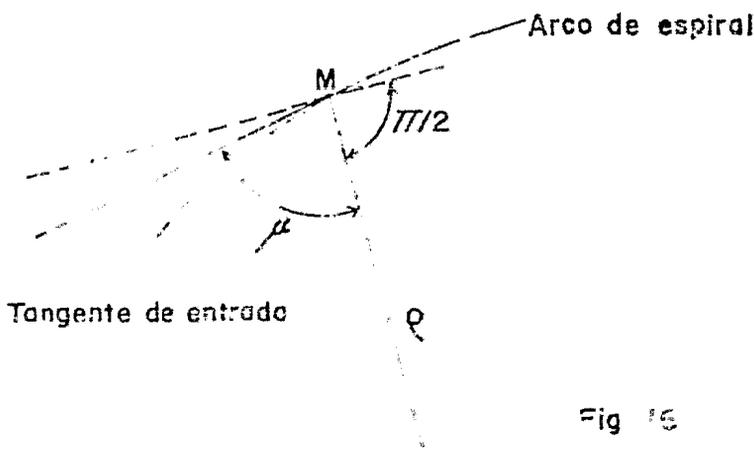


Fig 16

Ahora bien, en un problema específico nos vamos a encontrar con la necesidad de trazar canales en curva. Las recomendaciones que resultan de nuestro estudio son las siguientes:

Caso A. Todo el canal en curva:

Quando la topografía lo permita, resulta deseable que todo el canal sea trazado en curva. Para ello, una vez definidas las secciones de entrada y de salida con sus correspondientes ejes, llevar este trazo sobre la espiral anexa a este reporte, a la misma escala, hasta que se hagan coincidir los ejes de entrada y de salida con tangentes a un tramo de la espiral. Sobre ella se medirán los radio vectores de comienzo y de final así como el valor del ángulo de deflexión. Los cálculos restantes se detallan más adelante.

Caso B. Curva entre dos tangentes.

Proceder de la misma manera haciendo coincidir los ejes de los tramos rectos de entrada y de salida con tangentes a la espiral y medir las variables como en A.

Una vez obtenida la porción de curva que se adapta a cada caso específico se procederá a determinar las constantes de la espiral en la naturaleza.

El dibujo de la espiral que se transcribe en este reporte tiene por ecuación: (Fig 17)

$$\rho = a e^{0.11513 \theta}$$

Como puede observarse el valor de a resulta directamente proporcional al valor de ρ , por consiguiente, una cuestión fundamental será determinar este valor.

Siempre que el trazo de un canal en curva se haga sobre la espiral anexa a este reporte, las condiciones de trazado serán las mismas que las de un canal en curva.

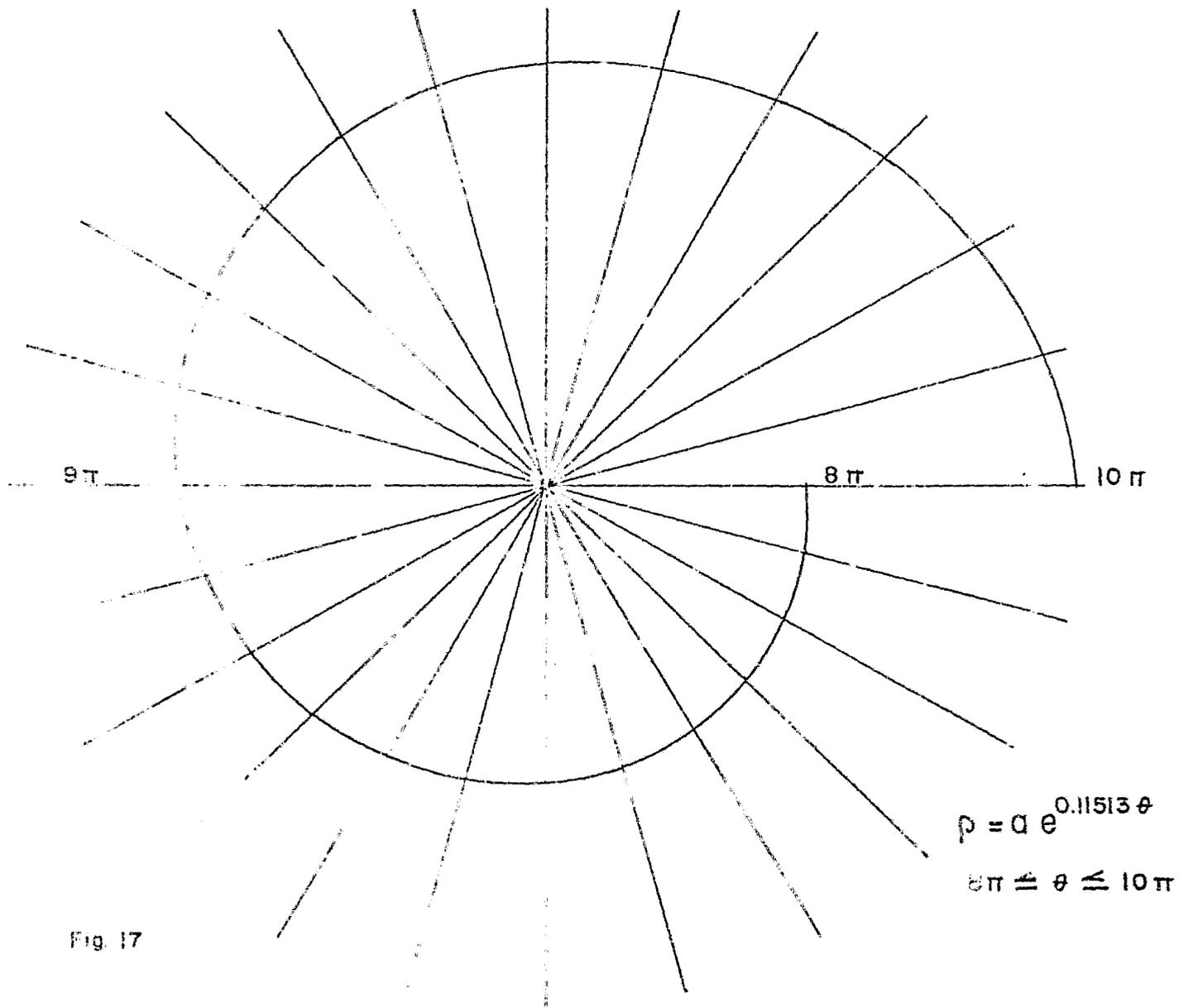
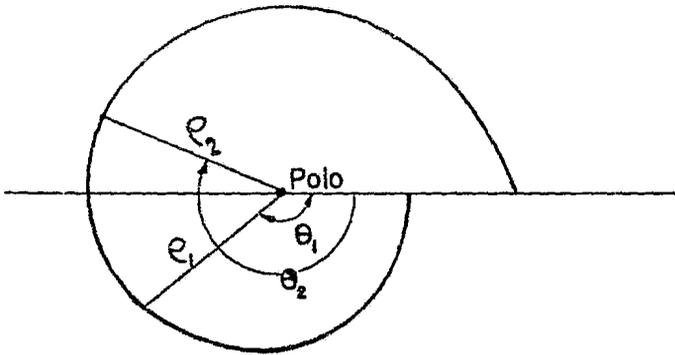


