



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Calibración del coeficiente de rugosidad del flujo en
un canal abierto mediante análisis experimental y
numérico

Numerical and experimental analysis for the
calibration of an open channel flow roughness
coefficient

Autor

Pablo Franco Cabello

Director/es

Pilar Brufau García

Pilar García Navarro

Resumen

Bajo las hipótesis del modelo 1D, el flujo de superficie libre de agua en un canal viene gobernado por un sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales basadas en la ecuación de conservación de la masa y la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento en la dirección del flujo. Estas ecuaciones se obtienen de promediar en la sección transversal al canal las ecuaciones de Navier-Stokes 3D. La fricción del flujo aparece en éste sistema de ecuaciones como una de las fuerzas en la ecuación de conservación de cantidad de movimiento y se modela habitualmente con la ley semi-empírica de Manning.

El objetivo principal de este proyecto consiste en la caracterización experimental y numérica del coeficiente de fricción del flujo de agua que circula por un canal con diferentes materiales recubriendo el mismo.

Primero, se ha realizado una campaña de medidas experimentales en el laboratorio, donde se generaron diferentes flujos en un canal variando el caudal, el material sobre el que fluye y los obstáculos que el flujo de agua debe sortear. Posteriormente se realizaron una serie de simulaciones que reproducen las diferentes situaciones medidas en el laboratorio. Para esto se ha utilizado un software de cálculo en la nube, desarrollado por el grupo de Hidráulica Computacional (<http://ghc.unizar.es>) del área de Mecánica de Fluidos (Universidad de Zaragoza) denominado *Canalflowmodel* (<http://www.canalflowmodel.net/beta>), accesible desde cualquier ordenador que disponga de conexión a Internet. Esta herramienta fue especialmente diseñada para la simulación del flujo en canales y con este trabajo se quiere realizar una calibración del coeficiente de rozamiento en ella para obtener mejores soluciones numéricas.

Índice

Lista de Figuras	v
Lista de Tablas	VIII
1. Introducción y objetivos	1
2. Descripción de las instalaciones y de la campaña de medidas	3
2.1. Descripción de la instalación	3
2.2. Medidas experimentales realizadas	4
2.3. Resultados de la medición y análisis	7
3. Obtención de la velocidad media a partir del perfil de velocidades medido	9
3.1. Velocidad media entre el 0.2 y el 0.8 de la altura de agua (Criterio 1) .	9
3.2. Ley potencial de distribución de velocidades por encima de la longitud de la rugosidad (Criterio 2)	10
4. Modelo de ecuaciones del flujo de superficie libre 1D	13
4.1. Ecuación de conservación de la masa	14
4.2. Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento	15
5. Estimación del coeficiente de rozamiento de Manning a partir de los datos experimentales	18
5.1. Determinación a partir de la ley de flujo uniforme	18
5.2. Determinación a partir del modelo de fricción de Darcy y la fórmula de Colebrook-White	20
6. Elaboración de datos de partida para realizar la simulación	22
6.1. Geometría del canal	22
6.2. Definición del coeficiente de rozamiento de Manning	22
6.3. Condición inicial	23
6.4. Condiciones de contorno	23
6.4.1. Condición de entrada	23
6.4.2. Condición de salida	23
6.5. Parámetros de simulación	24
6.6. Resultados de las simulaciones	25
6.6.1. Coeficientes de rozamiento de Manning utilizados en cada material	25

6.6.2.	Comparación de los coeficientes de rozamiento usados en la simulación frente a los calculados teóricamente	26
6.6.3.	Comparación de los coeficientes de rozamiento usados en la simulación con el parámetro adimensional Reynolds asociado . .	28
7.	Conclusiones	29
8.	Referencias	30
A.	Modelos de fricción	31
A.1.	Ley de Darcy	32
A.2.	Ley de Chézy	33
A.3.	Ley de Manning	34
B.	Software de cálculo: Canalfowmodel	36
B.1.	Fase I - Pre-proceso	37
B.1.1.	Geometría	37
B.1.2.	Condiciones iniciales	38
B.1.3.	Condiciones de contorno	38
B.1.4.	Parámetros de simulación	40
B.2.	Fase II - Cálculo	41
B.3.	Fase III - Post-proceso	42
C.	Sonda de medición de la velocidad del fluido	44
D.	Caracterización del rozamiento en otras configuraciones	46
D.1.	Geometría 2 : Canal Recto con obstáculos cúbicos	46
D.1.1.	Análisis de los datos medidos en el laboratorio	46
D.1.2.	Valores promedio de la velocidad según los perfiles medidos . . .	55
D.1.3.	Valores del coeficiente de rozamiento de Manning obtenidos según criterios teóricos	58
D.1.4.	Elaboración de datos de partida para realizar la simulación . . .	58
D.1.5.	Resultado de las simulaciones	60
D.2.	Geometría 3 : Canal Recto con obstáculo suave	63
D.2.1.	Análisis de los datos medidos en el laboratorio	63
D.2.2.	Valores promedio de la velocidad según los perfiles medidos . . .	68
D.2.3.	Valores del coeficiente de Manning obtenidos según criterios teóricos	70
D.2.4.	Elaboración de datos de partida para realizar la simulación . . .	70

D.2.5. Resultado de las simulaciones	71
E. Perfiles de velocidad	75

Lista de Figuras

1.	Instalación del laboratorio en la que se ha realizado la campaña de mediciones	3
2.	Vista en planta de las configuraciones geométricas elegidas para realizar los ensayos experimentales. (a) Geometría 1, (b) Geometría 2 y (c) Geometría 3	4
3.	Geometría del vertedero	5
4.	Secciones y puntos de medida de calado (izquierda) y velocidad (derecha) para cada una de las configuraciones geométricas.	6
5.	Ilustración del instrumento utilizado para medir los calados.	6
6.	Ejemplo de un perfil de velocidades con su función aproximada.	9
7.	Perfil de velocidades ajustado con la altura de rugosidad [1].	10
8.	División de la altura de agua en función del número de medidas de velocidad	11
9.	Esquema del flujo en el volumen de control	14
10.	Número de secciones y puntos introducidos en <i>CanalFlowmodel</i> para la simulación de la Geometría 1.	23
11.	Comparación del coeficiente de Manning en el caso del metacrilato (Geometría 1).	26
12.	Comparación del coeficiente de Manning en el caso del césped (Geometría 1).	27
13.	Comparación del coeficiente de Manning en el caso de la malla (Geometría 1).	27
14.	Comparación del coeficiente (f) de los 3 materiales con el número de Reynolds.	28
15.	Menú de entrada al simulador <i>Canalflowmodel</i>	36
16.	Menú de introducción de la geometría de las secciones del canal a simular en <i>Canalflowmodel</i>	37
17.	Opciones disponibles para definir el estado inicial en <i>Canalflowmodel</i>	38
18.	Opciones disponibles para definir el flujo a la entrada del canal a simular en <i>Canalflowmodel</i>	39
19.	Opciones disponibles para definir el flujo a la salida del canal a simular en <i>Canalflowmodel</i>	40
20.	Menú en el que se definen los parámetros de cálculo de <i>Canalflowmodel</i>	40

21.	Pantalla de visualización del cálculo en CanalFowmodel. Evolución temporal de : caudal aguas arriba y aguas abajo (gráfico superior), paso de tiempo(inferior izquierda)y error de masa(inferior derecha).	42
22.	Pantalla de visualización de resultados del perfil longitudinal del nivel superficial (izquierda) y caudal (derecha) en un instante de tiempo dado.	43
23.	Pantalla de visualización de resultados de la evolución temporal de las variables que intervienen en el cálculo(calado, caudal, velocidad,área,nivel,número de Froude) en un punto del dominio determinado.	43
24.	Vistas y funcionamiento de la sonda ADV utilizada para medir las componentes (x,y) de la velocidad del flujo [12].	45
25.	Secciones definidas en la Geometría 2	59
26.	Comparación del coeficiente de Manning en el caso del metacrilato (Geometría 2).	61
27.	Comparación del coeficiente de Manning en el caso del césped (Geometría 2).	61
28.	Comparación del coeficiente de Manning en el caso del malla (Geometría 2).	61
29.	Comparación del coeficiente (f) de los 3 materiales con el número de Reynolds.	62
30.	Secciones definidas en la Geometría 3.	71
31.	Comparación del coeficiente de Manning en el caso del metacrilato (Geometría 3).	73
32.	Comparación del coeficiente de Manning en el caso del césped (Geometría 3).	73
33.	Comparación del coeficiente de Manning en el caso del malla (Geometría 3).	73
34.	Comparación del coeficiente (f) de los 3 materiales con el número de Reynolds.	74
35.	Medidas del perfil de velocidades obtenido en la Geometría 1 con Q1. .	76
36.	Medidas del perfil de velocidades obtenido en la Geometría 1 con Q2. .	77
37.	Medidas del perfil de velocidad obtenido en la Geometría 1 con Q3. . .	78
38.	Medidas del perfil de velocidades obtenido en la Geometría 2 con Q1. .	79
39.	Medidas del perfil de velocidades obtenido en la Geometría 2 con Q2. .	80
40.	Medidas del perfil de velocidad obtenido en la Geometría 2 con Q3. . .	81
41.	Medidas del perfil de velocidades obtenido en la Geometría 3 con Q1. .	82
42.	Medidas del perfil de velocidades obtenido en la Geometría 3 con Q2. .	83

43.	Medidas del perfil de velocidad obtenido en la Geometría 2 con Q3. . .	84
-----	--	----

Lista de Tablas

1.	Velocidades (cm/s) y calados (cm) medidos en el caso de la Geometría 1 (Canal Recto)	8
2.	Velocidades medias (cm/s) obtenidas según los diferentes criterios de cálculo, comparadas con la velocidad de referencia (cm/s) para la Geometría 1.	12
3.	Número de Froude según el caudal y el material en el caso de la Geometría 1.	19
4.	Coefficientes de Manning ($s/m^{1/3}$) obtenidos teóricamente a partir de los datos medidos en la Geometría 1.	21
5.	Alturas en la salida del canal en función del caudal en el caso de la Geometría 1.	24
6.	Datos obtenidos como resultado en las simulaciones de altura y velocidad junto con los medidos en el canal.	25
7.	Características técnicas de la sonda.	44
8.	Velocidades (cm/s)y calados (cm) medidos en P1 en el caso de la Geometría 2.	48
9.	Velocidades (cm/s)y calados (cm) medidos en P2 en el caso de la Geometría 2.	49
10.	Velocidades (cm/s)y calados (cm) medidos en P3 en el caso de la Geometría 2.	50
11.	Velocidades (cm/s)y calados (cm) medidos en P4 en el caso de la Geometría 2.	51
12.	Velocidades (cm/s)y calados (cm) medidos en P5 en el caso de la Geometría 2.	52
13.	Velocidades (cm/s)y calados (cm) medidos en P6 en el caso de la Geometría 2.	53
14.	Velocidades (cm/s)y calados (cm) medidos en P7 en el caso de la Geometría 2.	54
15.	Velocidades medias (cm/s) obtenidas según los diferentes criterios de cálculo, comparadas con la velocidad de referencia (cm/s) en P1 para la Geometría 2.	55
16.	Velocidades medias (cm/s) obtenidas según los diferentes criterios de cálculo, comparadas con la velocidad de referencia (cm/s) en P2 para la Geometría 2.	55

17.	Velocidades medias (cm/s) obtenidas según los diferentes criterios de cálculo, comparadas con la velocidad de referencia (cm/s) en P3 para la Geometría 2.	56
18.	Velocidades medias (cm/s) obtenidas según los diferentes criterios de cálculo, comparadas con la velocidad de referencia (cm/s) en P4 para la Geometría 2.	56
19.	Velocidades medias (cm/s) obtenidas según los diferentes criterios de cálculo, comparadas con la velocidad de referencia (cm/s) en P5 para la Geometría 2.	56
20.	Velocidades medias (cm/s) obtenidas según los diferentes criterios de cálculo, comparadas con la velocidad de referencia (cm/s) en P6 para la Geometría 2.	57
21.	Velocidades medias (cm/s) obtenidas según los diferentes criterios de cálculo, comparadas con la velocidad de referencia (cm/s) en P7 para la Geometría 2.	57
22.	CoeFicientes de Manning obtenidos teóricamente a partir de los datos medidos en la Geometría 2.	58
23.	Datos obtenidos como resultado den las simulaciones de altura y velocidad junto con los medidos en el canal.	60
24.	Velocidades (cm/s) y calados (cm) medidos en P1 en el caso de la Geometría 3.	64
25.	Velocidades (cm/s) y calados (cm) medidos en P2 en el caso de la Geometría 3.	65
26.	Velocidades (cm/s) y calados (cm) medidos en P3 en el caso de la Geometría 3.	66
27.	Velocidades (cm/s) y calados (cm) medidos en P4 en el caso de la Geometría 3.	67
28.	Velocidades medias (cm/s) obtenidas según los diferentes criterios de cálculo, comparadas con la velocidad de referencia (cm/s) en P1 para la Geometría 3.	68
29.	Velocidades medias (cm/s) obtenidas según los diferentes criterios de cálculo, comparadas con la velocidad de referencia (cm/s) en P2 para la Geometría 3.	68
30.	Velocidades medias (cm/s) obtenidas según los diferentes criterios de cálculo, comparadas con la velocidad de referencia (cm/s) en P3 para la Geometría 3.	69

31.	Velocidades medias (cm/s) obtenidas según los diferentes criterios de cálculo, comparadas con la velocidad de referencia (cm/s) en P4 para la Geometría 3.	69
32.	Coeicientes de Manning obtenidos teóricamente a partir de los datos medidos en la Geometría 3.	70
33.	Datos obtenidos como resultado en las simulaciones de altura y velocidad junto con los medidos en el canal.	72

1. Introducción y objetivos

Cuantificar el rozamiento entre un flujo y el medio por el que discurre no es fácil, y es especialmente importante a la hora de definir las características propias del flujo.

