

24. 100



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERIA

ESTUDIO DE LOS VORTICES QUE SE FORMAN PERIODICAMENTE TRAS UNA PARED VERTEDORA

T E S I S

Que para obtener el título de:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P r e s e n t a n :

AGUSTIN JAVIER PERALTA

EFRAIN BALDEMAR DEL RISCO MORENO



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

I N D I C E

NOMENCLATURA	HOJA
1. VORTICES TRAS UNA PARED VERTEDORA	1
1.1 Introducción	1
2. DESCRIPCION DE LA FORMACION INTERMITENTE DE DIFERENTES ESTRUCTURAS VORTICOSAS	4
2.1 Consideraciones generales	4
2.2 Modelo físico	6
2.3 Elementos visualizadores y forma en que fueron empleados	9
2.4 Descripción del fenómeno	11
3. CALCULOS Y MEDICIONES	25
3.1 Análisis dimensional	25
3.2 Descripción de los ensayos	28
3.3 Descripción de tablas y gráficas	30
4. INTERPRETACION DEL FENOMENO Y CONCLUSIONES	36
4.1 Introducción	36
4.2 Interpretación del fenómeno	37
4.3 Conclusiones	44
5. RECONOCIMIENTOS	44
6. BIBLIOGRAFIA	45

NOMENCLATURA

- c Constante del parámetro adimensional $TU/d = C$ e igual a 6 ± 1 .
- d Tirante en el canal, cm.
- F_r Número de Froude
- g Aceleración debida a la gravedad igual a 9.8 m/seg.
- H_v Tirante en la descarga del vertedor triangular, cm.
- L Ancho del canal = ancho del vertedor igual a 24.6 cm.
- p Altura del vertedor, 19.8 y 27.0 cm.
- Q_m Gasto medio calculado con flotador
- Q_v Gasto calculado a partir de la fórmula $Q_v = 1.33693 H_v^{2.48}$
- Re Número de Reynolds
- T Promedio del período medio de aparición de los vórtices erguidos del lado derecho y del izquierdo del canal, seg.
- T Período de aparición de los vórtices erguidos usado en el análisis di menciona, seg
- T_R Período medio de fluctuación del rollo, seg.

\bar{T}_{vi} Período medio de aparición de los vórtices erguidos del lado izquierdo del canal, seg.

\bar{T}_{vd} Período medio de aparición de los vórtices erguidos del lado derecho, seg.

U Velocidad media en el canal, cm/seg.

U_m Velocidad aproximada calculada con flotador, cm/seg.

μ Viscosidad dinámica, Kg/m seg.

ρ Densidad, Kg/m³

ν Viscosidad cinemática, m²/seg.

1. VORTICES TRAS UNA PARED VERTEDORA

1.1 INTRODUCCION

El presente estudio intenta ser una pequeña aportación a la teoría de la formación de vórtices que se forman en una región separada y especialmente tras un vertedor de cresta horizontal. La importancia del estudio de los mecanismos de la formación de vórtices es obvia, ya que éstos se presentan frecuentemente en el movimiento de los fluidos más comunes, por tanto, disponer de información que permita conocer dichos mecanismos asociados a la formación de vórtices, puede servir para lograr su control y aplicación ulterior. Además, es importante en todo campo de la ingeniería entender con la mayor certeza posible el comportamiento de los fenómenos físicos en los que se ve involucrada, ya que de esta manera el esfuerzo que se realice para atacar en forma teórica cualquier estudio tendrá mayor probabilidad de éxito. Contrariamente, de no disponer de una amplia información acerca del fenómeno, el esfuerzo realizado al intentar reproducir con un modelo matemático las interpretaciones del mismo puede resultar un fracaso.

Tras de un vertedor de cresta horizontal colocado a través de un canal, en el cual fluye una corriente turbulenta, puede observarse si se deposita algún agente visualizador en las cercanías aguas arriba del vertedor, la formación de dos tipos de vórtices, éstos son, un par de vórtices erguidos y un vórtice horizontal en forma de rollo, indicados en la figura 1, con las letras A y B respectivamente.

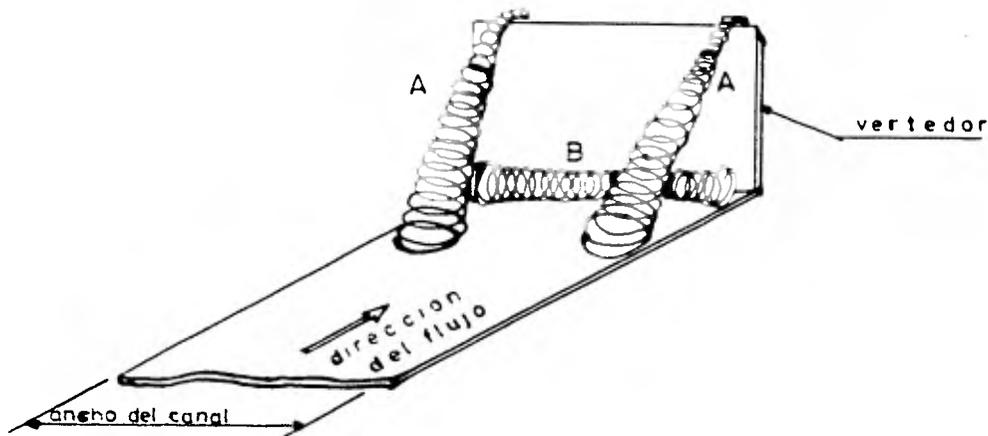


Figura 1-1.- Vórtices erguidos (A) y vórtice horizontal (B), que se forman tras un vertedor de cresta horizontal.

La motivación de este estudio se debió a que los vórtices erguidos aparecen, a pesar de que las condiciones en el canal no se alteran, con una periodicidad relativamente bien definida para cada gasto establecido.

Los vórtices A se manifiestan inicialmente como pequeños remolinos en el fondo del canal y cercanos al vertedor, siendo difícil precisar si se dan alternados o a la vez, ya que se observan ambos casos. En cuanto aparecen estos pequeños vórtices se desplazan sobre trayectorias bien definidas y al llegar a una zona cercana a la esquina formada entre la pared del canal y el vórtice horizontal a nivel del piso se observa un incremento en su rotación y translación, y siguiendo su trayectoria hacia una zona que recorren en forma ovoidal se intensifican y estabilizan, desapareciendo posteriormente para volverse a formar por el mismo proceso después de algún tiempo.

El vórtice B tiene la característica de ser permanente y tener fluctuaciones periódicas de intensidad, que parecen estar ligadas con el período de aparición de los vórtices erguidos.

El estudio de la formación periódica de un par de vórtices frente a una pared --- transversal en un canal es nuevo, por lo menos en lo que se refiere al análisis - de la periodicidad. El objetivo principal de este estudio ha sido investigar el origen de dichos vórtices y el motivo de su periodicidad.

Aunque los elementos utilizados en el estudio del fenómeno se limitó a un cronómetro para contabilizar la frecuencia de aparición y fluctuación de los vórtices y dos limnímetros para medir los tirantes en la descarga y en el canal; un período grande de observación auxiliado con elementos visualizadores y algunas pruebas efectuadas para descartar o aceptar hipótesis, permiten hacer una descripción cualitativa del fenómeno y con ello plantear un mecanismo probable de la formación - intermitente de los vórtices erguidos.

En el capítulo 2 se describe el fenómeno tal y como lo muestran las técnicas de visualización utilizadas, el modelo físico, el tipo de vertedor empleado, los elementos visualizadores y la forma en que fueron empleados. En el capítulo 3 se -- presenta el análisis dimensional hecho al sistema, se describe la forma y las condiciones bajo las cuales se realizaron los ensayos, mostrándose los resultados obtenidos en las pruebas por medio de tablas y gráficas. En el capítulo 4 se muestran las pruebas efectuadas y se plantea un mecanismo probable de la intermitencia de los vórtices erguidos, con base principal en las observaciones. Al final se dan algunas conclusiones.

2. DESCRIPCION DE LA FORMACION INTERMITENTE DE DIFERENTES ESTRUCTURAS VORTICOSAS

2.1 CONSIDERACIONES GENERALES

Describir un fenómeno turbulento es una tarea ardua y complicada por la dificultad que encierra su visualización, como consecuencia del comportamiento caótico y al azar de las partículas fluidas. Sin embargo, a pesar de encontrarnos ante un problema de esa índole, las observaciones muestran un proceso cíclico dentro del desorden en que se desarrollan.

Tomando en consideración lo anterior, se cree conveniente establecer un orden lógico en la descripción, para de esta manera facilitar la exposición, su comprensión y una concepción más clara del problema.

En primer término se describirá la formación de un vórtice de eje horizontal (localizado en el ángulo diedro formado por el piso del canal y la base del vertedor, - mismo que identificaremos en el futuro como rollo). El segundo punto contempla la descripción de los vórtices erguidos en cuatro rangos de gastos (ordenados en for-

ma creciente), mencionando en cada caso las manifestaciones macroscópicas que se visualizan.

El procedimiento anterior se definió observando el fenómeno en un intervalo de gastos cuyo límite inferior corresponde al mínimo gasto permisible para que el vertedor cumpla su función. El límite superior quedó definido por las limitaciones originadas en la estabilidad del vertedor y en la aireación de su cara posterior, necesaria para la correcta cuantificación de los vórtices. Si se toma en cuenta que el intervalo es continuo, resulta explicable la determinación de abarcarlo mediante incrementos aproximadamente constantes del gasto, de manera que las variaciones en el fenómeno resultarán apreciables. Este plan experimental permitió comparar los rasgos significativos obtenidos para un gasto, con los del siguiente.

Para efectos de visualización se utilizaron aquellos elementos fácilmente disponibles que se ajustaban a las necesidades esenciales.

- a) Permanganato de potasio cristalizado ($K Mn O_4$)
- b) Arena de diferentes tamaños de grano
- c) Pintura de aceite ligero con polvo de aluminio
- d) Banderitas
- e) Visualizador de rollo
- f) Trazadores esféricos y cuadrados de pequeñas dimensiones.

Estos elementos permitieron estudiar el comportamiento del flujo en regiones de interés tales como: fondo del canal, esquinas entre las paredes y el vertedor y la esquina entre el piso y el vertedor, y en general investigar tanto cuanto esté ligado con el origen y la periodicidad de los vórtices. Durante los experimentos se descubrió que el sedimento arrastrado es sumamente útil para el estudio cualitativo de lo que sucede cerca de la pintilla del canal, cuando se trabaja con gastos superiores a 4.4 lts/seg.

Por último vale la pena subrayar que la descripción no se limitará única y exclusivamente a los vórtices existentes intermitentemente tras una pared vertedora, pues éstos son el resultado de un proceso natural, y como tal, es importante describir todos los efectos que se asocian con su aparición y desaparición.

Cabe hacer mención que las pruebas fueron efectuadas en el laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM , donde además de disponer de un canal tiene un tanque de nivel constante que proporciona una carga neta de 5.5 mca.

2.2 MODELO FISICO

El equipo empleado está constituido por:

2.2.1 CANAL DE REHBOCK

Es un canal cuya principal característica es tener pendiente nula y sección transversal rectangular, con las siguientes dimensiones, 10.50 m de largo, 0.50 m de profundidad y 0.246 m de ancho. Parte de las paredes del canal (2.50 m) son de cristal transparente, circunstancia aprovechada para la colocación del vertedor en el extremo aguas abajo de dicho tramo. El agua destinada alimentar el canal entra primero a un tanque aquietador, de éste, cruzando un vertedor medidor triangular caía a otro tanque que a su vez daba acceso al canal a través de dispositivos tranquilizadores. El canal cuenta como elementos adicionales con dos limnímetros - que permitían medir el tirante aguas arriba de la pared vertedora y el tirante H_v del vertedor medidor triangular para conocer el gasto. Para determinar este último se abría la válvula con la cual se controlaba la cantidad de flujo y se establecía un gasto, una vez establecido el flujo se medía el tirante H_v aguas arriba del - vertedor medidor triangular, se utilizaba la tabla de gastos para un vertedor tipo THOMPSON (tabla 1) y se obtiene el gasto Q_v . El tirante d aguas arriba de la pared vertedora se medía y se calculaba el área de flujo en el canal, con estos datos se obtenía la velocidad media con ayuda de la ecuación $U = Q_v / A$. El canal presenta dos válvulas para descarga en donde se localizan los tanques amortiguadores.

2.2.2 VERTEDOR DE CRESTA HORIZONTAL

Este vertedor fabricado con acrílico por la resistencia y facilidad de maquinado de dicho material, se terminó en la cresta con un chaflán a 45° para aumentar su eficiencia; los detalles del canal y del vertedor se muestran en la figura 2.1 a) y b) respectivamente. Con la finalidad de evitar fugas fue necesario sellar el perímetro de contacto entre el canal y vertedor; utilizándose para tal fin silicón o en su defecto mastique.