Fig. 17



$$e_1 = 110 \text{ m}$$

$$e_2 = 122.606 \text{ m.}$$

$$\theta_1 = 143^\circ$$

$$\theta_2 = 197^\circ$$

$$\Delta = 54^\circ$$

Fig. 18

para $a = 1$ y $\theta = 8\pi + 143^\circ$, entonces:

$$e = e^{0.11513 \left(\frac{1440 + 143}{180} \pi \right)}$$

$$e = e^{0.11513 (27.628)} = e^{3.181}$$

$$e = 24.068 \text{ m.}$$

Ahora bien, si en la naturaleza requerimos un radio de entrada, sugerido por la topografía del terreno de 110 m; es decir $e_1 = 110 \text{ m.}$, entonces:

$$a = \frac{110}{24.068} = 4.570384$$

y toda la curva se trazará a partir de la ecuación:

$$e = 4.570384 e^{0.11513 \theta}$$

para valores de θ comprendidos entre:

$$\frac{1583^\circ}{180^\circ} \pi \leq \theta \leq \frac{1637^\circ}{180^\circ} \pi$$

para que el ángulo θ quede expresado en radianes.

El radio vector de salida valdrá, en metros:

$$e_2 = 4.570384 e^{0.11513 \frac{1637}{180} \pi}$$

$$\rho_2 = 122.606 \text{ m}$$

A los valores de entrada y salida se deben agregar valores intermedios para poder trazar la curva, por ejemplo de 6° en 6° . pudiendo construir la tabla siguiente:

θ°	$\rho(\text{m})$	θ°	$\rho(\text{m})$
1583	110.000	1613	116.834
1589	111.333	1619	118.251
1595	112.684	1625	119.686
1601	114.051	1631	121.137
1607	115.434	1637	122.606

TABLA 1

De toda evidencia, es deseable comenzar con un número entero de grados y proporcionarse intervalos con números enteros. No obstante, si así no fuera el caso, no existen mayores inconvenientes dadas las facilidades de cómputo que encontramos actualmente.

Por otra parte, es necesario proporcionar la longitud del arco de la curva y las posibilidades de trazo a partir de cuerda, por ejemplo, a cada 10 metros.

Recurrimos a la expresión que permite el cálculo de la longitud del arco de la espiral.

$$S = (\rho_2 - \rho_1) \frac{\sqrt{1 + m^2}}{m}$$

Para la espiral que se propone $m = 0.11713$, entonces:

$$\frac{\sqrt{1 + 0.11713^2}}{0.11713} = 7.4221$$

El desarrollo total del arco, medido sobre el eje del canal (y habrá que calcularlo también en otras márgenes, para evitar sorpresas en las medidas).

$$S = (122.606 - 110) 8.74321 = 110.217 \text{ m.}$$

Ahora bien, es necesario descomponer este arco en tramos rectos (cuerdas de 10 metros), para lo cual se propone construir una tabla en la que se fija el valor de la cuerda partiendo del radio vector de entrada a la curva. Expresando analíticamente lo anterior tendremos:

$$10 = (P_2 - 110) 8.74321$$

en donde P_2 es el radio vector que hace avanzar a la espiral en un arco de 10 m. Queda definido por las condiciones iniciales: $P_1 = 110 \text{ m}$ y $\theta_1 = 1583^\circ$; y puede calcularse fácilmente:

$$P_2 = 110 + \frac{10}{8.74321} = 110 + 1.1437 = 111.143744$$

por otra parte, considerando la ecuación:

$$P = 4.570384 e^{0.11513 \theta}$$

puede deducirse el valor del ángulo θ .

$$111.1437 = 4.570384 e^{0.11513 \theta}$$

Tomando logaritmos naturales:

$$4.710114 = 1.519897 + 0.11513 \theta$$

$$\theta = \frac{3.190217}{0.11513} = 27.71011225$$

$$\theta = 1580.123717^\circ$$

$$\theta = 100^\circ 00' 00''$$

El ángulo θ en la tabla se mide desde el polo a P_1 en el radio vector

tor de entrada será:

$$\Delta = 5.150987^\circ = 5^\circ 09' 02.55''$$

Si la espiral se abre en el sentido antihorario, la deflexión será hacia la izquierda.

Para medir la cuerda sobre el eje del canal y el ángulo correspondiente a esta posición, es necesario situarse en uno de los extremos de la cuerda, visando el polo y luego, con el ángulo interior del triángulo, visar el otro extremo de la cuerda.