A lo largo de la historia han existido numerosos autores [6] que han propuesto diferentes modelos que intentan cuantificar de una manera más o menos precisa como afecta la rugosidad del medio y su geometría a una corriente de líquido. Algunos de los más utilizados son el modelo de Darcy, Chézy o el de Manning, objeto de este estudio. Todos ellos hacen uso de coeficientes semi-empíricos que requieren de calibración.

A causa de la dificultad de caracterizar correctamente el valor del coeficiente que define cada modelo, este proyecto se centra en el estudio del coeficiente del modelo de rozamiento de Manning y a caracterizar correctamente su valor en función del material, el caudal y la geometría. El estudio se centra en este modelo debido a que es uno de los más utilizados en la modelización del flujo en canales y cuyo coeficiente está presente en la formulación de cálculo de un flujo. Para ello partiremos de unos datos medidos experimentalmente en un canal variando diferentes parámetros como son el caudal, la geometría y el material por el que fluye el agua. Una vez obtenidas las medidas de altura de agua y velocidad en diferentes puntos a lo largo y ancho del canal, se analizarán con el fin de caracterizar cada caso.

El coeficiente de rozamiento de Manning en un modelo 1D precisa para su cálculo de un valor promedio de la velocidad. Este valor promedio se calculará a partir de los perfiles de velocidad medidos utilizando dos criterios diferentes. El coeficiente de rozamiento también se obtendrá a partir de diferentes criterios teóricos que permiten obtener un valor a partir de la velocidad y el calado medido.

Los datos medidos servirán de referencia para un modelo 1D, con cuyas simplificaciones se trabajará en el resto del proyecto, para poder compararlos con las simulaciones que se realizarán posteriormente.

Por último, se reproducirán con la ayuda del simulador en la nube *CanalFlowModel*, que modela las corrientes en un canal según las hipótesis de un flujo en 1D las diferentes situaciones recreadas en el laboratorio. Una vez definida la geometría y el calado de cada caso, únicamente variaremos el coeficiente de rozamiento hasta reproducir las condiciones de calado y velocidad medidos en el canal.

Una vez obtenidos los coeficientes que ajustan la simulación a la realidad, se procederá a realizar una comparación entre estos y los obtenidos teóricamente. De esta forma, finalmente, se obtendrá una expresión que permita conocer el valor del coeficiente de rozamiento de Manning en función del caudal.

El objetivo principal del proyecto es comprobar si el valor del coeficiente de Manning que nos ofrece el modelo teórico, concuerda con el valor que se debe introducir en el simulador si se quiere reproducir correctamente un flujo real. Si no concuerdan, obtener una expresión en función del material y otros parámetros que permita caracterizar correctamente el coeficiente de rozamiento que se introduce en el simulador .

2. Descripción de las instalaciones y de la campaña de medidas

En esta sección se detalla tanto la instalación, como la metodología con la que se ha llevado a cabo la campaña de mediciones en el laboratorio del área de Mecánica de Fluidos. En lo que se refiere a la instalación se definirán los elementos propios del laboratorio como el canal, la bomba y el caudalímetro; y los materiales con los que se ha cubierto el canal, por último la instrumentación utilizada para medir la velocidad y altura del agua. En cuanto a los metodología, expondremos las diferentes configuraciones de obstáculos utilizadas, las secciones, puntos y alturas de fluido elegidas para realizar las mediciones, y la obtención y tratamiento de los datos previos a su análisis.

2.1. Descripción de la instalación

El área de Mecánica de Fluidos dispone de un canal, el cual tiene $6m$ de largo y una anchura de $24cm$. El canal dispone de regulación de la pendiente, en este proyecto se ha dejado sin pendiente alguna, es decir, completamente horizontal. La dirección paralela a la longitud del canal se define como x , dejando que el eje vertical sea el z y el restante el y , esto puede verse gráficamente reflejado en las Figura 1 que representa la instalación completa del canal con ciertos obstáculos y los ejes de coordenadas dependiendo de la vista del canal.

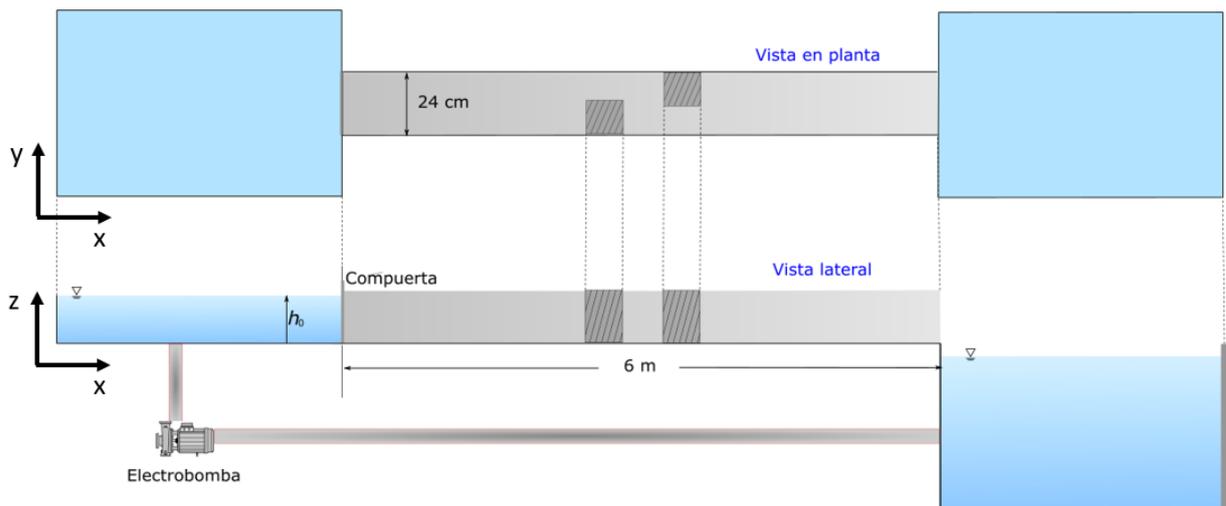


Figura 1: Instalación del laboratorio en la que se ha realizado la campaña de mediciones

El canal se alimenta a través de una electro bomba equipada con una válvula de regulación en la descarga, a través de la que se ajusta el caudal. Este caudal, constante

en el tiempo, también permanecerá uniforme en todo el canal, ya que se trata de un circuito cerrado sin aportes ni fugas. De esta forma, se consigue un flujo estacionario que puede ser uniforme o no uniforme. Para la correcta regulación del caudal, aparte de la válvula, se ha utilizado un caudalímetro digital con un rango de medida de 3 a 60 m^3/h y con un error asociado de $\pm 0,5\%$ [11]. Además se han usado algunos elementos singulares para cambiar el patrón de flujo, que son:

- Dos obstáculos laterales cúbicos de iguales dimensiones $8 \times 7 \times 16,3 \text{ mm}$ (ver Figura 2b),
- Un obstáculo lateral acoplado a una de las paredes del canal para forzar un estrechamiento suave en la sección transversal al flujo con una longitud de 30 cm y una anchura máxima de 10 cm (ver Figura 2c)
- Un vertedero de pared delgada de anchura 24 cm a la salida con una altura de cresta de $0,5 \text{ mm}$ (h_v). (ver Figura 3)

2.2. Medidas experimentales realizadas

Para realizar las mediciones se han cubierto tanto el fondo y las paredes del canal, como los obstáculos (fabricados en PVC) con los diferentes materiales con los que se trabaja, para no provocar una discontinuidad en el rozamiento. Se han usado tres materiales como recubrimiento:

- Material 1: El propio material del que está construido el canal (metacrilato, con una longitud de rugosidad $= \varepsilon = 0,02 \text{ mm}$ [6])
- Material 2: Césped artificial ($\varepsilon = 5 \text{ mm}$)
- Material 3: Rejilla o malla de fibra de vidrio ($\varepsilon = 0,5 \text{ mm}$)

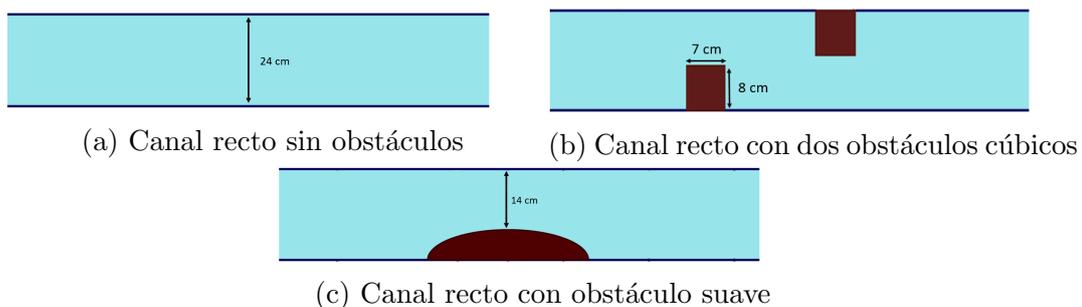


Figura 2: Vista en planta de las configuraciones geométricas elegidas para realizar los ensayos experimentales. (a) Geometría 1, (b) Geometría 2 y (c) Geometría 3

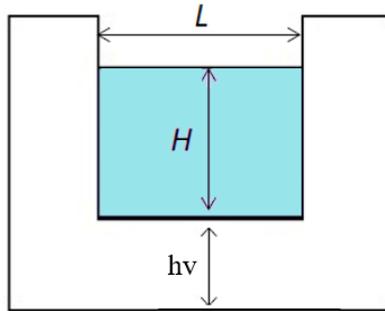


Figura 3: Geometría del vertedero

Los caudales estacionarios que circulan por el canal cuando se realizan las medidas son, $Q_1 = 5m^3/h$, $Q_2 = 10m^3/h$ y $Q_3 = 15m^3/h$

En todos los casos se han realizado medidas sobre el canal recto de sección rectangular (Geometría 1), sobre el canal recto con dos obstáculos bruscos cúbicos (Geometría 2) y sobre el canal recto con un obstáculo lateral suave (Geometría 3). Para cada geometría, con cada uno de los materiales, se han realizado medidas de calados y velocidad para cada uno de los valores de caudal anteriores. Según la geometría, los puntos en los que se toman las medidas cambian y se detallan a continuación en cada caso en la Figura 4 donde aparecen a que altura están las secciones donde se realizan las mediciones.