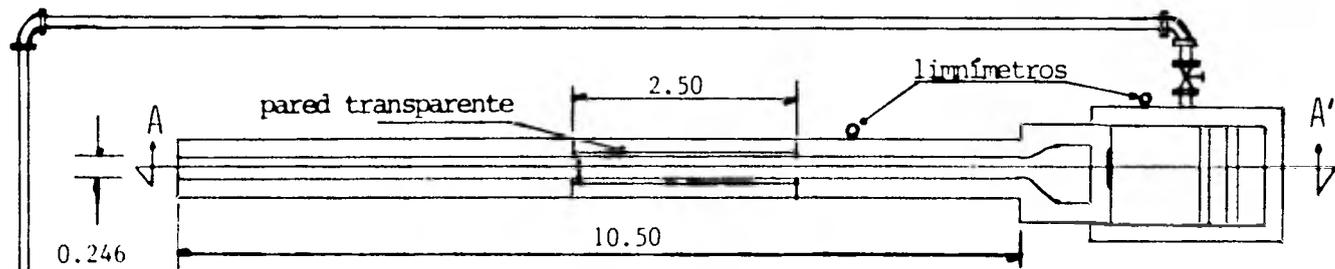
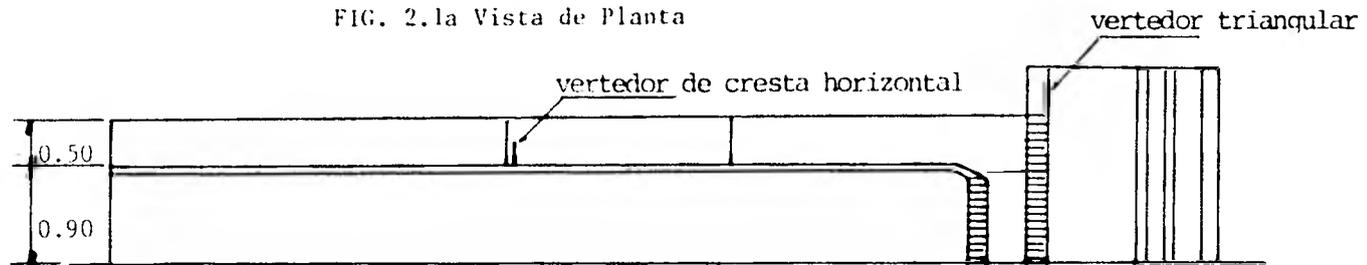


FIG. 2.1a Vista de Planta



Corte A - A'

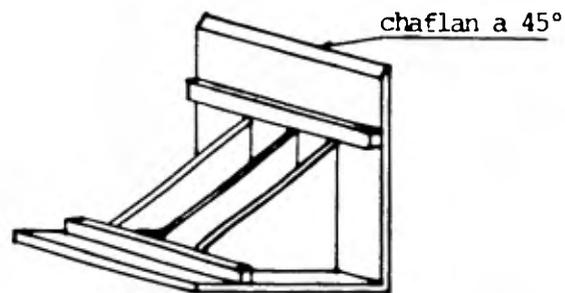


FIG. 2.1b Vertedor

FACULTAD DE INGENIERIA
TESIS PROFESIONAL
CAVAL TIPO REHBOCK Y VERTEDOR DE CRESTA HORIZONTAL
Acot: mts

CARGAS EN METROS	GASTOS EN LITROS/SEGUNDO				
	0.000	0.002	0.004	0.006	0.008
0.03	0.30	0.30	0.30	0.30	0.40
0.04	0.40	0.50	0.60	0.60	0.70
0.05	0.80	0.90	1.00	1.00	1.10
0.06	1.20	1.30	1.50	1.60	1.70
0.07	1.90	2.00	2.10	2.30	2.40
0.08	2.50	2.70	2.90	3.00	3.20
0.09	3.30	3.60	3.80	4.00	4.20
0.10	4.40	4.60	4.90	5.10	5.40
0.11	5.60	5.90	6.10	6.40	6.70
0.12	7.00	7.30	7.60	7.90	8.20
0.13	8.60	8.90	9.20	9.50	9.80
0.14	10.20	10.50	10.90	11.30	11.60
0.15	12.00	12.50	12.90	13.30	13.70
0.16	14.20	14.60	15.10	15.50	16.00
0.17	16.40	16.90	17.40	18.00	18.50
0.18	19.00	19.50	20.10	20.70	21.20
0.19	21.80	22.40	23.00	23.50	24.10
0.20	24.70	25.30	25.90	26.50	27.10
0.21	27.70	28.40	29.20	29.90	30.60
0.22	31.30	32.00	32.70	33.40	34.20
0.23	34.90	35.70	36.40	37.20	38.00
0.24	38.80	39.60	40.40	41.20	42.10
0.25	42.90	43.80	44.70	45.60	46.40
0.26	47.30	48.30	49.20	50.10	51.00
0.27	52.00	53.20	54.40	55.60	56.80
0.28	58.00	58.80	59.60	60.40	61.20
0.29	62.00	63.10	64.20	65.30	66.40
0.30	67.50	68.70	69.80	71.00	72.10
0.31	73.30	74.50	75.70	76.90	78.10
0.32	79.30	80.50	81.80	83.10	84.30
0.33	85.60	86.90	88.20	89.50	90.80
0.34	92.10	93.50	94.80	96.20	97.60
0.35	98.90	100.40	101.80	103.30	104.70
0.36	106.20	107.60	109.10	110.60	112.00
0.37	113.50	115.10	116.60	118.20	119.70
0.38	121.30	122.90	124.50	126.20	127.80
0.39	129.40	131.10	132.70	134.40	136.10
0.40	137.80	139.50	141.30	143.00	144.80
0.41	146.50	148.30	150.10	152.00	153.70
0.42	155.50	157.40	159.20	161.10	162.90
0.43	164.80	166.80	168.90	170.90	173.00
0.44	175.00	177.00	178.80	180.70	182.60
0.45	184.50	186.60	188.70	190.70	192.80
0.46	194.90	197.00	199.10	201.30	203.40
0.47	205.50	207.70	209.90	212.20	214.40
0.48	216.60	218.90	221.20	223.40	225.70
0.49	228.00	230.20	232.50	234.80	237.00
0.50	239.30				

TABLA 1 - Cargas-Gastos en vertedores triangulares tipo Thompson.

2.3 ELEMENTOS VISUALIZADORES Y FORMA EN QUE FUERON EMPLEADOS

Los tres primeros entre los elementos enlistados más arriba han sido ampliamente utilizados en la mecánica de los fluidos experimental. Los demás: banderita, visualizador de rollo, esferas y cuadrados, se introdujeron en el curso de la investigación.

2.3.1 PERMANGANATO DE POTASIO CRISTALIZADO ($K Mn O_4$)

Es más pesado que el agua y se disuelve lentamente a su contacto. Su utilidad en las observaciones resultó fundamental, habiendo permitido el estudio de aspectos importantes como por ejemplo: proceso de formación del rollo, contacto del rollo con el flujo principal, concentración periódica de colorante en regiones de interés y cambio de dirección que experimenta el flujo por la presencia del obstáculo. Para los fines perseguidos el permanganato se empleó de dos maneras:

i) Coloreado del fluido en condiciones estáticas.

Se procedió como sigue:

1) Alimentación del sistema hasta obtener un tirante ligeramente inferior a la altura del vertedor, condición en la cual se cierra la válvula de alimentación.

2) Coloreado del fluido, mediante la acumulación de cristales de $K Mn O_4$ en la plantilla, sobre líneas transversales al eje longitudinal del canal y equidistantes entre si 0.15 m.

3) Disolución de las partículas, lograda en un término de 20 a 30 min.

4) Alimentación lenta del fluido hasta obtener el gasto deseado. El procedimiento anterior es conveniente cuando se trabaja con gastos relativamente pequeños; para gastos mayores no conviene, por producirse un rápido desalojo del colorante.

ii) Coloreado del flujo en condiciones dinámicas

La dificultad de este proceso radica en que las partículas pueden ser arrastradas en suspensión, sin depositarse en la zona de interés. Este inconveniente se subsana arrojando los cristales a una distancia aguas arriba adecuada para permitir el descenso de los mismos en el lugar deseado.

2.3.2 ARENA DE DIFERENTES TAMAÑOS DE GRANO

La arena se usó con la finalidad de observar los fenómenos que se producen en el fondo del canal, tales como la limpia de ciertas zonas en una área cercana al vertedor, limpia efectuada por los vórtices, y mecanismos similares cuyas particularidades se comentarán a su debido tiempo. La arena se introdujo dejándola precipitar en el fondo, bien sea en condiciones estáticas o dinámicas, siendo preferible ésta última por facilitar la formación de una capa de fondo uniforme (si se tiene el cuidado de arrojar cantidades pequeñas), y lograr así mayor claridad en las observaciones.

2.3.3 PINTURA DE ACEITE LIGERO CON POLVO DE ALUMINIO

Esta pintura queda marcada por las trayectorias y las perturbaciones del flujo que ocurren cerca del fondo, sobre todo en proximidad del vertedor. Además permite visualizar trayectorias sobre la cara aguas arriba del vertedor. La dosificación de la mezcla usada en las pruebas, que podrían llamarse óptimas, fue lograda después de varios intentos fallidos, ésta se componía de aceite para coche designación SAE 30, al cual se le iba agregando polvo de aluminio hasta que la mezcla tomara la coloración del polvo de aluminio y una mediana consistencia. La pintura así obtenida se aplicaba con una brocha, para formar una película delgada tanto en el fondo como sobre el vertedor, luego de lo cual el canal se alimentaba lentamente hasta llegar al gasto deseado. La película se dejaba expuesta al flujo durante un lapso de tiempo adecuado para que apareciera sobre ella una configuración lo más clara posible. Luego había que suspender el escurrimiento, porque una sobre-exposición borra los trazos.

2.3.4 BANDERITAS

Bautizadas así por su semejanza con las convencionales, permitieron visualizar las fluctuaciones periódicas del rollo, así como sus codos de inversión y la inversión total de su eje a 90° en la cercanía de las paredes, y los flujos inferiores que se originaban, dirigidos hacia dos zonas colindantes con sus extremos. Además permitió visualizar los cambios de dirección del flujo principal incidente sobre el vertedor. El elemento consta de una varillita rígida cuyo pequeño diámetro no altera en forma considerable las condiciones del flujo, y una banderita propiamente dicha, hecha de papel permeable (bolsita de té), de 1.5 cm por lado, sujeta a

la varillita. Dentro de la bolsita se alojaban cristales de $KMnO_4$ y luego se cerraba la bolsita, cosiéndola por su perímetro. El acoplamiento de la banderita con la varilla se hacía de modo que la banderita pudiese girar y deslizarse libremente sobre la varilla misma (figura 2.2).



Fig. 2.2 Banderita

2.3.5 VISUALIZADOR DE ROLLO

Está formado por dos tubos de metal de igual diámetro (3 mm diámetro exterior), de manera que el dispositivo en su conjunto tiene la forma de una " T ". La sección horizontal, de 24 cm de largo, va agujerada convenientemente con la finalidad de colorear uniformemente al rollo. Como accesorios este dispositivo cuenta con un depósito de alimentación, una manguerita y una válvula de control (figura 2.3).

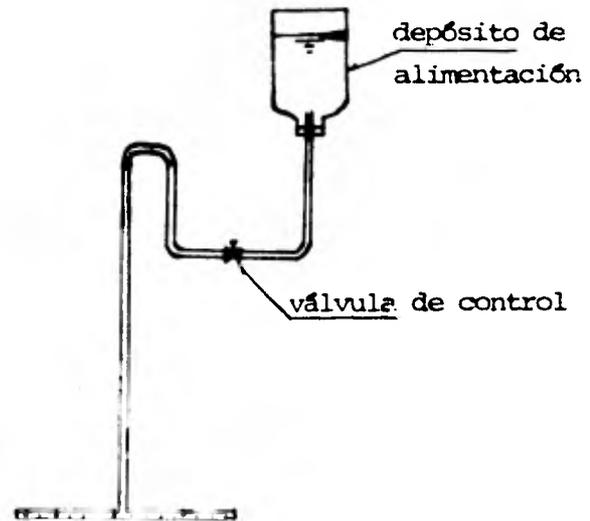


Fig. 2.3 Visualizador de rollo

2.3.6 TRAZADORES ESFERICOS Y CUADRADOS DE PEQUEÑAS DIMENSIONES

Se utilizaron en condiciones de suspensión y arrastre para la visualización de trayectorias dentro del flujo, tanto a nivel piso como a otros niveles, y para estudiar otros detalles de importancia. Estos trazadores se hicieron con papel absorbente. Las esferas tenían un diámetro de 3 a 6 mm y las plaquitas cuadradas 1 cm de lado. Durante la experimentación se arrojaban desde distancias convencionales - aguas arriba tomando en cuenta sus dimensiones.

2.4 DESCRIPCION DEL FENOMENO

Se mencionó en el inciso 2.1 la existencia de un vórtice de eje horizontal que llamamos rollo, caracterizado por fluctuar periódicamente.

Otro aspecto importante del fenómeno resultó ser la configuración que adquiere una delgada capa de arena colocada sobre el fondo del canal. Finalmente, el aspecto de mayor interés para la investigación era el de la aparición de los vórtices erguidos, para los cuales convenía una visualización a base de colorante. Por tanto en lo que sigue se efectuará la descripción en el orden siguiente:

- 1) Observaciones en presencia del colorante
- 2) Observaciones en presencia de arena

Los elementos visualizadores restantes fueron usados indistintamente en todos los casos con excepción de la prueba con pintura.

2.4.1 FORMACION DEL ROLLO

Con el canal coloreado en condiciones estáticas en el plano comprendido entre 2.0 y 0.50 m aguas arriba del vertedor, se alimentó lentamente fluido al sistema. El incremento inicial del nivel de la superficie libre produjo el vertido provocando un movimiento sumamente lento del colorante que se encontraba cerca de la superficie libre. Luego de haberse producido varios incrementos de nivel sumamente pequeños, se llegó a un gasto (aproximadamente 2 lts/seg.) en el que tuvo inicio un proceso evolutivo tal como el que se muestra en la figura 2.4.

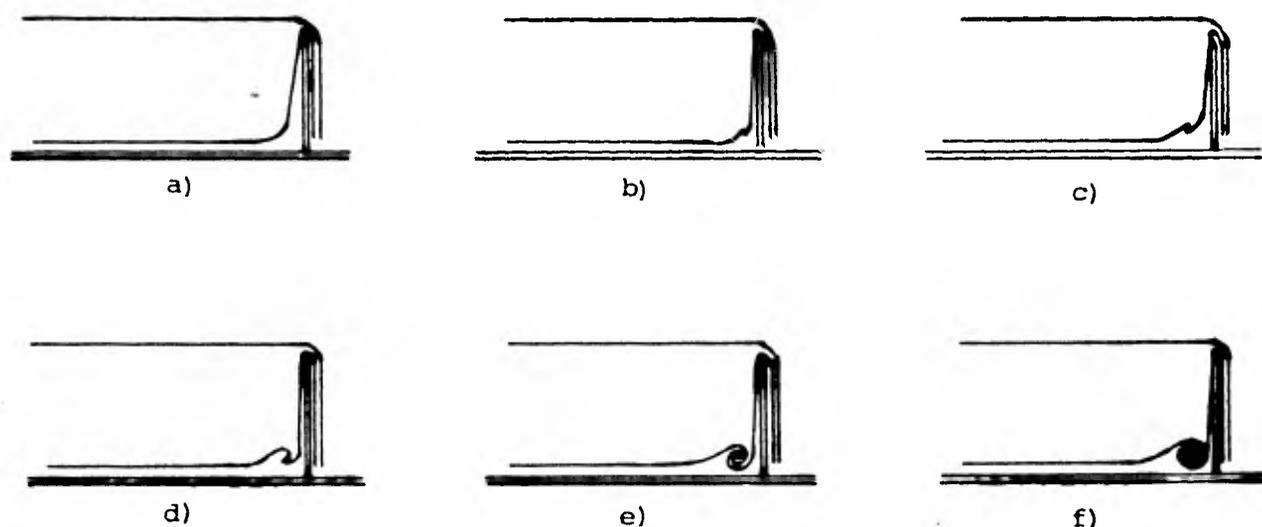


Fig. 2.4 Proceso evolutivo del vórtice horizontal (rollo).

