



Universidad
Politécnica
de Cartagena

MEMORIA

TFG

Cálculo de curvatura de líneas de corriente en flujo en lámina libre sobre reja de captación de fondo mediante Instrumentación Pitot.

Titulación: Grado en Ingeniería Mecánica.

Director: Alberto García Pinar.

Codirector: Juan García Bermejo.

Alumno: Fco. Emiliano García Bermejo.

ÍNDICE

1. RESUMEN	2
2. OBJETIVOS	3
3. PRINCIPIOS TEÓRICOS Y ESTADO DEL ARTE	6
3.1 SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE FONDO.....	8
4. MATERIALES, EQUIPOS Y MÉTODOS.....	13
4.1 DEFINICIÓN DEL PERFIL DE LA LÁMINA DE AGUA CON LIMNÍMETRO	13
4.2 DEFINICIÓN DE LA ENERGÍA TOTAL RESPECTO DE UNA DIRECCIÓN DETERMINADA MEDIDA MEDIANTE TUBO PITOT	16
5. ESQUEMA DE CÁLCULO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DIRECCIÓN DE LAS LÍNEAS DE CORRIENTE.....	20
6. CAMPAÑA DE MEDICIONES CON TUBO PITOT REALIZADAS	22
7.RESULTADOS OBTENIDOS.....	24
8. PLANIFICACIÓN.....	28
9. CONCLUSIONES.....	30
10.BIBLIOGRAFÍA.....	31

1. RESUMEN

El presente Trabajo Fin de Grado ha consistido en la toma de mediciones en modelo hidráulico de laboratorio del perfil de la lámina de agua (limnómetro) y de la energía total (tubo Pitot) en diferentes puntos interiores a un flujo que varía en función de los caudales de aproximación y de las condiciones del sistema. Además se proponen y realizan una serie de cálculos encaminados a analizar la curvatura de las líneas de corriente en un Flujo en Lámina Libre sobre una reja de captación de fondo.

Dichas mediciones se llevan a cabo en una estructura hidráulica disponible en el Laboratorio de Hidráulica de la UPCT. La estructura dispone de tres rejassistemas de captación, con distintos espaciamentos entre ellas, o índices de huecos, y que pueden adoptar ángulos distintos respecto a la horizontal (0, 10, 20, 30%). Además la estructura se puede alimentar con diversos caudales (53.8, 77.0, 114.6, 155.4 l/s.m).

Una vez realizadas las campañas de mediciones, se proponen una serie de ecuaciones para la determinación, a partir de los datos, del campo de velocidades y de la inclinación de las líneas de corriente en cada punto de medida.

Se presentan una serie de conclusiones respecto al uso de instrumentación Pitot en lámina libre, se discute la idoneidad de su uso en la ingeniería hidráulica y se proponen los trabajos a llevar a cabo para determinar los posibles factores correctores que posibiliten el uso de esta instrumentación para mediciones en flujo en canales abiertos con líneas de corriente curvadas.

2. OBJETIVOS

El laboratorio de Hidráulica de la Universidad Politécnica de Cartagena dispone de una estructura hidráulica basada en un canal rectangular de 0,5 m de ancho, de 5 m de longitud y una pendiente del 1 por mil que finaliza en un sistema de captación de fondo basado en rejillas longitudinales al flujo pudiendo adoptar diferentes espaciamientos. Cada una de las barras que conforman la rejilla son de aluminio con perfil transversal en T y con ancho en coronación de 30 mm. Se dispone de tres rejillas distintas como consecuencia de que éstas adoptan diferente espaciamiento, 11.7, 8.5, y 5.7 mm.

Dicho canal se puede alimentar con diferentes caudales (53.8, 77.0, 114.6, 155.4 l/s.m), medidos a la entrada mediante caudalímetro electromagnético, y que dispone de un canal de recogida del caudal captado y de un canal de recogida de los caudales no captados, que se miden mediante vertedero triangular.



Figura nº 1. Vista de la Estructura de Captación de Fondo ubicada en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Politécnica de Cartagena

El flujo desarrollado sobre el sistema de captación de fondo es un Flujo Espacialmente Variado (FEV) con caudales decrecientes en el que se produce una curvatura de las líneas de corriente cuando éste pasa sobre la reja. Así, para poder definir la capacidad de captación de las rejillas, es conveniente conocer lo más detallado posible la curvatura de dichas líneas de corriente a su paso sobre las rejillas.

Así, los objetivos propuestos en el presente proyecto son:

- 1º) Introducción Teórica al Flujo en lámina libre y más concretamente al Flujo Espacialmente Variado con Caudales Decrecientes. Caso concreto de un sistema de Captación de Fondo. Ecuaciones que lo definen y simplificaciones adoptadas en su cálculo. Definición del funcionamiento de la estructura hidráulica existente en el Laboratorio de Hidráulica. Definición de curvatura de las líneas de corriente.
- 2º) Campaña de mediciones en estructura hidráulica.
 - A) Medición de altura de lámina libre mediante limnómetro y;
 - B) medición de la presión total para diferentes secciones y diferentes calados en el interior de un flujo en lámina libre curvo mediante instrumentación tipo Pitot. Para esta tarea se podrá disponer de manera simultánea, y en la misma sección transversal, aunque en huecos paralelos de la reja, de dos tubos tipo Pitot con inclinaciones de 0 y 22°. La lectura de los tubos Pitot se podrá tomar de manera visual (columnas verticales de cristal) o mediante recogida de datos procedentes de data logger conectado a transductor de presión diferencial disponible. La campaña se compone de aproximadamente 9 secciones longitudinales sobre las que se tomarán alrededor de 5 puntos por sección. Se repetirá la campaña para diferentes caudales. En algunos puntos se tomarán medidas de velocidad mediante instrumentación tipo doppler para poder contrastar con los valores medidos con el Pitot. Las tareas a desarrollar son: colocación de la reja de fondo en la posición adecuada, puesta en marcha de las bombas necesarias regulando las válvulas para conseguir el caudal deseado, montaje de los pitot junto con el limnómetro y por último toma de datos.

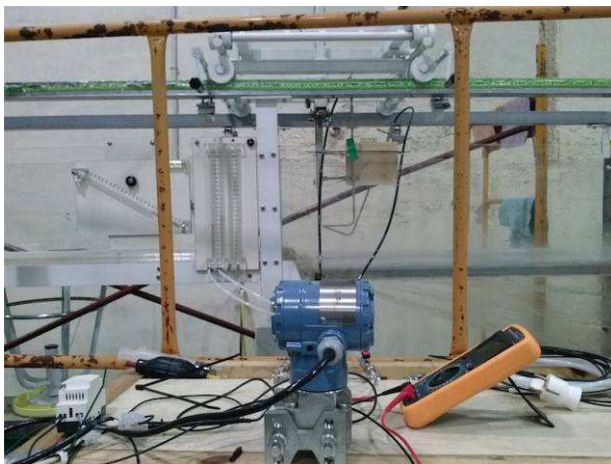


Figura nº 2. Vista de los dispositivos tipo Pitot, columnas de cristal de medición visual y transmisor de presiones diferenciales marca Rosemount modelo 2051

- 3º) Tratamiento de los valores medidos en laboratorio. A partir de los resultados medidos en laboratorio se calcularán, considerando la energía del flujo constante a lo largo de toda la reja (ec. Bernouilli aplicada a una línea de corriente), los valores de presión y velocidad en algunos de los puntos del flujo, determinando además el ángulo de inclinación de la línea de corriente y definiendo la diferencia de la presión con respecto a la presión hidrostática.
- 4º) Comparativa con los resultados obtenidos con otra instrumentación tipo Doppler. Se compararán los resultados obtenidos con los registrados mediante un medidor de velocidad Tipo Doppler
- 5º) Conclusiones respecto al uso de instrumentación Pitot en lámina libre. A la vista de los resultados obtenidos se discutirá la idoneidad y propondrán la conveniencia de adoptar factores correctores para validar las presiones medidas mediante tubos Pitot en canales abiertos con líneas de corriente curvadas.

3. PRINCIPIOS TEÓRICOS Y ESTADO DEL ARTE

El movimiento de un líquido a superficie libre se ve afectado por las siguientes fuerzas: -de gravedad; -de resistencia; -la producida por presión que se ejerce sobre las fronteras del canal; -la debida a la viscosidad del líquido; --de tensión superficial (Sotelo Ávila, 2002). Así, partiendo de las hipótesis de que el fluido es incompresible, que el flujo es irrotacional, y que la energía se mantiene constante a lo largo de la reja, se cumple la ecuación de Bernoulli a lo largo de cada una de las líneas de corriente en las que se puede separar el flujo. Estas hipótesis nos llevan a unas ecuaciones que aproximan de manera razonable el fenómeno de flujo en lámina libre.

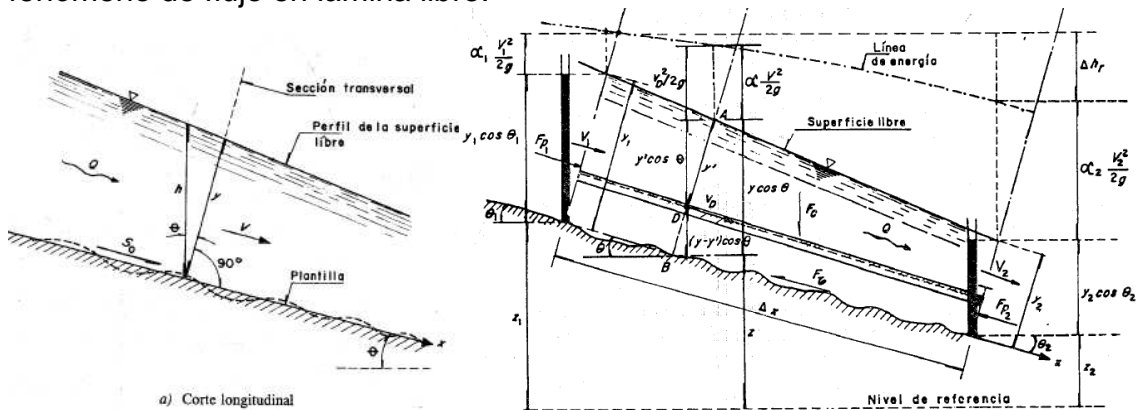


Figura nº 3. Esquema de un canal en lámina libre en condiciones de flujo unidimensional y permanente

$$E = y \cdot \cos \alpha + \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (\text{ec. 1})$$

$$H = z + y \cdot \cos \alpha + \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (\text{ec. 2})$$

Respecto al flujo unidimensional y permanente utilizaremos las siguientes ecuaciones: *ecuación 1* corresponde a la energía específica, E, que se define como la energía cuya referencia es el fondo del canal, y medida sobre la línea de corriente correspondiente a la superficie del agua. La *ecuación 2* corresponde a la carga total, H, respecto al plano de referencia

Donde:

E= energía específica

H= energía total

v= velocidad local en el punto de cálculo

y= calado medido en perpendicular a la base del canal, también llamado tirante

α= ángulo que forma la base del canal con la horizontal

P= presión que normalmente es la hidrostática (salvo si las l.d.c. tiene curvatura)

g= aceleración de la gravedad

γ = peso específico del agua, producto de la aceleración de la gravedad por la densidad del agua