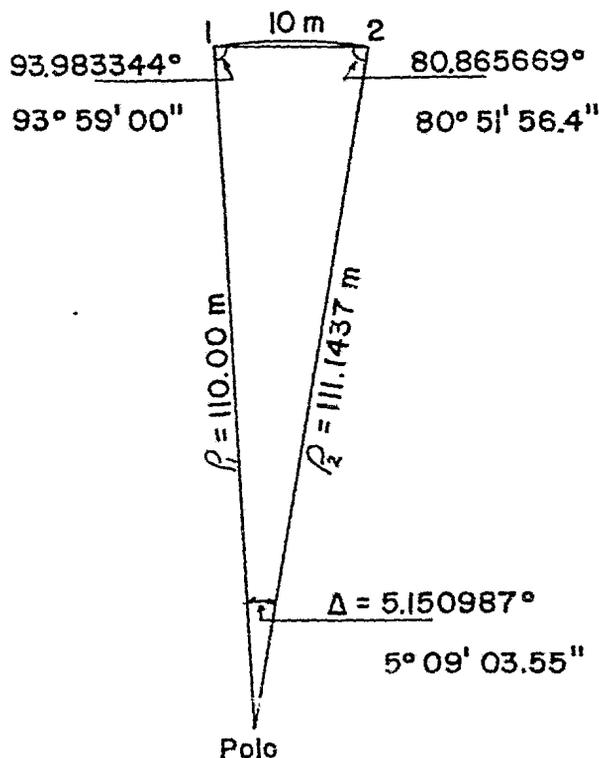


Fig. 19

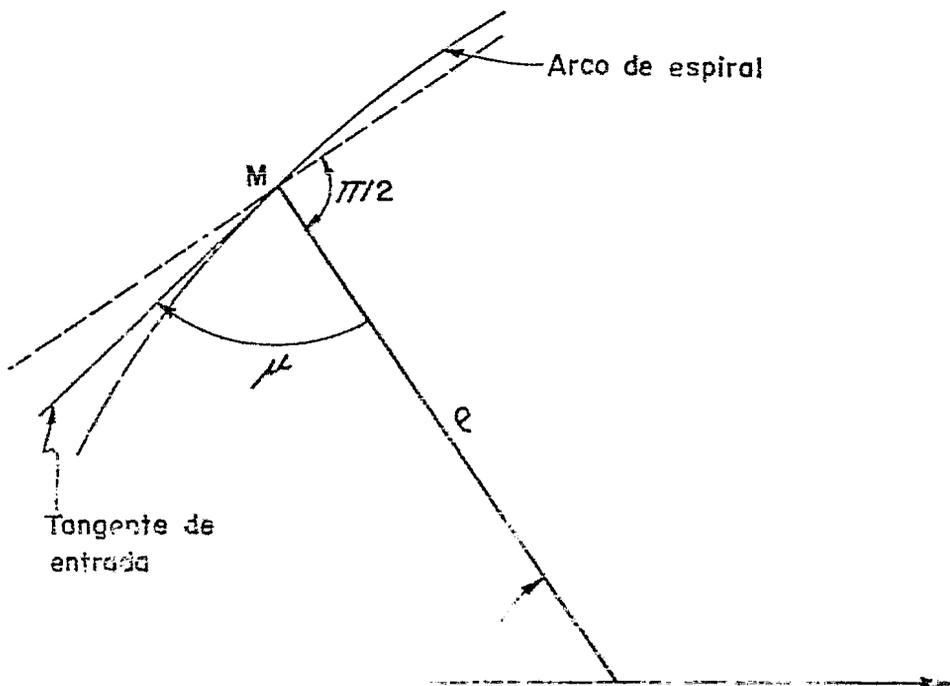
Los ángulos Δ y α de este triángulo se calcularon trigonómicamente aplicando la ley de los senos, pero corrigiendo la longitud de los lados de acuerdo al resultado del cálculo, tras de aplicar la ley de los cosenos. En efecto, por seguridad debe resulte esta corrección del cálculo de Δ .

es necesario aplicarlo, pues los ángulos 1 y 2 se encuentran cercanos a 90° y una aproximación en la cuarta o aún en la quinta cifra significativa, del valor de las funciones seno y coseno, pueden hacer variar al ángulo en algunos minutos de arco.

El cálculo se extiende a todos los arcos que quepan en el arco de espiral para la deflexión dada. En este caso resultan 10 de 10 m., y la última "se cierra" a 10.217 m., para completar la longitud de 110.217 m. que resultó en el cálculo del arco.

En la tabla 2 se registran los resultados de todos estos cálculos para utilizarlos en medidas de campo, para el trazo de la espiral.

Quedan dos cuestiones importantes por atender. La primera es de carácter geométrico y es la relacionada con la forma de adaptar un arco de espiral a una tangente de entrada (o de salida). Previamente se ha señalado una propiedad de la espiral logarítmica que ahora vamos a aprovechar.



El valor de μ se obtiene mediante la expresión:

$$\tan \mu = \frac{f(\theta)}{f'(\theta)}$$

Para la espiral logarítmica:

$$f(\theta) = ae^{m\theta} ; f'(\theta) = ma e^{m\theta}$$

$$\tan \mu = \frac{ae^{m\theta}}{ma e^{m\theta}} = \frac{1}{m}$$

Para cualquier punto de la espiral este valor es constante y representa una de las grandes ventajas de este lugar geométrico.

$$\tan \mu = \frac{1}{0.11513} ; \mu = 83^{\circ} 25' 56.83''$$

La tangente a la salida formará un ángulo suplementario del anterior, es decir $(180^{\circ} - \mu)$

La segunda cuestión está relacionada con el valor propuesto de m , denominado argumento de la exponencial en la expresión:

Si se ha dicho que el coeficiente a es un factor "de extensión" o "de escala" de la espiral es porque en función del valor numérico de este coeficiente la espiral será mayor o menor, pero conservando constantes todas las demás propiedades geométricas.