Para medir la altura de agua (calado), se ha utilizado un instrumento fabricado por nosotros (Ver Figura 5 mismos que consiste en un rectángulo de PVC cuyo lado más largo coincide con la anchura del canal (grosor de las paredes incluido), que tiene adherido papel milimetrado. Adjunta otra pieza más pequeña de PVC adosada a la primera en su lado más largo, formando un ángulo recto. Esta segunda pieza dispone de 5 agujeros que marcan los 5 puntos de la sección del canal donde se hacen las mediciones. Completa el instrumento de medida una aguja de metal cuya largura es exactamente la distancia entre el fondo del canal y el valor cero del papel milimetrado cuando el instrumento se coloca transversalmente sobre el canal. Para realizar la medición, se coloca el aparato sobre el canal y se introduce la aguja por uno de los agujeros, en ese momento el extremo inferior de la aguja estará tocando el fondo del canal y el superior estará en el punto cero del papel milimetrado. Manualmente, se sube la aguja hasta que el extremo inferior queda tocando la superficie del flujo, en ese momento el borde superior marcará en el papel milimetrado el valor exacto de la altura de agua sobre el fondo del canal (salvo un posible error de 1 milímetro).

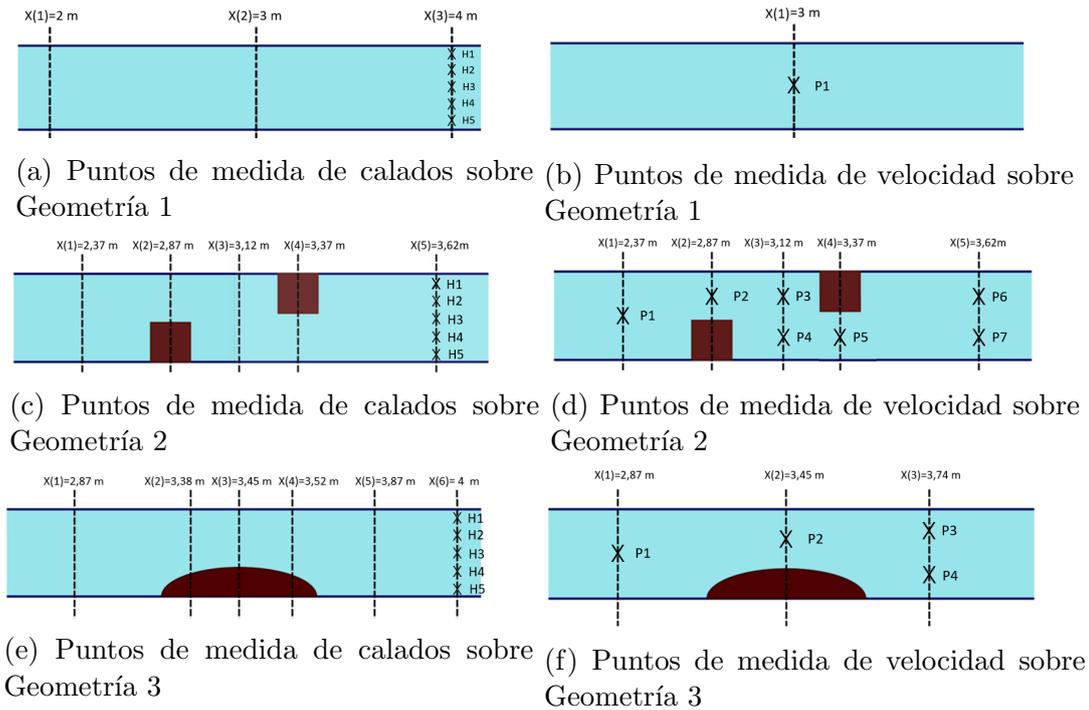


Figura 4: Secciones y puntos de medida de calado (izquierda) y velocidad (derecha) para cada una de las configuraciones geométricas.

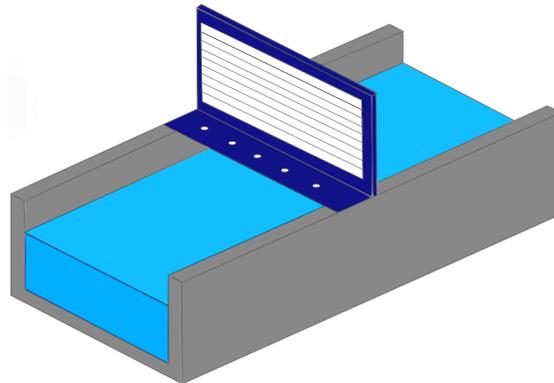


Figura 5: Ilustración del instrumento utilizado para medir los calados.

Para medir la velocidad se ha usado una sonda de la marca SONTEK [12]. Es una sonda de medición de velocidades en 2D que capta simultáneamente las componentes (x, y) del vector velocidad, especialmente diseñada para poder medir cerca de superficies verticales (paredes del canal). En este caso la sonda trabajaba a una frecuencia de medición de 10 Hz (10 datos por segundo), midiendo un minuto se obtienen 600 valores de velocidad por punto. Para más información e imágenes de la sonda consulte el Anexo C. Previo al análisis de los datos medidos se realizó un filtrado de datos anómalos lejanos a la media de todas las mediciones de un mismo punto.

2.3. Resultados de la medición y análisis

Incluimos en la memoria solamente los datos referentes al caso de la Geometría 1 (Canal recto sin obstáculos). Todas las demás mediciones cálculos, simulaciones y resultados para las demás Geometrías serán expuestas y analizadas en el anexo D.

La sonda ha tomado medidas de velocidad en tres posiciones diferentes en la vertical $z1 = 9mm$, $z2 = 17mm$ y $z3 = 25mm$ en los casos del Q1 o Q2. En el caso de que circule el Q3, la altura de la lámina de agua permitía poder tomar medidas de velocidad en $z4 = 37mm$ e incluso en algún caso en $z5 = 47mm$. Estos datos medidos aparecen en la Tabla (1), donde cada velocidad aparece con la altura a la que fue medida (en P2, coincidente con la sección X2 de medida de calado) y el calado las 3 secciones. Para ayudar al lector a visualizar los perfiles de velocidad medidos, en el Anexo E se adjuntan para este caso las Figuras 35,36 y 37 que representan de una forma gráfica estos perfiles de velocidad según el punto y el material con el que fueron medidos.

Metacrilato (Gris) Para los tres caudales, el metacrilato presenta el comportamiento esperado, situando las velocidades más bajas en la zona más cercana al suelo (zona de rozamiento más alta), y alcanzando valores más altos a medida que ascendemos en la vertical. En cuanto a los calados medidos, el rozamiento es tan bajo que no produce apenas variación de la altura de agua a lo largo del canal.

Césped (Verde) Éste es el material que presenta un comportamiento más dispar, presentando valores de velocidad irregulares en $(Q1, z1)$, y no tan acentuadas en $(Q2, z1)$. En el caso del Q1, la velocidad es prácticamente nula en calados bajos, provocando que domine la rugosidad (efectos de capa límite), muy cercanos a la zona de adherencia. Con caudales mayores se puede observar que este efecto deja de ser relevante. Por otro lado, se puede ver como en alturas cercanas a la superficie libre, el flujo presenta valores de velocidad más altos que en el resto de materiales, provocando que la velocidad media se acerque a la de los otros materiales a pesar de que en alturas bajas esta sea nula. Este comportamiento será característico en el césped a lo largo de toda la campaña de mediciones (semejante en los demás casos medidos). Por otro lado, en este caso se puede observar una mayor variación en el calado a lo largo del canal debido un mayor rozamiento.

Malla (Azul) De la misma manera que el metacrilato, la malla de fibra de vidrio, al no presentar una rugosidad muy acentuada, provoca el desarrollo de un perfil de velocidades, donde las velocidades más bajas se sitúan en la parte baja de la corriente,

y van subiendo a medida que nos acercamos a la altura de la superficie libre. En este caso se registra variación de calado entre las secciones de medida pero no tan acentuado como en el caso del césped, ya que la malla produce menos rozamiento.

Q	Material	z(cm)	Velocidad	h X1	h X2	h X3
Q1	Metacrilato	0.9	16.728	3.6	3.6	3.6
		1.7	19.359			
		2.5	19.751			
	Césped	0.9	-0.0101	3.9	3.7	3.7
		1.7	18.895			
		2.5	22.641			
	Malla	0.9	16.917	3.7	3.6	3.6
		1.7	19.441			
		2.5	21.540			
Q2	Metacrilato	0.9	27.211	4.6	4.6	4.6
		1.7	29.492			
		2.5	30.659			
	Césped	0.9	4.338	5.3	5	4.7
		1.7	28.917			
		2.5	35.649			
	Malla	0.9	25.726	5.0	4.8	4.7
		1.7	28.940			
		2.5	31.917			
Q3	Metacrilato	0.9	33.818	5.6	5.6	5.6
		1.7	36.100			
		2.5	37.424			
		3.7	38.022			
	Césped	0.9	30.466	6.4	6.2	5.9
		1.7	37.882			
		2.5	43.271			
		3.7	45.080			
		4.5	43.087			
	Malla	0.9	31.798	5.9	5.7	5.6
		1.7	36.230			
		2.5	40.577			

Tabla 1: Velocidades (cm/s) y calados (cm) medidos en el caso de la Geometría 1 (Canal Recto)

3. Obtención de la velocidad media a partir del perfil de velocidades medido

Existen numerosos criterios para obtener la velocidad media a partir de un perfil de velocidades. En este apartado se van a exponer los fundamentos de los criterios que se han utilizado para obtener el valor medio de la velocidad. El objetivo es la búsqueda de un valor de velocidad media en la sección (modelo 1D). Estos valores medios serán mejores cuanto más se acerquen a un valor teórico, obtenido a partir de la división del caudal entre el área mojada de cada sección (ambos datos obtenidos de la medición).

3.1. Velocidad media entre el 0.2 y el 0.8 de la altura de agua (Criterio 1)

Éste es uno de los criterios [5] más extendidos en la comunidad científica experimental del flujo en canales, debido a su sencillo desarrollo matemático y nula dificultad teórica. Se parte del perfil de velocidades medido en cada sección, donde a cada uno de los valores se le asigna el valor de la altura (con respecto del fondo del canal) en el que fueron medidos. Con ayuda de una hoja de cálculo, aproximamos el perfil de velocidades a lo largo de la vertical a una función de carácter potencial o logarítmico. En la Figura 6 puede verse un ejemplo del resultado de este proceso.

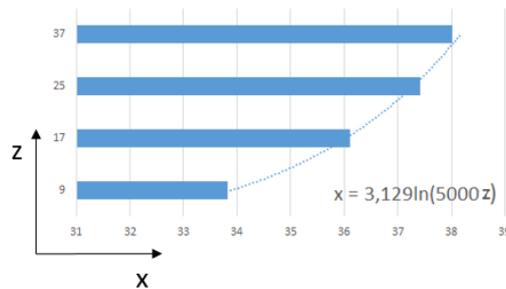


Figura 6: Ejemplo de un perfil de velocidades con su función aproximada.

Una vez obtenida la función para cada perfil de velocidades de cada material y caudal, se estima con ésta, la velocidad del agua en los valores de altura en $0,2h$ y $0,8h$ del calado medido en cada sección (h).

$$\bar{V} = \frac{1}{2}(V(z = 0,2h) + V(z = 0,8h)) \quad (1)$$

3.2. Ley potencial de distribución de velocidades por encima de la longitud de la rugosidad (Criterio 2)

Para poder aplicar este procedimiento, se puede asumir que un perfil de velocidades de un flujo del agua en un canal puede ajustarse a una función exponencial en la zona medio-alta del flujo [1], es decir, cuando acaba la altura de la rugosidad. En nuestro caso puede llegar a asumirse esto con cierta facilidad, visto en el apartado de análisis de los datos que en muchos perfiles de velocidad se dan casos razonablemente parecidos. Este perfil descrito puede verse gráficamente en la Figura 7:

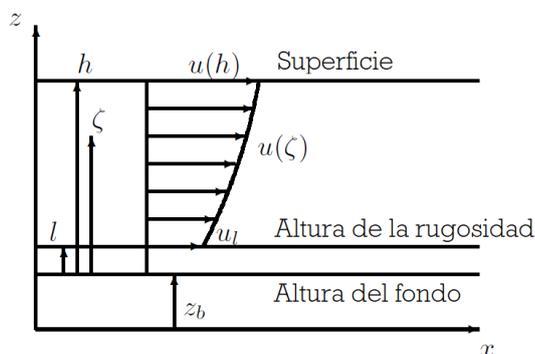


Figura 7: Perfil de velocidades ajustado con la altura de rugosidad [1].