En la fase " f " del proceso, se observa gran simetría en la figura formada, que ya presenta el aspecto de un rollo. Acerca de este rollo, diremos que es perfectamente visible su formación por sobreposición de superficies cilíndricas coaxiales, que no son destruidas por las fluctuaciones, muy ligeras por cierto, que se manifiestan en el flujo, la alimentación del rollo parece efectuarse principalmente a través de su porción central colindante con el vertedor, desalojando el colorante a través de sus codos de inversión.

2.4.2 GASTOS PEQUEÑOS

Está referido a las observaciones realizadas con gastos hasta de 3.3 lts/seg.

1) Descripción del fenómeno en presencia de colorante.

El flujo coloreado, laminar aguas arriba, sufre por la presencia del obstáculo una etapa de transición que culmina con un flujo turbulento concentrado en una región relativamente cercana al vertedor (zona hachurada en la figura 2.5). Periódicamente se observa la concentración de mayor cantidad de colorante en la región, hecho que antecede a las fluctuaciones del rollo. Un instante más tarde es posible visualizar un ligero aumento del flujo coloreado a través de las esquinas, entre el vertedor y las paredes, con marcada tendencia a formar en las paredes la traza que se muestra en la figura 2.6 .

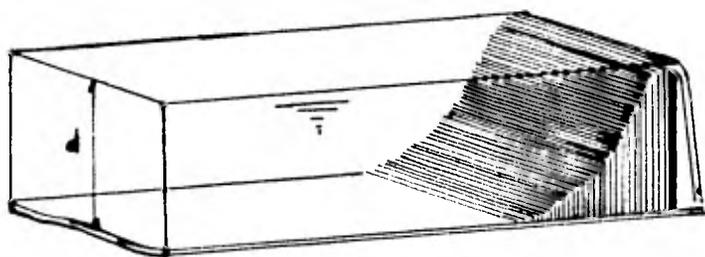


Fig 2.5 Flujo turbulento (hachurado) cercano al vertedor y laminar aguas arriba

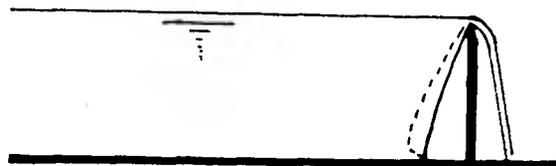


Fig 2.6 Aumento de flujo coloreado en las esquinas después de una fluctuación del rollo

Por otro lado, en las zonas que se llamarán desde ahora "zona de vórtices" comunicadas con los extremos horizontales y cuya localización se muestra en la figura 2.7, cada cierto tiempo aparecen estructuras que difícilmente pueden identificarse como vórtices, debido a que si bien en sus inicios dan esa impresión, luego terminan difundiéndose adoptando un comportamiento totalmente turbulento. En la intercara de contacto entre el flujo y el rollo se manifiestan emisiones turbulentas de baja velocidad, de preferencia ascendentes; los gastos máximos dentro del rango de estudio propician el rompimiento del orden existente en el rollo:

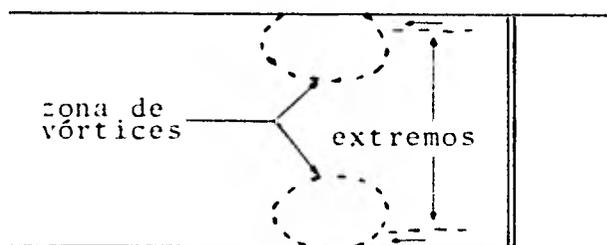


Fig 2.7 Zona de vórtices

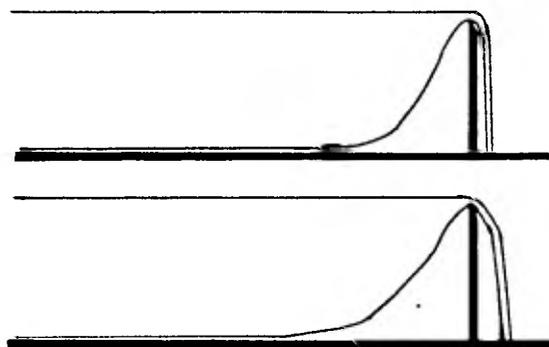


Fig 2.8 Cambio en la pendiente del flujo principal y la región separada al aumentar el gasto

Al colocarse la banderita en puntos cercanos a la pared y relativamente próximos a las esquinas, se revela la existencia de un escurrimiento inferior en dirección contraria al flujo principal. La intercara entre éste y el flujo principal tienen una pendiente que decrece al aumentar el gasto, al mismo tiempo que retrocede la sección en donde empieza su curvatura (figura 2.8). Los trazadores esféricos y cuadrados arrastrados en el fondo siguen trayectorias rectas hasta una distancia de aproximadamente 3.0 cm del vertedor, para luego desplazarse lateralmente y acercarse a las paredes. Allí permanecen girando muy lentamente alrededor de una trayectoria ligeramente ovalada, logrando ascender después de largos intervalos de tiempo. Si se forzan estos objetos a penetrar en el rollo, éste no ofrece resistencia a su ingreso.

2) Descripción del fenómeno en presencia de arena.

Las partículas de arena, asentadas en el fondo sobre una área rectangular limitada con la base del vertedor no muestra configuración alguna, a la vez que están desprovistas de movimiento (figura 2.9).

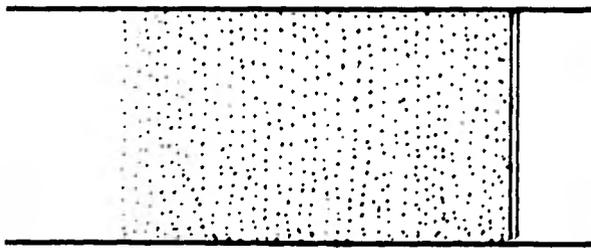


Fig 2.9 Arena en el fondo del canal

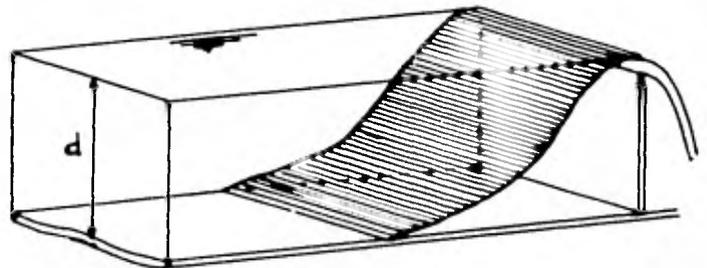


Fig 2.10 Ensanchamiento de la región separada con gastos medianos

2.4.3 GASTOS MEDIANOS

Se consideran gastos mayores de 3.30 lts/seg. hasta 4.40 lts/seg.

1) Descripción del fenómeno en presencia de colorante .

El comportamiento del colorante en el piso indica la existencia, en el tramo inicial del canal, de un flujo turbulento, cuyo desorden y poder de contaminación aumenta paulatinamente a medida que éste se acerca al vertedor. La región no afectada por el flujo principal se ensancha, volviéndose su comportamiento más desordenado, - (figura 2.10). La concentración de colorante crece en su interior por momentos ligeramente en magnitud, coincidiendo este crecimiento con una disminución periódica del diámetro del rollo. En esta fase ya es posible tener la certeza de la existencia de vórtices erguidos, aunque todavía son muy inestables. La comunicación entre el rollo y las zonas de los vórtices erguidos se visualiza a través de dos fajas a nivel piso (pegadas a las paredes), que se notan por estar desprovistas de colorante. Colocando en esas zonas la banderita, se puede notar la presencia de un flujo en dirección contraria al flujo principal, que se intensifica periódicamente durante cortos

intervalos de tiempo. El contacto del flujo principal con el rollo libera mayor cantidad de turbulencia sobre todo en el fondo. Estas emisiones turbulentas son frecuentes siendo más concentradas en la porción central de la zona de contacto (figura 2.11). La concentración del colorante en las fajas de comunicación está ligada a las fluctuaciones del rollo, tal como demuestran los movimientos de dos banderitas colocadas una en el centro y la otra en la esquina del vertedor.

A medida que crece el gasto descargado la trayectoria media del flujo disminuye su pendiente, al mismo tiempo que se desplaza hacia aguas arriba la línea en donde el flujo cambia de dirección. En toda la región coloreada, a nivel piso, son visibles emisiones turbulentas que ascienden con mayor facilidad a medida que se acercan a la pared vertedora. El uso del visualizador de rollo muestra que el colorante trata de difundirse periódicamente en zonas laterales, circunstancia que va acompañada por la aparición de un vórtice erguido en las mismas. Normalmente se forman dos vórtices - uno con sentido antihorario en la esquina izquierda y el otro en el sentido horario en la esquina derecha. Los trazadores esféricos y cuadrados siguen las mismas trayectorias que en la fase anterior, pero al llegar a las paredes penetran a las zonas de vórtices, describiendo posteriormente órbitas ovaladas (figura 2.12), y permaneciendo menos tiempo en ambas zonas.

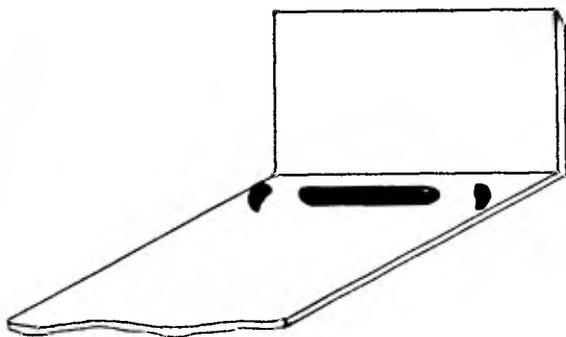


Fig 2.11 Emisiones turbulentas frecuentes en la zona de contacto entre el flujo principal y el rollo

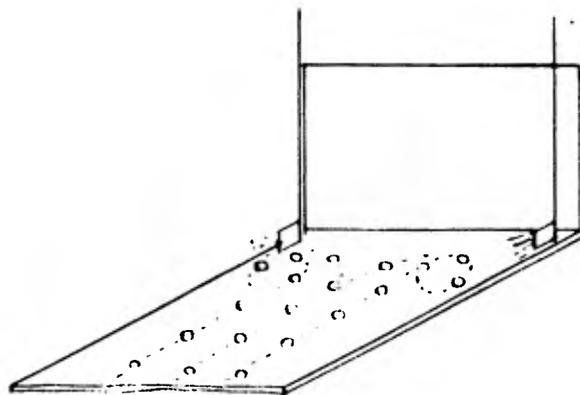


Fig 2.12 Trayectoria de los trazadores esféricos y del flujo en las esquinas inferiores del vertedor

2) Descripción del fenómeno en presencia de arena.

Habiendo los incrementos de gasto propiciado el reforzamiento y la intensificación de los vórtices erguidos, paulatinamente se van demarcando dos zonas limpias de forma ovalada que se muestran en la figura 2.13 ; las partículas de arena, con excepción de las zonas mencionadas permanecen quietas, los trazadores cuadrados y esféricos, al arribar a las zonas limpias, describen órbitas ovaladas antes de ascender en espiral.



Fig 2.13 Demarcación de zonas en forma de ovoides en presencia de arena

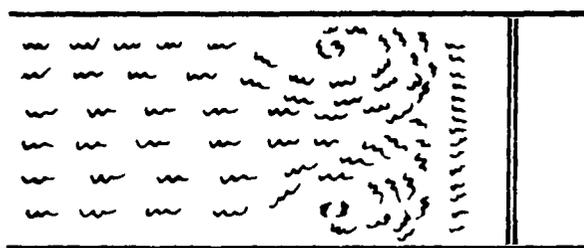


Fig 2.14 Configuración obtenida con colorante en condiciones dinámicas

2.4.4 GASTOS ELEVADOS

La utilización de gastos elevados resulta adecuada por permitir visualizar mejor el fenómeno, en cuanto propician la manifestación de ciertos efectos importantes, claves para la explicación del proceso. Los gastos aquí referidos son mayores de 4.40- lts/seg subiendo hasta 12.0 lts/seg como máximo.

1) Descripción del fenómeno en presencia de colorante.

El canal está ahora ocupado por un flujo totalmente turbulento, cuya intensificación se nota a simple vista estar ligada con los incrementos del gasto. La turbulencia, en la región de interés, aumenta periódicamente y en intervalos de tiempo cada vez menores, lo que se nota cuando la región se ve coloreada en su interior. Estos efectos pueden observarse coloreando el flujo en condiciones dinámicas en un tramo de 1.5 m a partir del vertedor, obteniéndose la configuración que muestra la fi

gura 2.14 . Al observarse esta configuración con un ángulo de 70° con respecto al plano de simetría del canal, se notará como oscila periódicamente con cierta tendencia a cargarse hacia una zona de vórtices erguidos, aunque también se da el caso de dividirse simétricamente. Cuando se carga hacia un lado en particular , la aparición del vórtice en este lado precede la aparición en el lado opuesto visualizándose así mismo mayor intensidad en el vórtice que apareció primero. Por otro lado, granos localizados sobre líneas próximas al vertedor y paralelas a éste, tienen movimientos periódicos, caracterizándose por avanzar hacia adelante, para luego retroceder en ligeros desplazamientos laterales; estos movimientos tienen lugar generalmente durante las fluctuaciones del rollo.

