

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS SÓLIDOS EN UNA BIFURCACION

Dr.- Ing. Arturo Rocha Felices
*Consultor. Profesor Emérito de la
Universidad Nacional de Ingeniería*

*El presente artículo constituye parte de un trabajo integral sobre **Bocatomas**, que viene preparando el autor. Ha aparecido en la revista Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería Civil de la UNI, N° 3 / Edición Noviembre 2005.*

CONTENIDO

1. *Definiciones fundamentales, 2*
2. *Investigaciones experimentales, 4*
 - 2.1 *Investigaciones de Thoma, 4*
 - 2.2 *Investigaciones de Bulle, 5*
 - 2.3 *Investigaciones de Vogel, 7*
 - 2.4 *Investigaciones de Dancy, 8*
 - 2.5 *Investigaciones de Cristiani y de Be nini, 9*
3. *Análisis dimensional, 10*
4. *Relación de Toma, 11*
5. *Líneas de Separación, 12*
6. *Ángulo de Bifurcación, 13*
7. *Influencia de la Curvatura, 15*
8. *Conclusiones, 17*
Figuras, 18

1. Definiciones fundamentales

La forma más simple de una captación de agua corresponde a la bifurcación de un canal, sin ninguna estructura de guía o control. Es la bifurcación libre, cuyo estudio es muy importante para comprender el funcionamiento de una obra de toma más compleja y para obtener los fundamentos teóricos indispensables de su diseño. En el presente trabajo se analiza algunos de los aspectos vinculados al comportamiento y a la distribución, en una bifurcación libre, de los sólidos (sedimentos) transportados por la corriente.

En la Figura 1 se aprecia esquemáticamente una bifurcación en un tramo recto. El ancho del canal principal es B y de él se separa un canal lateral cuyo ancho es b . Se llama ángulo de bifurcación q al ángulo formado por el eje del canal principal y el eje del canal lateral en el lugar de la bifurcación. Al canal lateral suele llamársele canal de derivación. El ángulo respectivo recibe entonces el nombre de ángulo de derivación. En la Figura 1 se muestra que en el canal principal escurre un caudal Q del cual se deriva un caudal Q_1 hacia el canal lateral. Al caudal remanente en el canal principal se le llama Q_2 . Por cierto que debe cumplirse la ecuación de continuidad

$$Q = Q_1 + Q_2.$$

El canal principal lleva una cierta cantidad de material sólido, es decir, tiene un gasto sólido, al que designamos como T y que también se distribuye entre ambos canales. Se denomina gasto sólido de una corriente a la cantidad de material sólido que pasa por una sección determinada en la unidad de tiempo. Puede expresarse en unidades de peso o de volumen. Así, en la bifurcación mostrada se tiene que T_1 es el gasto sólido en el canal de derivación y T_2 es el gasto sólido remanente en el canal principal. Para los sólidos también debe cumplirse la ecuación de continuidad, de modo que $T = T_1 + T_2$. Debe considerarse, sin embargo, que la validez de la última expresión está vinculada al tiempo. Esto se debe a que en un lapso relativamente corto se producen en el sistema fenómenos de erosión y

sedimentación, de modo que sólo se logra la ecuación de continuidad después de transcurrido un cierto tiempo.

Tanto el gasto líquido Q como el gasto sólido T pueden expresarse como valores específicos, es decir, referidos al ancho de cada canal. Se tiene así

$$q = \frac{Q}{B} ; t = \frac{T}{B} ; q_1 = \frac{Q_1}{b} ; \text{etc.}$$

Más adelante se señalará el comportamiento en una bifurcación de los dos componentes del gasto sólido: suspensión (T_s) y fondo (T_F). Para facilitar el estudio de las bifurcaciones es necesario tener en cuenta las dos definiciones que se señala a continuación. La *Relación de Toma* es la relación entre el caudal captado y el caudal que había en el canal principal; su expresión es $\frac{q_1}{q}$. La otra definición corresponde al *Coefficiente de Captación Sólida*, que es la relación entre el gasto sólido captado y el gasto sólido en el canal principal; su expresión es $\frac{t_1}{t}$. Según el caso, puede tratarse de material de fondo, de suspensión o de ambos. Para las dos definiciones se puede considerar los caudales totales o específicos, según convenga.

El estudio de las bifurcaciones libres permitirá determinar que variables influyen en el mayor o menor ingreso de sólidos al canal lateral. En el punto siguiente se hace una presentación de diversas investigaciones experimentales y en el punto subsiguiente se plantea un análisis teórico del problema. Todo esto, como un paso previo a la comprensión del fenómeno mucho más complejo del comportamiento del agua y de los sólidos en una obra de toma. Debe tenerse presente que una de las características de una bifurcación es que mediante una compuerta se puede regular la cantidad de agua Q_1 que ingresa al canal lateral. En este caso la bifurcación deja de ser libre. Sin embargo, en una bifurcación no hay ningún dispositivo para controlar el ingreso de sólidos.

2. Investigaciones experimentales

Como parte del análisis de una bifurcación libre examinaremos, en primer lugar, bajo que condiciones es posible predecir la distribución del gasto sólido a partir del conocimiento de la partición del gasto líquido. Si intentáramos resolver este problema analíticamente, considerando las capacidades de transporte de cada uno de los dos tramos, obtendríamos resultados que difieren notablemente de lo observado y medido. Se han realizado diversas investigaciones experimentales sobre la distribución de sólidos en una bifurcación. A continuación se presenta un breve resumen de algunas de ellas. El objeto de esta presentación es doble. De un lado, familiarizar al lector con los resultados de dichos trabajos, y, de otro, exponer indirectamente la metodología que se sigue en los trabajos hidráulicos experimentales.

2.1 Investigaciones de Thoma.

Durante muchos años no se conoció realmente las consideraciones teóricas o experimentales para resolver el problema de impedir o disminuir el ingreso de sólidos a una derivación. Generalmente se recurría a la solución simple de elevar el umbral de la captación, con lo cual se lograban resultados buenos en tanto que dicho umbral pudiera mantenerse libre. Las primeras investigaciones sistemáticas sobre la distribución de los sólidos de fondo en una bifurcación fueron hechas por H. Thoma en 1923, a partir de los estudios de una bocatoma en el Mittel Isar, ubicada aguas abajo de Munich, Alemania. Las experiencias se hicieron en una canaleta simple de 4 metros de largo, 0,30 m de ancho y 0,20 m de profundidad (Figura 2). El canal de derivación (lateral) tenía la misma sección transversal. El gasto se repartió en partes iguales, en consecuencia la Relación de Toma era 0,5.

Las primeras pruebas realizadas con un ángulo de 30° y borde interior redondeado mostraron que el 85,2% del gasto sólido de fondo (T_F) se dirigía hacia la derivación. Pruebas posteriores realizadas con un ángulo de derivación de 90° y borde interior sin redondear dieron por resultado que el

92,1% del material de fondo ingresara al canal lateral. Es decir, que en ambos esquemas los resultados fueron muy similares, tal como se ve en la Figura 2. Los resultados de Thoma fueron muy importantes porque permitieron establecer experimentalmente que en una bifurcación el material de fondo tiene una marcada tendencia a dirigirse hacia el canal de derivación. Thoma realizó también pruebas con materiales de bajo peso específico, comprobando la misma tendencia. Este problema fue también estudiado por Rehbock en el laboratorio de hidráulica de Karlsruhe y explicó esta tendencia de los sólidos de fondo (acarreos) por dirigirse hacia la derivación como una consecuencia de la pendiente transversal que se produce al efectuarse una bifurcación en un canal.

2.2 Investigaciones de Bulle.

H. Bulle realizó hacia 1926 experiencias sistemáticas en el laboratorio de hidráulica de Karlsruhe, Alemania, con el objetivo de profundizar el estudio de la distribución de sedimentos de fondo en una bifurcación y establecer sus causas. Bulle partió del hecho, ya entonces conocido por las experiencias de Thoma, de que no existía, como podría pensarse, la misma relación entre la distribución de caudales líquidos y sólidos de fondo y que tampoco se obtenían resultados correctos si se hacía un cálculo teórico en base a las capacidades de transporte de cada canal. Lo anterior significa que la Relación de Toma y el Coeficiente de Captación Sólida no son necesariamente iguales.