Asumiendo que en este caso el perfil de velocidades se ajusta a este modelo, el valor aproximado de la velocidad media del fluido vendrá dado por la siguiente expresión donde la letra h será el calado medido en cada sección y ζ indica la coordenada vertical:

$$\bar{V} = \frac{1}{h} \int_0^h V d\zeta \quad (2)$$

Como las mediciones de la velocidad no se realizaron de forma continua a lo largo de la vertical, sino que se hicieron en unas alturas determinadas, se ha discretizado la expresión (2). Se sustituye la integral de la velocidad desde el fondo hasta la altura de la superficie libre, por un sumatorio del valor de la velocidad medida en cada altura multiplicada por un tramo de altura de agua (Δz) que se le asigna a esta velocidad según la altura a la que fue medida. De esta manera el valor aproximado de

la velocidad media en la sección será:

$$\bar{V} = \frac{1}{h} \sum_{n=1}^{nmax} V_n \Delta z_n \quad (3)$$

Donde V_n son los diferentes valores de velocidad medidos a lo largo de la vertical, Δz es el intervalo asignado a cada valor de velocidad medido y $nmax$ será el número total de intervalos.

Teniendo en cuenta los puntos en la vertical en los que se han tomado datos de velocidad: $9mm, 17mm$ y $25mm$ para Q1 y Q2, y adicionalmente en $37mm$ y $45mm$ para Q3, se va a dividir la altura de agua en intervalos, Δz de aproximadamente $10mm$ y asignaremos a cada intervalo la velocidad medida en él. De manera que, para Q1 y Q2 se definen tres intervalos, Δz_1 desde el fondo hasta los $11mm$ ($\Delta z = 11 - 0 = 11$), Δz_2 de 11 a $21mm$ ($\Delta z = 21 - 11 = 10$) y Δz_3 de $21mm$ hasta el calado. En el caso de Q3, el tercer intervalo Δz_3 se define de 21 a $31mm$ ($\Delta z = 31 - 21 = 10$) y se definen uno o dos más en función de el número de medidas (4 o 5); Δz_4 de 31 a $41mm$ ($\Delta z = 41 - 31 = 10$) o hasta el calado si hay 4 medidas, y Δz_5 de $41mm$ hasta calado. En el caso de Q1 y Q2 los intervalos aparecen representados en la Figura 8a y en la Figura 8b en el caso de Q3.

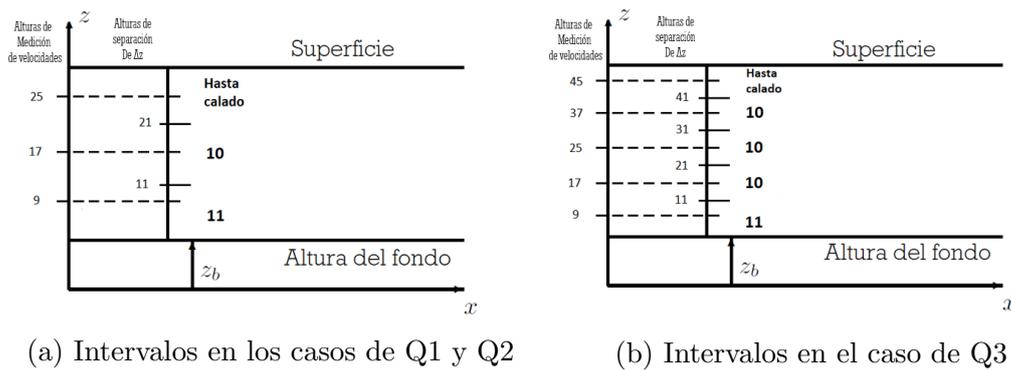


Figura 8: División de la altura de agua en función del número de medidas de velocidad

Los resultados se han ordenado en la Tabla (2) donde atendiendo al caudal que discurre y el material por el que fluye el agua, tenemos los 2 valores de velocidad medios obtenidos. La primera columna de valores numéricos hace referencia a la velocidad de referencia (o ideal), calculada a partir de la definición $Q = VA_h$, donde tanto el caudal (Q) como el área mojada (A_h) son datos propios de las mediciones.

Tanto en la Geometría 2 como en la Geometría 3 hay más de un punto donde se ha medido la velocidad, por tanto harán falta tantas tablas como puntos de medición haya.

Q	Material	Vel. referencia	Vel.criterio 1	Vel.criterio 2
Q1	Césped	15.641	12.985	13.873
	Malla	16.075	19.637	19.404
	Metacrilato	16.075	18.835	18.573
Q2	Césped	23.148	30.702	26.431
	Malla	24.113	31.571	29.744
	Metacrilato	25.161	30.460	29.482
Q3	Césped	28.002	40.681	40.121
	Malla	30.458	42.600	37.965
	Metacrilato	31.002	36.379	36.665

Tabla 2: Velocidades medias (cm/s) obtenidas según los diferentes criterios de cálculo, comparadas con la velocidad de referencia (cm/s) para la Geometría 1.

Las mayores diferencias de velocidad según el material se observan entre el metacrilato y la malla con el césped, ya que la rugosidad de este último, comparada con la de los otros dos, es mucho mayor propiciando así una mayor altura de calado para un mismo caudal provocando una bajada de la velocidad en comparación con los otros materiales. Con Ambos criterios el valor medio de velocidad obtenido está por encima del esperado en la mayor parte de los casos, pero la razón de por qué ambos criterios dan valores sobre-dimensionados no es la misma. El criterio 1 no ajusta de manera precisa la función de aproximación al perfil de velocidades. En cambio, el criterio 2 tiende a dar mayor influencia a los valores más altos de velocidad, propiciando la subida del valor medio.

Una vez analizados ambos criterios y los resultados que se obtienen, se puede observar que en la mayor parte de los casos, el criterio 2 se acerca más al valor esperado, siendo los resultados de éste los que se utilizarán en el resto del trabajo.

4. Modelo de ecuaciones del flujo de superficie libre 1D

La simplificación a un modelo 1D de las ecuaciones de flujo no estacionario de superficie libre conlleva una simplificación de fenómenos complejos donde solamente se incorporan las influencias más importantes. Ésta debe ser realizada cuidadosamente, siendo válida únicamente en aquellos flujos donde las líneas de corriente son prácticamente rectilíneas, dando lugar solamente a componentes de velocidad unidimensionales (aunque realmente esto no se encuentre en la naturaleza). Por lo tanto, para poder trabajar correctamente con estas ecuaciones que simplifican el comportamiento del fluido se debe definir a qué llamamos una situación unidimensional, que pueda ser adecuadamente simulada sin violar los conceptos básicos en los que se sustentan las ecuaciones. Para ello existen una serie de hipótesis conocidas como las de St. Venant [7] que son:

- La distribución de presiones es hidrostática, lo que es cierto si el flujo no presenta una curvatura pronunciada. La curvatura de las líneas de corriente es pequeña (o nula) haciendo las aceleraciones verticales prácticamente despreciables.
- La pendiente media del fondo del río o del canal (θ), es muy pequeña, de manera que el calado medido verticalmente posee aproximadamente el mismo valor que si se midiera en dirección normal al fondo.

$$\cos \theta \approx 1, \sin \theta \approx \tan \theta \approx \theta \quad (4)$$

Siendo θ el ángulo entre el fondo del canal con la horizontal, caracterizando así la pendiente media del fondo.

- La distribución de la velocidad es uniforme a lo largo de toda la sección transversal, estableciendo así una única componente de la velocidad en cuya dirección suponemos apoyado el eje x . De la misma manera se supone que la altura de calado no varía en la sección.
- Las pérdidas por fricción en flujo no estacionario pueden ser descritas usando formulas empíricas deducidas para flujo estacionario.
- El canal no tiene por qué ser prismático, las secciones en principio pueden ser cualesquiera y variar a lo largo del canal. Esto será posible siempre que podamos expresar el área de la misma en función de $A = A(h)$ creciente con h (siendo esto la altura de calado), sin violar la primera hipótesis.

4.1. Ecuación de conservación de la masa

Para obtener la ecuación diferencial de conservación de la masa se parte de la forma integral [4] de la misma, aplicada sobre un volumen de control en reposo de longitud dx (ver Figura 9)

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV_c + \oint_{S_c} \rho \mathbf{V} \hat{\mathbf{n}} dS = 0 \quad (5)$$

La expresión (5) hace referencia a la entrada y salida de masa en un volumen de control (V) a través de sus superficies (S_c) y la variación de masa dentro del mismo en un intervalo de tiempo. Esta variación puede formularse:

$$\frac{dMasa}{dt} \approx \frac{M_{final} - M_{inicial}}{\Delta t} = \dot{M}_{in} - \dot{M}_{out} \quad (6)$$

Donde \dot{M}_{in} y \dot{M}_{out} serán los flujos máxicos entrante y saliente respectivamente. La masa inicial del volumen se define $M_{inicial} = \rho A \Delta x$ y la masa final $M_{final} = \rho \left(A + \frac{\partial A}{\partial t} \Delta t \right) \Delta x$.

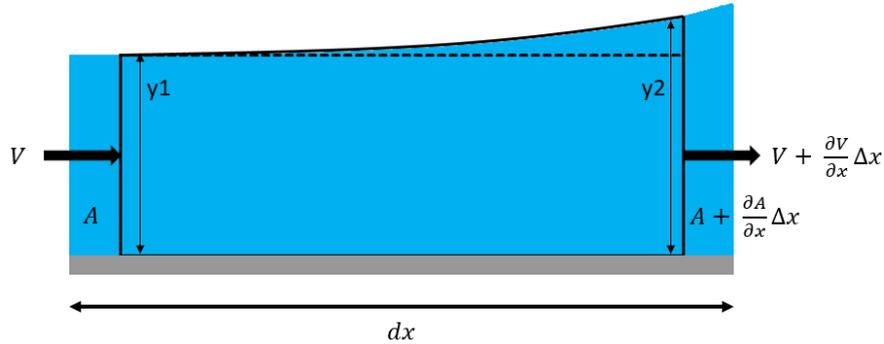


Figura 9: Esquema del flujo en el volumen de control

Los flujos máxicos en el instante t vienen definidos en función de la densidad (ρ), la sección transversal (A) y la velocidad media del fluido (V) (7).

$$\dot{M}_{in} = \rho AV \quad \dot{M}_{out} = \rho \left(A + \frac{\partial A}{\partial x} \Delta x \right) \left(V + \frac{\partial V}{\partial x} \Delta x \right) \quad (7)$$

Insertando las expresiones de la masa inicial y fina, y (7) en (6) se obtiene:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial(AV)}{\partial x} = 0 \quad \text{ó} \quad \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

Será en esta forma diferencial (8) como se implemente y resuelva la ecuación en el simulador de flujos 1D que se utiliza en este proyecto, donde Q será el caudal circulante.

4.2. Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento

La conservación de la cantidad de movimiento lineal a lo largo del eje x se plantea a partir de la segunda ley de Newton. Esta expresión en su forma integral [4] es:

$$\frac{d}{dt} \int_{V_c} \rho V dV_c + \oint_{S_c} \rho \mathbf{V} \mathbf{V} \hat{\mathbf{n}} dS = \sum \mathbf{F} \quad (9)$$

La expresión (9) hace referencia a la variación de la cantidad de movimiento lineal contenido en el volumen de control en el diferencial de tiempo y ha de ser igual a la suma de las fuerza exteriores que actúan en esa dirección más el flujo neto de cantidad de movimiento que entra en el volumen de control en ese mismo diferencial de tiempo. Siendo $\sum F$ el cómputo del total de fuerzas que afectan al volumen de control (ver Figura 9).