En cambio el valor de m ocasiona que la espiral se abra más aprisa cuanto mayor es su valor y naturalmente distintos valores de m reproducen distintas espirales, no solo en tamaño, sino en forma.

Es cierto que para nuestras experiencias el valor $m = 0.11513$ nos proporcionó la mejor forma de solución, pero cómo lograr otras posibilidades?

En rigor llegamos a ese valor ensayando diferentes alternativas que, con el propósito de facilitar los cálculos, fueron planteados a partir de una expresión de la forma: $m = C \ln 10$; con un valor de C comprendido entre $0.01 \leq C \leq 0.10$, y desarrollando vueltas completas de la espiral. Para valores de C cercanos a 0.10 la espiral se abre muy aprisa; para valores de C cercanos a 0.01 sólo después de muchas vueltas se pueden apreciar variaciones en los radios vectores. Optamos por el valor $C = 0.05$ y así

$$C = 0.05 \quad \ln 10 = 0.11513$$

Pueden desde luego proponerse otros valores de m y explorar otros -- valores de θ que mejor se adapten a las necesidades de diseño.

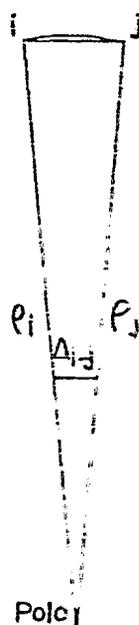
Nuestro propósito fundamental es presentar una alternativa de diseño para este problema tan complejo.

En el futuro presentaremos los resultados de nuevas investigaciones que amplíen esta primera etapa, al tiempo que aplicaremos nuestras propias concepciones de diseño al trabajo en modelos reducidos que se desarrolla en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de Guanajuato.

Pto.	ρ	θ rad	θ°	Δ_{i-j}°	i	j	Longitud real de la cuerda
1	110.0000	27.628562	1583.00000				
2	111.1437	27.718464	1588.150987	5.150987	93.983344	80.865669	10.00272
3	112.2874	27.807387	1593.245896	5.094909	94.015745	80.889345	9.99631
4	113.4331	27.895409	1598.289173	5.043277	94.017326	80.915074	9.99638
5	114.5748	27.982547	1603.281854	4.992681	94.067032	80.946624	9.99644
6	115.7185	28.068820	1608.224944	4.943090	94.091910	80.964999	9.99651
7	116.8622	28.154245	1613.119418	4.894474	94.116299	80.989227	9.99657
8	118.0059	28.238338	1617.966224	4.846806	94.140210	80.012984	9.99663
9	119.1496	28.322615	1622.766281	4.800057	94.163661	81.036282	9.99668
10	120.2933	28.405591	1627.520483	4.754202	94.186661	81.059137	9.99674
11	121.4370	28.487782	1632.229696	4.709213	94.209228	81.081559	9.99679
12*	122.6060	28.571040	1637.000000	4.770304	94.175133	81.054563	10.22321

* Arco de 10.217 m.

T A B L A 2



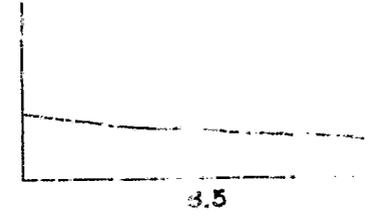
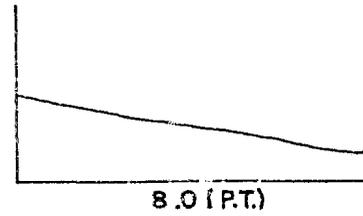
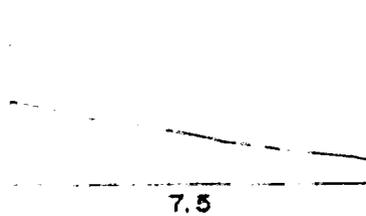
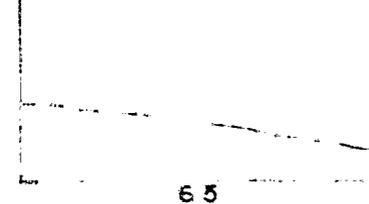
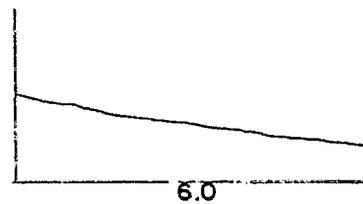
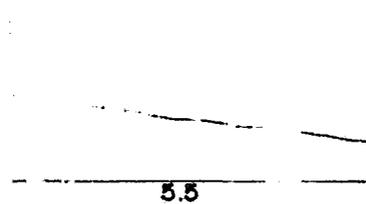
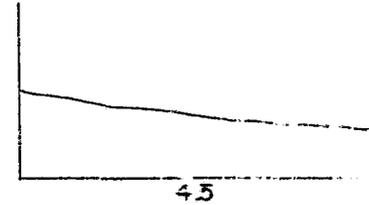
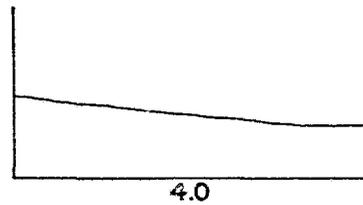
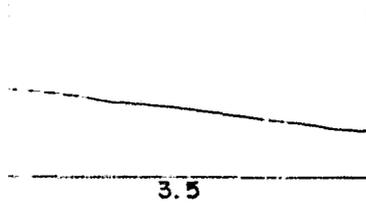
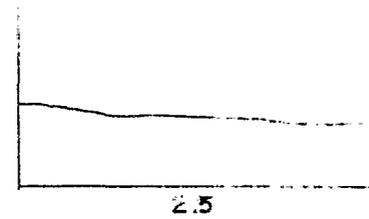
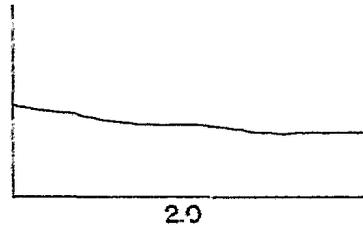
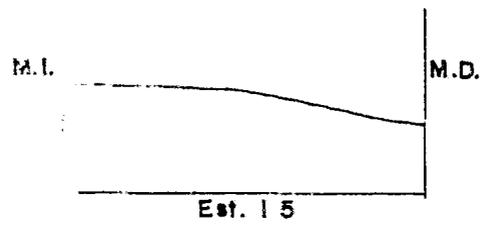
LABORATORIO DE HIDRAULICA