La mayor parte de las experiencias de Bulle se realizó en un canal rectangular de 0,20 m de ancho, tanto el principal como el lateral (Figura 3a). La velocidad media de la corriente era de 0,37 m/s y el caudal fue de 5 l/s, el que se repartió en la mayor parte de los casos aproximadamente en la relación 1:1. Los ángulos de derivación estudiados por Bulle fueron 30°, 60°, 90°, 120° y 150°. El canal inicial se construyó con un ángulo de bifurcación de 30° y tenía fondo rígido. Las observaciones de Bulle sobre el comportamiento del flujo indicaron que la capa inferior de 1 cm de espesor, que correspondía aproximadamente a 1/7 del tirante que se presentó, se

dirigía íntegramente al canal lateral. Como se sabe, en la zona cercana al fondo las velocidades son mucho menores que cerca de la superficie.

En la Figura 3a se observa que en la margen derecha del canal lateral aparece un gran vórtice, que en la superficie ocupaba casi la mitad del ancho del canal. Así mismo, en el canal principal apareció un vórtice menor en la margen izquierda y una pequeña zona vorticosa alrededor del punto S de separación. En el canal principal se observó la presencia de una pendiente transversal. Bulle realizó este mismo tipo de ensayos para los otros cuatro ángulos mencionados, con resultados similares. El redondeo del borde interior no alteró fundamentalmente los resultados. Posteriormente, Bulle realizó experiencias incorporando arena como material de fondo, cuyo diámetro máximo era de 1,2 mm. Para una repartición igual de caudales entre ambos canales Bulle obtuvo los siguientes resultados.

q	$t_{F1}/t_F(\%)$
30°	97
60°	96
90°	90
120°	87.5
150°	92

Estos resultados corresponden a pruebas realizadas incorporando arena, durante 45 minutos en cada prueba. Los ensayos realizados con una duración de 75 minutos no mostraron una diferencia sustancial. Bulle realizó también algunas pruebas cambiando la Relación de Toma, y obtuvo el diagrama que se muestra en la Figura 3b. Las conclusiones que se obtiene n del análisis del importante estudio de Bulle son las siguientes:

- I. En una bifurcación la capa inferior del escurrimiento se dirige preferentemente hacia la derivación.
- II. La tendencia del material sólido de fondo por dirigirse hacia la derivación se explica como una consecuencia de la pendiente transversal que se crea en la bifurcación. Esta tendencia es mayor al aumentar el caudal derivado, así como al aumentar el ancho del canal lateral.

- III. En las inmediaciones de la derivación ocurren zonas vorticosas y de estancamiento.
- IV. Existe, para las condiciones de la experimentación, vinculación entre la captación de sólidos de fondo y la variación del ángulo de derivación q , para un valor constante de la Relación de Toma.
- V. La vinculación entre el Coeficiente de Captación Sólida y los valores de la Relación de Toma, para un ángulo de 30° , se obtienen de la Figura 4b.
- VI. Para lograr una captación libre de sólidos existe la posibilidad de aprovechar el efecto de curva que se produce en la derivación, disponiendo la toma convenientemente en la parte exterior de una curva del río.

Luego de estas experiencias, primero de Thoma y luego de Bulle, queda perfectamente claro que en una bifurcación los gastos líquidos y sólidos se distribuyen en proporciones diferentes. En las capas inferiores las velocidades son muy pequeñas y, por lo tanto, son éstas las que preferentemente realizan el cambio de dirección. Por el contrario, las capas superiores de mayor velocidad son las que siguen de largo. En adelante denominaremos Efecto Bulle a la tendencia que tienen en una bifurcación las capas inferiores del escurrimiento, cargadas de sedimentos, de dirigirse preferentemente hacia el canal de derivación.

2.3 Investigaciones de Vogel.

Hacia 1934 H. D. Vogel realizó investigaciones sobre el comportamiento de las bifurcaciones en el Waterways Experiment Station, de Vicksburg, Estados Unidos. La diferencia fundamental con respecto a los anteriores estudios radica en que Vogel consideró además del transporte de fondo el transporte en suspensión. Utilizó una canaleta rectangular de 0,61 m de ancho con una velocidad media de 0,30 m/s. Para un ángulo de bifurcación de 30° , arena fina y repartición igual de caudales obtuvo que el 76% del material sólido se dirigió hacia la derivación. Para un material muy fino y condiciones iguales a las anteriores, ingresaba el 55% de los sólidos.

Vogel realizó también otra serie de experimentos en una canaleta de sección circular de 0,61 m de radio, de la que salía una derivación a 30° constituida por una canaleta de 0.305 m de radio. Los resultados que obtuvo fueron:

a) Para arena gruesa: cuando la Relación de Toma era 0,36 el Coeficiente de Captación Sólida era de 0,65 y b) Para arena fina: cuando la Relación de Toma era 0,5 el Coeficiente de Captación Sólida era de 0,52.

A partir de los estudios de Vogel se confirma una vez más que el gasto líquido y el gasto sólido no se reparten en la misma proporción. Sin embargo, si el gasto sólido se encuentra constituido parcialmente por material en suspensión el Coeficiente de Captación Sólida tiende a ser igual a la Relación de Toma. De acá se concluye que en una bifurcación un material sólido muy fino transportado íntegramente en suspensión tiende a distribuirse en la misma proporción que los caudales líquidos.

2.4 Investigaciones de Dancy.

A. G. Dancy realizó en Iowa, en 1927, una serie de estudios experimentales sobre bifurcaciones con el objeto de estudiar la repartición del gasto sólido según la modalidad del transporte. El canal principal y el lateral fueron de sección rectangular de 0,15 m de ancho y 0,125 m de altura. Las conclusiones experimentales de Dancy se presentan gráficamente en la Figura 4 en la que se muestra la vinculación entre el Coeficiente de Captación Sólida y la Relación de Toma, en función del parámetro adimensional a y para un ángulo de bifurcación de 30°. Para preparar ese gráfico, a partir de las mediciones de Dancy, ha sido necesario calcular en cada caso la velocidad de caída de las partículas y la velocidad de corte y determinar así el parámetro a .

$$a = \frac{2.5w}{V_*}$$

En la Figura 4 se observa que para valores altos de a , que corresponden a grandes concentraciones de sólidos en las zonas cercanas al fondo, la distribución de sólidos tiende a realizarse según el Efecto Bulle; en cambio, para valores pequeños de a , que corresponden a una distribución más o menos uniforme del material sólido en suspensión en toda la sección

transversal, el Coeficiente de Captación Sólida tiende a ser igual a la Relación de Toma.

2.5 Investigaciones de Cristiani y de Benini.

El ingeniero Mario Cristiani, de Verona, Italia, realizó en el laboratorio de hidráulica de la Universidad de Padua una serie de investigaciones sobre bifurcaciones, las que quedaron inconclusas por su muerte durante la segunda guerra mundial. Sin embargo, sus resultados fueron presentados por Benini, del mismo laboratorio, en un estudio crítico muy interesante sobre algunos de los trabajos que hasta 1952 se conocían sobre bifurcaciones, y que posteriormente, hacia 1955, fue ampliado con las experiencias del propio Benini. Las experiencias de Cristiani se realizaron en un canal trapecial de 0,28m de ancho en la base y taludes 1:4, del cual se derivaba un canal de sección rectangular cuyo ancho era de 0,10m en la primera serie de ensayos y 0,206 m en la segunda serie. En todas las pruebas se mantuvo un ángulo de derivación de $26^{\circ} 45'$. Benini, a partir de las citadas investigaciones de Cristiani, planteó las siguientes conclusiones

- i. En todos los ensayos el Coeficiente de Captación Sólida aumenta rápidamente con la Relación de Toma.
- ii. No se nota influencia de la velocidad; sin embargo, esta afirmación sólo puede mantenerse en tanto que la velocidad no sea tan grande que ponga en suspensión parcial o totalmente el material sólido.
- iii. Al aumentar el diámetro de la arena, el Coeficiente de Captación Sólida tiende a disminuir.

Las investigaciones propias de Benini siguieron la línea general trazada por Cristiani. Examinó el comportamiento de las bifurcaciones en una canaleta de 0,30 m de ancho y 0,20 m de profundidad, para tres ángulos: 30° , 60° y 90° , dos tirantes: 0,10 m y 0,17 m y dos velocidades medias en el canal principal: 0,47 m/s y 0.73 m/s. Benini usó material sólido de una sola granulometría. En todos los ensayos los sólidos se desplazaban como material de fondo (arrastre). Las conclusiones del estudio de Benini fueron:

- i. El ángulo de derivación q no tiene una influencia bien determinada sobre el Coeficiente de Captación Sólida.
- ii. El ancho de la derivación tiene poca importancia.
- iii. El peso específico y el diámetro de las partículas tiene poca importancia.
- iv. Al aumentar el tirante disminuye el Coeficiente de Captación Sólida.