En lo que se refiere a la presión en cualquier punto de la sección del flujo, ésta se puede medir por la altura de una columna en un tubo piezométrico colocado en dicho punto. Ignorando perturbaciones menores y para condiciones de flujo normales, en las que las líneas de corriente son rectas y paralelas al fondo del canal se puede considerar que la presión corresponde a una distribución hidrostática y podemos establecer la ecuación 3 siguiente tal que la presión se iguala a la altura de agua en punto interior al flujo, punto D de la figura siguiente:

$$y' \cdot \cos \alpha = \frac{P}{\gamma} \quad (\text{ec. 3})$$

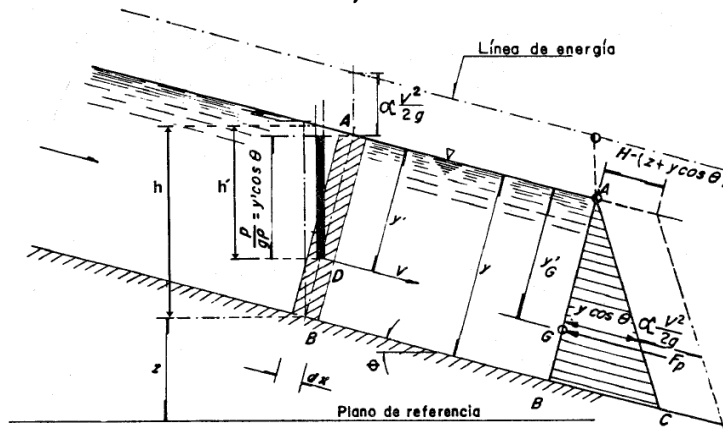


Figura nº 4. Esquema de la distribución de presiones en la sección transversal de un canal en lámina libre

En referencia a la distribución de presiones en un canal en lámina libre se pueden dar casos en los que las líneas de corriente dejan de ser rectas y paralelas al fondo del canal y adquieren cierta curvatura. Dicho caso puede corresponder por ejemplo a una caída libre del flujo al abandonar un canal. En estos casos la distribución de presiones dentro del flujo deja de ser hidrostática y la presión en un punto se puede expresar como:

$$\text{Presión} = \frac{P}{\gamma} + \frac{\Delta P}{\gamma} \quad (\text{ec. 4})$$

El término de la presión $\Delta P/\gamma$, de desviación de la presión hidrostática, puede ser positivo o negativo dependiendo de que el flujo sea cóncavo o convexo. Así la energía H en un punto con las líneas de corriente curvadas quedaría:

$$H = z + y \cdot \cos \alpha + \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2 \cdot g} \pm \frac{\Delta P}{\gamma} \quad (\text{ec. 5})$$

3.1 SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE FONDO

Desde el punto de vista hidráulico los sistemas de captación de fondo se enmarcan dentro del Flujo Espacialmente Variado (FEV), con caudales decrecientes a lo largo de la reja, y en los que se obtienen una buena aproximación considerando el flujo como unidimensional y permanente ($Q=\text{cte}$).

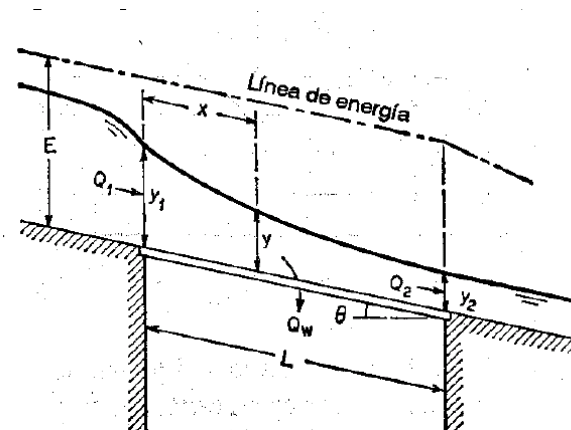


Figura nº5. Esquema de cálculo de Flujo Espacialmente Variado con caudales decrecientes sobre reja de fondo bajo la hipótesis de energía específica constante y despreciando la diferencia entre proyección del tirante sobre la vertical y altura de la lámina de agua en la vertical. (Chow, 1998)

Diversos autores han comprobado que la variación de la energía específica del flujo a su paso por la reja era muy baja en la mayor parte de los casos, siendo ésta una de las hipótesis de cálculo: energía específica, E, constante. Solo en casos en los que la pendiente longitudinal de la reja es muy elevada se puede dar el caso de que las pérdidas por fricción no compensen la variación de energía para mantener la energía específica constante y es más adecuado considerar la energía total como constante. Así autores como *Marchi, Noseda*, y *Mostkow* (1957) utilizan la hipótesis de energía específica constante para realizar sus cálculos, mientras que por el contrario otros autores como *Garot, Bouvard*, y *Frank* consideran la energía total, H, como constante. Es necesario precisar que tanto *Garot* como *Mostkow* realizaron todos sus cálculos para rejillas horizontales por lo que en ese caso ambas hipótesis son equivalentes.

$$E = y + \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot b^2 \cdot y^2} \rightarrow Q = b \cdot y \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (E - y)} \quad (\text{ec } 1)$$

Como $E = \text{cte}$ calculamos su derivada e igualamos a cero:

$$\frac{dE}{dx} = 0 \rightarrow \frac{dy}{dx} = \frac{Q \cdot y \cdot (-\frac{dQ}{dx})}{g \cdot b^2 \cdot y^3 - Q^2} \quad (\text{ec. } 2)$$

Donde:

x = componente longitudinal de la reja

b = ancho de la reja

La ecuación que gobierna el caudal que recoge la reja de fondo es la de un orificio en presión en la que toda la carga hidráulica se puede decir que se convierte en velocidad de paso a través de los barrotes. En referencia a la carga hidráulica cabe decir que diversos autores han tomado como carga hidráulica el valor del calado del flujo sobre la reja en cada punto; o bien la energía específica del flujo; o el valor de la energía total a la hora de aplicar dicha ecuación del orificio. En cualquiera de los casos será el coeficiente de descarga el coeficiente encargado de absorber la relación entre el caudal captado y la carga de energía elegida. Esto supone una importante consideración pues podemos encontrar muy diversos coeficientes de descarga en función de la carga hidráulica considerada, además de la influencia que en dicho coeficiente tiene la forma de las barras, su espaciado, etc. Desde el punto de vista físico ya *Mostkow (1957)* y a continuación *Righetti y Lanzoni (2008)* comentan la gran correlación entre el valor del coeficiente de descarga y el seno del ángulo que forma la velocidad de las líneas de corriente entrantes en la reja con el plano paralelo a la reja.

$$Q_{captado} = \frac{dQ}{dx} = b.C_q.m.\sqrt{2.g.E} \quad (\text{ec. 3})$$

Donde:

m = índice de huecos, relación entre la superficie hueca y la maciza+hueca.

Así, operando se obtiene:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{2.m.C_q.\sqrt{E.(E-y)}}{3.y-2.E} \quad (\text{ec 4})$$

Integrando se obtiene:

$$x = \frac{-E}{m.C_q} \cdot \frac{y}{E} \cdot \sqrt{1 - \frac{y}{E}} + C \quad (\text{ec. 5})$$

Si hacemos que en $x=0$ el calado sea conocido $y=y_1$ tendremos:

$$x = \frac{E}{m.C_q} \cdot \left(\frac{y_1}{E} \cdot \sqrt{1 - \frac{y_1}{E}} - \frac{y}{E} \cdot \sqrt{1 - \frac{y}{E}} \right) \quad (\text{ec. 5})$$

Además podemos calcular la longitud necesaria para captar la totalidad del caudal haciendo $y=0$:

$$L = \frac{E}{m.C_q} \cdot \left(\frac{y_1}{E} \cdot \sqrt{1 - \frac{y_1}{E}} \right) \quad (\text{ec. 6})$$

Normalmente para los casos de mayor aplicación práctica se da el flujo de aproximación subcrítico sobre la reja, se convierte en supercrítico al inicio de la reja, por lo que se suele adoptar la simplificación, que se aproxima a la

realidad, del calado crítico al inicio de la reja.

Otra cuestión que se trata de forma diversa por los diferentes autores es la de los casos en los que la reja tiene cierta pendiente en la que se considera de manera simplificada por parte de varios autores, entre ellos Nosedá (1956), que la altura de agua medida sobre la vertical al punto de medida es equivalente a la proyección vertical del tirante a la reja en el punto de medida. Esta simplificación no parece introducir un error muy elevado ya que para inclinación de la reja de hasta el 20% inducen a variaciones del área ocupada por el perfil de la lámina de agua del orden del 2%

Interesante es hablar de los desarrollos de Nosedá (1956) que demuestra la variación del coeficiente de descarga a lo largo de la reja, ya que el caudal de transporte varía el calado.

$$C_q = 0,66.m^{-0,16} \left(\frac{y}{L} \right)^{-0,13} \quad (\text{ec. 4})$$

Se trata de un flujo en el que la captación se produce por su fondo, lo que da lugar a una importante curvatura de las líneas de corriente, por lo que las presiones dejan de ser hidrostáticas. Así lo comprobó Venkataraman *et al.* (1980) proponiendo los correspondientes valores del coeficiente α' de corrección de la presión en la ecuación de la energía. Al igual que estos autores, Mostkow (1957), midió la distribución de presiones a la entrada, a la salida de la reja (figura nº 4) y propuso la formulación más correcta desde el punto de vista físico, y que tiene en cuenta la curvatura de las líneas de corriente, la Teoría de Boussinesq, que desprecia las pérdidas por fricción del flujo a lo largo de la reja y considera el fluido no viscoso y potencial. Pero esta formulación es de una enorme complejidad pues se debería distinguir entre la zona de huecos frente a la de barrotes (maciza), entre la parte superior frente a la inferior, etc. y en la actualidad no ha sido obtenido un desarrollo aplicable.