Si se evalúa esta expresión en la dirección x , se puede expresar la variación de cantidad de movimiento de una forma análoga a la presentada en el apartado de la ecuación de continuidad.

$$\frac{dC_{mov}}{dt} \approx \frac{C_{mov_{final}} - C_{mov_{inicial}}}{\Delta t} = C_{\dot{mov}_{in}} - C_{\dot{mov}_{out}} + F_x \quad (10)$$

La cantidad de movimiento presente al principio y al final del intervalo de tiempo vendrá definida por:

$$C_{mov_{inicial}} = \rho V^2 A \Delta x \quad C_{mov_{final}} = \rho \left(A + \frac{\partial A}{\partial t} \Delta t \right) \left(V + \frac{\partial V}{\partial t} \Delta t \right) \Delta x \quad (11)$$

De la misma manera los flujos de cantidad de movimiento se expresan:

$$C_{\dot{mov}_{in}} = \rho V A \Delta x \quad C_{\dot{mov}_{out}} = \rho V \left(A + \frac{\partial A}{\partial x} \Delta x \right) \left(V + \frac{\partial V}{\partial x} \Delta x \right) \quad (12)$$

Sólo se consideran tres tipos de fuerzas que afectan al volumen diferencial de agua. En primer lugar, el propio peso del fluido (provocando el movimiento en el eje positivo x):

$$F_{P_{eso}} = \rho g A dx S_o \quad \longrightarrow \quad S_o \approx \tan \theta \approx \sin \theta \approx \theta \quad (13)$$

En (13) S_o será la pendiente del fondo, se asume que, al tener un valor muy bajo se aproxima al ángulo formado entre la horizontal y el fondo del canal (θ), haciendo referencia a la componente del peso en la dirección x , y g la gravedad.

La fuerza de fricción (dirección opuesta al movimiento) se formula:

$$F_{Friccion} = \rho g A dx S_f \quad \longrightarrow \quad S_f = \frac{n^2 Q^2}{A^2 R_h^{4/3}} \quad (14)$$

En la fuerza de fricción, el término S_f es la pendiente de fricción, que representa la pendiente de la línea de energía mecánica (gradiente necesario para equilibrar la fuerza de la gravedad en el flujo estacionario) y que se evalúa a partir de la relación empírica de Manning. Esta relación es dependiente del caudal (Q), del área de la sección (A), del radio hidráulico (R_h) definido como el cociente del área mojada entre el perímetro mojado, y del coeficiente de rozamiento de Manning (n). Es así como el coeficiente objeto de este estudio afecta en el cálculo en diferentes aspectos de un flujo y se relaciona directamente con la pérdida de carga por unidad de longitud.

Y por último, las fuerzas F_1 y F_2 provocadas por las presiones hidrostáticas en sentidos opuestos, presentes a ambos lados del volumen. Estas fuerzas vienen definidas por las expresiones:

$$F_1 = \rho Ah \quad (15)$$

$$F_2 = \rho \left(A + \frac{\partial A}{\partial x} \Delta x \right) \left(h + \frac{\partial h}{\partial x} \Delta x \right) \approx \rho Ah + \rho A \frac{\partial h}{\partial x} \Delta x \quad (16)$$

Si se usan las expresiones (11) y (12), y se sustituyen las expresiones que definen cada fuerza en la expresión (10), nos queda:

$$\frac{\partial(AV)}{\partial t} + \frac{\partial(AV^2)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} = gA(S_o - S_f) \quad (17)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} = gA(S_o - S_f) \quad (18)$$

Así se obtiene la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento en su forma diferencial (17). Es fácil formularla en función caudal circulante (Q) en la ecuación (18).

5. Estimación del coeficiente de rozamiento de Manning a partir de los datos experimentales

Este apartado tiene como objetivo la estimación del coeficiente de rozamiento de Manning a partir de los datos experimentales medidos. Como se ha visto en el capítulo anterior, el coeficiente de Manning está presente en las ecuaciones fundamentales que definen las características de un flujo, donde tiene una fuerte influencia. Es por ello que para una correcta modelización del flujo es vital la correcta caracterización de este coeficiente.

5.1. Determinación a partir de la ley de flujo uniforme

A partir de las ecuaciones de conservación de la masa y conservación de la cantidad de movimiento en su forma diferencial, se establece una situación estacionaria donde las características de la corriente no varían en el tiempo ($\frac{\partial Q}{\partial t} = 0$ y $\frac{\partial A}{\partial t} = 0$), con un caudal constante a lo largo de toda su longitud ($\frac{\partial Q}{\partial x} = 0$) y siendo la geometría del canal fija, se puede llegar a una expresión que define la variación de la altura de calado a lo largo del canal [7]:

$$\frac{dh}{dx} = \frac{S_o - S_f}{1 - Fr^2} \quad (19)$$

Donde Fr es el número de Froude. Se trata un parámetro adimensional que relaciona el efecto de las fuerzas de inercia y las fuerzas de gravedad que actúan sobre el fluido, el cual está definido por la expresión (20).

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (20)$$

Según el valor que adquiera el comportamiento del flujo será diferente, si $Fr < 1$ el flujo será subcrítico, si $Fr = 1$ el flujo será crítico y finalmente si $Fr > 1$ se tratará de un flujo supercrítico. Si calculamos este parámetro para el caso de la Geometría 1 (Tabla (5)), se obtiene que para todos los casos el comportamiento del flujo es subcrítico.

Q	Metacrilato	Césped	Malla
Q1	0.317	0.227	0.328
Q2	0.453	0.372	0.457
Q3	0.491	0.517	0.565

Tabla 3: Número de Froude según el caudal y el material en el caso de la Geometría 1.

En nuestro caso, $S_o = 0$, es un canal sin pendiente donde se desarrolla un flujo no uniforme. De esta manera la expresión (19) se simplifica, quedando:

$$\frac{dh}{dx} = -\frac{S_f}{1 - Fr^2} \quad (21)$$

Sustituyendo la pendiente de fricción por la expresión de la ley de Manning (A.3) y discretizando el diferencial de altura, la expresión puede resolverse sustituyendo directamente cada parámetro por valores medidos o calculados.

$$\frac{\Delta h}{\Delta x}(1 - Fr^2) = -S_f = -\frac{n^2 Q^2}{A^2 R_h^{3/4}} \quad (22)$$

Por último despejamos en la expresión (23) el coeficiente de rozamiento de Manning (n).

$$n^2 = -\frac{\Delta h}{\Delta x}(1 - Fr^2) \frac{A^2 R_h^{3/4}}{Q^2} \quad (23)$$

Donde Δh hace referencia a las variaciones de calado entre dos posiciones a lo largo del canal separadas Δx . Se utilizarán los datos medidos entre dos secciones del canal. Para el cálculo de aquellos parámetros que dependen del calado, como el número de Froude o el radio hidráulico, se utilizará el valor del calado medio entre las dos secciones en las que se evalúe el flujo. La velocidad media utilizada en el cálculo del caso del canal recto, será la medida en el punto central (única medida de velocidad).

5.2. Determinación a partir del modelo de fricción de Darcy y la fórmula de Colebrook-White

El cálculo del coeficiente de rozamiento de Manning aquí expuesto se basa en el modelo de fricción de Darcy, expuesto en el Anexo A, donde se obtiene un coeficiente que cuantifica este rozamiento en función de las características del flujo (Reynolds), de la longitud de rugosidad del material (ε) y del diámetro hidráulico (D_h).

En nuestro caso, al tener un flujo completamente turbulento utilizaremos una aproximación para estos casos de la fórmula de Colebrook-White [6] que, puede ser resuelta de manera explícita.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2,0 \log_{10} \left(\frac{D_h}{\varepsilon} \right) + 1,14 \quad (24)$$

De esta manera se obtendrá un valor del coeficiente de fricción (f) según los datos medidos en el laboratorio. Con las equivalencias entre coeficientes de fricción se establece la relación del coeficiente f con el factor (n) del modelo de Manning (n) [6] según:

$$n = R_h^{1/6} \sqrt{\frac{f}{8g}} \quad (25)$$

Así se estima un valor del coeficiente de rugosidad de Manning para las diferentes situaciones medidas en el laboratorio.

Una vez calculados los diferentes coeficientes de rozamiento de Manning según los criterios expuestos, se exponen los resultados obtenidos. En la Tabla (4) el coeficiente de Manning número 1 hace referencia al obtenido según la ecuación de variación de altura de agua (5.1), y el coeficiente de rozamiento de Manning número 2 según el modelo de fricción de Darcy (5.2). El primer criterio presenta el inconveniente de que si no se ha medido una variación de calado (Δh) entre las dos secciones no puede completarse el cálculo del coeficiente de rozamiento.

Los resultados obtenidos según el segundo criterio son mejores porque el coeficiente n apenas varía cuando el caudal cambia, ya que, teóricamente el coeficiente de rozamiento de Manning debería ser constante para cada material sin importar el

Q	Material	n1	n2
Q1	Césped	0.0184	0.0168
	Malla	0.0118	0.0105
	Metacrilato		0.0069
Q2	Césped	0.0165	0.0165
	Malla	0.0151	0.0106
	Metacrilato		0.0070
Q3	Césped	0.0126	0.0163
	Malla	0.0084	0.0106
	Metacrilato		0.0071

Tabla 4: Coeficientes de Manning ($s/m^{1/3}$) obtenidos teóricamente a partir de los datos medidos en la Geometría 1.

caudal que discurra.

En cambio los obtenidos según la ecuación de variación de altura de agua varían de manera exagerada entre dos caudales diferentes tratándose de un mismo material. Asimismo no se ha podido calcular el coeficiente de rozamiento de Manning en todos los casos, por ejemplo en el caso del metacrilato, al tener un rozamiento tan bajo no han podido medirse las diferencias de calado de una sección a otra y por tanto no ha podido calcularse ningún valor de este coeficiente.

A la vista de que el segundo criterio nos proporciona una serie de valores del coeficiente de rozamiento de Manning estables en todos los casos, se opta por utilizar este criterio en futuras fases del estudio.

6. Elaboración de datos de partida para realizar la simulación

Para realizar una simulación 1D de las situaciones medidas en el laboratorio, se introducirán en la herramienta *CanalFlowmodel* los datos necesarios siguiendo los pasos expuestos en el Anexo B, después se variará el coeficiente de rozamiento hasta conseguir como resultado de la simulación los valores medidos en la realidad.

Canalflowmodel es un simulador de flujos en 1D que ha sido desarrollado por el Grupo de Hidráulica Computacional de la Universidad de Zaragoza para resolver numéricamente flujos estacionarios y transitorios que discurran por todo tipo de geometrías. La herramienta se apoya en la computación en la nube, donde puede utilizarse sin necesidad de instalar de forma local el programa en el ordenador del que lo utiliza. Se puede acceder a él de manera gratuita en la dirección <http://canalflowmodel.net>.

6.1. Geometría del canal

Como características comunes de todas las configuraciones de obstáculos, se tendrá la longitud del canal ($6m$), tratándose de un canal de sección rectangular definidas por 4 puntos geométricos (descritos por sus coordenadas x, y). Para definir el número de secciones que necesita cada configuración, ha de tenerse en cuenta que el programa realiza una interpolación lineal entre secciones consecutivas, de manera que, para casos como el del obstáculo lateral suave habrá que definir su curvatura con un número suficiente de secciones.

El caso de la Geometría 1 que se toma como ejemplo, es el más sencillo, ya que sólo se requiere definir las coordenadas de dos secciones, la primera y la última. Estas dos secciones tendrán exactamente las mismas coordenadas de manera que no exista pendiente entre ellas ($S_o = 0$). La situación de estas secciones puede observarse en la Figura 10a, y en la Figura 10b pueden visualizarse los 4 puntos que hay que introducir a la hora de definir una sección del canal.

6.2. Definición del coeficiente de rozamiento de Manning

Este es el parámetro clave de estas simulaciones, cuyo valor se variará sucesivas simulaciones, hasta que la simulación reproduce el calado medido en el laboratorio en un determinado punto del canal.