3. Análisis dimensional de una bifurcación

Luego de haber examinado los resultados de numerosas investigaciones experimentales sobre las bifurcaciones es conveniente presentar una aproximación teórica al problema, lo que se hará a partir del análisis dimensional. Para estudiar sistemáticamente el problema de la distribución de sólidos en una bifurcación (Ver Figura 1) se puede considerar las siete cantidades fundamentales siguientes

q	gasto específico en el canal principal
q_1	gasto específico en el canal lateral
t	gasto sólido específico en el canal principal
t_1	gasto sólido específico en el canal lateral
w	velocidad de caída de las partículas sólidas
V	velocidad media de la corriente
d	tamaño representativo de la resistencia del lecho

En consecuencia, se tendrá que en una bifurcación:

$$\mathbf{j}(q, q_1, t, t_1, w, V, d) = 0$$

Estas siete cantidades pueden reducirse por medio del teorema de Buckingham a cuatro parámetros p adimensionales, que son los siguientes.

Relación de Toma, ya mencionada, que es la relación entre el gasto específico en el canal lateral y el gasto específico en el canal principal. Su expresión es

$$P_1 = \frac{q_1}{q}$$

Coefficiente de Captación Sólida, ya mencionada, que es la relación entre el gasto sólido específico en el canal lateral y el que corresponde al canal principal. Su expresión es

$$P_2 = \frac{t_1}{t}$$

La Rugosidad Relativa, es la relación entre el tirante en el canal principal y el tamaño representativo de la resistencia del lecho. Cuando el fondo es móvil la resistencia dependerá de las características de la fase del transporte que se presente (rizos o dunas). Su expresión es

$$P_3 = \frac{y}{d} = \frac{q}{Vd}$$

Relación entre la velocidad de caída de las partículas y la velocidad media. Expresa la relación entre una característica de las partículas, su velocidad de caída en aguas tranquilas, y una característica del escurrimiento, su velocidad media. Su expresión es

$$P_4 = \frac{w}{V}$$

Si consideramos, además, el ángulo de derivación q se tendrá entonces un conjunto de cinco parámetros adimensionales importantes para describir los problemas que se presentan en una bifurcación. Ellos son:

$$\mathbf{j} \left(\frac{q_1}{q}, \frac{t_1}{t}, \frac{q}{Vd}, \frac{w}{V}, \mathbf{q} \right) = 0$$

En general, nos interesa que en una obra de toma el Coeficiente de Captación Sólida tenga el menor valor posible. Si su valor fuese cero entonces teóricamente no habría ingreso de sólidos en absoluto.

4. Relación de Toma

Todos los investigadores están de acuerdo en que la Relación de Toma es el parámetro que tiene mayor influencia sobre la captación de sólidos. Así mismo, hay acuerdo en que cuanto mayor sea la Relación de Toma, mayor será el Coeficiente de Captación Sólida. Obviamente, la Relación de Toma

sólo tiene significado como parámetro descriptivo de la captación de sólidos de fondo cuando $Q > Q_0$. Se denomina gasto crítico de arrastre al gasto Q_0 , a partir del cual se inicia el movimiento de las partículas de fondo de una cierta granulometría. La Relación de Toma es importante en el diseño de una captación para proyectar el esquema de funcionamiento y operación. El funcionamiento eficiente de una obra de captación tiene que estar basado en el principio de no aceptar una Relación de Toma muy alta, pues hay dos problemas que pueden presentarse. Uno de ellos es que el gasto remanente en el canal principal (Q_2) sea tan pequeño que no dé lugar a la suficiente capacidad de transporte para arrastrar los sólidos hacia aguas abajo. El otro problema reside en el hecho de que si se capta el 100% del agua será inevitable captar el 100% de los sólidos, si $Q > Q_0$. Estos dos problemas acerca de la importancia de la Relación de Toma tienen mucho significado cuando se diseñan obras de toma en zonas de gran escasez de agua. Cuesta mucho trabajo, y a veces es imposible, no captar toda el agua del río por razones operativas. Las consecuencias suelen ser un mal funcionamiento de la obra de toma. Debe pensarse también que en una obra de toma en un río, en el que sus caudales suelen variar mucho a lo largo el año, también ocurrirá lo mismo con la Relación de Toma. En época de avenidas su valor puede ser muy pequeño y en estiaje, muy alto.

5. Líneas de Separación

La Relación de Toma y las características geométricas de una bifurcación originan que se produzcan ciertas líneas, o mejor, superficies de separación en el escurrimiento, las que están determinadas por las líneas de corriente del flujo que ingresa al canal lateral y las del que sigue de largo. Para esquematizar el fenómeno podemos distinguir una línea de separación en el fondo y otra línea de separación en la superficie. Ambas líneas se hallan unidas por una superficie curva, es decir, que para cada altura hay un ancho de separación B_h . En la Figura 5a se observa las líneas de separación características en una bifurcación libre. La línea de separación B_1 próxima al fondo está más lejos de la derivación que la línea superficial B_2 . La presencia de una grada a la entrada del canal lateral alteraría la forma de esa

superficie de separación, produciéndose una inversión, tal como se ve en la Figura 5b.

No existen criterios uniformes y universales para la determinación del ancho de separación B_h en una bifurcación libre. En general, B_h aumenta con el gasto líquido captado. Se han establecido varias fórmulas y expresiones que proporcionan con alguna aproximación sus valores; pero, lo único en lo que parece haber coincidencia entre todas las fórmulas, es que en una bifurcación libre, sin grada, el ancho de separación en el fondo es 50% mayor que el ancho de separación en la superficie. Se ha comprobado también que al aumentar la Relación de Toma, aumenta el ancho de separación comprometido.

6. Ángulo de bifurcación

Otro de los parámetros que determina la distribución de sólidos en una bifurcación es el ángulo de bifurcación o de derivación. El ángulo de derivación determina, en primer lugar, que para un mismo ancho del canal lateral se presente una mayor o menor abertura de entrada, con el consiguiente efecto sobre la captación de sólidos. En la Figura 1 se aprecia que para un ancho b del canal lateral, la abertura en el canal principal es b' . Naturalmente que si $q = 90^\circ$, entonces $b = b'$ y el ancho de entrada será mínimo. El valor del ángulo de bifurcación q determina también la curvatura de las líneas de corriente y la trayectoria de las partículas que se dirigen hacia el canal de derivación. Un ángulo grande produce una fuerte curvatura.

La Figura 6 muestra esquemáticamente algunos de los fenómenos secundarios que se presentan en una bifurcación, con el borde interior redondeado, como consecuencia de la curvatura de las líneas de corriente y de la aparición de una capa límite. En torno al punto A aparece una pequeña zona vorticosa en la que se presenta una contracorriente y, finalmente, una zona de estancamiento. La aparición de esta zona de estancamiento

corresponde a un fenómeno de separación. El redondeo de la esquina comprometida no elimina la zona de estancamiento, pero altera ligeramente su forma desplazando la parte más ancha hacia aguas abajo. El redondeo de la esquina produce un aumento del ancho de entrada b' . No puede afirmarse que el redondeo disminuya la cantidad de material sólido captado, porque, de un lado, aumenta el ancho de entrada y, de otro, el redondeo hace más inestable la zona de separación. Como consecuencia del redondeo pueden presentarse fluctuaciones turbulentas de la velocidad que determinan el ingreso de una mayor cantidad de material sólido fino.

En la Figura 7 se muestra las respectivas zonas de estancamiento en una bifurcación con ángulos de 30° , 90° y 120° , sin redondear. Con el objeto de apreciar la influencia del ángulo de bifurcación sobre la cantidad de sólidos captados se ha preparado la Figura 8 en la que se presentan los resultados de las investigaciones de Thoma, Benini, Bulle, Dancy y las del laboratorio de Vicksburg. Thoma realizó mediciones para ángulos de 30° y 90° . Este último ángulo tenía la esquina redondeada, sin embargo se ha considerado en el gráfico dado que el efecto del redondeo de la esquina es en realidad pequeño. Las mediciones de Vicksburg se originaron en un modelo del río Mississippi, por lo tanto las condiciones son diferentes a la bifurcación esquematizada que estamos estudiando, sin embargo se ha considerado útil su incorporación al gráfico. Las experiencias de Benini y de Bulle corresponden al caso genérico en estudio. Dancy utilizó únicamente un ángulo de 30° , pero diversos diámetros para el material sólido.