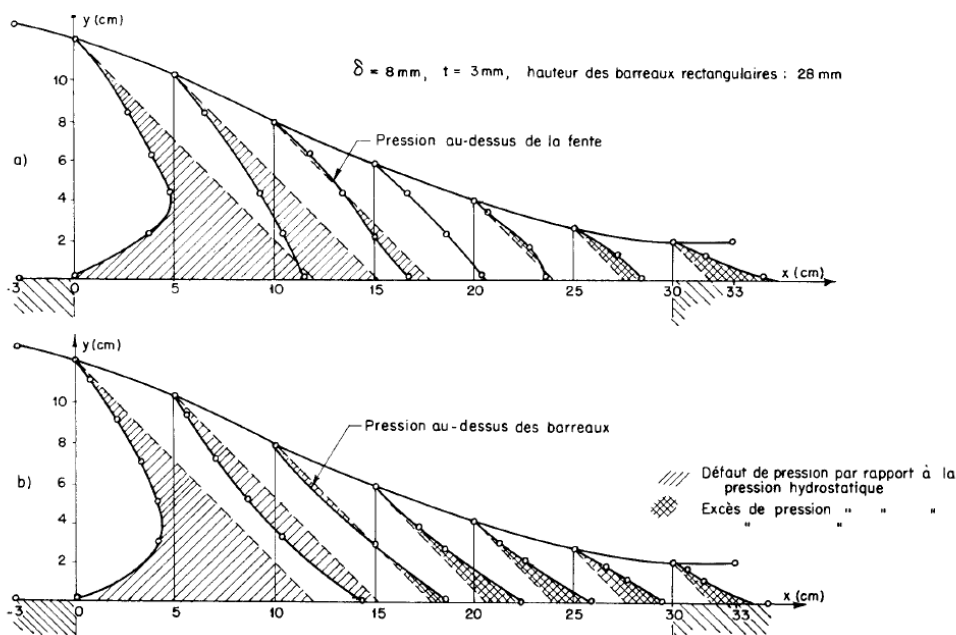


Figura nº 6. Distribución de presiones a lo largo de la reja de captación de fondo de barras longitudinales determinada sobre hueco y sobre reja mediante tubos Pitot

Además, Mostkow (1957) determinó la distribución de velocidades a lo largo de la reja (figura nº 5)

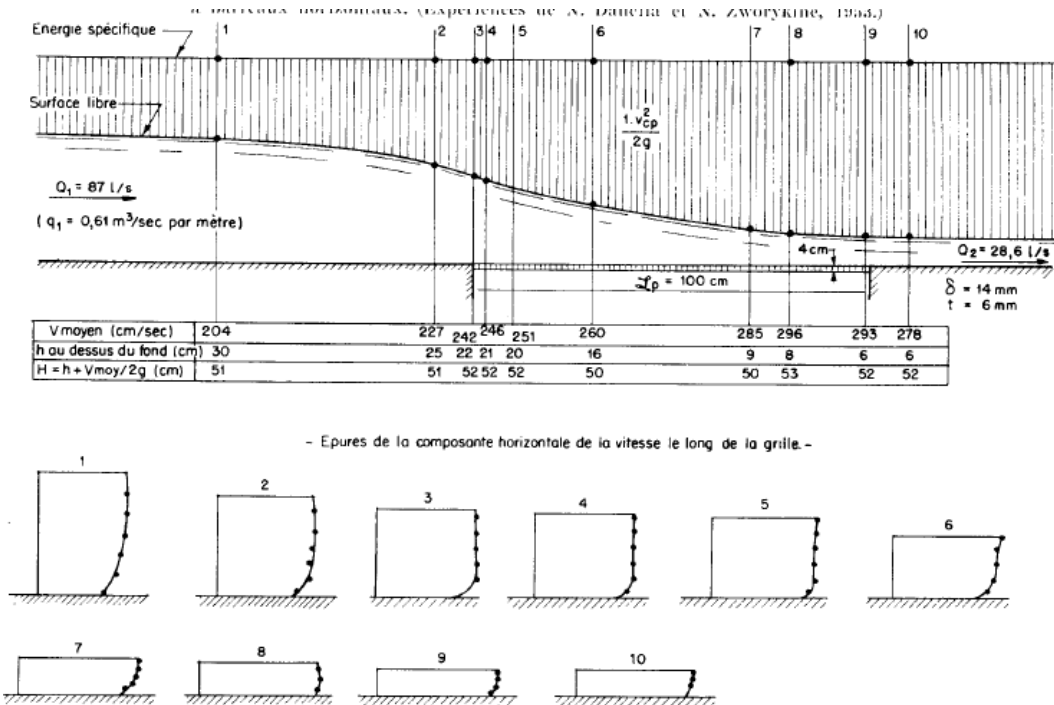


Figura nº 7. Vista del perfil longitudinal de la lámina de agua a su paso sobre la reja y distribución de velocidades en diversas secciones sobre la reja.

Otros autores como *Rigetti y Lanzoni (2008)* utilizaron técnicas PIV (Particle Image Velocimetry) para determinar el campo de velocidades y la curvatura del flujo a su paso por la reja. Éstos, encontraron una relación entre el coeficiente de descarga y el seno del ángulo que la velocidad forma con la horizontal en el punto de paso a través de la reja.

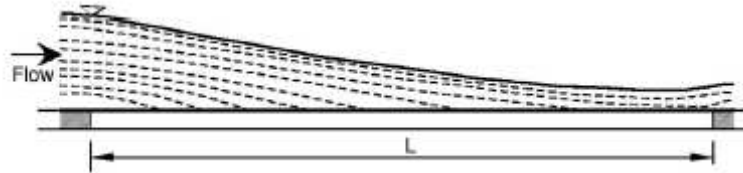


Figura nº 8. Trazado de líneas de corriente a lo largo de la sección longitudinal de la reja (*Rigetti y Lanzoni, 2008*)

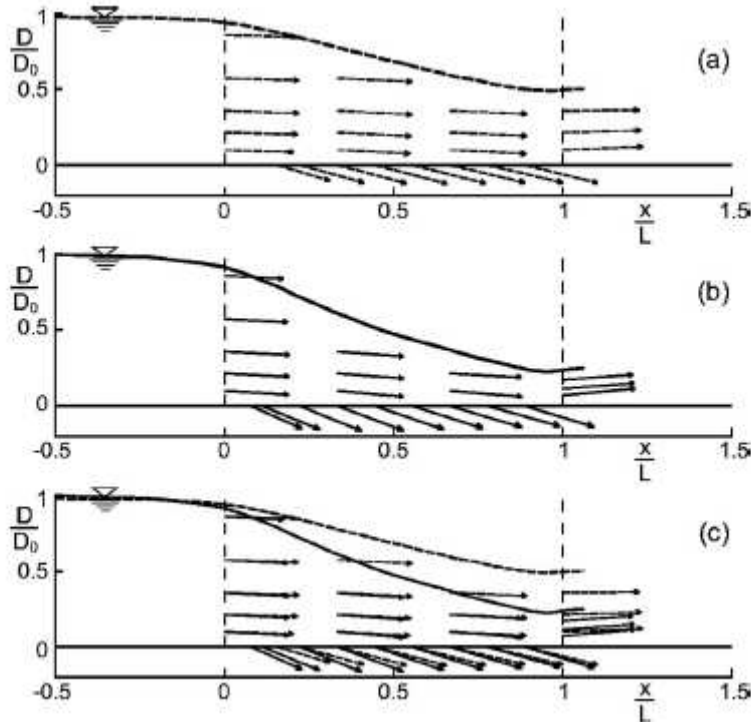


Figura nº 9. Distribución de velocidades en diversos puntos del flujo sobre la reja. (*Rigetti y Lanzoni, 2008*)

Conocer todas las características del flujo en cuanto a dirección y módulo del vector velocidad, así como presiones disponibles en el interior del flujo ayudarán a mejorar el conocimiento disponible en este tipo de sistemas de captación permitiendo la caracterización del transporte de sedimentos en la reja.

Dada la curvatura de las líneas de corriente se tratará de plantear una metodología capaz de determinar el campo de velocidades y de presiones en el interior de dicho flujo mediante un tubo Pitot.

4. MATERIALES, EQUIPOS Y MÉTODOS.

Se adjunta esquema del modelo físico sobre el que se va a llevar a cabo las mediciones.

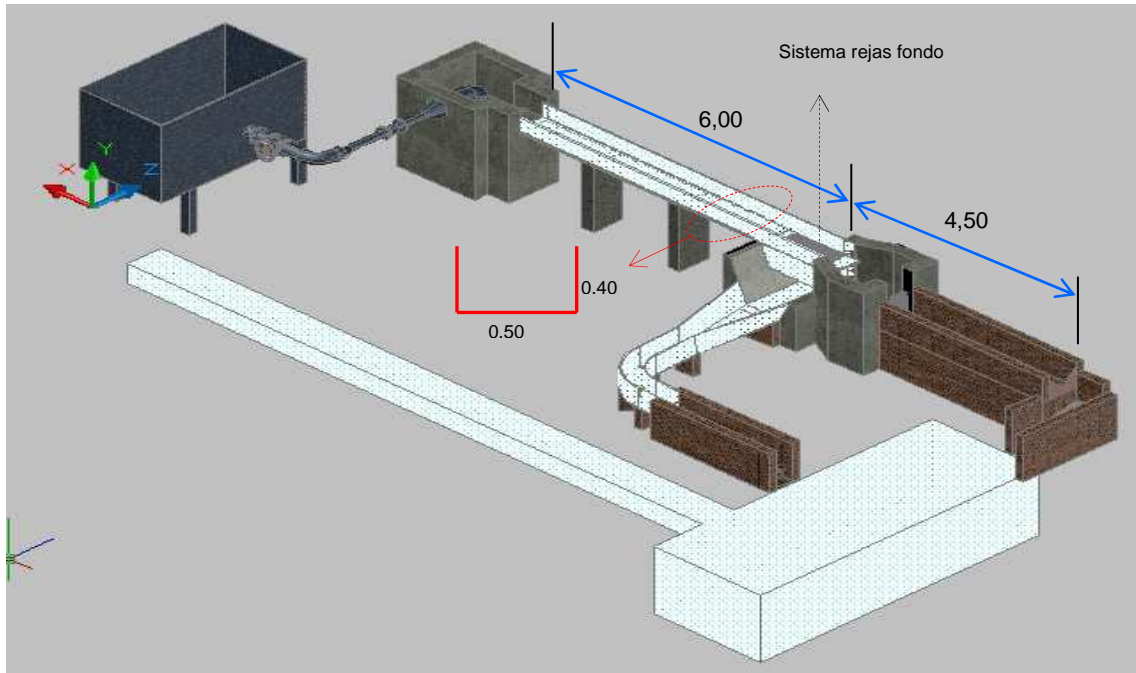


Figura nº 10. Plano de modelo físico de Captación de Fondo del Laboratorio de Hidráulica de la UPCT

4.1 DEFINICIÓN DEL PERFIL DE LA LÁMINA DE AGUA CON LIMNÍMETRO

En dicho modelo físico en primer lugar se va a medir el perfil de la lámina de agua para diferentes caudales, pendientes longitudinales de las rejillas y para cada una de las tres rejillas existentes. En el Laboratorio de Hidráulica el limnómetro es un instrumento que permite medir la diferencia de altura entre dos puntos mediante una regla vertical de precisión de décima de milímetro. Es de uso manual como se puede ver en la figura siguiente:

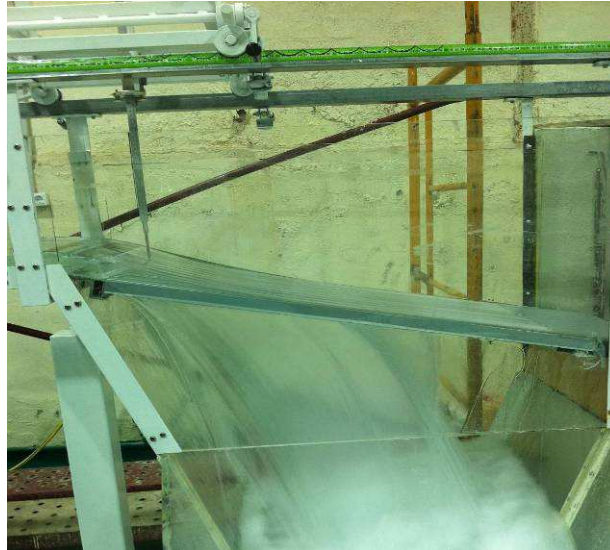


Figura nº 11. Detalle en la parte superior de la imagen de carro portalimnómetro con limnómetro colocado para medir el perfil de la lámina de agua