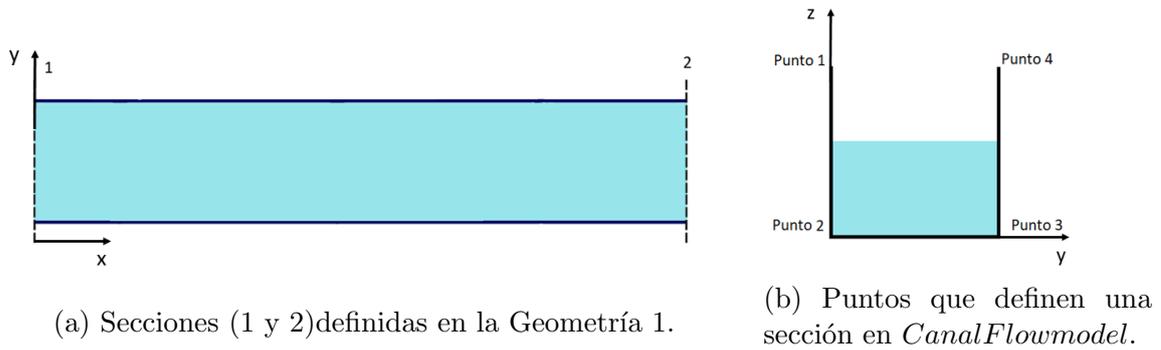


Figura 10: Número de secciones y puntos introducidos en *CanalFlowmodel* para la simulación de la Geometría 1.

6.3. Condición inicial

Se parte de un estado estacionario de caudal constante en el tiempo. En la campaña de mediciones se trataron en cada caso 3 caudales diferentes, trabajando en el sistema internacional los valores que habrá que introducir según cada caso son:

- Q1: $5m^3/h = 0,0013889m^3/s$
- Q2: $10m^3/h = 0,0027778m^3/s$
- Q3: $15m^3/h = 0,00416671m^3/s$

6.4. Condiciones de contorno

Como se explica en el Anexo B, para el correcto funcionamiento de la herramienta debe definirse cómo entra y cómo sale el agua del canal. Esto se introduce en el simulador definiendo las condiciones de entrada y salida.

6.4.1. Condición de entrada

Se define la variación del caudal a la entrada en el tiempo $Q(t)$. El caudal a lo largo de toda la simulación ha de ser constante, por lo que se definirá con dos valores de tiempo (0 y 1000 segundos) y dos valores de caudal asociados a estos valores de tiempo que serán los mismos que los utilizados en la condición inicial.

6.4.2. Condición de salida

Para caracterizar el efecto que produce el vertedero a la salida del canal, definiremos la altura de calado que éste provoca con una expresión teórica [10] que permite calcular la altura de vertido:

$$Q = \frac{2}{3}C_R L \sqrt{2g} H^{(3/2)} \quad H = h - hv \quad (26)$$

Esta expresión (26) es específica para vertederos rectangulares y depende del ancho del vertedero (L), de un factor dependiente de la geometría (C_R) que en este caso tendrá un valor de 0.6 [10] con los que se buscará la altura de vertido H . Como puede verse en la Figura 3 es la altura del agua por encima de la cresta del vertedero, por lo que para obtener el verdadero valor de el calado de vertido habrá que sumar a ésta, los 5 mm que tiene de cresta el vertedero. Las diferentes alturas de agua a la salida en función del caudal son:

	Q1	Q2	Q3
h(cm)	2.70	3.99	5.07

Tabla 5: Alturas en la salida del canal en función del caudal en el caso de la Geometría 1.

Estos valores se introducen en el simulador de forma análoga a la definición de caudal en función del tiempo, estableciéndose dos valores de tiempo (0 y 1000 segundos) a los que se les asigna un mismo valor de altura de salida.

6.5. Parámetros de simulación

Según la geometría del canal que sea, es necesario cambiar alguno de los parámetros de cálculo predeterminados que ofrece el programa. Sólo se expondrán aquellos que se han cambiado.

El caso de la Geometría 1 (Canal Recto sin obstáculos), al poseer un número de secciones mínimo lo convierte en un caso muy sencillo siendo sólo necesario variar dos parámetros:

- Tiempo de simulación: Se impondrá un valor de 1000 segundos de simulación, el mismo para el que hemos definido el valor final tanto del caudal como de la altura de calado a la salida.
- Posición de la sonda ($x(m)$): Se coloca la sonda de recogida de resultados numéricos en la misma posición en la que disponemos de medidas de laboratorio,

siendo en este caso se encuentra en al mitad del canal, a 3 metros desde el comienzo del mismo. Existían otros puntos de medición de calado pero sólo este de velocidad, por lo que se tomará éste como referencia en las simulaciones.

6.6. Resultados de las simulaciones

En esta sección se van a exponer todos los resultados obtenidos en las simulaciones: desde los coeficientes de Manning que han sido necesarios utilizar para recrear las condiciones medidas en el laboratorio y los gráficos resultado de la fase de cálculo, como los gráficos que comparan los valores teóricos de rozamiento con los utilizados en la simulación.

6.6.1. Coeficientes de rozamiento de Manning utilizados en cada material

En la tabla (6) se exponen tanto los coeficientes de Manning ($s/m^{\frac{1}{3}}$) utilizados en las simulaciones para reproducir los datos medidos en el laboratorio, como la velocidad (cm/s) y la altura de calado (cm) que se genera introduciendo este coeficiente. Junto a ellos se muestran los datos obtenidos a partir de las mediciones en el canal cómo el coeficiente de Manning (nm), velocidad (Vm) y calado (hm), para poder comparar a simple vista unos con otros.

Material	Q	n	V	h	nm	Vm	hm
Metacrilato	Q1	0.0247	16.042	3.6	0.0069	18.573	3.6
	Q2	0.0154	25.157	4.6	0.0070	29.482	4.6
	Q3	0.0129	30.984	5.6	0.0071	36.665	5.6
Césped	Q1	0.0270	15.567	3.7	0.0168	13.873	3.7
	Q2	0.0215	23.172	5	0.0165	26.431	5
	Q3	0.021	27.860	6.2	0.0163	40.121	6.2
Malla	Q1	0.0247	16.042	3.6	0.0105	19.404	3.6
	Q2	0.0186	24.089	4.8	0.0106	29.744	4.8
	Q3	0.0143	30.451	5.7	0.0106	37.965	5.7

Tabla 6: Datos obtenidos como resultado en las simulaciones de altura y velocidad junto con los medidos en el canal.

En primer lugar se puede observar como ambos calados, medidos y simulados, se ajustan perfectamente debido a que el objetivo de las simulaciones es el de variar el coeficiente de rozamiento hasta obtener como resultado el calado medido. En cuanto a la velocidad se observan discrepancias, siendo siempre los valores obtenidos de la simulación menores que los valores medidos. Esta diferencia entre los valores de velocidad se debe, a que en los obtenidos a partir de las medidas en el

canal, poseen cierto error ya que estos datos medidos son insuficientes a la hora de aplicar los criterios de cálculo de manera perfecta, como ya hemos visto. La manera óptima de obtener la velocidad media habría sido la midiendo el perfil de velocidades completo, cosa para la que no se disponía ni de instrumentación, ni de tiempo suficiente.

Por otro lado, el coeficiente de rozamiento de Manning necesario para replicar el flujo medido en el laboratorio, va decreciendo gradualmente a medida que aumenta el caudal. Como se esperaba, los valores más altos del coeficiente de rozamiento utilizados son los correspondientes al caso del césped.

6.6.2. Comparación de los coeficientes de rozamiento usados en la simulación frente a los calculados teóricamente

Las Figuras 11, 12 y 13 muestran la diferencia entre los valores utilizados en la simulación y los que se obtuvieron en el Capítulo (5). La línea azul corresponde a los valores del coeficiente de rozamiento introducido en el programa *CanalFlowmodel*, mientras que la naranja hace referencia a la variación del coeficiente de rozamiento de Manning obtenido en el Capítulo (5). La expresión que se sitúa al lado de cada línea azul define la línea discontinua azul, la cual es de una aproximación a la variación del valor del rozamiento que podría utilizarse para saber que coeficiente se debe introducir, en función del caudal, en futuras simulaciones. n representa el coeficiente de rozamiento de Manning y Q el caudal circulante en m^3/h .

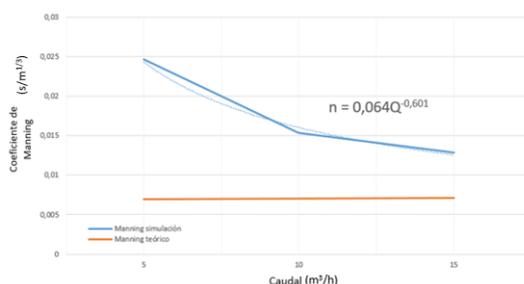


Figura 11: Comparación del coeficiente de Manning en el caso del metacrilato (Geometría 1).

En el caso del metacrilato (Figura 11) se observa que la pendiente entre el valor usado en las simulaciones con el Q1 y el usado con el Q2 es notablemente mayor que el usado entre este último y el usado en el Q3, es decir, que la influencia del caudal en la variación del coeficiente de rozamiento es menor a medida que aumenta el valor del caudal. Por el contrario, el coeficiente calculado teóricamente no varía en gran medida,

solamente decae su valor con el aumento del caudal. Se ha aproximado la variación del coeficiente de rozamiento de Manning usado en las simulaciones a una función de carácter potencial, donde a medida que el caudal aumenta, el valor del coeficiente irá decreciendo hasta que adquiere el valor obtenido de manera teórica, tomándose este último valor como óptimo para caudales mayores.

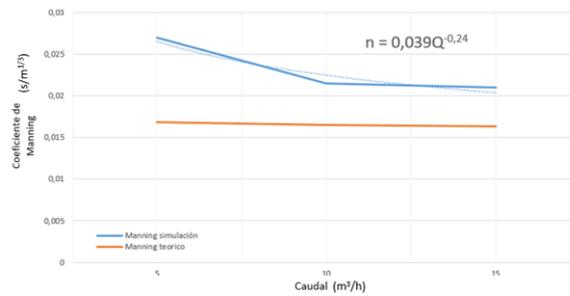


Figura 12: Comparación del coeficiente de Manning en el caso del césped (Geometría 1).

En el caso del césped (Figura 12), las conclusiones a las que se llega son similares a las del caso del metacrilato. A medida que el caudal aumenta influye menos en el valor del rozamiento a introducir en el simulador. La expresión a la que se ha aproximado la variación del coeficiente de rozamiento es una función potencial, la cual tenderá a un valor aproximadamente constante con valores del caudal mayores. Por otro lado, el valor teórico sufre también una ligera caída a medida que aumenta el caudal.

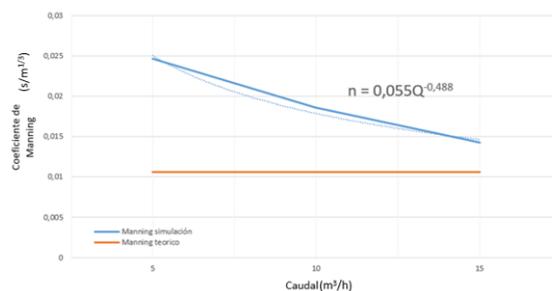


Figura 13: Comparación del coeficiente de Manning en el caso de la malla (Geometría 1).

Por último, al simular el caso de la malla (Figura 13) se observa una menor variación pero nada significativo. En cambio, en este caso el coeficiente de Manning calculado de manera teórica sufre un ligero aumento con el caudal pero de una manera tan pequeña que puede considerarse despreciable.

6.6.3. Comparación de los coeficientes de rozamiento usados en la simulación con el parámetro adimensional Reynolds asociado

El coeficiente de fricción(f) se obtiene a partir de los valores de rozamiento utilizados en las simulaciones operando según la relación entre ambos que viene dada por la expresión (25).El parámetro de Reynolds se obtiene a partir de los datos de calado y velocidad obtenidos en las simulaciones, y con el valor tanto de la densidad como de la viscosidad del agua a una temperatura de $20C^{\circ}$. Uno de los objetivos de esta comparación es la de analizar el aspecto adimensional del rozamiento, ya que como se explica en el Anexo A el coeficiente de Manning no es adimensional mientras que el coeficiente (f) y el Reynolds si lo son.

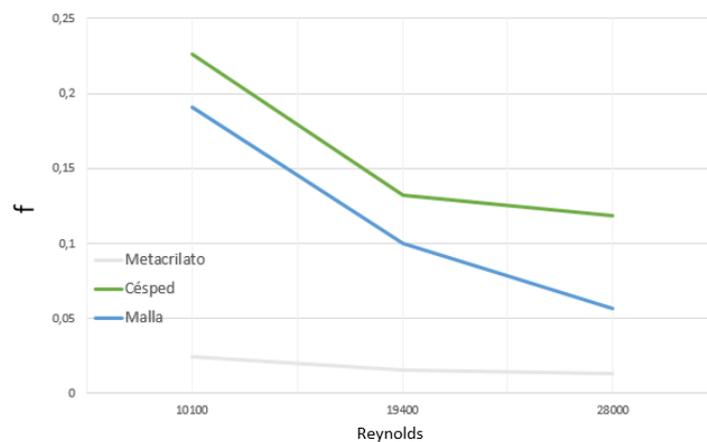


Figura 14: Comparación del coeficiente (f) de los 3 materiales con el número de Reynolds.