El visualizador de rollo y cristales de $K Mn O_4$ colocados frente al vertedor delatan formas vorticosas como las que se ven en la figura 2.15, la mayoría de las veces con eje horizontal y sentido de giro contrario al del rollo. Estos rollos secundarios existen durante lapsos de tiempo sumamente cortos y se presentan en el momento de las fluctuaciones. Entre sus características más llamativas está la de recorrer trayectorias transversales al flujo, desembocando en las zonas de vórtices, después de lo cual generalmente aparece un vórtice erguido. Otra particularidad es la de que estos rollos secundarios aparecen con mayor frecuencia en número impar, hecho que coincide con una coloración total o parcial del rollo.

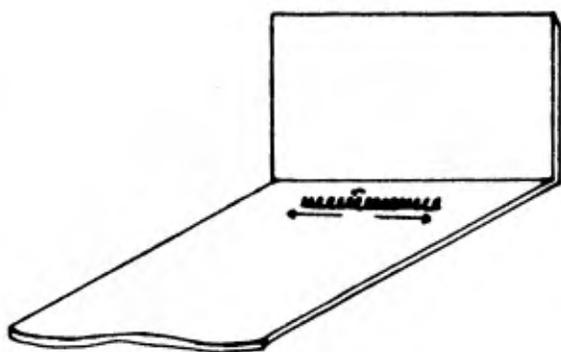


Fig 2.15 Rollos secundarios que aparecen enseguida de una fluctuación del vórtice horizontal

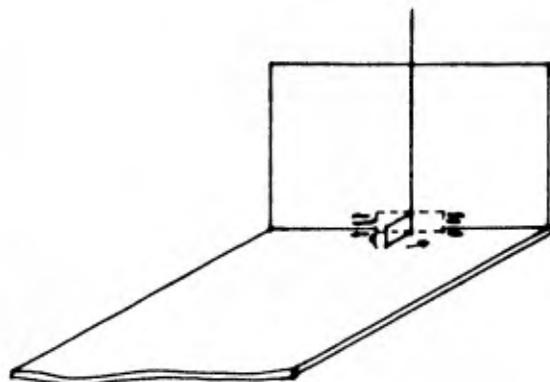


Fig 2.16 Comportamiento de la bandera colocada en el rollo

En ciertas ocasiones, durante las fluctuaciones, se observa en la parte central del canal (franja señalada en la figura 2.12), región al parecer de equilibrio, el nacimiento de vorticillos de eje vertical apenas perceptibles, mismos que, desplazándose dentro de una franja desde su centro hacia las paredes, arriban a la zona de vórtices luego de lo cual se intensifican. Sin embargo, es bastante notoria aún sin visualizar el nacimiento de estos vorticillos, la presencia de un movimiento periódico en la región, que culmina con un tirón en los extremos de la región misma, generalmente acompañado por una estructura vorticiosa; luego hace su aparición un nuevo vórtice o, si el vórtice ya existe, se ocasiona su intensificación (como normalmente ocurre) o bien su destrucción.

La banderita, colocada en el centro del rollo, muestra una intensificación periódica de éste, perfectamente visible por la coloración más intensa que adquiere su núcleo, que se asocia con un incremento considerable de su velocidad angular (fig. 2.16). - El comportamiento de la banderita ante el embate de las fluctuaciones no es uniforme oscilando cada cierto intervalo de tiempo hacia un lado en particular. La oscilación coincide generalmente con una mayor y más rápida emisión de colorante, que se concentra en el núcleo y se extiende hacia las paredes, pero con mayor nitidez en la dirección de la banderita. También vale la pena mencionar que el colorante emitido por el visualizador de rollo, se difunde dentro de una región como la que se muestra en la figura 2.17.

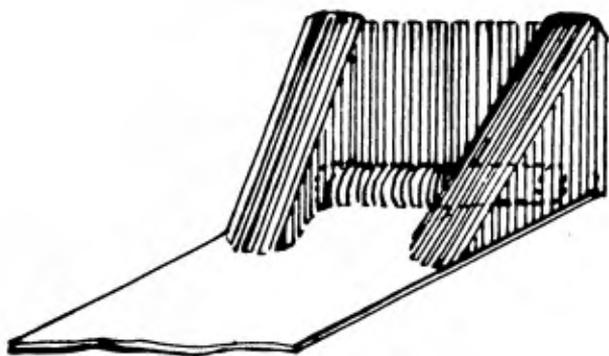


Fig 2.17 Zonas donde se difunde el colorante emitido por el visualizador de rollo



Fig 2.18 Proceso del barrido de arena de dos zonas ovales (zona de vórtices erguidos) y una franja transversal

Los trazadores esféricos y cuadrados, arriban a la región de interés más rápidamente que con los gastos anteriores; pero conforme se van acercando disminuyen su velocidad avanzando posteriormente en forma zigzagueante por la zona limpia, para luego entrar en la zona de los vórtices erguidos, en las cuales, en caso de no haber vórtices, describen trayectorias ovaladas más abiertas que en el rango de gastos anterior. Al manifestarse el primer movimiento vorticoso, empiezan a describir órbitas circulares con radio cada vez menor para luego ser succionadas y desalojadas aguas abajo por el vórtice erguido.

Para concluir, diremos que las observaciones revelan en este caso un aumento en frecuencia, intensidad e intervalo de aparición de las vórtices erguidos, así como de las fluctuaciones del rollo, en el que además se nota una disminución de diámetro.

2) Descripción del fenómeno en presencia de arena.

Al incrementarse lentamente el gasto, la arena asentada debajo del rollo empieza a ser desalojada y acumulada en una franja transversal colindante con éste. Puede observarse que la intensidad del barrido depende del gasto suministrado así es como a mayor gasto corresponde menor tiempo de limpieza. La fig. 2.18, ilustra la configuración correspondiente a un gasto ligeramente superior al extremo inferior del rango que estamos considerando.

Aumentando lentamente el gasto, se inicia luego un proceso interesante, que consiste en la limpieza de una segunda franja transversal que a la postre separará dos zonas perfectamente definidas y ocupadas por la arena (fig. 2.19)



Fig 2.19 Proceso de limpieza de arena de una segunda franja transversal

El proceso empieza por el desalojo de partículas en sentido longitudinal y la aparición de una barra transversal que delimita la región barrida por el rollo, formada - mediante el desplazamiento hacia atrás y hacia adelante de la arena, que da la impresión de un barrido simultáneo, en esas direcciones. El crecimiento de la barra es - función del gasto, predominando en el transcurso de esta etapa el mecanismo anterior así como, en menor cantidad, la presencia de formas vorticosas de eje vertical generalmente originadas en la región de aguas arriba. Otras formas vorticosas, originadas en la franja de equilibrio o surgidas de la misma barra en su fase de crecimiento, se observan en forma esporádica. Si bien es cierto que toda la región a la larga se va limpiando, con lo que se produce finalmente la zona limpia mencionada en la descripción anterior, las partículas, durante la operación siguen esencialmente las trayectorias ya descritas, con marcada tendencia a desplazarse lateralmente, sobre todo en sus extremos (pero siempre a nivel del piso). Posteriormente (cuando ya son bastante manifiestos estos mecanismos), aparecen en las zonas de los vórtices erguidos ya sea vórtices plenamente intensificados o bien, si el vórtice ya existe, vorticillos que lo intensifican o lo destruyen. Por otro lado, en la parte central de la franja de equilibrio, que vibra periódicamente, surgen vorticillos. Estos vorticillos, recorriendo la mitad de franja correspondiente, arriban a las zonas de los vórtices erguidos, donde después de un corto lapso de tiempo se desarrollan completamente (fig. 2.20). La zona ocupada aguas arriba por la arena (fig. 2.21), se caracteriza por la presencia de dos caminitos (perfectamente visible en el lado derecho). Sobre estos caminitos, los cuales están en sentido longitudinal y separados de las paredes aproximadamente 5 cm, las partículas se desplazan incrementando intermitentemente su velocidad de avance, durante intervalos de tiempo menores que los que se dan entre un vórtice y otro; estos movimientos son similares al que se presentaría al someter a una partícula en movimiento a aceleraciones repentinas. Poco antes de la curvatura que los caminitos sufren al rodear la zona de vórtices, puede verse, si se observa con atención, que en ciertas ocasiones surgen estructuras vorticosas diminutas no bien definidas. Esta impresión se reafirma a medida que dichas estructuras avanzan en la dirección del flujo. Parte de éstas, siguiendo una trayectoria encorvada en C, arriban a la zona de los vórtices erguidos, donde posteriormente se manifiestan como vórtices plenamente intensificados; el resto alcanza la zona limpia donde es destruido. Estos mismos movimientos son visualizables en la región comprendida entre los caminitos, con la diferencia de ser menos violentos y por lo tanto más difíciles de visualizar.

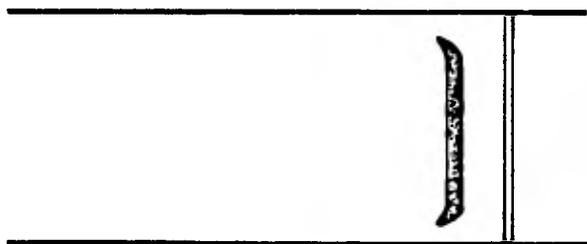


Fig 2.20 Franja de equilibrio

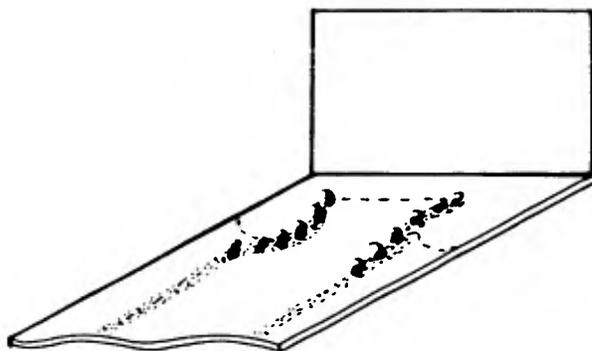


Fig 2.21 Caminitos aguas arriba de la pared vertedora

3) Descripción del fenómeno en presencia de sedimento.

La zona limpia y aquella ocupada por el rollo son barridas con mayor rapidez. La zona limpia se caracteriza por la presencia durante cortos periodos de tiempo, de trayectorias carentes de sedimento, de pocos milímetros de ancho, notándose que las partículas las abandonan desplazándose en sentido lateral, sobre todo en los extremos (fig. 2.22).

En el centro de las franjas de equilibrio, es notorio el nacimiento de pequeños vortecillos los cuales se desplazan lateralmente hasta arribar a la zona de vórtices, - percibiéndose en el momento de abandonar su trayectoria una aceleración en su movimiento. Otro aspecto interesante, es que la franja central periódicamente se ve sometida a movimientos oscilatorios aún sin visualizarse el nacimiento de vórtices que culminan en sus extremos con un tirón, muchas veces acompañado por la creación de un vórtice diminuto.

El sedimento asentado aguas arriba de la zona limpia forma trayectorias más o menos rectilíneas intercaladas con franjas longitudinales desprovistas de partículas. Las trayectorias se caracterizan por tener, durante cortos períodos de tiempo, movimientos oscilantes más notorios, que aparecen aproximadamente a la altura del inicio de la curvatura (fig. 2.23). Se trata de estructuras semejantes a gusanos que se mueven al parecer en órbitas redondas. De todos modos, bien cuando estas estructuras no se manifiestan, es frecuente observar la presencia, en la cresta de la región, de

vórtices que en caso de no ser destruidos siguen una trayectoria en C para arribar luego a la zona de vórtices, allí donde posteriormente aparece un vórtice erguido - en toda su magnitud. Lo arriba expuesto es más notorio en los caminitos pero al igual que en la prueba con arena, sucede también en la región entre los caminitos.

La parte curva de los caminitos, se ve sometida a oscilaciones laterales siendo la curvatura mayor cuando en la zona existe un vórtice. Esta situación se presenta cualquiera que sea la zona donde se ha originado el vórtice.

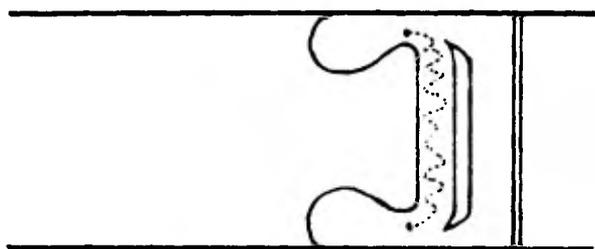


Fig 2.22 Las partículas abandonan la zona limpia desplazándose en sentido lateral

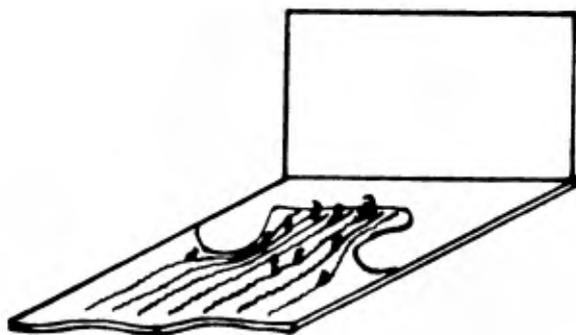


Fig 2.23 Trayectorias longitudinales formadas por el sedimento

- 4) Descripción del fenómeno en presencia de la pintura de aceite en polvo de aluminio

Después de un cierto tiempo de escurrimiento de la corriente el fondo del canal adquiere la configuración mostrada en la figura 2.24, la zona limpia central y aquella ocupada por el rollo muestran un barrido muy ligero, sin observarse ninguna succión ascendente que indique la presencia de vórtices de eje vertical, tal como sucede en la zona de los vórtices erguidos donde sí es perceptible este mecanismo de succión además de la huella dejada por los vórtices durante su reforzamiento.

2.4.4 GASTOS MUY ELEVADOS

Este grupo comprende a los gastos mayores a 12.0 lts/seg hasta 40.0 lts/seg que era

el máximo alcanzado.

1) Descripción del fenómeno en presencia de colorante.