Dicho limnómetro se coloca cada 5 cm de distancia definiendo así las secciones de cálculo y se mide de forma manual la altura de agua en cada sección. Así, en las siguientes figuras se puede ver algunos ejemplos para los perfiles de la lámina de agua obtenidos para la reja de espaciamiento 11,7 mm, índice de huecos, m , 0,28 y para diferentes caudales y pendientes:

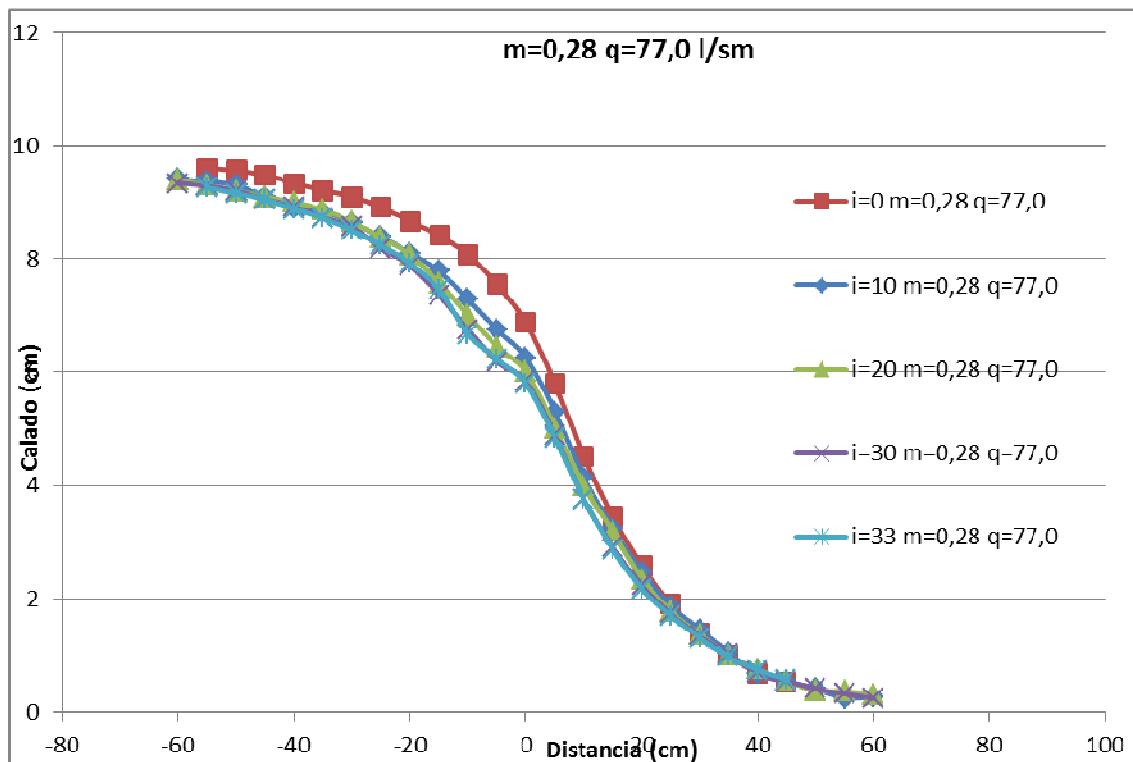


Figura nº 12. Perfil de la lámina de agua sobre la reja de captación de fondo medida con el limnómetro

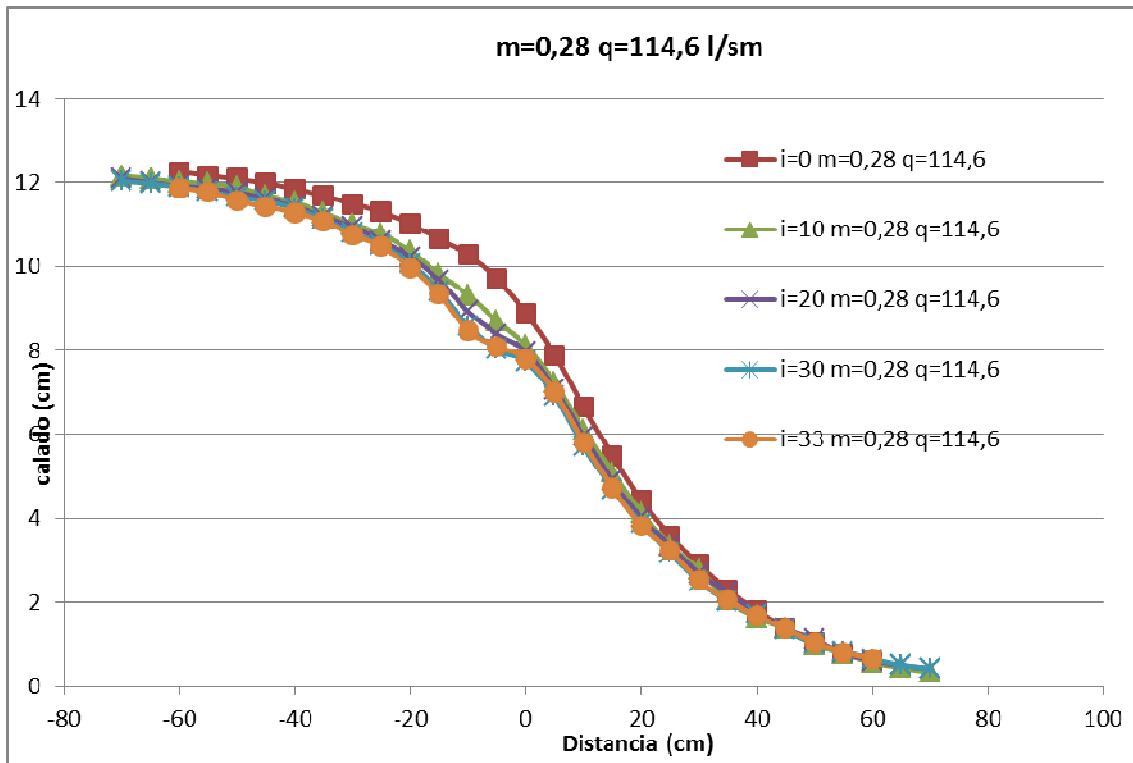


Figura nº 13. Perfil de la lámina de agua sobre la reja de captación de fondo medida con el limnómetro

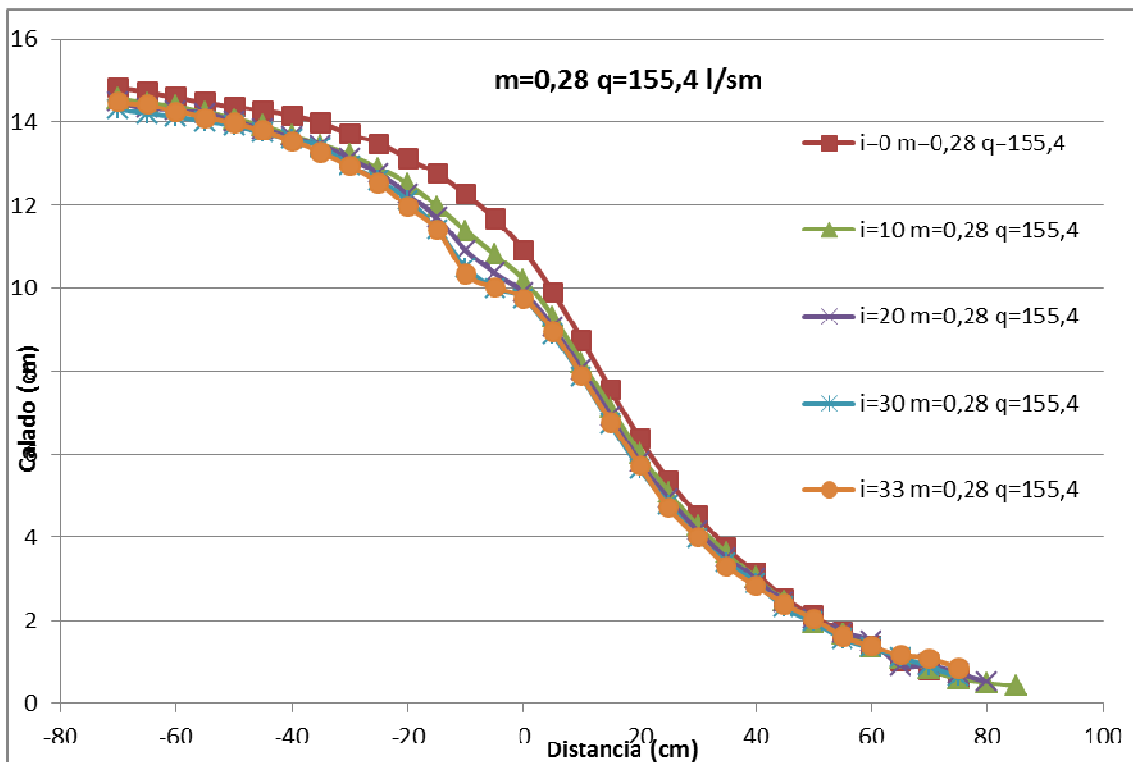


Figura nº 14. Perfil de la lámina de agua sobre la reja de captación de fondo medida con el limnómetro

4.2 DEFINICIÓN DE LA ENERGÍA TOTAL RESPECTO DE UNA DIRECCIÓN DETERMINADA MEDIDA MEDIANTE TUBO PITOT

En el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Politécnica de Cartagena se dispone de dos tubos Pitot tipo L como los descritos en la figura nº 16. Los tubos Pitot disponen de dos conducciones con aberturas/orificios para recibir las presiones del flujo sobre dichos orificios y convertirlas en altura de agua o energía potencial. Es decir, el principio de funcionamiento de un tubo Pitot, como la de un piezómetro, es la de convertir la energía total que actúa sobre sus orificios en energía potencial.

Uno de los orificios se suele colocar frontal al flujo y suele recibir las presiones de las líneas de corriente, que en un régimen sin curvatura de éstas, es decir con dichas líneas de corriente formando 0° con la conducción que recoge dicho orificio frontal (ver figura nº 15), e incidiendo de manera perpendicular al orificio, se puede concluir que dicho orificio recibe la totalidad de la componente de la energía debida a la presión de la lámina de agua (P/γ) más la componente debida a la energía cinética ($v^2/2.g$). Por otro lado dispone de un orificio lateral, sobre él las líneas de corriente inciden a 90°, y que solo recoge la energía debida al término de presión (P/γ). Así, se puede determinar el término de energía cinética por diferencia entre el valor medido por la parte frontal del tubo respecto a la parte lateral, según se muestra en las ecuaciones siguientes:

$$Cte_Pitot_frontal = \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2.g} \quad (\text{ec } 7)$$

$$Cte_Pitot_lateral = \frac{P}{\gamma} \quad (\text{ec. } 8)$$

$$Cte_Pitot_frontal - Cte_Pitot_lateral = \frac{v^2}{2.g} \quad (\text{ec. } 9)$$

Todo esto se cumple si se dan las condiciones de líneas de corriente paralelas y en la dirección del plano de medición en que se coloca el tubo Pitot. En caso de existir curvatura en las líneas de corriente el ángulo de incidencia de éstas sobre el tubo Pitot no será 0°, en el orificio central, por lo que no se cumplirán los principios indicados anteriormente sino que el orificio lateral ya no recibirá únicamente la energía estática o carga de presión y el orificio frontal recibirá una proyección, sobre el eje en que se coloca, de la energía total que lleva la línea de corriente que incide en dicho orificio.