La conclusión que se obtiene sobre la influencia del ángulo de bifurcación en la captación de material sólido, luego de analizar las diversas investigaciones efectuadas y diseños de diferentes países, es que no hay un ángulo óptimo. En general, puede decirse que la influencia del ángulo de derivación es pequeña, no bien conocida y no susceptible de generalización.

7. Influencia de la Curvatura

Hasta ahora hemos discutido el problema general de las bifurcaciones a partir de un canal principal recto. Examinaremos ahora lo que ocurre cuando la bifurcación se encuentra en un tramo curvo, en el que, como se sabe, el escurrimiento, tanto en su fase líquida como en su fase sólida, tiene características especiales y diferentes a las de un tramo recto. En la Figura 9 se aprecia las características del escurrimiento en un tramo curvo como consecuencia de la circulación transversal. Se produce una corriente helicoidal y un desnivel entre ambas márgenes que da lugar a una pendiente transversal. La influencia de los fenómenos señalados se manifestará según la naturaleza del cauce. Éste puede ser rígido o móvil. En los cauces móviles se produce una modificación de la sección transversal, de modo que las corrientes superficiales se dirigen hacia el margen exterior y las corrientes de fondo, cargadas de sedimentos, se dirigen hacia el margen interior. A este fenómeno lo denominamos Efecto de Curva (Figura 9).

Fritz Habermaas realizó en Karlsruhe hacia 1935 una larga serie de experimentos con el objeto de estudiar la influencia de la ubicación del canal lateral con respecto a la curvatura del canal principal. Se puede considerar que estas investigaciones son una continuación de lo sugerido en la última conclusión de Bulle, sobre la influencia de la curvatura del canal. Habermaas utilizó canales trapeziales de 0,15 m de ancho en el fondo y 0,30 m en la superficie y para la determinación del gasto sólido de fondo empleó la fórmula de Du Boys. Luego de numerosas experiencias preliminares Habermaas comprendió la importancia del flujo helicoidal en los tramos curvos y estudió en detalle diversas bifurcaciones que presentaban ubicación diferente de la derivación con respecto a la curvatura del canal. En la Figura 10 se muestran los esquemas correspondientes a siete de las principales bifurcaciones estudiadas por Habermaas, así como los resultados que obtuvo. En todos los ensayos utilizó una distribución igual de caudales, es decir una Relación de Toma igual a 0,5.

La disposición de toma designada con la letra “a” corresponde a la captación en un tramo recto. Los resultados son muy malos, pues ingresa a la derivación el 100% del material sólido. Estos resultados tienen buena correspondencia con los de Bulle. En los ensayos “b” y “c” la toma se hallaba ubicada en la margen interior de una curva; una al principio, otra al final. En ambos casos los resultados son bastante malos, pues prácticamente ingresa el 100% de los sólidos. En los ensayos “d”, “e” y “f” la toma se ubica en la margen exterior. En el ensayo “d” la toma está muy alejada del inicio de la curva e ingresa el 95% de los sólidos. En el ensayo “e” la derivación está en un punto intermedio e ingresa el 50% de los sólidos. En el ensayo “f” la toma está ubicada casi en la iniciación de la curva e ingresa sólo el 5% de los sólidos. Finalmente, en el ensayo “g” la toma se ubica en la iniciación de la curva, con lo que se impide totalmente el ingreso de sólidos.

Como puede observarse se obtiene menor ingreso de sólidos a medida que la toma se ubica cerca de la iniciación de la curva (margen exterior). Se puede interpretar que los resultados favorables se deben a la presencia de una corriente helicoidal. Podría también interpretarse como que los resultados favorables de la experiencia “g” se deben a que como consecuencia de la ubicación del canal lateral, éste aparece como una continuación del cauce principal, mientras que la parte del canal principal ubicada aguas abajo de la bifurcación aparece como el canal derivado. De esta manera se logra una inversión del Efecto Bulle.

Las conclusiones que obtenemos de estos ensayos son que la curvatura del canal y la ubicación de la toma con respecto a ella tienen una gran importancia para impedir el ingreso del material sólido. La ubicación más favorable corresponde a la iniciación del tramo en curva en su margen exterior. Nunca debe ubicarse la toma en la margen interior.

8. Conclusiones

Luego de la exposición hecha sobre el comportamiento y distribución de los sólidos en una bifurcación se plantea las siguientes conclusiones:

- a) En una bifurcación los gastos líquidos y sólidos se distribuyen en proporciones diferentes.
- b) La proporción en la que se distribuyen los gastos sólidos en suspensión y de fondo también es diferente.
- c) La distribución de los sólidos en suspensión depende del gradiente vertical de concentraciones. Para partículas pequeñas y flujos muy turbulentos la distribución de gastos sólidos en suspensión tiende a ser igual a la de los gastos líquidos.
- d) En una bifurcación realizada en un tramo recto las capas inferiores del escurrimiento, cargadas de sedimentos, se dirigen hacia el canal lateral.
- e) La Relación de Toma es el factor más importante. Al aumentar su valor aumenta la cantidad de material sólido captado.
- f) La Relación de Toma determina el ancho de las superficies de separación en el canal principal.
- g) El ángulo de bifurcación tiene una influencia pequeña y no muy bien determinada.
- h) En un tramo curvo el lugar más favorable para la ubicación de la bifurcación es la parte externa e inicial de la curva.
- i) Si el gasto en el río es menor que Q_0 (gasto crítico de arrastre) no hay problemas con los sólidos de fondo, puesto que no están en movimiento.
- j) Si el gasto en el río es mayor que Q_0 , sólo debe derivarse una parte de Q , de modo de conservar una adecuada capacidad de transporte en el río.
- k) El conocimiento de los fenómenos hidráulicos que ocurren en una bifurcación es importante para el diseño de las obras de captación.
- l) El método experimental, con base en modelos, es la mayor parte de las veces altamente recomendable para el mejor conocimiento del comportamiento hidráulico y sedimentológico de una bifurcación.

Relación de Figuras

- Figura 1** Representación esquemática de una bifurcación en un tramo recto
- Figura 2** Resultados de las investigaciones de Thoma
- Figura 3** Investigaciones de Bulle: a) Esquema utilizado, b) Resultados
- Figura 4** Resultado del procesamiento de las mediciones de Dancy.
- Figura 5** Líneas de separación en una bifurcación libre: a) Sin grada, b) Con grada
- Figura 6** Fenómenos secundarios que se presentan en una bifurcación
- Figura 7** Zonas de estancamiento y depósito
- Figura 8** Influencia del ángulo de bifurcación en la captación de sólidos
- Figura 9** Escurrimiento en un tramo curvo
- Figura 10** Influencia de la curvatura del canal en la captación de sólidos para $Q_1 = 0,5Q$.