Las fluctuaciones del rollo son ahora mucho más intensas y frecuentes. La banderita colocada, en una franja pegada a las paredes cambia bruscamente de dirección, manteniendo esta misma orientación en un tramo de aproximadamente 12.0 cm aguas arriba del vertedor. Además este cambio de dirección está acompañado por una ascensión rápida de la banderita (fig. 2.25). Cuando la fluctuación se aprecia por medio de la banderita, puede distinguirse como se desplaza el eje del rollo, gracias a la coloración que adquiere su núcleo tanto en el tramo horizontal como en el vertical. Al colocar el visualizador de rollo en la base del vertedor se observa que las fluctuaciones afectan a una mayor porción de zona limpia en el preciso instante en que se manifiestan las estructuras vorticosas de eje horizontal mencionadas en el inciso anterior. Subiendo el visualizador a 3.0 cm de la plantilla del canal, durante las fluctuaciones se visualiza una expansión de las zonas de vórtices seguidas por la formación de un vórtice erguido y el consiguiente ensanchamiento de dichas zonas. Los trazadores esféricos y cuadrados permanecen menos tiempo en la zona limpia y al llegar a la zona de vórtices describen trayectorias espirales cada vez más amplias, ascendiendo en menor tiempo. En lo que respecta al rollo, éste barre toda partícula con que tenga contacto.

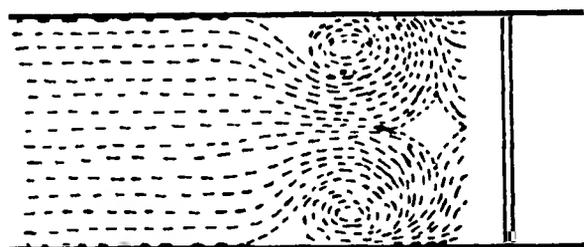


Fig. 2.24 Configuración del fondo del canal en presencia de aceite con polvo de aluminio.

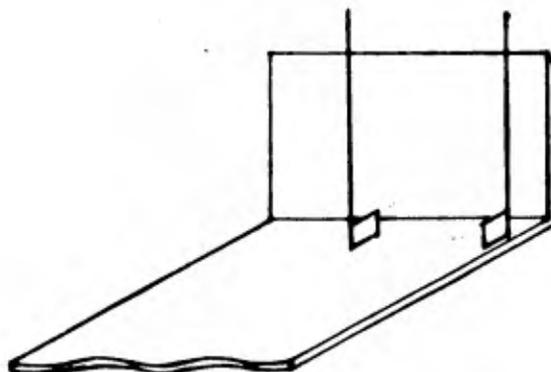


Fig 2.25 Cambio brusco de dirección de la banderita

2) Descripción del fenómeno en presencia de arena.

El fondo adquiere una configuración como la que se ilustra en la figura 2.26. La limpieza del área debajo del rollo y la formación de la zona limpia aguas arriba son sumamente rápidas; se efectúan de la forma ya mencionada, pero por un proceso un tanto confuso, por la turbulencia general y la intensidad con que tienen lugar las fluctuaciones.

El barrido de la franja de equilibrio es posterior a la limpieza de las dos zonas antes mencionadas, visualizándose mejor la aparición de vórtices en su parte central. El desalojo de la arena empieza en la parte central extendiéndose hacia los extremos hasta su total desaparición.

En los caminitos las estructuras vorticosas se manifiestan con mayor nitidez que en el rango de gastos anterior, desde un poco antes del inicio de su curvatura; llegan a la cresta completamente desarrollados y generalmente con el sentido de giro que corresponde a la zona que arribarían en caso de no ser destruidos (fig. 2.27). Estas mismas manifestaciones se presentan en la región limitada por los caminitos, pero en menor grado.

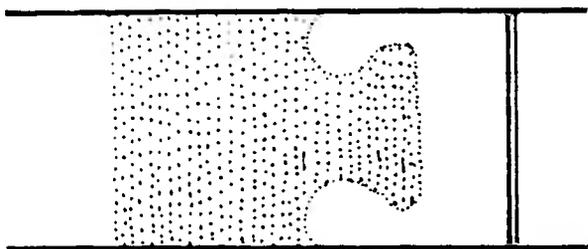


Fig 2.26 Configuración final con arena para gastos elevados.

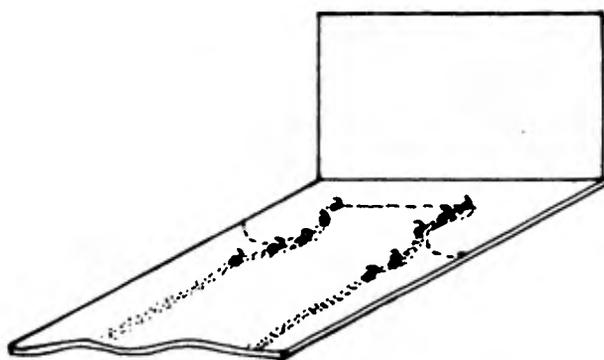


Fig 2.27 Estructuras vorticosas completamente desarrolladas en los caminitos

3 CALCULOS Y MEDICIONES.

3.1 ANALISIS DIMENSIONAL.

Se sabe que para cada tipo de flujo existe generalmente una relación funcional entre las diferentes variables, adecuadas al caso en cuestión, incluyendo en estas variables las dimensiones geométricas, las propiedades del fluido y las características del escurrimiento. En algunos problemas sobre fluidos se puede partir de una expresión matemática de las leyes que rigen el flujo de fluido; resolviendo estas ecuaciones apelando a hipótesis apropiadas y simplificaciones se llega a la descripción algebraica del problema, dicha solución resulta en forma de relación entre las diferentes magnitudes que intervienen en el flujo. Otra manera de obtener esta información consiste en hechar mano de medidas reales, esto es, utilizando instrumentos adecuados con los cuales se puedan medir las magnitudes del fluido de interés. La evaluación experimental es en el estudio concierne el mejor medio disponible, dado lo complicado que resulta estudiar analíticamente el fenómeno.

El análisis dimensional es la teoría que ayuda a encontrar la forma como se ligan en un problema específico unos parámetros dimensionales con otros e indica el agrupamiento lógico de las magnitudes en relaciones adimensionales. Este método es particularmente valioso cuando son desconocidas o complejas las relaciones matemáticas.

Al aplicar el método, suponiendo que se conocen todas las magnitudes que controlan el fenómeno, el primer paso consiste en escribir las dimensiones de todas las magnitudes que intervienen en el fenómeno físico. Las dimensiones de una magnitud dada se determinan por su definición en función de las dimensiones que arbitrariamente se han seleccionado como fundamentales. El segundo paso consiste en encontrar la relación de los parámetros adimensionales. Se conocen tres métodos para encontrar dichos grupos adimensionales, los cuales se clasifican de la siguiente manera:

- 1) Algebráico
 - a) Método clásico de Rayleigh
 - b) Teorema de Π mejorado
- 2) Utilización de ecuaciones diferenciales
- 3) Por la semejanza geométrica, cinemática y dinámica que da la significación de los grupos adimensionales.

Utilizando el sistema absoluto de unidades como dimensiones fundamentales: masa $[M]$, longitud $[L]$ y el tiempo $[t]$.

Las magnitudes que controlan el fenómeno son:

- 1) Dimensiones geométricas.
 - L = ancho del canal = ancho del vertedor = $[L]$
 - P = altura del vertedor = $[L]$
- 2) Propiedades del fluido (agua).
 - ρ = densidad = $[M/L^3]$
 - μ = viscosidad dinámica = $[M/Lt]$
- 3) Características del escurrimiento
 - T = periodo de aparición de los vórtices erguidos = $[t]$
 - U = velocidad media = $[L/t]$

d = tirante en el canal = $[L]$

g = aceleración de la gravedad = $[L/t^2]$

Aplicando el método algebraico se tiene:

Si por ϕ se representa la característica de una cierta función podrá escribirse

$$T = \phi(U, d, g, \rho, \mu) \quad (3.1)$$

donde no se introducen las dimensiones geométricas por razones que después se explicarán.

Aplicado el método, el resultado final es:

$$TU/d = \phi\left[\left(\frac{Ud\rho}{\mu}\right), \left(\frac{U^2}{gd}\right)\right] \quad (3.2)$$

donde la función desconocida ϕ , puede ser una función de cualquier tipo que se determina experimentalmente.

La ecuación (3.2) puede representarse como

$$TU/d = \phi(Re, Fr) \quad (3.3)$$

donde Re es el número de Reynolds y Fr el número de Froude.

La razón de no haber incluido en el análisis dimensional las dimensiones geométricas se debió a que el director de tesis (Dr. Levi), realizó en la universidad de -

Padua, Italia, algunos ensayos similares, en un canal y con un vertedor de características completamente distintas al modelo de pruebas usado por nosotros. Comparando los resultados obtenidos por ambas partes se llegó a la conclusión de que estas variables, altura del vertedor y ancho del canal, no eran muy significativos en el estudio global del fenómeno. Existía sin embargo la inquietud de comprobar este hecho y por ello se construyó un vertedor con altura diferente al empleado en el estudio del fenómeno (19.8 cm), que fue de 27.0 cm, comprobándose lo anteriormente expuesto.

3.2 DESCRIPCION DE LOS ENSAYOS.

En todo trabajo experimental es necesario llevar a cabo mediciones que permitan -- una mayor comprensión de los fenómenos en estudio. Las peculiares características del movimiento de los fluidos, que dan a éste considerable complejidad dificultan en el caso concerniente la interpretación del fenómeno basada únicamente en la observación. Esto hizo necesaria la obtención de información que auxiliara no solo -- para la comprensión e interpretación del fenómeno, sino además, para relacionar -- las diferentes variables que intervienen en el susodicho fenómeno.

Los parámetros medidos fueron: la periodicidad de los vórtices erguidos, la periodicidad de las fluctuaciones de velocidad del rollo, el tirante en el canal y el tirante en la descarga. Todos los demás parámetros se calcularon a través de fórmulas simples.

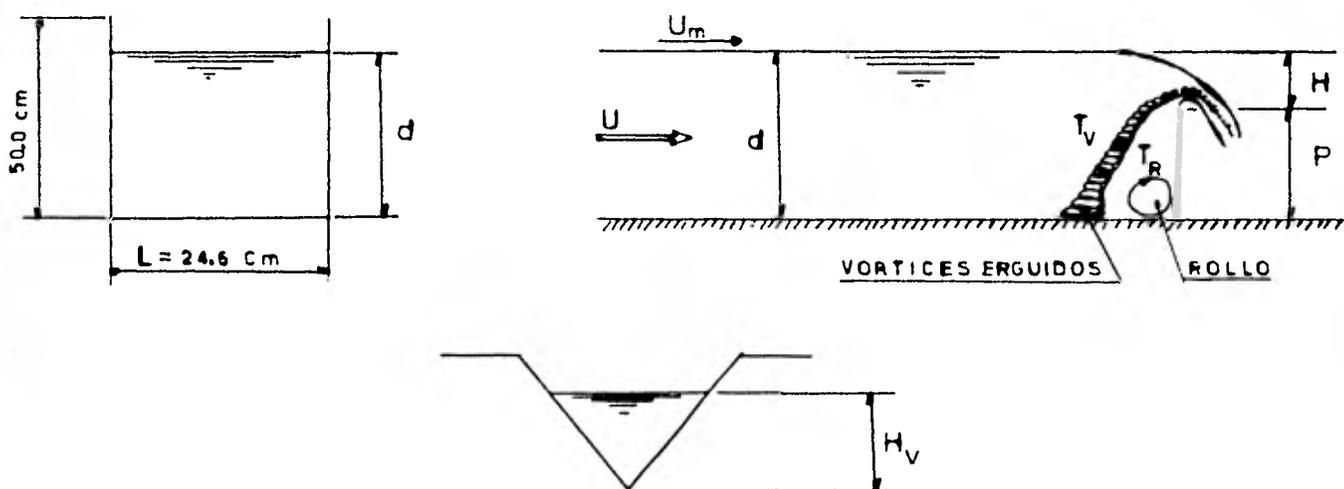


Figura 3.1 Parámetros que se midieron: tirante en el canal (d), periodicidad de los vórtices erguidos (T_v), periodicidad de las fluctuaciones de velocidad del rollo (T_r), tirante en la descarga (H_v).

El procedimiento de medición seguido en cada ensayo era el siguiente: Por medio de una válvula de compuerta, con la cual se controla el caudal en el canal, se establece un gasto pequeño que se incrementa poco a poco; con el auxilio del $K Mn O_4$, que previamente se deposita en la zona de vórtices, se observa como se mencionó anteriormente, la formación del rollo y diferentes estructuras vorticosas, se deja de incrementar el gasto una vez que se llega aquél en el cual los vórtices erguidos son bien definidos y por tanto contabilizables. Este era el mínimo gasto para la medición de la periodicidad de los vórtices erguidos y de las pulsaciones del rollo. A partir de allí se incrementó de centímetro en centímetro el tirante en el canal, realizando para cada tirante las mismas mediciones.

Las mediciones y cálculos realizados para cada tirante se muestran en las tablas 2 y 3; la forma en que se construyeron es como sigue: Se mencionó en el capítulo anterior la forma en que se midieron los tirantes d (columna 2) y H_v (columna 3), así como el cálculo del gasto Q_v (columna 4), el área del flujo y la velocidad media U (columna 5). Para comprobar si la velocidad y el gasto eran correctos se utilizaron dos métodos; la fórmula de Rehbock ($Q = K L H^{3/2}$) y un flotador el cual era depositado en la corriente del canal y se cronometraba el tiempo en que recorría la distancia de un metro, con esto se calculaba su velocidad y por ende un promedio de la del flujo, el resultado multiplicado por el área de flujo da el gasto medio Q_m . Se mencionó que normalmente se forman dos vórtices, uno en sentido antihorario en la esquina izquierda y otro en sentido horario en la esquina derecha, por lo cual fue necesario relizar mediciones en ambos lados; se eligieron dependiendo del gasto una serie de 5, 8, 10 o 15 vórtices seguidos, se cronometraba su tiempo de aparición y se realizaban 10 mediciones de este tipo para un mismo gasto, de ésta manera se obtenía un periodo medio del lado izquierdo llamado T_{vi} (columna 6) y otro del lado derecho llamado T_{vd} (columna 7); a su vez estos dos se promediaban para obtener un periodo medio T (columna 8) para un gasto dado. Las columnas 9, 10 y 11 de las tablas muestran tres parámetros adimensionales resultado del análisis hecho al sistema.