PERFILES DE SUPERFICIE LIBRE

CURVA CIRCULAR $Q = 3.17 \text{ m}^3/\text{s}$

$S = 0.00$

ESCALA
HORZ: 1:5
VERT: 1:5



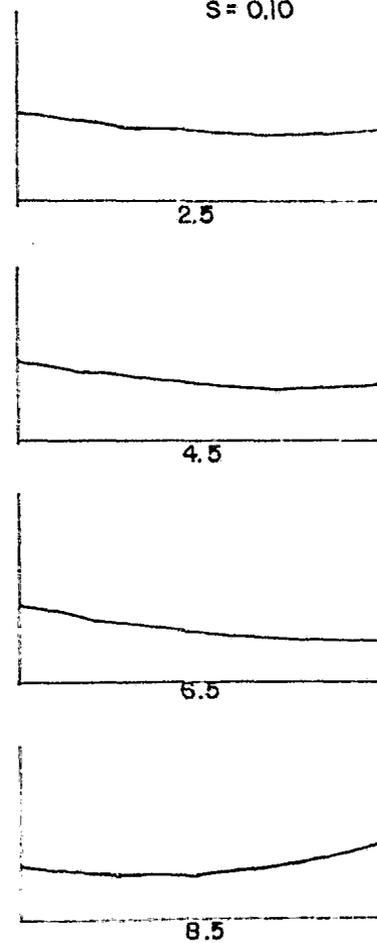
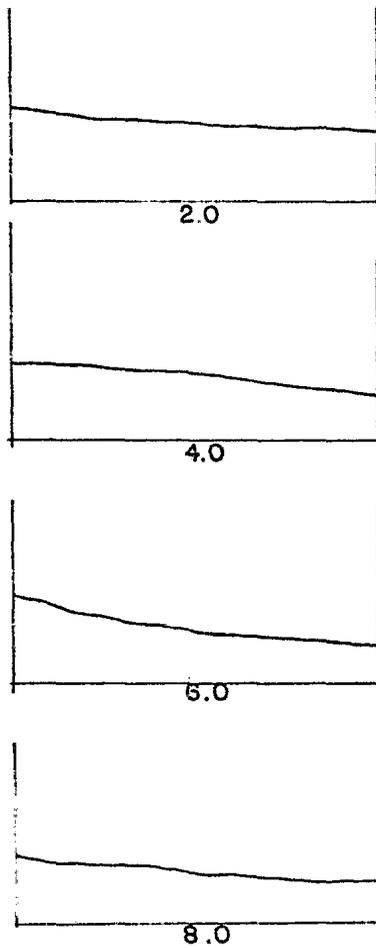
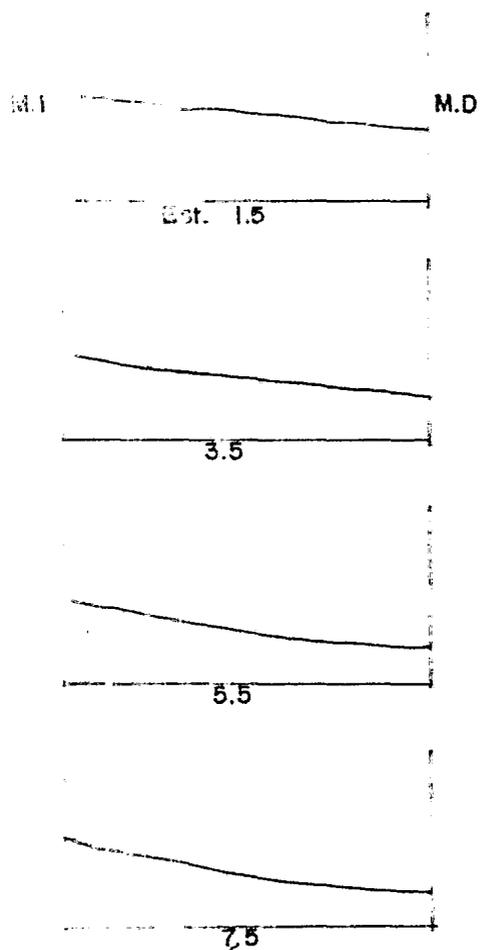
LABORATORIO DE HIDRAULICA

PERFILES DE SUPERFICIE LIBRE

CURVA ESPIRAL $Q = 36.9 \text{ l/s}$

$S = 0.10$

ESCALA
HORZ. 1:5
VERT. 1:5



LABORATORIO DE HIDRAULICA

PERFILES DE SUPERFICIE LIBRE

CURVA CIRCULAR $Q=50.5 \text{ l/s}$
 $S=0.14$

N.I.

M.D.

ESCALA
HORZ. 1:5
VERT. 1:5



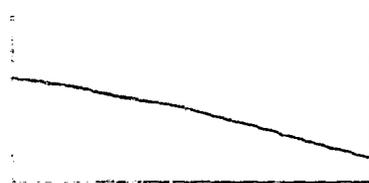
Est. 3.0 (P.C.)