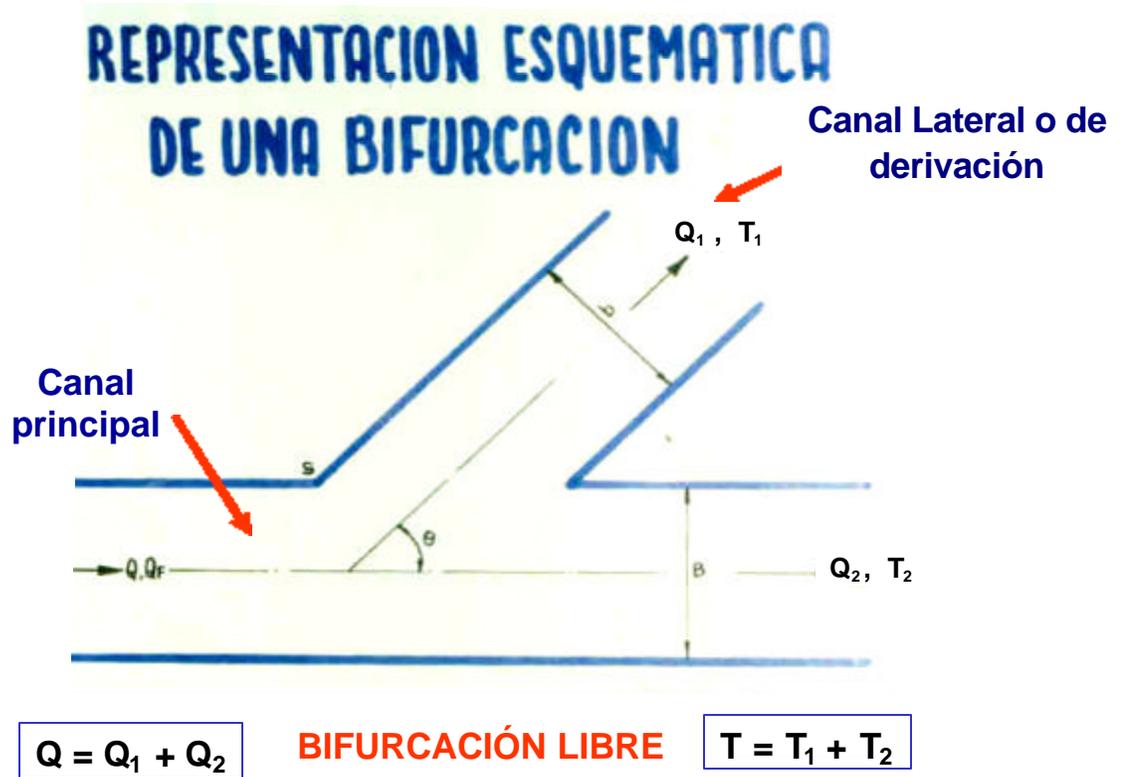


Fig. 1 Representación esquemática de una bifurcación en un tramo recto

Investigaciones de Thoma

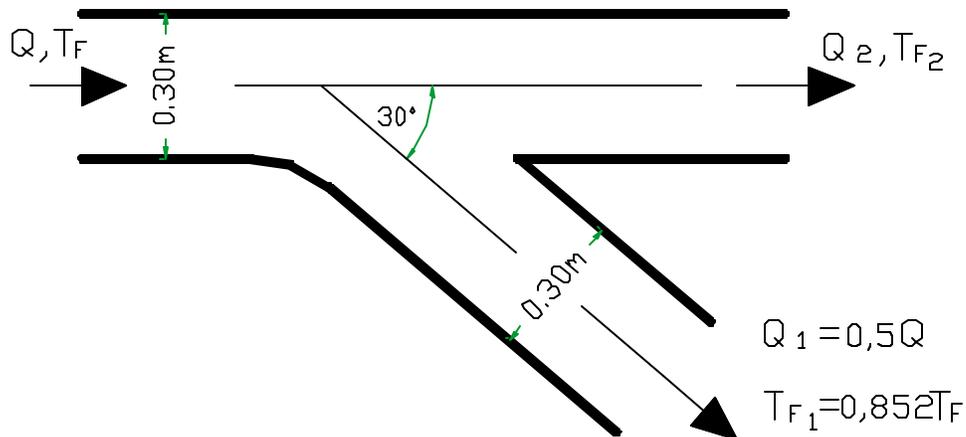


Fig. 2 Resultados de las investigaciones de Thoma ($\epsilon = 30^\circ$)

Investigaciones de Thoma

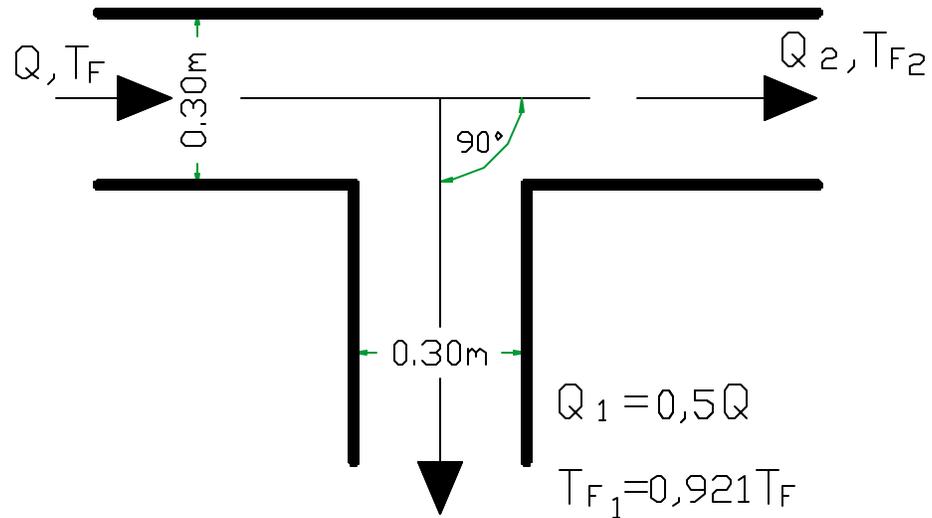


Fig. 2 Resultados de las investigaciones de Thoma ($\theta = 90^\circ$)

Investigaciones de Bulle

PARA UN ÁNGULO DE 30°

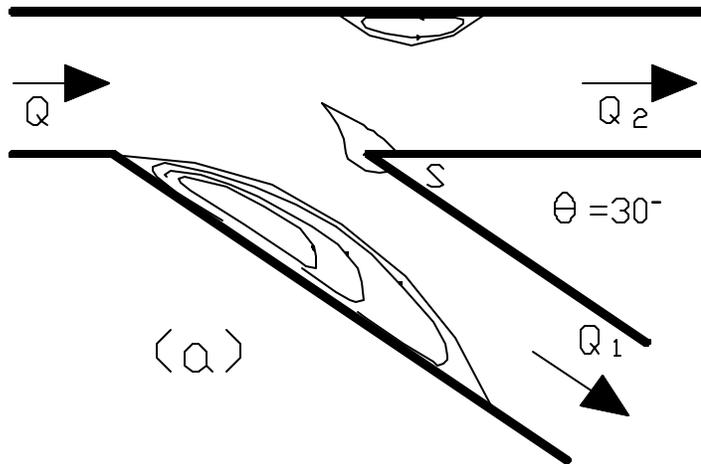


Fig. 3a Investigaciones de Bulle.
Esquema utilizado

Investigaciones de Bulle

PARA UN ÁNGULO DE 30°

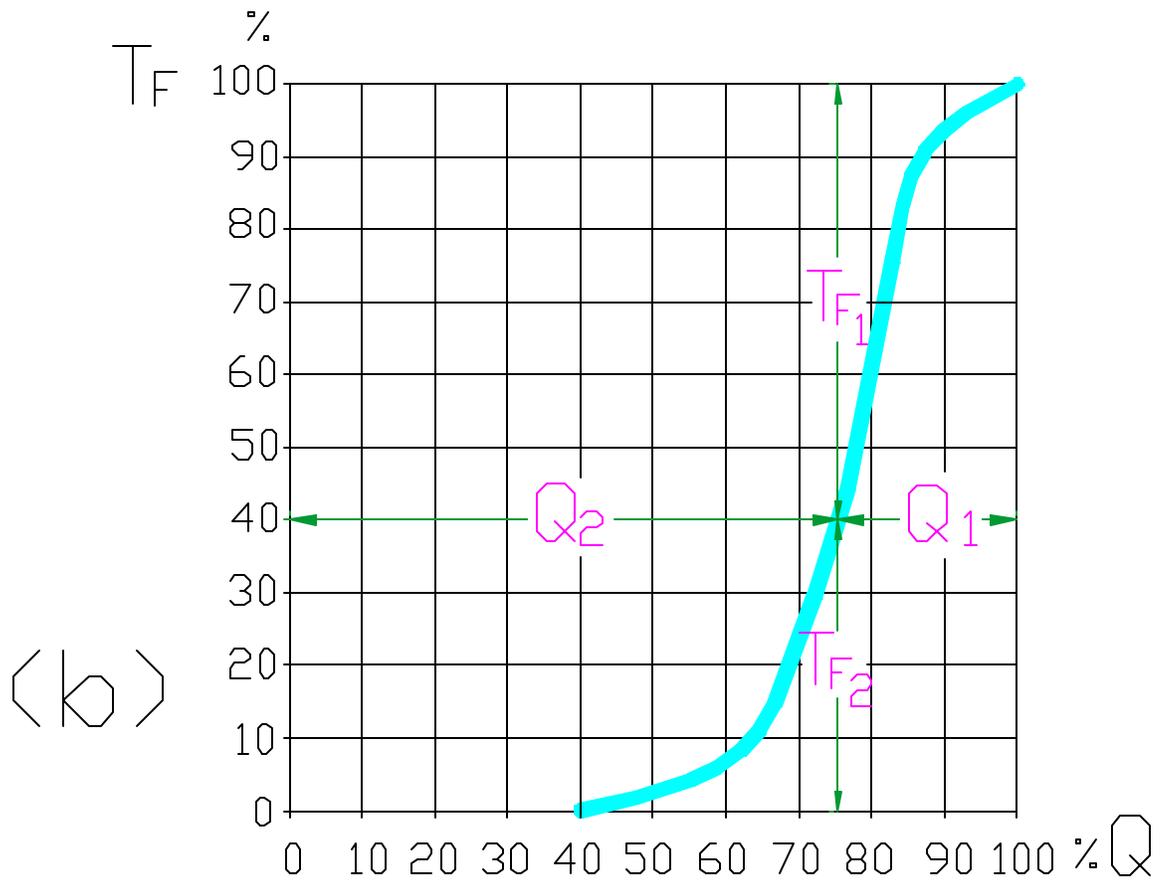


Fig. 3b Investigaciones de Bulle. Resultados.