Como consecuencia de que el fenómeno de estudio, captación por reja de fondo, posee una importante curvatura de las líneas de corriente, únicamente mediremos la presión transmitida al orificio frontal del tubo Pitot sin considerar la transmitida al orificio lateral y trataremos de determinar mediante dos

inclinaciones distintas en el mismo punto, a distinta inclinación, obtener la dirección principal de la línea de corriente y los valores de velocidad y presión en dicho punto.

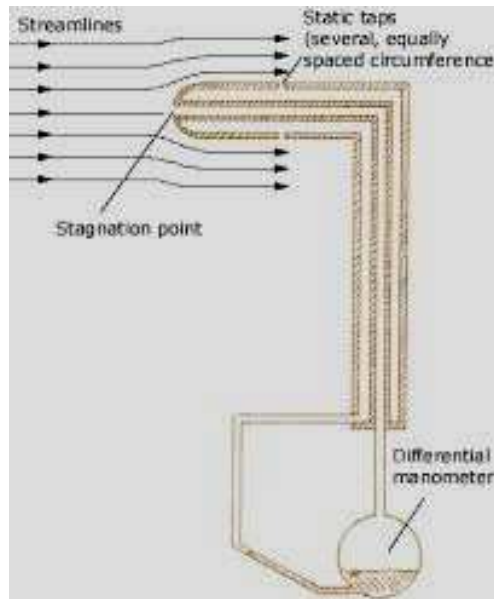
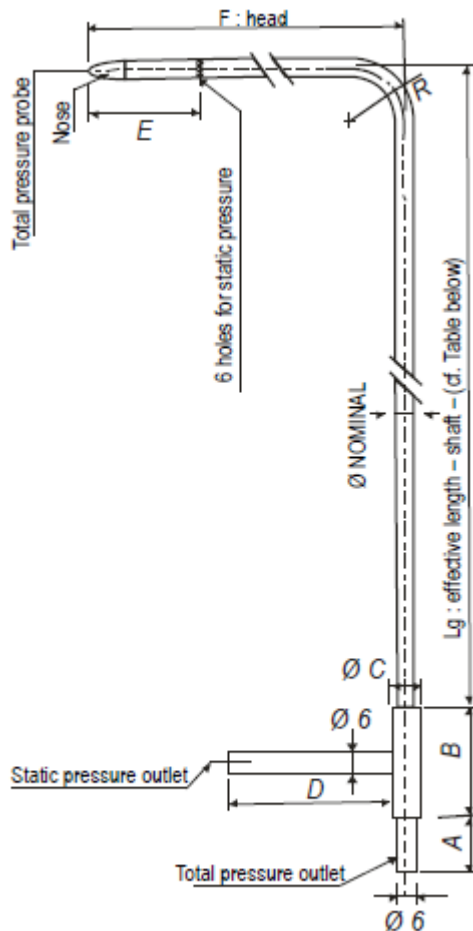


Figura nº 15. Detalle de tubo Pitot con sus dos orificios, frontal y laterales, y esquema de las líneas de corriente incidiendo a 0° respecto a la posición del orificio frontal



Diameter	Reference	Length
Ø 3 mm	TPL-03-100	100 mm
	TPL-03-200	200 mm
	TPL-03-300	300 mm
Ø 6 mm	TPL-06-300	300mm
	TPL-06-500	500 mm
	TPL-06-800	800 mm
Ø 8 mm	TPL-08-1000	1000 mm
	TPL-08-1250	1250 mm
Ø 12 mm	TPL-12-1500	1500 mm
	TPL-12-2000	2000 mm
Ø 14 mm	TPL-14-2500	2500 mm
	TPL-14-3000	3000 mm

	A	B	ØC	D	E	F	R
Pitot tube Ø 3 mm	17	32	10	30	25	48	9
Pitot tube Ø 6 mm	25	40	10	45	48	96	18
Pitot tube Ø 8 mm	25	40	10	45	64	128	24
Pitot tube Ø 12 mm	25	50	16	60	96	192	36
Pitot tube Ø 14 mm	25	50	16	60	112	224	42

Pitot tube Type L

Figura nº 16. Detalle de dimensiones de tubo Pitot

Para la toma de datos del tubo Pitot se dispone de dos posibilidades:

- 1) mediante transmisor de presión *Rosemount 2051*, de rango de medida de presión diferencial de -62,2 a 62,2 mbar y de precisión del 0,065% del fondo de escala. (es decir 0,5 mm de precisión), cuyos valores se almacenan en registrador/data logger de 1 HZ de frecuencia de registro de señales analógicas de 4/20 mA (figura nº 17);
- 2) columnas de cristal verticales con reglas de medida de altura de lámina de agua (figura nº 18).

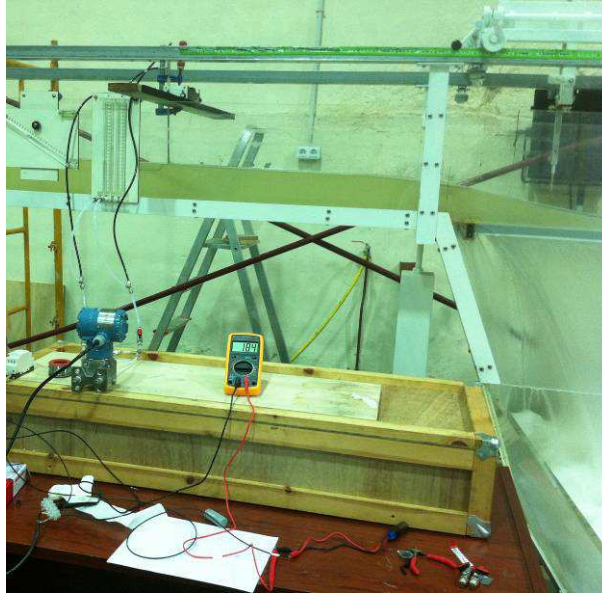


Figura nº 17. Detalle de montaje de equipamiento para recogida de presiones mediante transmisor de presiones Rosemount 2051CF

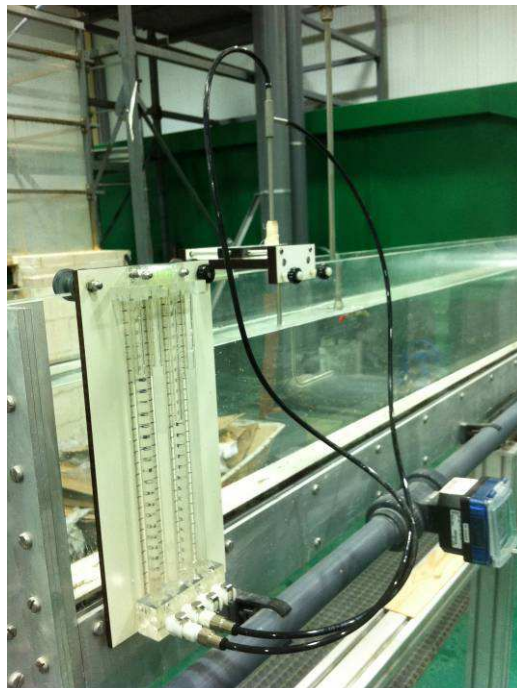


Figura nº 18. Vista de las columnas de cristal para medición de energía potencial transmitida por el tubo Pitot

Además, al disponer de dos tubos Pitot, se adoptarán dos configuraciones de medida:

1) o bien un único tubo conectado al registrador y a la atmósfera por lo que la medición de presión diferencial será la proyección sobre el eje del Pitot de la energía total, posicionándolo sobre el mismo punto en intervalos temporales distintos para las inclinaciones de 0 y 22°, obteniéndose dos series de valores de 350 datos cada una tomadas para intervalos temporal de 1 s, denominadas *Cte_Pitot_0°* y *Cte_Pitot_22°*.

2) Se dispondrá de los dos tubos Pitot de forma simultánea adoptando la inclinación de 0 y 22° sobre la horizontal respectivamente conectados a dos columnas de cristal independientes y sobre la misma sección transversal, eso si sobre huecos contiguos, suponiendo que el flujo es bidimensional y que se producirán las mismas presiones en ambos puntos (figura nº 19). Para este caso se tomará un único valor visual a partir de la observación de las columnas de cristal con regla para medir.



Figura nº 19. Vista lateral del canal sobre la reja con los tubos Pitot colocados en el mismo punto pero en huecos de la reja contiguos

5. ESQUEMA DE CÁLCULO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DIRECCIÓN DE LAS LÍNEAS DE CORRIENTE

Para el caso de flujo curvilíneo, en el que nos encontramos en la zona de la reja de captación de fondo nos interesa calcular la dirección de las líneas de corriente y las componentes de los vectores velocidad que las recorren.

Así, a partir de los valores medidos colocando el tubo Pitot en una misma posición y con las inclinaciones de 0° y 22° , se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones (ec. 10-15), de cuya resolución se concluye con la determinación de la dirección de las l.d.c., la magnitud del vector velocidad y la variación de la presión respecto a la hidrostática, término $\pm \Delta p/\gamma$.

A continuación se muestra en la figura nº 20 el esquema de flujo sobre la reja en cuyo interior se coloca el tubo Pitot:

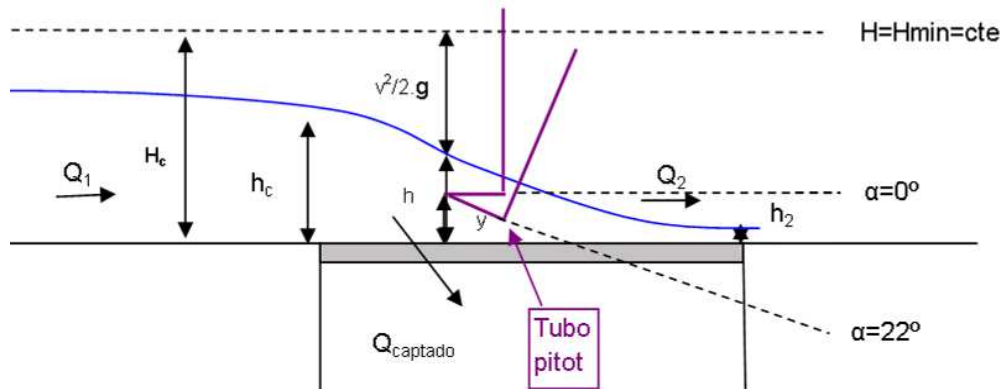


Figura 20. Esquema de flujo sobre reja y detalle de posición de tubo Pitot

Como se observa en dicha figura anterior se considerará que la energía total se mantiene constante a lo largo de toda la reja e igual a la energía mínima. Además se comprueba que la velocidad máxima en cada punto interior del flujo cumplirá las siguientes relaciones trigonométricas con respecto a las componentes de velocidad respecto a unos ejes horizontales y unos ejes inclinados 22° , como se observa en la figura 21:

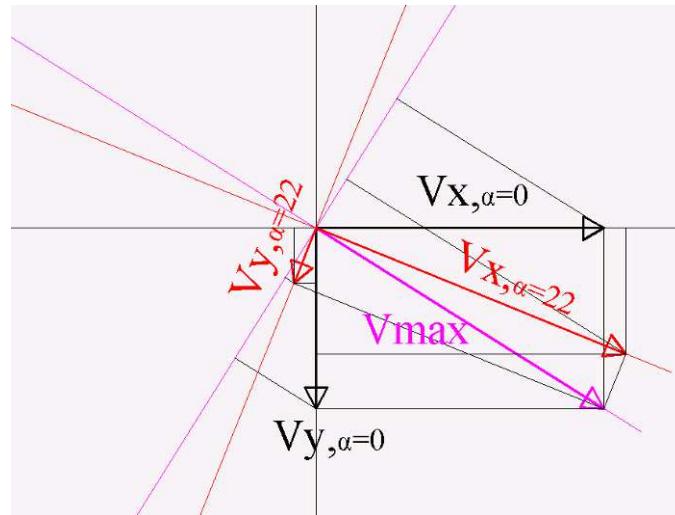


Figura 21. Dirección y magnitud del campo de velocidades en un punto del flujo respecto a los ejes sin inclinación, con inclinación a 22° y respecto al eje de velocidad máxima

De la figura 21 anterior se obtienen las siguientes relaciones trigonométricas:

$$\left| V_{x,\alpha=22} \cdot \cos(22) - V_{x,\alpha=0} \right| = V_{y,\alpha=22} \cdot \text{sen}(22) \quad (\text{ec. 10})$$

$$V_{\max}^2 = V_{x,\alpha=22}^2 + V_{y,\alpha=22}^2 \quad (\text{ec. 11})$$

A partir de la ecuación de Bernoulli, y sabiendo que la energía se mantiene constante e igual a la energía mínima se obtienen, mediante los valores medidos con el Pitot (presiones totales en cada punto y para cada inclinación) las siguientes ecuaciones respecto a la figura 20:

$$\text{Cte.}_{\text{medida Pitot } \alpha=0} = (h - y) + \frac{\Delta p}{\rho \cdot g} + \frac{V_{x,\alpha=0}^2}{2 \cdot g} + y \quad (\text{ec. 12})$$

$$\text{Cte.}_{\text{medida Pitot } \alpha=22} = (h - y) + \frac{\Delta p}{\rho \cdot g} + \frac{V_{x,\alpha=22}^2}{2 \cdot g} + y \quad (\text{ec. 13})$$

$$H_{\min} = \frac{3}{2} \cdot \left(q / \sqrt{g} \right)^{2/3} = (h - y) + \frac{\Delta p}{\rho \cdot g} + \frac{V_{x,\max}^2}{2 \cdot g} + y \quad (\text{ec. 14})$$

Así, dichas ecuaciones suponen un sistema en el que las incógnitas son: Δp = término de presión que supone la variación de la presión respecto a la hidrostática como consecuencia de la curvatura del flujo (que como se vió en los cálculos de Mostkow deberá ser negativo, figura 6). Los términos $V_{x,\alpha=0}$, $V_{x,\alpha=22}$, $V_{y,\alpha=22}$, V_{\max} son las componentes de la velocidad para los diferentes sistemas de referencia. Y los valores de presión total medidos mediante el orificio frontal del tubo Pitot son: $\text{Cte.}_{\text{medida } \alpha=0}$, $\text{Cte.}_{\text{medida } \alpha=22}$. Además, como ya hemos comentado conocemos el calado en cada sección, h , ya que fue

medido mediante limnómetro. En este proyecto trabajaremos con pendiente longitudinal de la reja nula por lo que el valor de $y=h$, según se vio en la figura nº 3.

Simplificando en las ecuaciones anteriores se obtiene, a partir de despejar los valores de velocidad en las ecuaciones 12, 13 y 14 e introducirlos en 10 y 11

$$\left| \sqrt{2.g.(Cte_{\alpha=22} - (h - y) - \Delta p / \rho.g - y)}. \cos(22) - \sqrt{2.g.(Cte_{\alpha=0} - (h - y) - \Delta p / \rho.g - y)} \right| = \left(\sqrt{\left(\left(\frac{3}{2} \cdot (q / \sqrt{g})^2 \right)^{2/3} \right) - (h - y) - \Delta p / \rho.g - y} \right) \cdot 2.g - (Cte_{\alpha=22} - (h - y) - \Delta p / 2.g - y) \cdot 2.g \cdot \text{sen}(22) \quad (\text{ec. 15})$$

Esta ecuación 15, implícita, se resuelve mediante mínimos cuadrados obteniéndose así los valores de Δp , V_{max} y el ángulo que la velocidad máxima forma con la horizontal, β .

6.CAMPAÑA DE MEDICIONES CON TUBO PITOT REALIZADAS

Se adjuntan en Anexo, al final del proyecto, las campañas de mediciones de presiones con tubos Pitot llevadas a cabo para los caudales específicos de 77.0, 114.6 y 155.4 l/s.m. Además antes de dar inicio a dicha campaña de mediciones se comprobó la fiabilidad de las mediciones de los tubos Pitot comparándolas con las de un medidor de velocidad tipo Doppler en una zona de flujo con distribución horizontal y paralela al fondo del canal y al eje del Pitot en L.

Para la comprobación de los valores calculados a partir de los valores medidos mediante los tubos Pitot, para el caso de flujo curvo, se han llevado a cabo algunas mediciones mediante sistema de medición de velocidades tipo Doppler disponible en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Politécnica de Cartagena.

Se presentan a continuación los valores registrados, mediante el medidor de presión diferencial y su data logger asociado (350 valores en cada unto), por los Pitots a 0 y 22° para el caudal de 77.0 l/s.m la pendiente horizontal y el índice de huecos 0.28 para los que se realizan las comprobaciones con los valores medidos con el medidor Doppler.

Tala nº1. Valores promedio de los 350 valores registrados en cada punto mediante registrador de presiones diferencial para $q= 77 \text{ l/s.m}$ y $m=0.28$

Perfil	Punto	Altura medición (cm)	Calado total (cm)	Sección 77,0 H,i0-0- PITOT HORIZONTAL		Sección 77,0 H,i0-22- PITOT INCLINADO	
				Pitot (mA)	Pitot (mm)	Pitot (mA)	Pitot (mm)
-10	2	3.5	8.07	14.5	125.951613	13.07	118.263441
-10	3	4.9	8.07	14.73	127.188172	13.4	120.037634

Calculo de curvatura de líneas de corriente en flujo en lámina libre sobre reja de captación de fondo

Perfil	Punto	Altura medición (cm)	Calado total (cm)	Sección 77,0 H,i0-0- PITOT HORIZONTAL		Sección 77,0 H,i0-22- PITOT INCLINADO	
				Pitot (mA)	Pitot (mm)	Pitot (mA)	Pitot (mm)
-10	4	6.2	8.07	14.79	127.510753	13.68	121.543011
-10	5	7.5	8.07	14.89	128.048387	13.78	122.080645
-5	1	2.6	7.54	14.17	124.177419	12.85	117.080645
-5	2	3.7	7.54	14.62	126.596774	13.49	120.521505
-5	3	4.8	7.54	14.77	127.403226	13.75	121.919355
-5	4	5.9	7.54	14.73	127.188172	13.93	122.887097
-5	5	7	7.54	14.9	128.102151	14.02	123.370968
0	1	0.5	6.87	12.47	115.037634	11.82	111.543011
0	2	1.6	6.87	13.81	122.241935	13.2	118.962366
0	3	2.7	6.87	14.22	124.446237	13.38	119.930108
0	4	3.8	6.87	14.42	125.521505	13.72	121.758065
0	5	4.9	6.87	14.47	125.790323	13.89	122.672043
5	0	0	5.87	4.85	74.0698925	13.84	122.403226
5	1	1	5.87	13.24	119.177419	14.14	124.016129
5	2	2	5.87	14.02	123.370968	14.09	123.747312
5	3	3	5.87	14.1	123.801075	14.31	124.930108
5	4	4	5.87	14.17	124.177419	14.44	125.629032
5	5	5	5.87	14.36	125.198925	14.6	126.489247
10	0	0	4.51	5.82	79.2849462	14.27	124.715054
10	1	0.8	4.51	13.17	118.801075	14.31	124.930108
10	2	1.6	4.51	13.85	122.456989	14.27	124.715054
10	3	2.4	4.51	14.26	124.66129	14.25	124.607527
10	4	3.2	4.51	14.24	124.553763	14.34	125.091398
10	5	4	4.51	14.45	125.682796	14.44	125.629032
15	0	0	3.44	7.88	90.3602151	14.52	126.05914
15	1	0.6	3.44	13.3	119.5	14.57	126.327957
15	2	1.2	3.44	14.13	123.962366	14.2	124.33871
15	3	1.8	3.44	14.35	125.145161	14.09	123.747312
15	4	2.4	3.44	14.5	125.951613	13.95	122.994624
15	5	3	3.44	14.61	126.543011	14.06	123.586022
20	1	0	2.58	9.75	100.413978	14.65	126.758065
20	2	0.5	2.58	13.5	120.575269	14.49	125.897849
20	3	1	2.58	14.39	125.360215	14.04	123.478495
20	4	1.5	2.58	14.61	126.543011	13.83	122.349462
20	5	2	2.58	14.85	127.833333	13.7	121.650538
25	0	0	1.9	11.18	108.102151	14.56	126.274194
25	1	0.6	1.9	14.09	123.747312	14.21	124.392473
25	2	1.2	1.9	14.7	127.026882	13.49	120.521505

7.-RESULTADOS OBTENIDOS.

Se presentan a continuación los resultados obtenidos en tres de los puntos medidos y presentados en la tabla nº 1 anterior, y de los que además, se dispone del valor de velocidad medido mediante instrumentación Doppler.

A) Caso de caudal 77.0 l/s.m posición horizontal y $m=0.28$ midiendo en la sección +10 cm una vez iniciada la reja a la profundidad de 1.6 cm sobre la superficie de la reja:

Se comparan los resultados calculados a partir de medidor de velocidad Doppler con los obtenidos mediante la resolución de la ecuación 15 un vez se tiene el registro de las presiones colocando el tubo Pitot a 0 y 22°.

Tabla nº 2. Valores obtenidos con medidor de velocidad Doppler

Caudal	m	Hmin	Perfil	Punto	Calado	Vx	Vy	V	$v^2/2.g$	$\Delta P/\gamma$
77.00	0.28	0.126822	10.00	1.6	4.75	123.81	-22.12	125.77	0.08062	-0.0013

A continuación se muestran los valores calculados mediante uso de doble Pitot:

Tabla nº 3. Resultado de resolver la ec. 15 a partir del registro de los valores de presión con el Pitot a 0 y 22°

Sección	Calado	Dist. Fondo	Cte pitot 0°	Cte pitot 22°	$\Delta P/\gamma$ (m)	V (m/s)	β (ángulo con horizontal)
10	4.51	1.6	122.46	124.72	-0.004	1.30	12.99

La solución obtenida con el Pitot se aproxima a la obtenida con el medidor Doppler. En cualquier caso se van a aproximar la solución modificando los valores de calado, Cte a 0° y a 22° para obtener una mejor aproximación.