En la medición de los vórtices erguidos se utilizaron dos criterios. Esto se debió básicamente a que se observa, principalmente desde gastos medios hacia arriba la superposición de vórtices, es decir, durante la aparición e intensificación de un vórtice se observa que se sobreponen a éste uno o dos pequeños vórtices más, dando lugar según este criterio, a un mayor tiempo de duración del vórtice inicial. El pri-

mer criterio consistió en medir el vórtice desde que aparecía hasta que en la zona de vórtices dejaba de haber movimiento vorticoso, el segundo criterio consistía en tomar en cuenta el vórtice inicial más los que se sobreponían al él. Sin embargo, a criterio del Dr. Levi los vórtices pequeños que parecen sobreponerse al vórtice inicial son originados por la presencia del primero. Utilizando el primer criterio de medición se realizaron tres barridos; cuando se llevaron a cabo estas mediciones se pensaba que el rollo era permanente e invariante en intensidad para un gasto dado, por esta razón no aparece en la tabla 2, la cual muestra la información obtenida -- con el primer criterio. Con el segundo criterio se realizaron dos barridos, uno con el vertedor de 19.8 cm de alto y otro con el de 27.0 cm, donde paralelamente a la medición de la periodicidad de los vórtices erguidos se medía la periodicidad de fluctuación del rollo; La tabla 3 resume esta información, sobre la cual no se apoya la interpretación del fenómeno. Se presenta a sugerencia del Dr. Levi.

3.3 DESCRIPCION DE TABLAS Y GRAFICAS.

Se observa en la tabla 2 en la columna 1, que el tirante en el canal se varió entre 24.0 y 38.0 cm, originando gastos de 3.6 a 36.8 lts/seg (columna 3), con velocidades medias entre 6.0 hasta 39.0 cm/seg (columna 4), el número de Froude varía de 0.04 hasta 0.20 (columna 9) y el número de Reynolds varía de 0.47×10^5 a 4.2×10^5 . Las columnas 5 y 6 muestran los periodos medios de aparición de vórtices de la izquierda y la derecha respectivamente, se aprecia en ellas que conforme se incrementa el gasto el periodo decae, es decir, la frecuencia aumenta.

La figura 3.2 muestra el periodo medio de aparición de los vórtices erguidos (columna 8), en función del gasto en el canal (columna 4); se aprecia claramente un comportamiento exponencial decreciente, de manera que, cuando el gasto tiende a ser pequeño los vórtices erguidos tienden a desaparecer y opuestamente cuando el gasto crece los vórtices tienden a ser permanentes.

Las columnas 8, 9 y 10 de la tabla 2 muestran tres parámetros adimensionales resultado del análisis hecho al sistema. Se pretende con ello encontrar experimentalmente la función ϕ que los relaciona. El parámetro adimensional TU/d se ha graficado en función del número de Froude y del número de Reynolds, figuras 3.3 y 3.4 respectivamente, para ver la relación que los liga. En estas figuras se aprecia que no -- existe ninguna correlación entre estos parámetros.

El haber introducido en el análisis del sistema las propiedades del fluido trajo como consecuencia la aparición del número de Reynolds y el haber introducido el parámetro g (aceleración de la gravedad) por considerar que en el problema el fluido se desplaza debido a la gravedad trajo como consecuencia la aparición del número de Froude. Esto se hizo con la finalidad de no perder generalidad en el problema y evitar el error de no considerar magnitudes que podían estar involucradas en el fenómeno.

Como no existe ninguna relación entre los parámetros adimensionales TU/d con Re y Fr , como lo muestran las figuras 3.2 y 3.3 respectivamente, la ecuación (3.1) se reduce a la siguiente expresión.

$$T = \phi (U, d) \quad (3.4)$$

Dando como resultado un solo parámetro adimensional donde ϕ es una constante que se determina experimentalmente. Se tiene entonces que el periodo medio T de los vórtices erguidos se relaciona con el tirante d y la velocidad media U , a través de la expresión:

$$TU/d = C \quad (3.5)$$

Donde C es una constante que tiene un valor de 6.6 ± 1 , como puede apreciarse en la tabla 2 (columna 9), en la figura 3.2 y en la figura 3.3

La ecuación (3.5) es la relación entre las diferentes variables que intervienen en el fenómeno en estudio. Sin embargo no dice nada acerca del mecanismo de la formación de los vórtices erguidos, ni la razón de la periodicidad, ni el porque este parámetro adimensional es el mismo valor, constante.

Medición	d (mm)	H _v (mm)	Q _v l/seg	u cm/seg	T _v seg	T _d seg	T̄ seg	T̄u/d	F _r	R _c x 10 ⁵
1	28.06	14.13	10.41	15.02	12.84	13.03	12.94	6.924	0.091	1.30
2	29.04	15.18	12.45	17.29	11.52	11.21	11.36	6.766	0.102	1.55
3	30.15	16.34	14.95	20.07	10.72	9.75	10.24	6.814	0.1167	1.83
4	31.38	17.49	17.69	22.82	9.89	8.65	9.27	6.741	0.1301	2.14
5	32.09	18.16	19.45	24.53	9.71	8.09	8.90	6.802	0.1383	2.34
6	33.11	19.10	22.10	26.95	8.77	8.23	8.50	6.920	0.1496	2.63
7	34.08	20.01	25.00	29.62	7.83	7.23	7.53	6.543	0.1620	2.96
8	35.15	20.92	27.46	31.58	6.22	6.38	6.30	6.658	0.1702	3.22
9	36.25	21.76	30.46	34.02	6.04	6.20	6.12	5.743	0.1804	3.55
10	37.22	22.80	34.20	37.20	6.46	6.26	6.36	6.356	0.1950	3.96
11	38.16	23.51	36.84	39.07	6.02	6.06	6.04	6.186	0.2020	4.24

Medición	d (mm)	H _v (mm)	Q _v l/seg	u cm/seg	T _v seg	T _d seg	T̄ seg	T̄u/d	F _r	R _c x 10 ⁵
1	24.06	9.23	3.63	6.108	25.66	26.20	26.93	6.836	0.0408	0.478
2	25.03	10.55	5.05	8.170	17.81	21.88	19.85	6.478	0.0521	0.656
3	26.00	11.77	6.61	10.29	14.53	14.94	14.74	5.833	0.0644	0.848
4	27.00	12.94	8.48	12.70	12.69	14.21	13.45	6.333	0.0780	1.07
5	28.00	14.04	10.34	14.93	11.31	14.89	13.09	6.784	0.0901	1.29
6	29.00	15.15	12.37	17.28	9.73	10.70	10.22	6.089	0.1025	1.53
7	30.00	16.14	14.48	19.54	9.86	10.31	10.08	6.573	0.1139	1.78
8	31.00	17.15	16.77	21.90	9.93	9.47	9.70	6.554	0.1256	2.04
9	32.00	18.14	19.35	24.49	8.85	8.90	8.87	6.793	0.1382	2.33
10	33.00	19.02	21.81	27.10	7.57	7.93	7.75	6.361	0.1500	2.64
11	34.01	19.94	24.54	29.21	7.44	6.93	7.19	6.173	0.1594	2.91
12	35.00	19.96	24.58	29.51	6.79	7.94	6.86	5.955	0.1613	2.94
13	35.00	20.76	26.98	31.21	6.52	6.83	6.68	5.952	0.1682	3.17
14	36.00	21.70	30.75	34.02	5.99	6.472	6.23	5.886	0.1811	3.53
15	37.00	22.61	33.44	36.59	5.96	6.531	6.23	6.161	0.194	3.88
16	38.00	23.42	36.48	38.87	5.26	5.90	5.58	5.711	0.2014	4.20

Medición	d (mm)	H _v (mm)	Q _v l/seg	u cm/seg	T _v seg	T _d seg	T̄ seg	T̄u/d	F _r	R _c x 10 ⁵
1	24.0	9.21	3.61	6.10	27.54	24.69	26.12	6.639	0.0399	0.476
2	25.0	10.54	5.64	8.13	21.03	21.11	21.07	6.854	0.0520	0.652
3	26.0	11.74	6.61	10.24	17.39	17.33	17.36	6.875	0.0649	0.848
4	27.0	12.93	8.46	12.68	16.09	16.39	16.24	7.632	0.0778	1.07
5	28.0	14.03	10.20	14.74	13.01	14.04	13.52	7.120	0.089	1.28
6	29.0	15.70	13.50	18.85	10.68	10.99	10.84	7.040	0.112	1.67
7	30.0	16.13	14.46	19.50	8.93	11.01	9.97	6.480	0.114	1.77
8	31.0	17.10	16.65	21.74	9.43	8.62	9.02	6.330	0.125	2.02
9	32.0	18.07	18.50	23.42	9.07	8.02	8.54	6.250	0.132	2.23
10	33.0	18.98	21.75	25.59	7.41	7.24	7.73	5.680	0.142	2.49
11	34.0	19.89	24.37	29.04	8.11	7.15	7.63	6.520	0.154	2.89
12	35.0	20.73	26.89	31.00	7.25	7.35	7.30	6.460	0.167	3.15
13	36.0	21.66	30.11	33.86	6.21	6.55	6.46	6.022	0.1803	3.52
14	37.0	22.68	33.56	36.72	6.38	6.99	6.69	6.640	0.191	3.89
15	38.0	23.55	36.15	38.52	5.69	6.63	6.16	6.240	0.199	4.17

TABLA 2.- Mediciones y cálculos efectuados con el primer criterio de medición-

MEDICIÓN	d (cm)	\bar{T}_n (seg)	\bar{T}_{nd} (seg)	\bar{T}_{ni} (seg)	\bar{T} (seg)	$\bar{T}_{n1/d}$	$\bar{T}_{u/d}$
1	2.4	16.97	20.68	19.67	20.17	4.82	5.13
2	2.5	14.47	15.76	16.71	16.74	4.69	5.44
3	2.6	10.59	12.71	12.59	12.65	4.19	5.01
4	2.7	9.62	10.64	10.44	10.54	4.52	4.95
5	2.8	7.88	8.40	8.94	8.67	4.15	4.56
6	2.9	8.84	8.86	8.11	8.49	5.75	5.52
7	3.0	6.13	8.71	6.82	7.76	3.99	5.06
8	3.1	6.14	6.57	6.79	6.68	4.34	4.72
9	3.2	4.84	6.03	5.34	5.69	3.70	4.35
10	3.3	4.05	5.66	4.35	5.01	3.33	4.11
11	3.4	3.37	4.29	4.69	4.49	2.93	3.69
12	3.5	3.47	3.68	3.80	3.74	3.09	3.33
13	3.6	2.99	3.45	3.58	3.15	2.83	2.98
14	3.7	2.61	2.65	2.54	2.59	2.59	2.58
15							

a) vertedor de 19.8 cm

MEDICIÓN	d (cm)	U (cm/seg)	Q _v (l/seg)	\bar{T}_n (seg)	\bar{T}_{nd} (seg)	\bar{T}_{ni} (seg)	\bar{T} (seg)	$\bar{T}_{nU/d}$	$\bar{T}_{U/d}$
1	32.7	6.23	5.03	24.81	28.21	28.89	28.56	4.73	5.45
2	33.7	7.98	6.64	16.12	17.84	20.78	19.31	3.83	4.57
3	34.7	9.87	8.46	12.31	14.39	13.49	13.94	3.50	3.97
4	35.7	11.62	10.25	11.89	13.79	12.62	13.20	3.87	4.29
5	36.7	14.89	13.50	10.30	12.20	12.03	12.12	4.18	4.92
6	37.7	15.55	14.48	10.55	11.26	12.89	12.08	4.35	4.98
7	38.7	17.68	16.90	9.00	11.61	11.18	11.39	4.11	5.20

b) vertedor de 27.0 cm

TABLA 3. Mediciones y Cálculos efectuados con el segundo criterio de medición

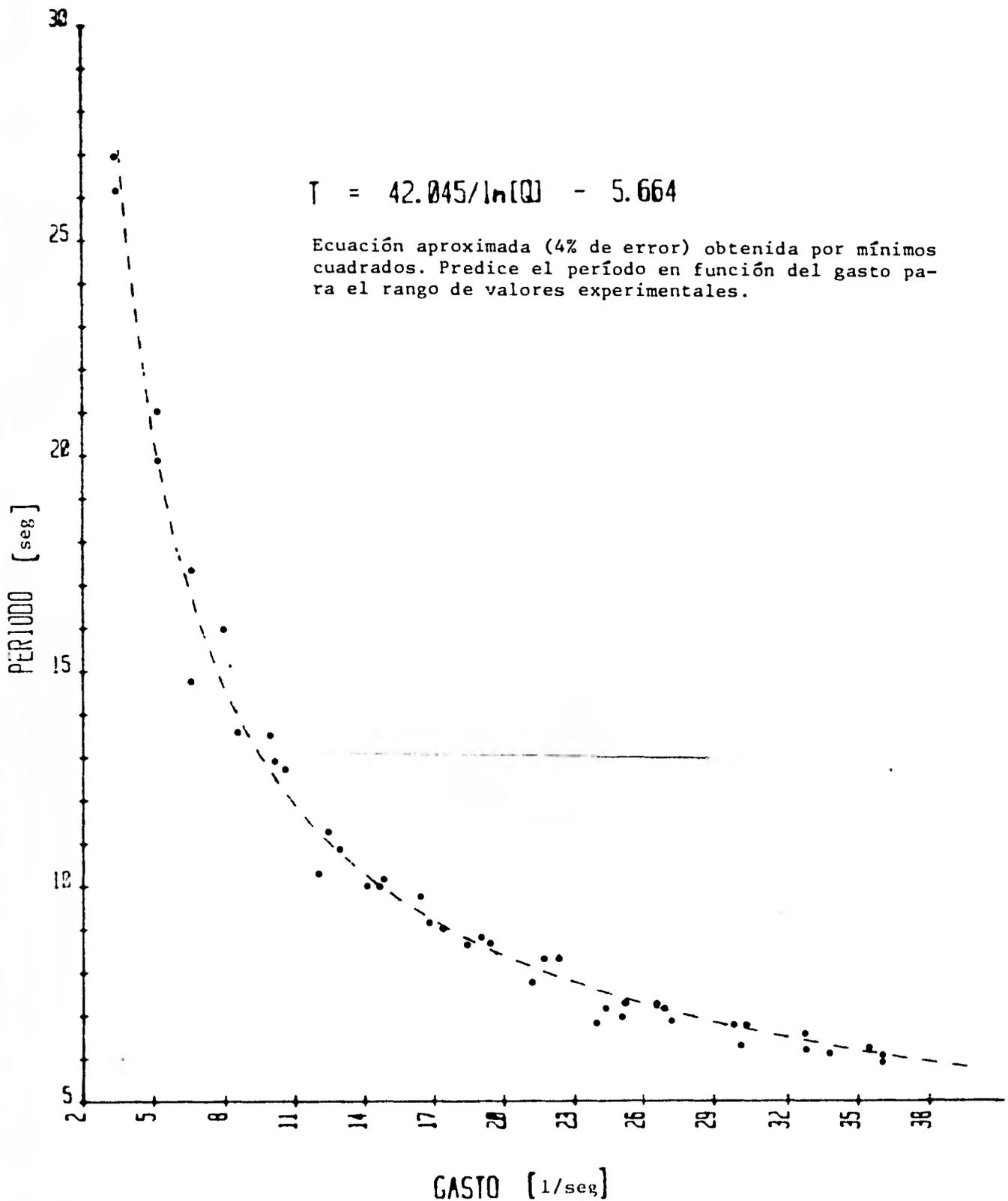


Fig 3.2 Período medio de aparición de los vórtices erguidos en función del gasto en el canal.