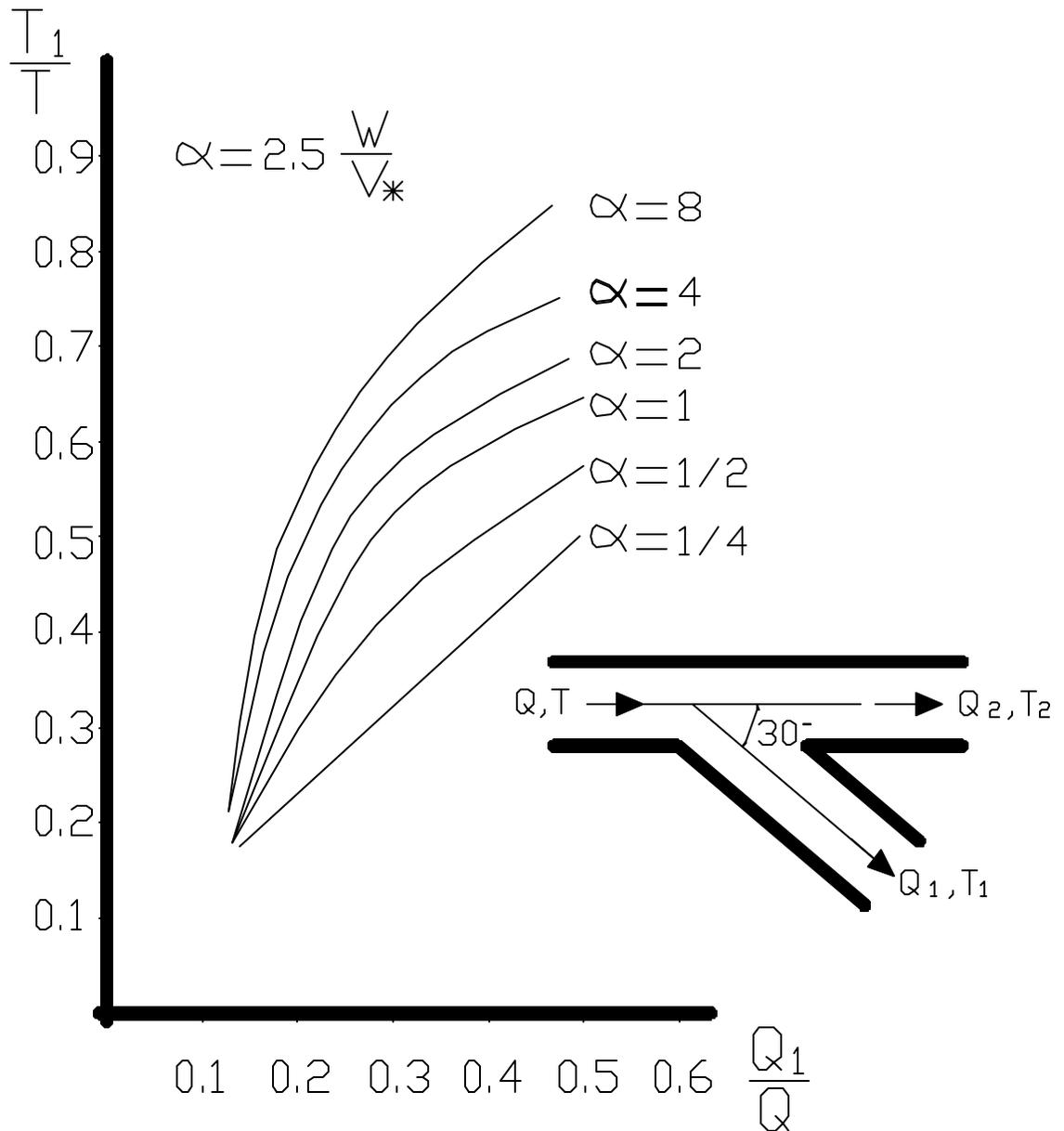


Fig. 4 Resultado del procesamiento de las Investigaciones de Dancy.

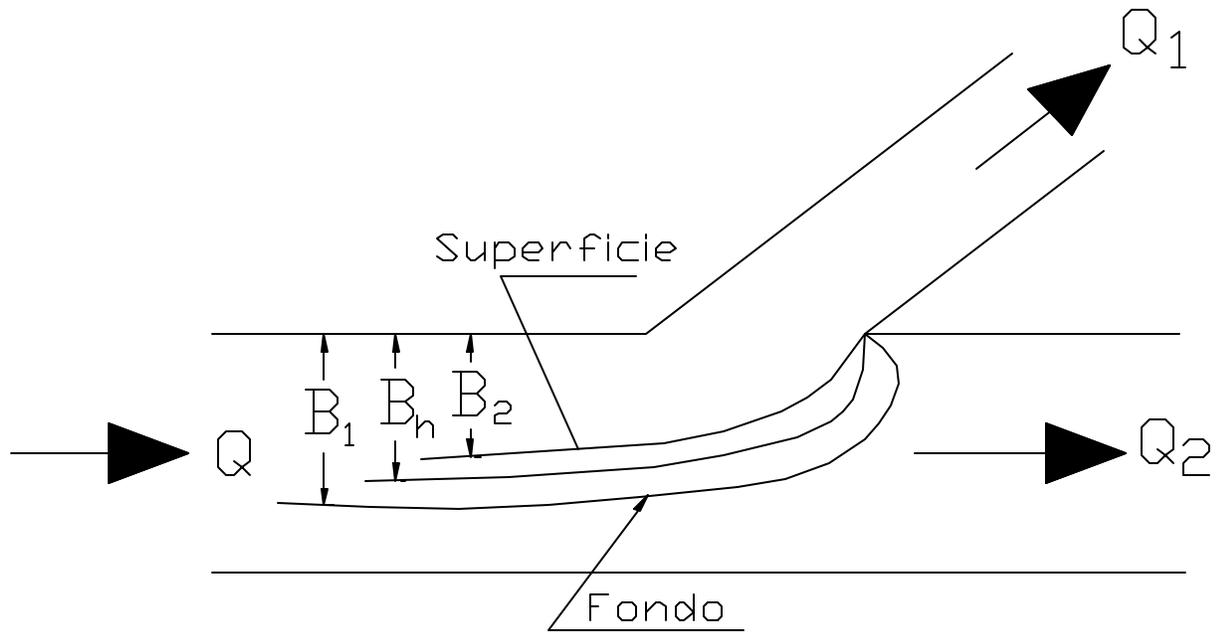


Fig. 5a Líneas de separación (sin grada)