Tabla nº 4. Ajuste valores de presión medida por Pitot a valores medidos con Doppler

Iteración (n°)	Sección (pos. en cm)	Calado (cm)	Dist. Fondo (cm)	Cte pitot 0° (mm)	Cte pitot 22° (mm)	$\Delta P/\gamma$ (m)	V (m/s)
1	10	4.61	1.60	122.95	124.65	-0.001	126

A continuación se presenta la gráfica de la serie de datos de la que se ha obtenido el valor de Cte Pitot 22°, valor que se ha calculado como el valor medio de una serie de datos registrados, como se puede ver en la gráfica siguiente:

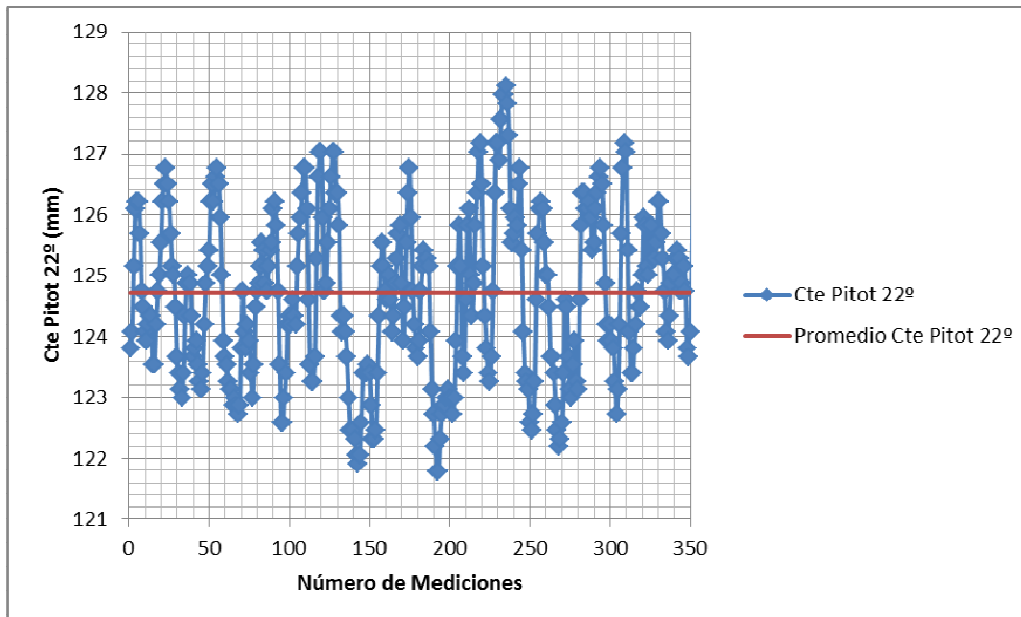


Figura 22. Representación gráfica de los 350 valores registrados para el pitot inclinado a 22°

B) Caso de caudal 77,0 l/s.m posición horizontal y $m=0,28$ midiendo en la sección -5 cm antes del inicio de la reja a la profundidad de 3,7 cm sobre la superficie de la reja:

Se comparan los resultados calculados a partir de medidor de velocidad Doppler con los obtenidos mediante la resolución de la ecuación 15 un vez se tiene el registro de las presiones colocando el tubo Pitot a 0 y 22°.

Tabla nº 5. Valores obtenidos con medidor de velocidad Doppler

Caudal	m	Hmin	Perfil	Punto	Calado	Vx	Vy	V (cm/s)	$v^2/2.g$	$\Delta P/\gamma$
77.00	0.28	0.126822	-5.00	3.7	7.72	105.63	-6.93	105.86	0.05711	-0.0075

A continuación se muestran los valores calculados mediante uso de doble Pitot:

Tabla nº 6. Resultado de resolver la ec. 15 a partir del registro de los valores de presión con el Pitot a 0 y 22°

Sección	Calado	Dist. Fondo	Cte pitot 0°	Cte pitot 22°	$\Delta P/\gamma$ (m)	V (m/s)	β (ángulo con horizontal)
-5	7.54	3.65	126.6	120.52	-0.013	1.13	3.37

La solución obtenida con el Pitot se aproxima a la obtenida con el medidor Doppler. En cualquier caso se van a aproximar la solución modificando los valores de calado, Cte a 0° y a 22° para obtener una mejor aproximación.

Tabla nº 7. Ajuste valores de presión medida por Pitot a valores medidos con Doppler

Iteración (nº)	Sección (pos. en cm)	Calado (cm)	Dist. Fondo (cm)	Cte pitot 0º (mm)	Cte pitot 22º (mm)	$\Delta P/\gamma$ (m)	V (m/s)
6	-5	7.54	3.65	126.7	120.5	-0.006	1.06

A continuación se presenta la gráfica de la serie de datos de la que se ha obtenido el valor de Cte Pitot 22º, valor que se ha calculado como el valor medio de una serie de datos registrados, como se puede ver en la gráfica siguiente:

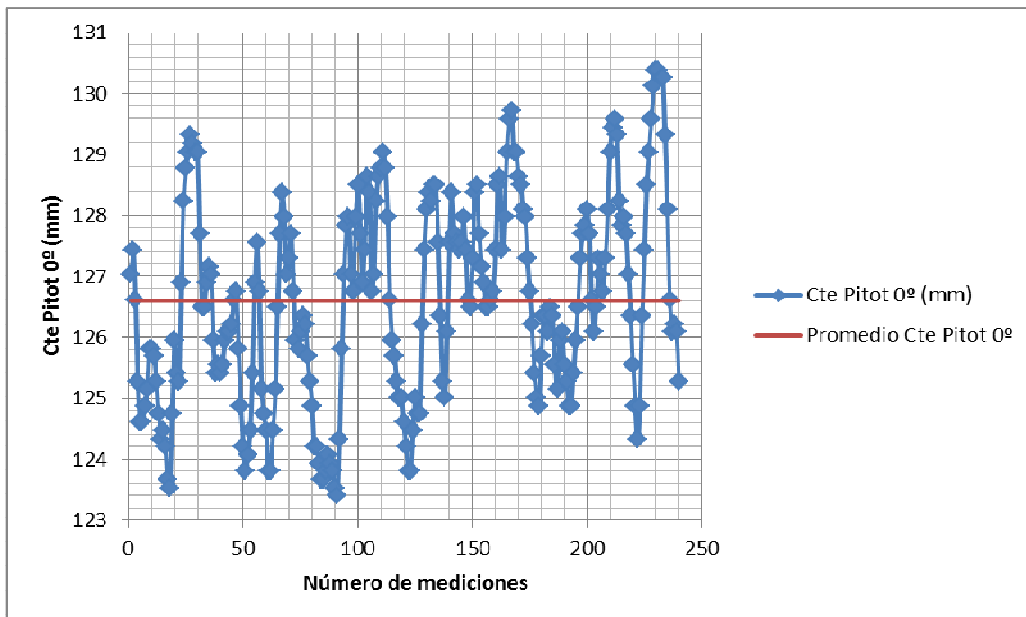


Figura 22. Representación gráfica de los 350 valores registrados para el pitot inclinado a 22º para el punto del caso B)

C) Caso de caudal 77,0 l/s.m posición horizontal y $m=0,28$ midiendo en la sección 5 cm antes del inicio de la reja a la profundidad de 3,0 cm sobre la superficie de la reja:

Se comparan los resultados calculados a partir de medidor de velocidad Doppler con los obtenidos mediante la resolución de la ecuación 15 un vez se tiene el registro de las presiones colocando el tubo Pitot a 0 y 22º.

Tabla nº 8. Valores obtenidos con medidor de velocidad Doppler

Caudal	m	Hmin	Perfil	Punto	Calado	Vx	Vy	V (cm/s)	$v^2/2.g$	$\Delta P/\gamma$
77.00	0.28	0.126822	5.00	3	5.87	116.56	-23.77	118.96	0.07213	-0.0040

A continuación se muestran los valores calculados mediante uso de doble Pitot:

Tabla nº 9. Resultado de resolver la ec. 15 a partir del registro de los valores de presión con el Pitot a 0 y 22°

Sección	Calado	Dist. Fondo	Cte pitot 0°	Cte pitot 22°	$\Delta P/\gamma$ (m)	V (m/s)	β (ángulo con horizontal)
5	5.87	3.0	123.8	124.93	+0.0017	1.14	12.32

La resolución de la ecuación implícita resulta en un valor de $\Delta p/\gamma$ positivo cuando debe dar negativo. En cualquier caso se van a aproximar la solución modificando los valores de calado, Cte a 0° y a 22° para obtener una mejor aproximación.

Tabla nº 10. Ajuste valores de presión medida por Pitot a valores medidos con Doppler

Iteración (nº)	Sección (pos. en cm)	Calado (cm)	Dist. Fondo (cm)	Cte pitot 0° (mm)	Cte pitot 22° (mm)	$\Delta P/\gamma$ (m)	V (m/s)
6	-5	5.87	3.0	123.5	124.93	-0.003	1.18

A continuación se presenta la gráfica de la serie de datos de la que se ha obtenido el valor de Cte Pitot 22°, valor que se ha calculado como el valor medio de una serie de datos registrados, como se puede ver en la gráfica siguiente:

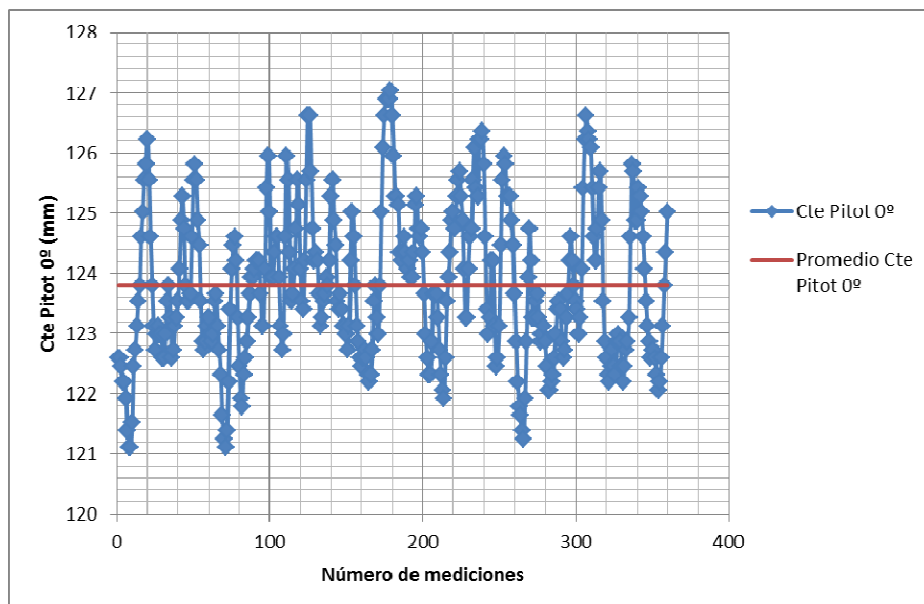


Figura 23. Representación gráfica de los 350 valores registrados para el pitot inclinado a 22° para el punto del caso C)