$$TU/d = C = 6.481 \pm 1$$

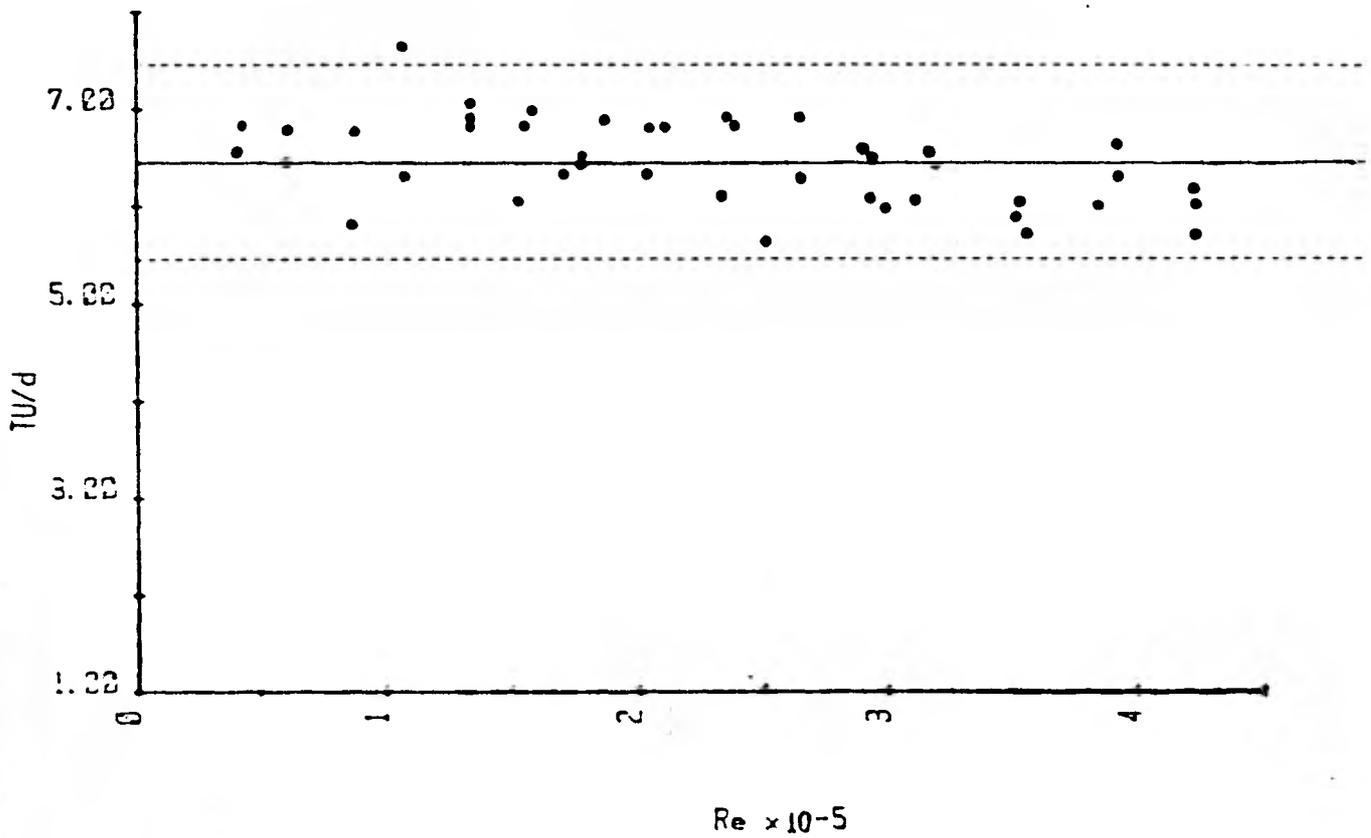


Fig 3.3 Parámetro adimensional TU/d en función del número de Reynolds

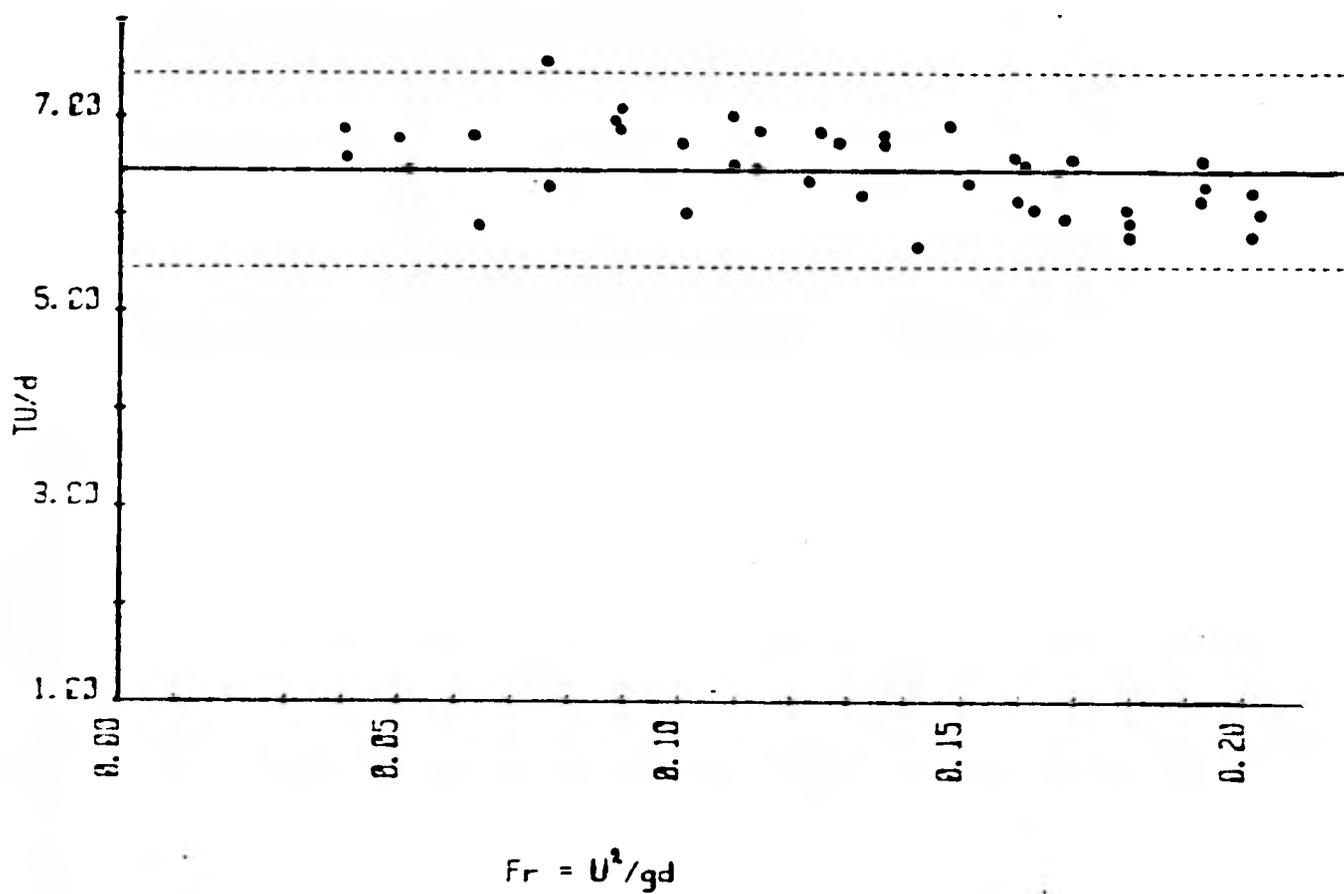


Fig 3.4 Parámetro adimensional TU/d en función del número de Froude

4. INTERPRETACION DEL FENOMENO Y CONCLUSIONES

4.1 INTRODUCCION.

Se pretende en este capítulo ofrecer una explicación cualitativa del fenómeno que nos ocupa, basada en:

- La resistencia que opone un cuerpo a un fluido en movimiento.

- Observaciones de pruebas realizadas a fin de comprender las causas que lo originan.

Este enfoque del problema conducirá a analizar los efectos de la geometría de las - fronteras en el campo de flujo, en función del número de Reynolds.

Finalmente se expondrán algunas conclusiones con base en la descripción del fenómeno (capítulo 2), los resultados obtenidos (capítulo 3) y la interpretación del fenómeno.

4.2 INTERPRETACION DEL FENOMENO.

Es evidente que un vertedor en un canal cumple su función a través de convertirse en un obstáculo al flujo. Pero por su geometría y orientación respecto a la plantilla del canal, inevitablemente será un obstáculo altamente resistente al escurrimiento.

Un análisis superficial de los efectos inducidos por un vertedor a un flujo, hacen pensar que las características de los mismos dependerán de su orientación respecto a la plantilla del canal. Así por ejemplo, el campo de flujo cerca de un vertedor vertical evidentemente será distinto al de un vertedor inclinado hacia aguas abajo. La razón de éste comportamiento estriba en la distinta resistencia que ofrecen al movimiento del fluido. Una forma de sustentar esta afirmación se deriva del análisis dinámico de las fuerzas actuando sobre los vertedores. Mientras en el primer caso el empuje dinámico ejercido por el agua es perpendicular al vertedor, en el segundo caso el empuje forma un ángulo respecto a la horizontal, figura 4.1. A consecuencia del cambio en el ángulo respecto a la horizontal, la resistencia al movimiento en el vertedor inclinado será menor a la ocasionada por el vertedor vertical a expensas de la fuerza ascendente favorable al movimiento del agua en el primero.

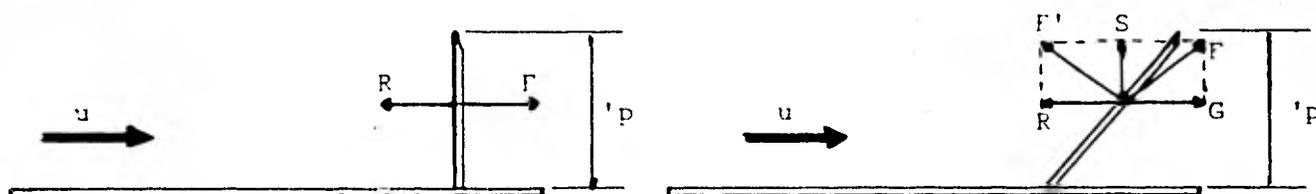


Fig 4.1 Fuerzas actuando sobre un vertedor vertical y uno inclinado.

De las ideas arriba expuestas se infiere que un procedimiento para reducir los efectos ocasionados por un vertedor vertical sería sustituir dicho vertedor por uno inclinado hacia aguas abajo. Pero éste procedimiento puede conducir a situaciones poco prácticas cuando el objetivo deseado es la casi total eliminación de los efectos. Un procedimiento alternativo y equivalente al anterior en cuanto a las metas perseguidas sería substituir el vertedor vertical por un vertedor inclinado aguas abajo e ir reemplazando el ángulo que forma con la plantilla del canal, por una línea curva adecuada

para el escurrimiento. Este razonamiento en sí, conduce de manera natural a considerar un perfil fluidodinámico, como era de esperarse, puesto que como se sabe dichos perfiles facilitan el escurrimiento de los fluidos. En otras palabras, se pueden reducir los efectos producidos por un vertedor vertical disminuyendo la curvatura de un perfil fluidodinámico que sustituya al perfil original.

Si ahora suponemos al rollo como un efecto del vertedor, es intuitivo esperar cambios en sus dimensiones mismas que serán función del radio de curvatura de la curva sustituida al ángulo inicial del vertedor inclinado elegido.

Para evaluar la hipótesis anterior se procedió a rellenar la esquina del vertedor vertical con mastique contorneando perfiles como los mostrados en la figura 4.2.

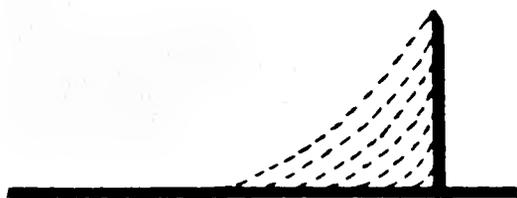


Fig 4.2 Perfiles contorneados con mastique hasta obtener uno casi fluidodinámico.

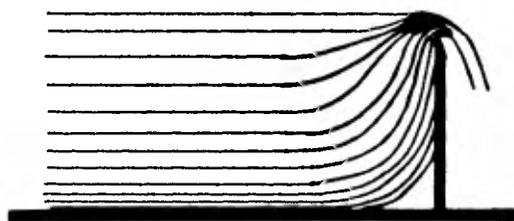


Fig 4.3 Campo de flujo caracterizado por líneas de corriente ascendentes para gastos pequeños.