Se puede observar cómo en los 3 casos el coeficiente de rozamiento va decreciendo a medida que aumenta el Reynolds cuya subida está relacionada con el aumento de caudal y por tanto de velocidad. Como se esperaba, el mayor coeficiente de rozamiento es del césped (verde), seguido por la malla (azul) y por último el metacrilato (gris). El metacrilato, al poseer la rugosidad más pequeña, sufre solamente una ligera variación mientras que en el césped y la malla, sí presentan una disminución sustancial del coeficiente de rozamiento a medida que aumenta el parámetro adimensional de Reynolds.

7. Conclusiones

Como conclusiones generales a partir, no solamente del análisis del comportamiento del agua en la Geometría 1, sino de también del análisis del flujo sobre las otras geometrías medidas presentes en el Anexo D son:

- El rozamiento es considerablemente mayor en el césped que en el metacrilato y la malla. Hasta el punto de que las medidas tomadas en el laboratorio con el césped presentan anomalías en alturas cercanas al fondo.
- El coeficiente de rozamiento f , que es adimensional, decrece con el aumento del número de Reynolds (relacionado con el aumento de caudal). Al presentar este comportamiento un coeficiente adimensional (no en el caso del coeficiente de rozamiento de Manning) puede corroborarse que el rozamiento depende en gran medida del caudal, no siendo solamente función del material.
- A medida que aumenta, el caudal pierde influencia en la variación del coeficiente de rozamiento de Manning. Como se ha visto en los resultados procedentes de las simulaciones, la variación del coeficiente de Manning es mucho mayor entre Q1 y Q2, que entre Q2 y Q3.
- Una vez analizados todos los casos se llega a la conclusión de que la geometría por la que fluye el agua influye en gran medida en el valor del coeficiente de rozamiento. Esto queda patente en el caso de la Geometría 2 que tiene la disposición de obstáculos más crítica, ya que presenta los coeficientes de rozamiento de Manning más altos en todos los materiales, seguidos de la Geometría 3.
- Queda constatado que el valor del coeficiente de rozamiento de Manning obtenido a partir de las mediciones en el laboratorio, y el que se debe introducir en el simulador para reproducir la realidad, distan mucho de ser el mismo. Por lo tanto, si se desea reproducir los casos analizados en este estudio con la herramienta *CanalFlowmodel*, el coeficiente de rozamiento de Manning que se debe introducir será el calculado, para el caudal circulante, con la función obtenida en la sección 6.6.2 correspondiente al material que se desea simular

8. Referencias

- [1] J.BURGUETE, P.GARCIA-NAVARRO, J.MURILLO y I.GARCIA-PALACÍN, *Analysis of the Friction term in the One-Dimensional Shallow-Water Model*, J. Hydraul. Eng, 133(9): 1048-1063, 2007.
- [2] J.A. ROBERSON, J.J. CASSIDY y M.H CHAUDHRY, *Hydraulic Engineering*, Houghton Mifflin Company, 1988.
- [3] LARRY W. MAYS, *Water Resources Engineering*, Hamilton printing, Arizona State University, 2001.
- [4] P. GARCIA-NAVARRO y P. BRUFAU, *Conceptos básicos de Hidrología Superficial*, Universidad de Zaragoza, 2001.
- [5] G. ESTRADA GUTIERREZ, *Hidráulica de canales abiertos*, McGraw-Hill, Universidad autónoma de Chihuahua, 2010.
- [6] V.T. CHOW, *Open-Channel Hydraulics*, McGraw-Hill, 1959.
- [7] F.M. HENDERSON, *Open Channel Flow*, MacMillan series in Civil Engineering, 1966.
- [8] S. CABREJAS MELERO, *Simulación de avenidos en el río Ebro con una herramienta de cálculo en la nube*, TFG, Universidad de Zaragoza, 2018.
- [9] *Manual del Software de cálculo en la nube CanalFlowmodel*, <http://www.canalflowmodel.net>.
- [10] *Guión de la Practica 4 de la asignatura de Mecánica de Fluidos en la titulación de Ingeniería de Tecnologías Industriales*, Universidad de Zaragoza.
- [11] *Boletín de instrucciones de medidor electromagnético de caudal*, ABB, https://library.e.abb.com/public/72a9c8053f8326cec1256dec0035bfaa/D184B105U04-01-06_00.pdf
- [12] *Ficha técnica de la sonda Argonaut-ADV de SONTEK*, SONTEK, <https://www.sontek.com/argonaut-adv>

A. Modelos de fricción

A lo largo de la historia numerosos autores han desarrollado diferentes modelos para caracterizar la pérdida de energía debida a la fricción entre un fluido y el medio por el que fluye. Estos modelos son en gran parte de carácter empírico, donde el modelo de Chézy, propuesto en el siglo XVIII, fue el primer modelo fiable para calcular el efecto de la fricción en un flujo. Más adelante, en el siglo XIX, Darcy y Manning propusieron modelos similares. A pesar de que existen más autores con sus respectivos modelos, estos tres son los más importantes y siguen siendo los más utilizados hoy en día para el modelizado del rozamiento en Hidrodinámica. Cada uno de ellos precisa de un coeficiente de rozamiento empírico, cuyo valor varía mucho en función del modelo que se utilice. Este coeficiente empírico tiene como principales dependencias la rugosidad del medio y las propias características del flujo (laminar o turbulento). Existen tablas muy completas que aproximan este coeficiente para muy variados tipos de flujos, cauces y rugosidades.

En canales o cauces naturales, existen dos causas principales de rozamiento: por un lado la fricción provocada por la rugosidad de las partículas que forman el fondo y las paredes (rugosidad granulométrica); y por otro lado la debida a la irregularidad del fondo. Existe formulación que ajusta de manera razonablemente precisa el coeficiente de rozamiento según las características de la granulometría y del flujo, como puede ser la de Colebrook-White. Aunque se han propuesto algunos modelos para obtener el rozamiento debido a la forma del fondo, hay que señalar que no hay fórmulas que aproximen bien las características del flujo para medios altamente rugosos; siendo en estos casos necesarias investigaciones experimentales para cada flujo si se desea una estimación precisa del coeficiente de rozamiento.

En este apartado se van a exponer los modelos más aceptados y utilizados en la actualidad. Todos los modelos de fricción expuestos, parten del esfuerzo de fricción para un modelo 1D promediado en la sección transversal que tiene una forma:

$$\tau_o = K\rho v^2 \quad (27)$$

Donde K será función de las características de la rugosidad y del flujo, ρ es la densidad el fluido y v la velocidad del flujo. Y donde la energía presente en el flujo viene definida por:

$$E = \frac{V^2}{g}(h + z) \quad (28)$$

Suponiendo que la fuerza de rozamiento va en la misma dirección y sentido contrario a la velocidad, puede adaptarse esta fórmula para un modelo de ecuaciones en 2D, donde aparecerá otra ecuación similar en función de otra velocidad en el eje y . De esta manera conocido un modelo de τ_o puede hallarse la fuerza de rozamiento tanto en 1D como en 2D.

A.1. Ley de Darcy

Para flujo en canales con superficie libre, la pérdida de energía (H) cuando el fluido recorre una distancia (S) viene dada por la ecuación de Darcy (29) [6], y el esfuerzo de fricción provocado en las paredes del canal viene expresado por la ecuación (30), también propuesta por Darcy.

$$\Delta E = f \frac{\Delta S V^2}{D_H 2g} \quad (29)$$

$$\tau_o = \frac{f}{8} \rho V^2 \quad (30)$$

En ambas ecuaciones f es el factor de fricción, D_H es el diámetro hidráulico definido como 4 veces el radio hidráulico, que a su vez es el cociente entre el área mojada y el perímetro mojado. Para poder obtener un valor numérico de f , se han propuesto diferentes expresiones, destacando entre ellas la ecuación de Colebrook-white (31), válida para todo tipo de flujos turbulentos, suaves, de transición o completamente turbulentos. Esta fórmula incluye el número adimensional de Reynolds (32); de esta manera se hace sensible al efecto de la turbulencia, según el valor de este número. Para canales con superficie libre, el efecto de la turbulencia se hace manifiesto con valores de Reynolds (32) por encima de $2000 \sim 3000$.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3,71 D_H} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (31)$$

$$Re = \rho \frac{VD_H}{\mu} \quad (32)$$

En las expresiones (31) y (32) ε hace referencia a la rugosidad en *mm* propia del sustrato por el que fluye el líquido, ρ hace referencia a la densidad del fluido, μ será la viscosidad del fluido y V la velocidad del mismo.

La ecuación (31) es una ecuación no lineal en la que el factor f está presente tanto en el lado izquierdo como en el derecho de la igualdad. En lugar de tener que recurrir a un método numérico para resolverla, existe una solución gráfica para esta ecuación: el diagrama de Moody presente en numerosa bibliografía de mecánica de fluidos. De esta manera se permite obtener un coeficiente de Darcy (f) con una fuerte dependencia de la rugosidad relativa y del número de Reynolds, y por tanto de las características del flujo. De manera que este coeficiente de rozamiento, una vez obtenida la aproximación gráfica con la ayuda del diagrama de Moody, puede ajustarse con mayor precisión de manera iterativa con la ecuación (31).

Cuando el flujo con el que trabajamos es de tipo turbulento, existe una aproximación de la fórmula de Colebrook-white, que permite el cálculo de f de manera directa, sin necesidad de obtenerlo gráficamente.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2,0 \log_{10} \frac{D_H}{\varepsilon} + 1,14 \quad (33)$$

Esta fórmula (33) será la que utilicemos a lo largo del proyecto para obtener el coeficiente de fricción del experimento medido, y posteriormente lo corregiremos con la expresión 31. En el caso de que el flujo no fuera turbulento sino de carácter laminar, también se dispone de diferentes aproximaciones.

A.2. Ley de Chézy

En 1768 A. Chézy propone una nueva ecuación (36) para el cálculo de tensiones en las paredes provocadas por el rozamiento; pero la ecuación más característica del modelo es la llamada ecuación de Chézy (34) [6], la cual es una adaptación de la

ecuación de conservación de la cantidad de movimiento que establece la dependencia de la velocidad del fluido con el radio hidráulico.

$$V = C \sqrt{\frac{D_H}{4} \sin \theta} \quad (34)$$

Donde C es el coeficiente de Chézy, que tiene una equivalencia con el coeficiente de rozamiento de Darcy f según la expresión (35), para poder sustituir el factor f en la ecuación (34):

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}} \quad \longrightarrow \quad \frac{C}{\sqrt{8g}} = \frac{1}{\sqrt{f}} \quad (35)$$

$$\tau_o = \rho g \left(\frac{V}{C} \right)^2 = \rho g \frac{V^2}{\frac{8g}{f}} = \frac{f}{8} \rho V^2 \quad (36)$$

Para flujos altamente turbulentos podemos sustituir en la ecuación de Colebrook-white (31) la relación entre los coeficientes de Darcy y Chézy (35), donde el coeficiente C se obtendrá según la expresión:

$$C = 17,7 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{D_H} \right) + 10,1 \quad (37)$$

Como se ha dicho anteriormente, los coeficientes de rozamiento de estos modelos son empíricos.

A.3. Ley de Manning

La fórmula empírica de Manning [6] fue propuesta en un principio por Gauckler en 1867, según las medidas de Darcy y Bazin, y posteriormente por Robert Manning en 1890. Esta fórmula es válida para flujos uniformes y no uniformes, y es la más usada en los modelos 2D promediados en la vertical y en modelos 1D promediados también en

la sección transversal. Se considera que el esfuerzo por rozamiento puede aproximarse como:

$$\tau_o = \rho g n^2 R_H^{-\frac{1}{3}} V^2 \quad (38)$$

Siendo n en esta fórmula el número de Manning. Este coeficiente depende exclusivamente de las características de la superficie por la que fluye el fluido, y es equivalente a la ecuación propuesta por Darcy (30) y a la propuesta por Chézy (36).