8. PLANIFICACIÓN.

Referente a la planificación del trabajo, se muestra a continuación la propuesta prevista inicialmente:

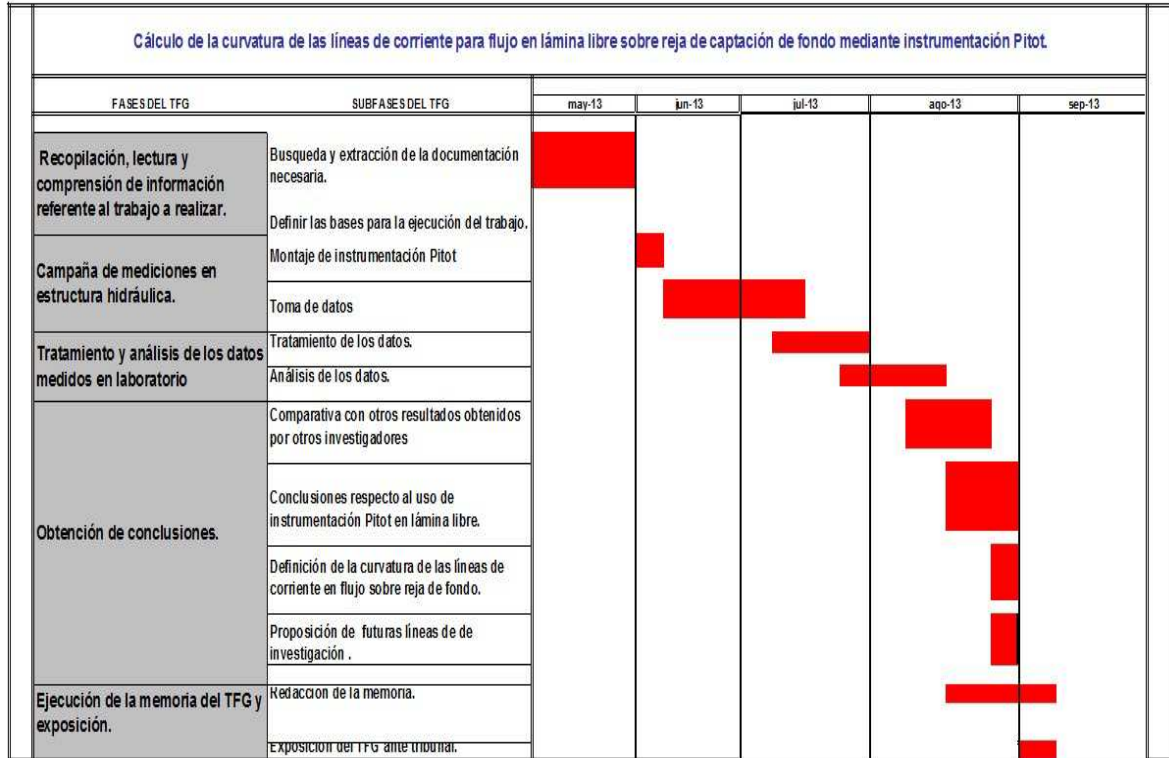


Figura 24. Planificación temporal inicial del Trabajo Fin de Grado.

La fase de recopilación, lectura y comprensión de información referente al trabajo a realizar y en concreto la subfase de extracción de la documentación necesaria, que dieron comienzo en mayo, se prolongo hasta el mes de junio también.

La toma de datos de la campaña de mediciones en estructura hidráulica mediante instrumentación pitot se ha dilatado en el tiempo hasta agosto, debido al aumento de las campañas previstas inicialmente.

Dado que la fase de tratamiento y análisis de los datos medidos en laboratorio va a continuación de la toma de estos, por lo que el grueso de esta fase comenzó en septiembre, aunque ya se habían hecho análisis previos solapados a la toma de datos, con el fin de adelantar para compensar el tiempo empleado en el incremento de campañas de mediciones.

Dentro de la fase de obtención de conclusiones, para la definición de la curvatura de las líneas de corriente en flujo sobre reja de fondo se plantea el esquema de cálculo y se disponen de los datos obtenidos pero por falta de tiempo no se realiza.

La comparativa de los resultados obtenidos por otros investigadores se sustituye por la comparativa con los resultados obtenidos por medidor de velocidad tipo Doppler.

Al igual que el resto de fases situadas cronológicamente posteriores a la campaña de mediciones, la ejecución de la memoria del TFG y su exposición se ven retrasadas a los meses de septiembre y octubre.

Referente a los recursos humanos comentar que se han realizado reuniones cada 15 días, en las que se han supervisado cada fase tras su finalización, se han tratado los temas de interés, se han resuelto consultas y se han propuesto mejoras en el laboratorio.

Referente a los recursos materiales:

-se comienza con los documentales en la primera fase para sentar los principios teóricos, documentarse y realizar un completo estado del arte.

-antes de comenzar la fase de mediciones se lanzan los pedidos de todos los suministros como las rejillas, instrumentación como tubos pitot, transductor de presión diferencial y limnómetros, polímetro, columnas de cristal, data logger, pequeños materiales y pequeñas herramientas de mano, que además se ven incrementados en el transcurso del trabajo por pequeños suministros para la mejora de los sistemas de medición como estructura metálica y planchas de poliestireno expandido para montaje de doble Pitot, uniones rápidas, conductos y abrazaderas de cara a obtener la precisión deseada en las mediciones.

Se muestran en el siguiente cronograma la planificación real de este trabajo:

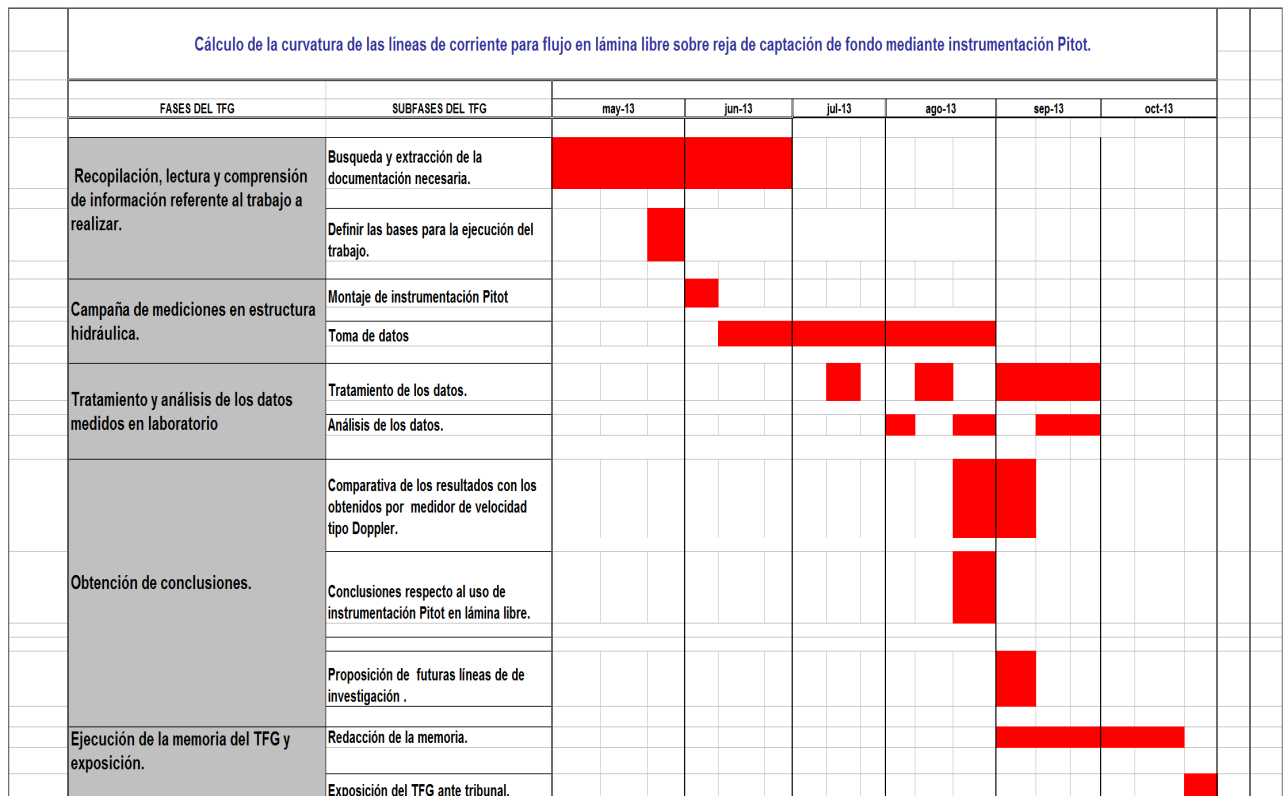


Figura 25. Planificación temporal real del Trabajo Fin de Grado.

9. CONCLUSIONES.

A la vista de los tres casos resueltos, y comparándolos con los medidos mediante la instrumentación Doppler, hasta el momento se puede concluir que utilizando el valor promedio para cada serie de 350 valores registrados se obtiene una buena aproximación entre ambas soluciones.

Dicho esto se aconseja resolver la ecuación implícita (ec. 15) para cada uno de los valores medidos con el pitot adoptando una doble inclinación en cada punto de medida y calcular así los valores de velocidad así como inclinación de su componente máxima.

Además, observando los resultados medidos utilizando los dos tubos Pitots de forma simultánea (Anexo I), se puede concluir que éstos presentan valores, registrados de manera visual, muy similares a los valores promedio de las series registradas.

En definitiva, y sin olvidar las observaciones hechas por administraciones como el United States Bureau of Reclamation (U.S.B.R.) acerca de la precaución a la hora de dar validez a los valores obtenidos con tubos Pitot para velocidades no superiores a 1,5 m/s se observa que los resultados obtenidos presentan coherencia y permiten el trazado de las líneas de corriente interiores al flujo sin la necesidad de llevar a acabo proceso de tratamiento alguno más que el uso del promedio de la serie registrada.

Se proponen metodologías alternativas para el cálculo de la velocidad y la dirección de esta en cada punto como el uso de PIV (Particle Image Velocimetry) instrumentación basada en la toma de un par de imágenes de la zona de estudio en un espacio muy corto de tiempo, de tal forma que mediante un software de análisis de pixeles, se pueda determinar la dirección y velocidad de una serie de partículas que recorren dichas imágenes.

10.BIBLIOGRAFÍA.

Mostkow, M. (1957). "Sur le calcul des grilles de prise d'eau _Theoretical study of bottom type water intake_" *Houille Blanche*, 4, 570–580.

Nasser, M. S., Venkataraman, P., and Ramamurthy, A. S. (1980). "Flow in channel with a slot in the bed." *J. Hydraul. Res.*, 18_4_, 359–367.

Noseda, G. (1956b). "Correnti permanenti con portata progressivamente decrescente, defluenti su griglie di fondo." *Energ. Elettr.*, 6, 565–581.

Righetti M, Lanzoni S., (2008). Experimental study of the flow field over bottom intake racks. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*;134(1):15_22.

Sotelo, G. (1997). "Hidráulica General. Volumen 1". Editorial Limusa S.A., México.

Sotelo, G. (2002). "Hidráulica de Canales". UNAM, Facultad de Ingeniería, México.

ANEXO I