3.5



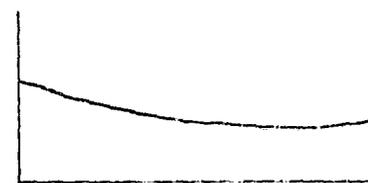
4.0



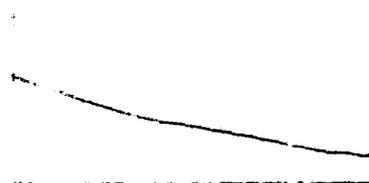
5.0



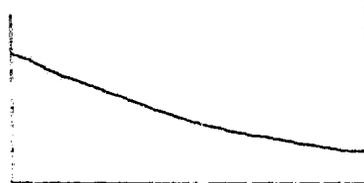
5.5



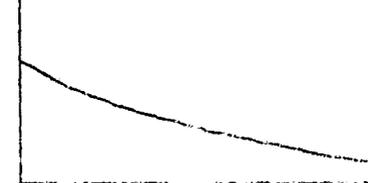
6.0



7.0



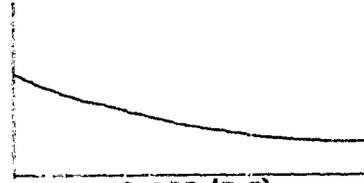
7.5



8.0



9.0



9.283 (P.T.)



9.5

LABORATORIO DE HIDRAULICA

PERFILES DE SUPERFICIE LIBRE

CURVA ESPIRAL $Q = 50.5 \text{ l/s}$
 $S = 0.14$

ESCALA

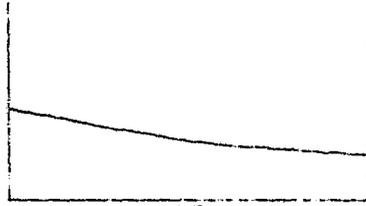
HORZ. 1.5
VERT. 1.5

M.I.

M.D.



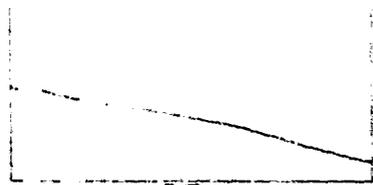
Est. 3.5



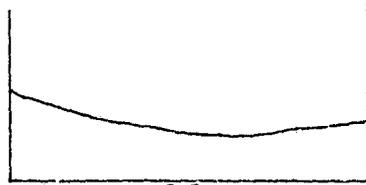
4.0



4.5



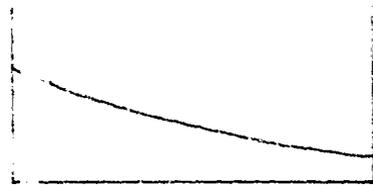
5.5



6.0



6.5



7.5



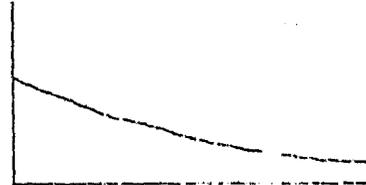
8.0



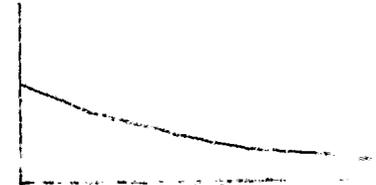
8.5



9.5



9.75 (P.T.)



10.0

VELOCIDAD (m/s)

TIRANTE (m)

ESTACION	VELOCIDAD (m/s)			TIRANTE (m)		
	MARGEN DERECHA	CENTRO	MARGEN IZQUIERDA	MARGEN DERECHA	CENTRO	MARGEN IZQUIERDA
1.0	2.100	2.100	2.100	0.103	0.061	0.103
1.5	2.100	2.100	2.100	0.098	0.062	0.103
2.0	2.100	2.100	2.100	0.062	0.063	0.103
2.5	2.100	2.100	2.100	0.062	0.063	0.103
3.0 P.C.	2.410	2.513	2.589	0.044	0.060	0.061
3.5	2.433	2.503	2.573	0.037	0.053	0.061
4.0	2.543	2.541	2.900	0.041	0.053	0.063
4.5	2.531	2.530	3.072	0.038	0.053	0.071
5.0	2.513	2.533	3.203	0.032	0.051	0.063
5.5	2.523	3.002	3.287	0.031	0.047	0.071
6.0	2.414	3.073	3.390	0.025	0.043	0.063
6.5	2.512	3.141	3.437	0.023	0.048	0.063
7.0	2.511	3.141	3.545	0.024	0.044	0.063
7.5	2.511	3.240	3.530	0.022	0.040	0.063
8.0	2.423	3.040	3.537	0.023	0.042	0.07
8.5	2.423	3.040	3.730	0.028	0.037	0.063
9.0						
9.5						

0.1

EN AYO.

ESTACION	VELOCIDAD (m/s)			TIRANTES (m)		
	MARGEN DERECHA	CENTRO	MARGEN IZQUIERDA	MARGEN DERECHA	CENTRO	MARGEN IZQUIERDA
1.0	1.818	1.818	1.744	0.000	0.000	0.000
1.5	1.896	1.897	1.861	0.000	0.000	0.000
2.0	2.200	2.193	2.170	0.000	0.000	0.000
2.5	2.311	2.341	2.390	0.000	0.000	0.000
3.0 P.C.	2.350	2.525	2.519	0.043	0.050	0.070
3.5	2.550	2.705	2.693	0.034	0.052	0.071
4.0	2.596	2.864	2.852	0.033	0.054	0.082
4.5	2.651	2.953	2.903	0.044	0.047	0.082
5.0	2.648	2.996	2.982	0.032	0.047	0.082
5.5	2.740	3.176	3.103	0.020	0.043	0.070
6.0	2.798	3.235	3.305	0.028	0.042	0.082
6.5	2.774	2.223	3.348	0.031	0.040	0.082
7.0	2.917	3.321	3.484	0.030	0.038	0.082
7.5	2.774	3.395	3.605	0.024	0.041	0.070
8.0	2.841	3.403	3.667	0.033	0.041	0.074
8.5	2.900	3.000	3.711	0.050	0.030	0.082
9.0						
9.5						
F.F.						