Los resultados de la prueba fueron:

- La reducción de la intensidad (circulación) y dimensiones de los vórtices - erguidos.
- El incremento del periodo de ocurrencia de los mismos.
- La reducción del diámetro del rollo.

Estos cambios cualitativos eran más notorios a medida que disminuía la curvatura del perfil lográndose un perfil para el cual el fenómeno era apenas perceptible y su periodo de ocurrencia mucho mayor que en condiciones normales.

De esta prueba se infiere que la geometría de la frontera formada por la plantilla - del canal y el vertedor desempeña un papel preponderante en la existencia del fenómeno. En efecto, aún cuando la sustitución de la frontera original por un perfil fluido-dinámico origina cambios cualitativos del fenómeno, la esencia del mismo no se modifica, puesto que siempre existen los vórtices objeto de éste estudio. Además, debe existir un perfil para el cual el fenómeno se elimina. Se ofrece enseguida una explicación de porqué el vertedor puede ocasionar la formación del rollo.

Un análisis somero de los efectos producidos por la geometría de las fronteras en el campo de flujo cerca del vertedor, conduce en primer lugar a considerar la separación de la capa límite de fondo a cierta distancia del mismo. Esta separación es causada por el gradiente de presión adverso, en la frontera inferior, a que da lugar el vertedor por su característica intrínseca de ser un obstáculo con geometría y orientación inadecuados para el escurrimiento de un fluido real, en este caso agua. En consecuencia, para gastos pequeños, el campo de flujo se caracterizará por estar formado por líneas de corriente esencialmente ascendentes colinealmente con una región - separada, figura 4.3.

No es difícil comprender que al ser la geometría del perfil formado por la plantilla del canal y el vertedor, independientemente del flujo, en principio se puede pensar que sus efectos sean de índole cualitativo. Cuantitativamente es razonable suponer que el comportamiento del campo de flujo esté gobernado por el gasto de agua circulante. Pero al ser constante el ancho del canal, el gasto será función de la velocidad del flujo y del tirante de agua en el canal. De esta manera desde el punto de - vista cualitativo la magnitud de los efectos dependerán de estas dos propiedades del flujo.

Líneas arriba se comentó la separación de la capa límite de fondo sin mencionar explícitamente que su desprendimiento se debe a la viscosidad del fluido. Esta propiedad de los fluidos al provocar efectos de fricción altera notablemente el campo de - flujo, siendo por tanto necesario averiguar su efecto cuando se incrementan las variables del flujo.

Como se sabe la viscosidad de un fluido, al modificar notablemente la distribución teórica de cortantes, crea fuerzas sobre cuerpos sujetos a la acción del flujo. Si además se trae a colación el tercer principio de la dinámica, es de esperarse una reac-

ción por parte del cuerpo la cual se manifiesta como una fuerza igual y contraria, - misma que determinará el cambio en la trayectoria de las partículas fluidas. En el - caso concerniente este empuje es aún más evidente debido a la orientación del vertedor respecto al movimiento del flujo y obviamente constituirá una fuerza de resistencia al movimiento del agua.

Puesto que estas fuerzas están ligadas al flujo, se hará uso del número de Reynolds por relacionar dicho parámetro adimensional a las fuerzas de inercia con las fuerzas viscosas en un fluido en movimiento.

Para bajos números de Reynolds, asumiendo al agua como fluido incompresible, las fuerzas viscosas predominarán sobre las de inercia a consecuencia de las pequeñas velocidades que alcanzará el flujo en el canal, aún cuando la viscosidad del agua sea pequeña. Por tanto la resistencia total provocada por el vertedor al movimiento del agua será prácticamente igual a la resistencia de deformación y vendría a ser la fuerza necesaria para la deformación de líneas de corriente. Este comportamiento del flujo se observa para gastos menores a 1.0 lts/seg.

Dado que las fuerzas de inercia varían con el cuadrado de la velocidad del flujo, su incremento será más rápido que el de las fuerzas viscosas las cuales varían linealmente con dicha propiedad. Esto originará el dominio de las primeras sobre las segundas a partir de un cierto gasto. Las observaciones efectuadas muestran el inicio de un proceso evolutivo con un gasto de 1.0 lts/seg , figura 2.4 . Es posible que dicho gasto marque el inicio de una mayor influencia de las fuerzas de inercia y por ende a un aumento de la curvatura de las líneas de corriente a consecuencia de su mayor aproximación al vertedor. Esta situación podría implicar la necesidad de un reacomodo del campo de flujo, mediante un obstáculo adicional del mismo fluido a fin de evitar su escurrimiento. Tal necesidad al parecer se satisface con la formación del rollo y si es correcto el razonamiento, su origen se debe a que en la resistencia total, ofrecida por el vertedor al flujo, empieza a predominar la resistencia de forma sobre la resistencia de deformación. Se centrará a continuación la atención en las fluctuaciones del rollo y en la formación de vórtices erguidos.

En la descripción del fenómeno se mencionó que el rollo experimenta fluctuaciones periódicas las cuales parecen preceder a la aparición de vórtices erguidos. A fin de disipar dudas sobre esta observación se hizo un ensayo el cual consistió en colocar segmentos de tubo transparente en el ángulo diedro formado por la plantilla del ca-

nal y el vertedor. El diámetro del tubo era de 4.5 cm y su longitud adecuada a cada una de las etapas en las cuales se dividió la prueba.

Primera etapa.

La longitud del tubo era la correspondiente al ancho del canal, impidiéndose de esta manera la comunicación del fluido contenido con las zonas de vórtices. Se pretendía en esta etapa simular la frontera del rollo y averiguar los efectos de la eliminación de sus fluctuaciones, en los vórtices erguidos. Como resultado aparecieron en la zona de vórtices estructuras vorticosas provenientes de zonas aguas arriba las cuales rara vez lograban intensificarse y alcanzar su intensidad (circulación) normal. En consecuencia el periodo de ocurrencia de los vórtices erguidos aumentó - considerablemente.

Segunda etapa.

El ángulo diedro era ocupado ahora por un tubo de longitud menor al de la etapa anterior. El objetivo de esta etapa era observar el comportamiento del agua en el interior del tubo en presencia de vórtices erguidos. El resultado de la observación fue que el agua en el interior del tubo no se ve afectada por la presencia de vórtices erguidos, conservando estos últimos la características de la etapa anterior.

Tercera etapa.

En esta etapa se usó un tubo de longitud igual al ancho del canal. La superficie del tubo se recortó para formar una ranura que terminaba en sendos orificios en los extremos del tubo, figura 4.4 . El objeto de la ranura era determinar la zona por donde es alimentado el espacio interior del tubo, en tanto que con los orificios en los extremos se buscaba la salida del agua. En sí, en esta etapa, se pretendía ver - si las partículas fluidas en el interior del tubo describen el mismo movimiento que en el rollo y además observar si existen fluctuaciones. Únicamente se consiguieron - los objetivos aludidos cuando el tubo se colocó en la posición mostrada en la figura 4.5 , conservando, los pocos vórtices erguidos que lograban formarse, la periodicidad observada en las etapas precedentes.

Cuarta etapa.

Se pretendía en esta etapa observar el efecto, en los vórtices erguidos de las fluctuaciones del agua en el interior de un tubo con ranura y sin orificios. Mediante la observación se apreció que los vórtices erguidos alcanzan la misma intensidad que los formados en ausencia del tubo, pero con frecuencia mucho menor a los visualizados en las pruebas anteriores, sin alcanzar la periodicidad de los formados cuando no existe el tubo.

La diferencia observada en la última prueba puede ser atribuida bien sea a la presencia de un obstáculo (tubo) extraño cerca del vertedor o al confinamiento del rollo en una frontera sólida que evita su contacto con los estratos inferiores del flujo. Pero si se recuerda lo expuesto anteriormente acerca de la necesidad de un obstáculo para facilitar el escurrimiento del agua, nuestra opinión es que las fluctuaciones del rollo probablemente son las causantes de esta diferencia. La aparente contracción debida a un obstáculo adicional en el ángulo diedro ya mencionado quizá se clarifique aún más si se recuerda la prueba con la cual se dio inicio a este inciso.



Fig 4.4 Tubo transparente con ranura y con orificios en los extremos.

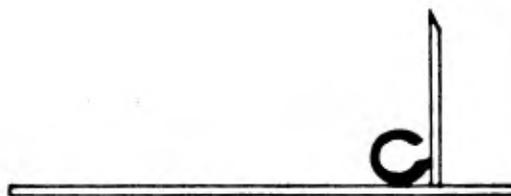


Fig 4.5 Posición del tubo para determinar la zona por donde es alimentado el rollo

Las ideas hasta aquí expuestas inducen a pensar que los vorticillos de eje vertical formados en la barra de equilibrio temporal, figura 2.12, y las estructuras vorticosas de eje horizontal, figura 2.15, son originados por las fluctuaciones del rollo. Estas fluctuaciones, por otra parte, intensifican a cualquier estructura vorticosa en las zonas de vórtices independientemente de su procedencia. La intensificación probablemente es por fricción y por un exceso de agua que ingresa a las zonas de vórtices durante una fluctuación del rollo. Este exceso periódico de agua en las zonas de vórtices quizá origine un aumento de circulación en las mismas, debida a la poca compresibilidad del agua.

El último mecanismo de intensificación de los vórtices erguidos, puede ser aplicado al caso del rollo. En efecto, en la descripción del fenómeno se comentó acerca de cierta concentración periódica de colorante viajando en el flujo principal. Se dijo también que dicha concentración ocasiona, al chocar con el vertedor, una intensificación del flujo descendente coloreado por la banderita coloreada a cierta distancia de la plantilla, pero pegada al vertedor. Dicha concentración de colorante es al parecer indicio de una fluctuación del flujo principal, la cual al chocar con el vertedor puede dar lugar a un ingreso adicional de agua al rollo, como lo muestra la intensificación del flujo descendente. Debido a la poca compresibilidad del agua y ante la sobrealimentación, el rollo tiene que incrementar su circulación a fin de desalojar el fluido en exceso.

Se pone a consideración un mecanismo para la formación de vorticillos de eje horizontal durante una fluctuación del rollo.

Cuando el rollo experimenta una fluctuación, el flujo a nivel piso que genera adquiere mayor energía cinética que el flujo a nivel superficie proveniente de la corriente principal. El contacto de estos flujos de sentido opuesto da lugar a la formación de una región asteroide, figura 2.24. En los vértices orientados hacia las paredes del canal de esta figura, probablemente por la mayor energía cinética del flujo inducido por el rollo, existen condiciones para la formación de vórtices por fricción. Para que estas estructuras vorticosas puedan intensificarse al llegar a la zona de vórtices es evidente que deberán tener el sentido de giro del vórtice erguido correspondiente. Este sentido es precisamente el que tendrían los vorticillos originados por una fluctuación del rollo mediante el razonamiento anterior.

En cuanto a la formación de estructuras vorticosas aguas arriba de la zona limpia, figura 2.23, su formación puede obedecer al incremento de los efectos viscosos a medida que el flujo se aproxima al vertedor. A continuación se exponen algunos puntos de vista acerca de la periodicidad de las estructuras vorticosas y de los vórtices erguidos.

El periodo de formación de estructuras vorticosas y vórtices erguidos al parecer está determinado por fluctuaciones periódicas del flujo principal. Esta idea surge al observar el comportamiento de un hilo inmerso en el flujo desarrollado en un canal sin vertedor. El hilo en cuestión tenía una longitud de 1.0 m, y estaba amarrado a bastidores separados a una distancia menor al largo del hilo. En estas condiciones -

el hilo exhibía, cada cierto intervalo de tiempo un movimiento sinusoidal de longitud de onda variable. Al medir el periodo de las ondas de mayor longitud y calcular la relación TU/d , se encontraron valores que caen en el intervalo de los encontrados para el caso de los vórtices erguidos. Este mismo comportamiento se obtuvo para el caso de las ondas de longitud intermedia cuando la longitud característica en la relación es igual a $d/2$.

4.3 CONCLUSIONES

Se ha buscado en el transcurso del presente trabajo comprender un fenómeno complejo de una manera poco ortodoxa. Sin embargo a la luz de los resultados obtenidos parece factible establecer las siguientes conclusiones:

a) La existencia del rollo obedece a la necesidad de un reacomodo del campo de flujo para facilitar el escurrimiento, y su formación tiene lugar cuando la resistencia de forma empieza a predominar sobre la resistencia de deformación en la resistencia total que opone el vertedor al flujo.

b) La formación de vórtices en la barra de equilibrio temporal es consecuencia de las fluctuaciones del rollo.

c) La intensificación de los vórtices erguidos está íntimamente ligada a las fluctuaciones del rollo.

d) La relación obtenida mediante el análisis dimensional muestra que la periodicidad de los vórtices erguidos depende únicamente de las características del escurrimiento principal.

5.- RECONOCIMIENTOS

Se agradece la dirección de esta tesis al Dr. Enzo Levi Lattes y la orientación de los Doctores Jaime Cervantes de Gortari y Mihir Sen.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Formación de Vértices por chorros que inciden a 45° en una pared horizontal, Jaime Gonzalo Cervantes de Gortari, Facultad de Ingeniería, México, D.F., 1970
2. Applied Hydro & Aeromechanics, L. Prandtl, O.G. Tietjens, Dover Publications, Inc., New York, 1937.
3. Elementos de Mecánica de Fluidos, J.K. Vennard, R.L. Street, Segunda Edición en Español, GECSA, México D.F., 1979
4. La Mecánica de los Fluidos, I.H. Shames, Mc Graw-Hill, México, D.F., 1976.
5. Fundamental Mechanics of Fluids, I.G. Currie, Mc Graw-Hill, 1974
6. Hidráulica (Tomo II), A. Balloffet - L. M. Gotelli - G.H. Meoli Ediar, Buenos Aires, 1948.
7. Elementary Mechanics of Fluid, Hunte Rouse, Wiley & Sons.
8. Transmisión de Calor, Mc Adams W. H., Mc Graw Hill, 1978.