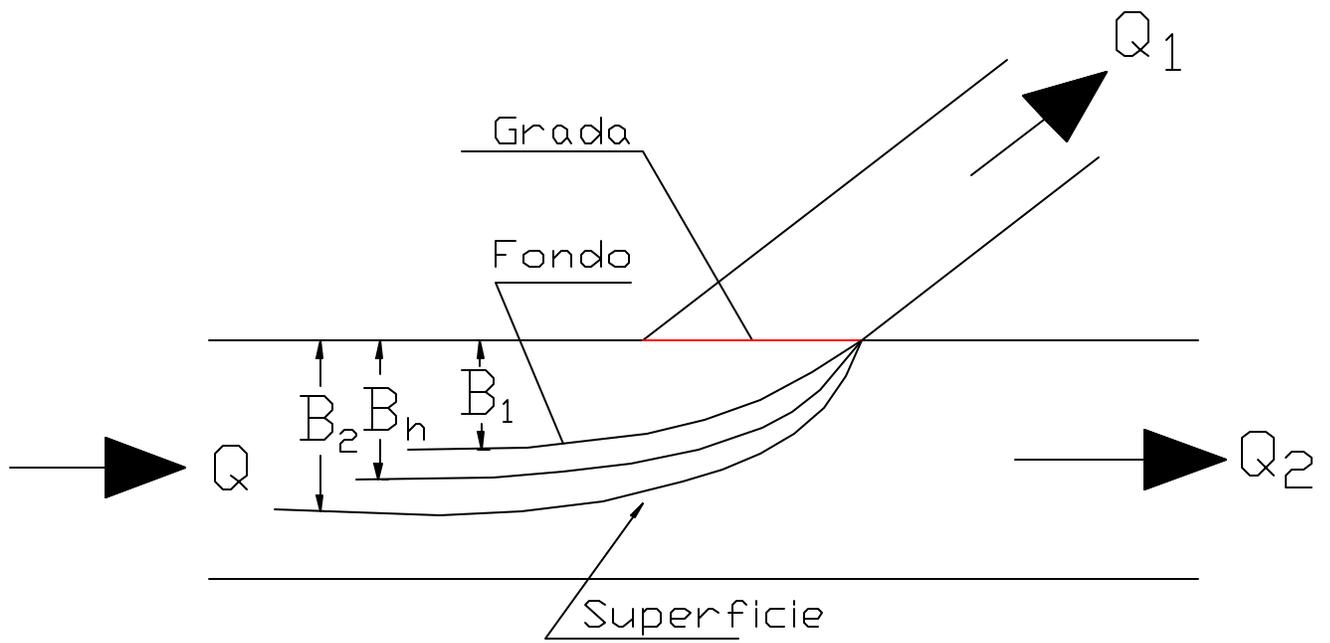


Fig. 5b Líneas de separación (con grada)