ESTACION	VELOCIDAD (m/s)			TIRANTES		
	MARGEN DERECHA	CENTRO	MARGEN IZQUIERDA	MARGEN DERECHA	CENTRO	MARGEN IZQUIERDA
1.0	2.357	2.303	2.309	0.087	0.083	0.090
1.5	2.407	2.506	2.521	0.087	0.083	0.091
2.0	2.786	2.758	2.727	0.087	0.083	0.076
2.5	2.970	2.990	2.892	0.088	0.083	0.070
3.0 P.C.	3.078	3.094	3.227	0.073	0.083	0.070
3.5	3.242	3.262	3.176	0.067	0.083	0.072
4.0	2.380	3.420	3.321	0.031	0.062	0.103
4.5	2.463	3.523	3.420	0.020	0.058	0.103
5.0	2.495	3.631	3.680	0.016	0.051	0.086
5.5	2.752	2.846	3.923	0.034	0.053	0.077
6.0	3.251	4.005	3.394	0.049	0.052	0.083
6.5	3.292	3.960	4.110	0.037	0.054	0.078
7.0	3.157	4.062	4.141	0.011	0.047	0.088
7.5	2.727	3.970	4.201	0.013	0.049	0.102
8.0	2.631	3.943	4.121	0.021	0.043	0.097
8.5	2.850	4.116	4.400	0.020	0.047	0.099
9.0	2.814	4.207	4.300	0.030	0.043	0.094
9.5						
P.T.	2.713	4.200	4.200	0.023	0.043	0.093
10.0	2.704	4.200	4.200	0.027	0.043	0.093

CURVA CIRCULAR

Q=

L=

S= 0.11

VALORES MEDIDOS EN EL PUNTO DE INICIO DE LA CURVA.

VELOCIDAD (m/s)

TIRANTES (m)

ESTACION	VELOCIDAD (m/s)			TIRANTES (m)		
	MARGEN DERECHA	CENTRO	MARGEN IZQUIERDA	MARGEN DERECHA	CENTRO	MARGEN IZQUIERDA
1.0	2.111	2.111	2.111	0.075	0.050	0.075
1.5	2.111	2.111	2.111	0.075	0.050	0.075
2.0	2.773	2.773	2.773	0.075	0.050	0.075
2.5	2.324	2.324	2.324	0.075	0.050	0.075
3.0 P.C.	3.155	3.031	3.037	0.075	0.050	0.058
3.5	3.321	3.321	3.321	0.075	0.050	0.052
4.0	3.442	3.447	3.397	0.015	0.050	0.073
4.5	3.214	3.435	3.504	0.015	0.036	0.110
5.0	2.933	3.665	3.605	0.005	0.060	0.085
5.5	2.702	3.773	3.731	0.005	0.050	0.075
6.0	2.226	3.575	3.861	0.050	0.040	0.074
6.5	3.334	3.901	3.994	0.030	0.040	0.068
7.0	3.011	4.237	4.126	0.015	0.050	0.070
7.5	2.950	4.052	4.307	0.015	0.045	0.080
8.0	3.053	3.955	4.380	0.012	0.035	0.085
8.5	2.211	3.973	4.366	0.015	0.045	0.075
9.0	2.211	3.937	4.425	0.020	0.045	0.075
9.5	2.211	3.937	4.425	0.020	0.045	0.075
10.0	2.211	3.937	4.425	0.020	0.045	0.075
10.5	2.211	3.937	4.425	0.020	0.045	0.075
11.0	2.211	3.937	4.425	0.020	0.045	0.075
11.5	2.211	3.937	4.425	0.020	0.045	0.075
12.0	2.211	3.937	4.425	0.020	0.045	0.075
12.5	2.211	3.937	4.425	0.020	0.045	0.075
13.0	2.211	3.937	4.425	0.020	0.045	0.075
13.5	2.211	3.937	4.425	0.020	0.045	0.075
14.0	2.211	3.937	4.425	0.020	0.045	0.075
14.5	2.211	3.937	4.425	0.020	0.045	0.075
15.0	2.211	3.937	4.425	0.020	0.045	0.075
15.5	2.211	3.937	4.425	0.020	0.045	0.075
16.0	2.211	3.937	4.425	0.020	0.045	0.075
16.5	2.211	3.937	4.425	0.020	0.045	0.075
17.0	2.211	3.937	4.425	0.020	0.045	0.075
17.5	2.211	3.937	4.425	0.020	0.045	0.075
18.0	2.211	3.937	4.425	0.020	0.045	0.075
18.5	2.211	3.937	4.425	0.020	0.045	0.075
19.0	2.211	3.937	4.425	0.020	0.045	0.075
19.5	2.211	3.937	4.425	0.020	0.045	0.075
20.0	2.211	3.937	4.425	0.020	0.045	0.075

B I B L I O G R A F I A :

1. FORCHHEIMER, Philipp. Tratado de Hidráulica. Editorial Labor, S.A. (1950)
2. BOUSSINESQ, J. Essai sur la théorie des eaux courantes. Mémoires présentées par divers savants à l'Académie des Sciences. Paris (1877)
3. FULLER, W.E. Loss of head in bends. Journal New Engineering Water Works Assoc. (1913)
4. WIRT, L. New data for the design of elbows in duct systems. General Electric Review. Vol. 30 (1927)
5. KLEIN G. TUPPER, K.F.; and GREEN, J.J. The design of corners in fluid channels. Canadian Journal of Research Vol. 3 (1930)
6. NIPPERT, H. Über den Stromungsverlust in gekrümmten Kanälen (Sobre la pérdida de carga en canales curvos) FORSCH. Arb. a.d. Geb. d. Ingenieurwesens (1929). Citado por ROUSE, H. En Fluid Mechanics for Hydraulic Engineers. Dover Publication Inc. New York (1961)
7. HINDERKS, A. Nebenströmungen in gekrümmten Kanälen. (Corrientes secundarias en canales curvos) Zeitschrift VDI. Vol. 71 (1927) Citado por ROUSE. Id.
8. WASILIEWSKY. Pipe Friction Manual. Cap. Hydraulic Institute. New York (1961).
9. SHUKRY, Ahmed. Flow around bends in a open flume. Transactions, ASCE. Vol. 118. (1950)

10. LEVI, Enzo. Investigación acerca de las estrías longitudinales de las láminas vertientes. Ingeniería, Núm. 2.- Vol. XXXIV, México, Abril (1964)
11. LELIAVSKY, S. Précis d'Hydraulique Fluviale. I Dnod. Paris (1961)
12. REMENIERAS, G. et HERMANT, C. Mésure Electromagnétique des vitesses dans les liquides. La Houille Blanche. No. Spécial B. (1954)
13. DESSUS, B.; NAPIE, L. et PERNECKER, L. Velocimétrie à Laser. La Houille Blanche, Núm. 8 (1972)
14. DESSUS, B.; LESNE, J.L. et. NAPIE, L. La mésure optique des vitesses par effet Doppler. Bulletin de la Direction des Etudes et Recherches de l'EDF. Série A, Núm. 1 (1978).
15. IPPEN, A.G. Mechanics of supercritical flow. First paper in High-velocity flow in Open Channels: A Symposium, Transactions, ASCE, Vol. 116 (1951)
16. IPPEN, A.T.; NECE R.E.; GIVLER, CH. A., and NOUTSOPOULOS, G.K. Flow Through Curved Channels. Report Paper. Hydrodynamic Laboratory. Department of Civil Engineering. M.I.T. (1962)
17. KNAPP, R.T. Design of channel curves for supercritical flow, Second paper in High-velocity flow in open channels: A Symposium, Transactions, ASCE, Vol. 116 (1951)
18. DAWSON, J.H. and IPPEN, A.T. Design of channel contractions, Third paper in High-velocity flow in open channels: A symposium, Transactions ASCE, Vol. 116 (1951)
19. ROUSE, H.; BHOOTA, B.V. and HSU, en-Yun; Design of channel expansions Fourth paper in High-velocity flow in open channels: A Symposium, Transactions ASCE. Vol. 116 (1951)

- 20 y 21. GARBRECHT, G. Wasserabfluss in gekrummten Gerinnen (Flujo del agua en conductos curvos). Die Wasserwirtschaft Nr. 2 (Nov. 1953) und Nr. 3 (dez 1953). (Traducción francesa Núm. Tr. 574 E de la Dirección des Etudes et Recherches du Service des Etudes Hydrauliques de l'Electricité de France).
22. GARBRECHT, G. Über die Linienführung von Gerinnen (Sobre el Tratado de ductos.) Die Wasser-wirtschaft Nr. 6 (Marz. 1956) (Se consultó traducción al francés Núm. Tr. 853 E del servicio citado).
23. KALINCJCHKINE, M.P. An sujet du mouvement helicoidal dans les canalisations. Izvestia Akademya Nauk, S.S.S.R. Mar. 1952 (Se consultó traducción al francés Num. Tr. 579 E del servicio citado).
24. POGGI, B. Correnti veloci nei canali in curva. L'Energia Elettrica Núm. 5, Mayo 1956.
25. CHAU-LIN CHIU; HSIUNG, D.E. and LIN, HSIU-CHI. Three Dimensional Open Channel Flow. Journal of the Hydraulics Division. ASCE Vol. 104. HY8. August 1978.
26. CHAU-LIN CHIU; CHIU, CHAO-LIN; LIN, HSIU-CHI and MIZIMURA, K. Simulation of Hydraulic Processes in Open Channels. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol 102 No HY2, Feb. 1976
27. LIGGET, A; CHIU, C.L. and MIAO. L.S. Secondary Currents in a Corner. Journal of the Hydraulics Division. Vol. 91. No. HY6. Nov. 1965.
28. POSEY, C.J. and CHIU, C.L. Stochastic Nature of Secondary Currents in open channels. Proceedings of the XVth Congress of the IAHR. Vol. 5 Sep. 1975

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA:OBRAS DE CARACTER GENERAL.

- ROUSE, H. Fluid mechanics for hydraulic engineers. Dover Publications, Inc. New York (1961)
- CHOW, Ven Te. Open Channel Hydraulics. Mc.Graw-Hill Book Co., New York (1959)
- FLEURY, P. et MATHIEU, J.P. Mecanique Physique. Eyrolles. Paris (1961).
- ROUSE, H. (Edited by) Engineering Hydraulics. Jhon Wiley and Sons, Inc. New York (1961).
- SCHLICHTING, H. Bounday Lager Theory. Mc.Graw-Hill Book Co. New York. (1960)
- HINZE, J.O. Turbulence.- Mc.Graw-Hill Book Co. New York (1959)
- COMOLET, R. Mecanique des Fluides (2 Volumes). Masson etc. Cie, Editeurs. Paris (1963.)
- SILBER, R. Etude et Tracé des Ecoulements Permanents en canaux et rivieres. Dunod. Paris (1968).
- FORTIER, A. Pertes de charge singulières. Cours professé a la Sorbonne. Paris (1950)
- FORTIER, A. Etude de la Turbulence. Cours. professé a la Sorbonne. Paris (1954)

- FORTIER, A. Etude des canalisations. Cours professé à la Sorbonne. Paris (1958)
- LEVI, Enzo. Mecánica de los Fluidos. Instituto de Ingeniería. México, 1957