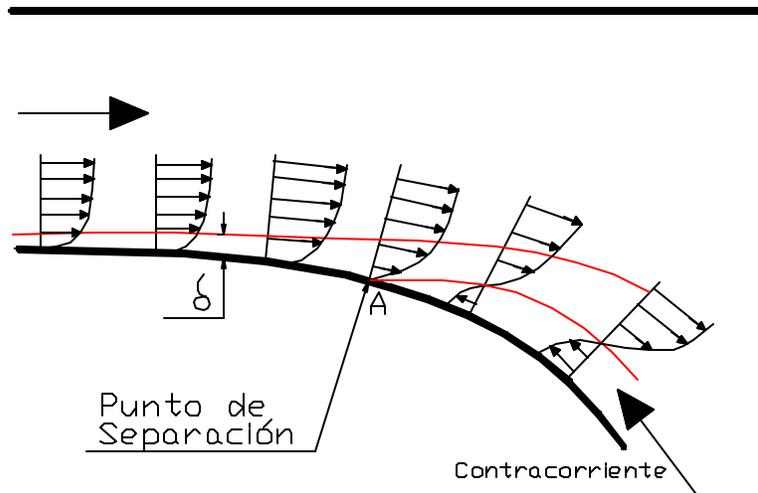


Fig. 6 Fenómenos secundarios que se presentan en una bifurcación

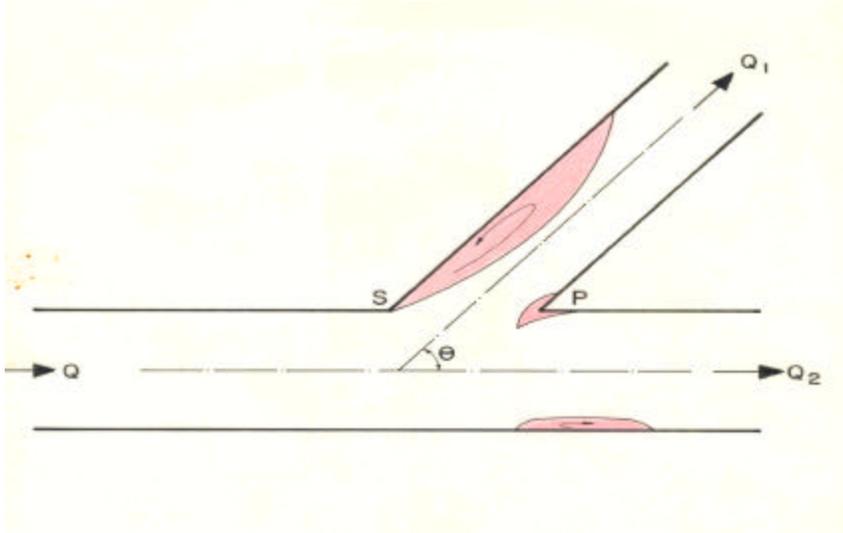


Fig. 7a Zonas de estancamiento y depósito

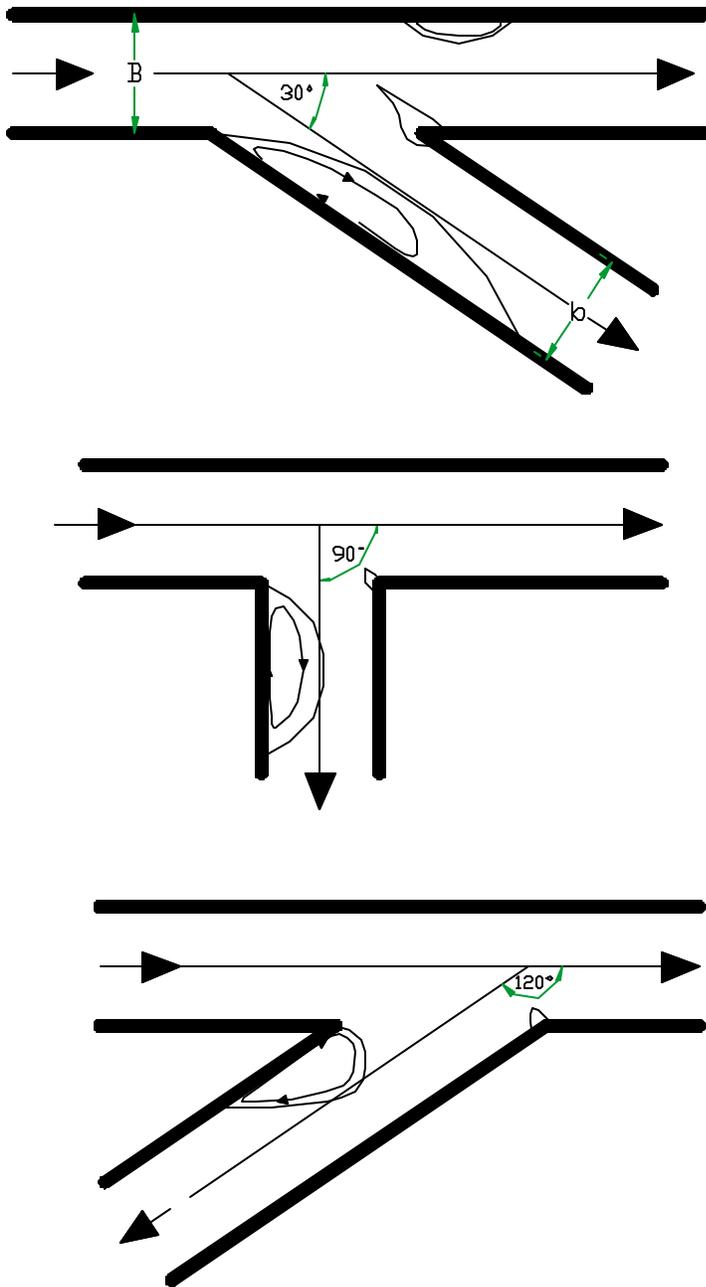


Fig. 7b Zonas de estancamiento y depósito

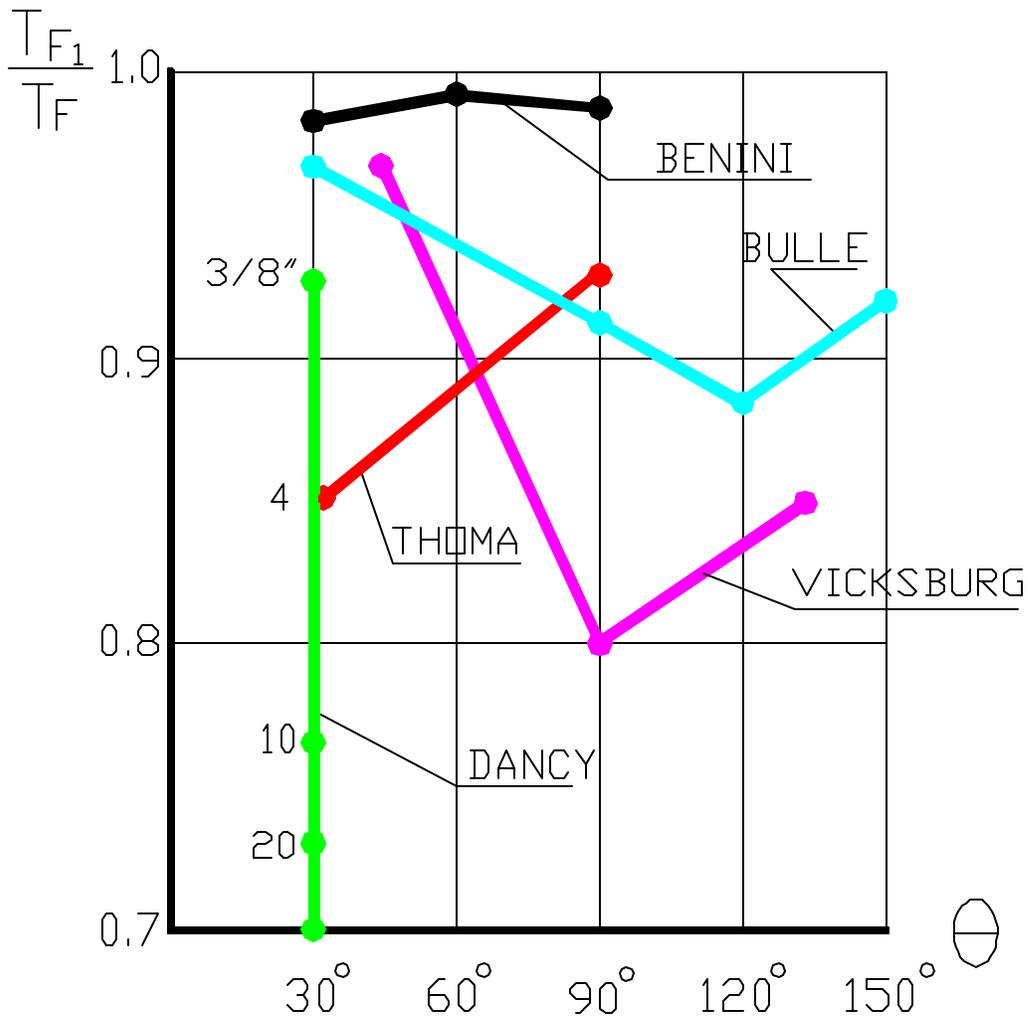


Fig. 8 Influencia del ángulo de bifurcación en la captación de sólidos para $Q_1/Q = 0,5$

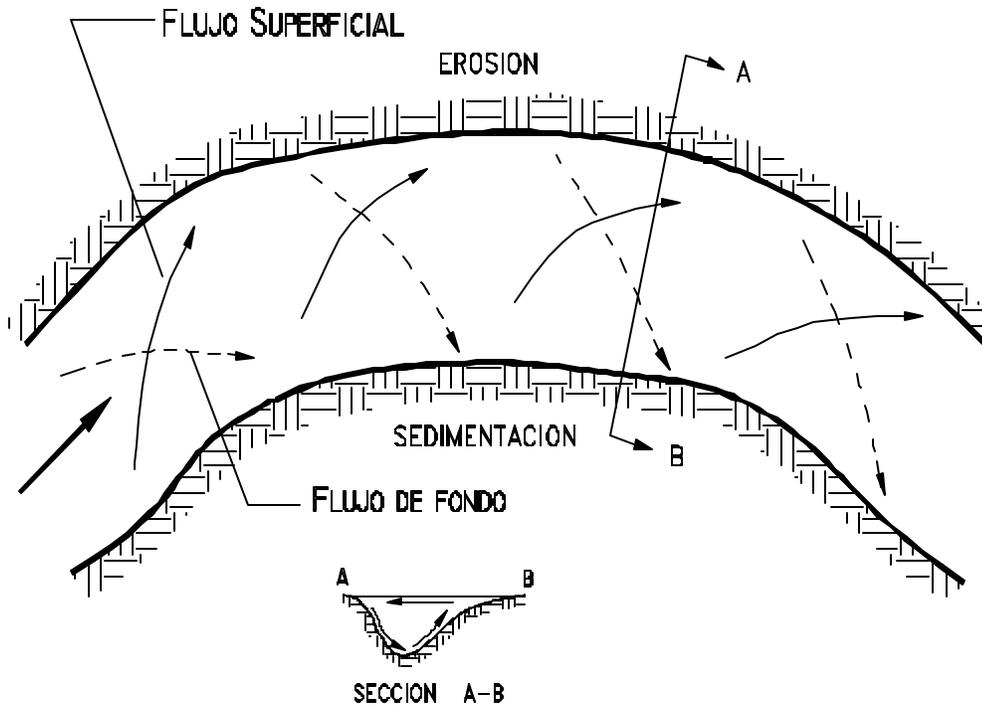


Fig. 9 Escurrimiento en un tramo curvo

**RESULTADOS
EXPERIMENTALES DE
HABERMAAS PARA UN
TRAMO RECTO Y VARIOS
TRAMOS CURVOS.**

$Q_1/Q = 0,5$

Bifurcaciones

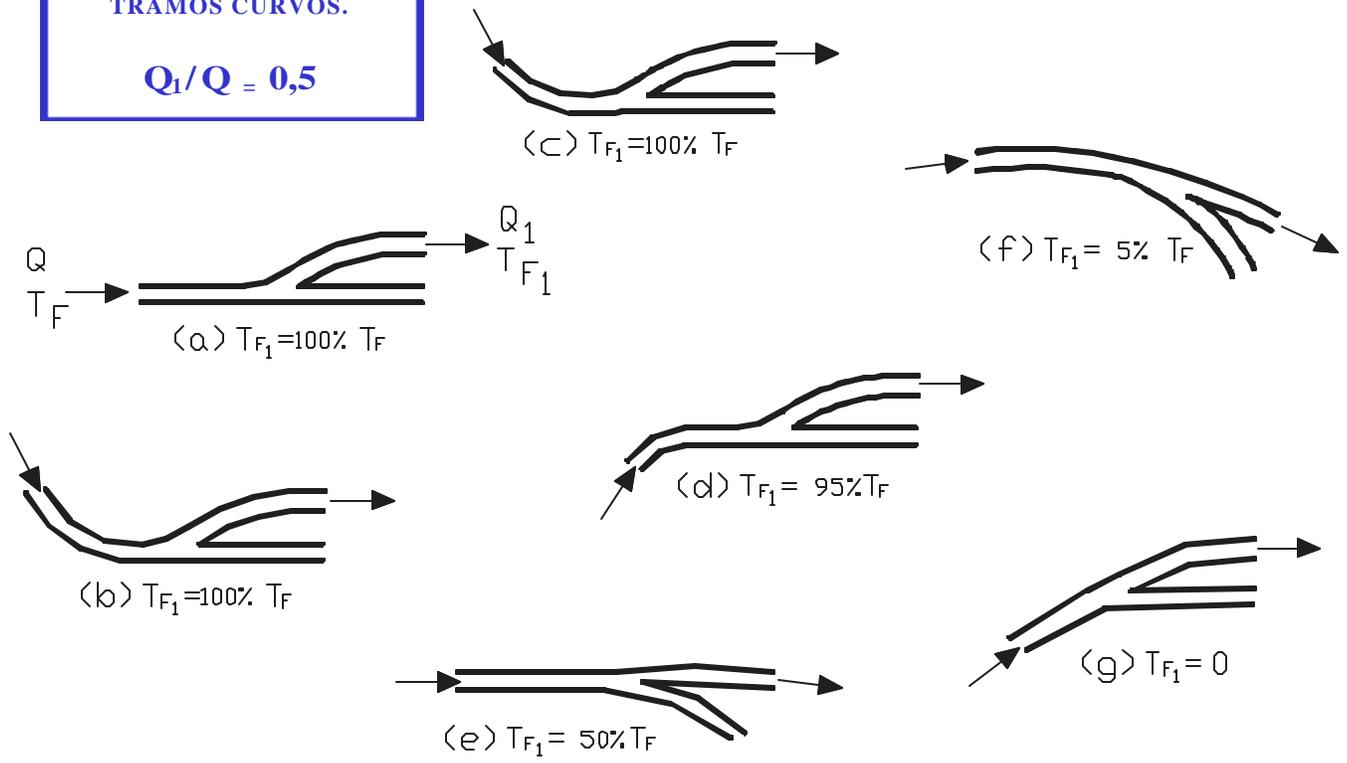


Fig. 10 Influencia de la curvatura en la captación de sólidos para $Q_1/Q = 0,5$