Este modelo fue especialmente desarrollado para el cálculo en canales naturales ya que éstos suelen tener fondos irregulares donde es difícil obtener información acerca de la rugosidad y suelen desarrollarse flujos completamente turbulentos. De la misma manera que en el modelo de Chézy, el modelo de Manning dispone de una ecuación (39) que relaciona n con el coeficiente de Chézy, y éste con el de Darcy.

$$n = \frac{R_H^{\frac{1}{6}}}{C} \quad (39)$$

El principal problema que presenta esta ley es que el coeficiente de Manning que representa el rozamiento fluido-terreno, no es adimensional como los otros, sino que posee dimensiones de $s/m^{\frac{1}{3}}$ por lo que no será constante para un mismo material sino que depende de otros factores que le confieren unidades. Por último Strickler calibró una expresión (40) con la que se obtiene el coeficiente de Manning a partir de la rugosidad granulométrica de la superficie. Para flujos con baja rugosidad relativa se cumple:

$$n = 0,041 d_{50}^{\frac{1}{6}} \quad (40)$$

siendo d_{50} el diámetro medio de las partículas. Henderson también propuso una expresión (41) similar para gravas.

$$n = 0,038 d_{75}^{\frac{1}{6}} \quad (41)$$

B. Software de cálculo: Canalflowmodel

Canalflowmodel es un simulador de flujos en 1D que ha sido desarrollado por el Grupo de Hidráulica Computacional de la Universidad de Zaragoza para resolver numéricamente flujos estacionarios y transitorios que discurren por todo tipo de geometrías. Esta herramienta desde un principio fue diseñada para el cálculo de canales, por lo que se adecua perfectamente al desarrollo de este proyecto. La herramienta se apoya en la computación en la nube, donde puede utilizarse sin necesidad de instalar de forma local el programa en el ordenador del que lo utiliza. Se puede acceder a él de manera gratuita en la dirección <http://canalflowmodel.net>.

Lo primero que se visualiza al acceder a la herramienta de cálculo *Canalflowmodel* es un menú que nos ofrece (siguiendo una serie de pasos sucesivos) la creación de diferentes tipo de canal y características del flujo que discurre por éste. En caso de haber trabajado con anterioridad con este simulador existe la opción de abrir un caso ya existente mediante un sistema de tickets, cuyo número puede introducirse al acceder al simulador como puede observarse en la parte derecha de la Figura 15. En cada uno de los casos que se ha creado y simulado en este trabajo, aparece el nombre del ticket correspondiente a cada uno, de manera que el lector puede acceder y simular en tiempo real en la nube, viendo directamente los resultados que se obtienen y que aquí se exponen.

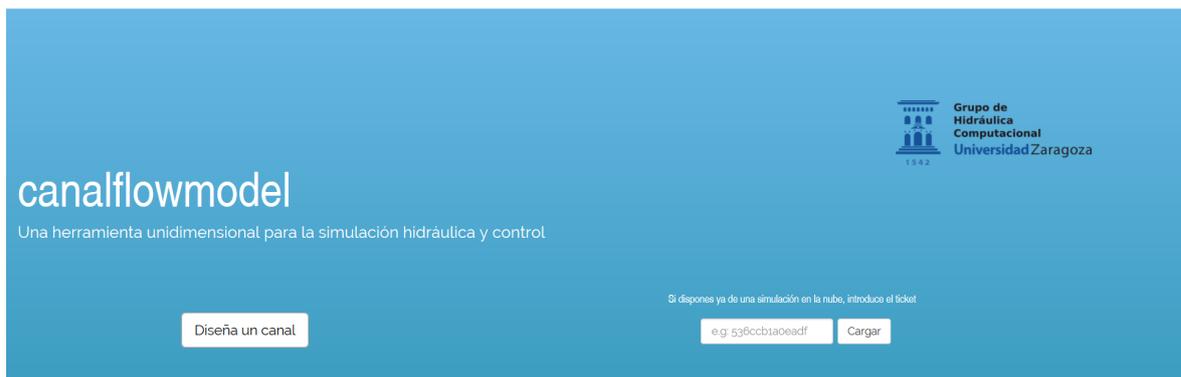


Figura 15: Menú de entrada al simulador *Canalflowmodel*.

Como se ha dicho, a la hora de crear un caso existen una serie de fases a seguir en la simulación [9] de cada caso.

- Fase I - Pre-proceso
- Fase II - Cálculo

– Fase III - Post-proceso

A su vez, en cada fase existen una serie de pasos necesarios para la correcta definición de las características en cada caso, por lo que vamos a exponer cada fase con más detalle explicando claramente los pasos de cada una:

B.1. Fase I - Pre-proceso

En la fase de pre-proceso se introducen el conjunto de parámetros que definirán las características del flujo de las que depende los futuros resultados en fases posteriores. La geometría, las condiciones iniciales de la simulación (valor de las variables de cálculo en tiempo cero), las condiciones de contorno que definen la entrada y salida del fluido en el canal, así como el resto de parámetros de simulación.

B.1.1. Geometría

La definición de la geometría se caracteriza por la longitud del canal y el número de secciones transversales que definirá su cauce. La forma de la sección se determina por un conjunto de puntos con sus coordenadas espaciales. En nuestro caso, estas secciones se agruparan en las zonas donde se encuentra los diferentes obstáculos en cada configuración, debiéndose definir un número suficiente de secciones, para cuando se proceda al cálculo de cada caso el simulador entienda correctamente la forma del obstáculo que se trate.

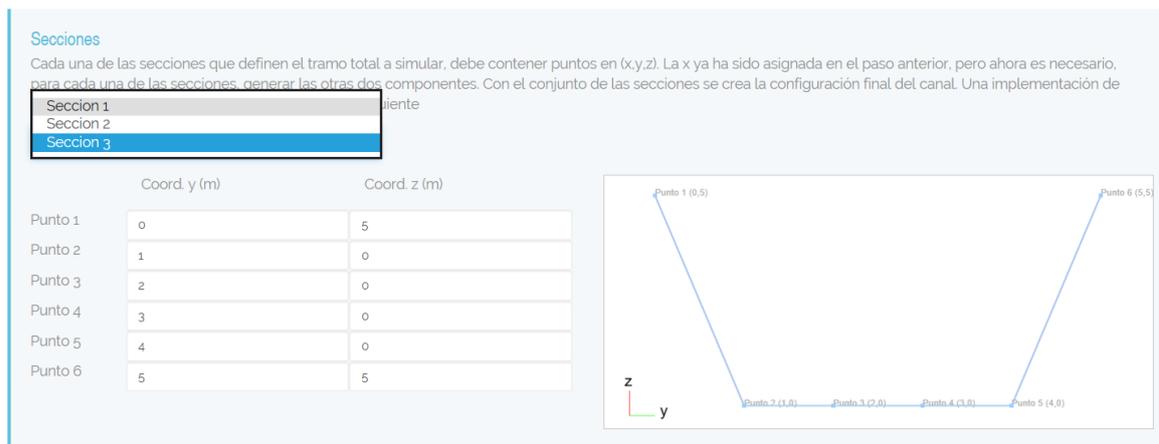


Figura 16: Menú de introducción de la geometría de las secciones del canal a simular en *Canalflowmodel*.

B.1.2. Condiciones iniciales

En este paso se definen el estado de las variables de cada caso en el tiempo inicial de la simulación ($t = 0$). Para definir esto correctamente, la herramienta dispone de diferentes opciones:

- Canal seco: Caudales y calados nulos, en el momento en el que empieza la simulación es cuando empieza a discurrir caudal por el canal. $h = 0m, Q = 0m^3/s$
- $h + z = cte$: Establece una altura de calado constante en todo el dominio y en reposo, es decir, el valor de la velocidad será 0.
- Q constante: En este caso el estado de partida se establecerá un caudal estacionario cuyo valor nosotros impondremos. (Esta será la condición inicial que se usará en las simulaciones)
- h constante: Se establece un valor de altura de calado para todas las celdas de cálculo, encontrándose este fluido en reposo (velocidad nula).
- Rotura de presa (dambreak): Se parte de una discontinuidad de calados en algún punto del dominio del canal, donde la velocidad del fluido será nula.

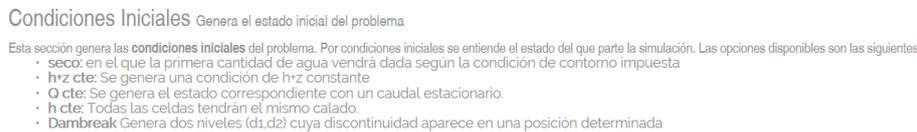


Figura 17: Opciones disponibles para definir el estado inicial en *Canalflowmodel*.

B.1.3. Condiciones de contorno

El siguiente paso sera definir el comportamiento de la corriente a la entrada y salida del canal (aguas arriba y aguas abajo respectivamente). De la misma manera que con las condiciones iniciales, el programa ofrece una serie de opciones para definir estas entradas y salidas. Para la entrada ofrece:

- $h + z(t)$: Establecerá en la entrada del canal una altura de calado variable en el tiempo. De esta manera proporcionará información de como varía en el tiempo el nivel superficial de agua en este punto, condicionando así los resultados de la simulación.

- $Q(t)$: Define el caudal que entra al canal, siendo este variable en el tiempo. En nuestro caso, sera la condición de entrada que se usará, ya que en el laboratorio trabajamos según este régimen, y no condicionamos la salida de ninguna otra manera que nos permita poner otra opción en este punto.
- $h(t)$: Altura de calado en función del tiempo. Define la evolución temporal del calado a la entrada del canal.



Figura 18: Opciones disponibles para definir el flujo a la entrada del canal a simular en *Canalflowmodel*.

De la misma manera que existían diferentes opciones para definir el estado del flujo a la entrada del canal, ahora se van a exponer las opciones disponibles para la salida:

- Libre: No se impone ninguna condición de salida dejando así que el fluido vaya saliendo del canal conforme vaya llegando a este punto
- Vertedero : Con esta opción, *Canalflowmodel* permite introducir un vertedero en el punto de salida del fluido. Cuya geometría viene definida por la altura de su cresta y el angulo que forma (180° si es cuadrado, variable si es triangular).
- $h + z(t)$: Establece la altura de calado en función del tiempo. En nuestro caso esta será la condición de salida que se utilizara, donde estableceremos una altura constante en el tiempo provocada por el vertedero utilizado. No utilizamos la condición de vertedero por que éste no queda correctamente definido según los parámetros que ofrece el simulador.
- $Q = Q(h + z)$: Se define un caudal en función del nivel superficial. En caso de existir variaciones de caudal a la salida, se definirá el valor de éste en cada instante de tiempo creando así una curva de variación del caudal a lo largo del tiempo de simulación.

- Froude constante: se impone un valor del número adimensional de Froude constante y por debajo de 1 en todo el intervalo de simulación, garantizando que en todo momento se obtenga un flujo subcrítico.
- Flujo uniforme : esta opción impone un flujo uniforme a la salida definido por una pendiente.

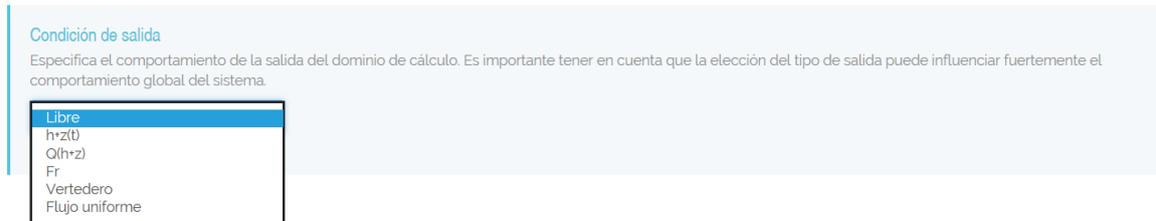


Figura 19: Opciones disponibles para definir el flujo a la salida del canal a simular en *Canalflowmodel*.

En el caso de existir algún tipo de compuertas, el simulador dispone de un paso para definir las características de estas. Como en ninguno de nuestros casos se da la existencia de compuertas simplemente se introduce en el simulador un número de compuertas igual a 0.

B.1.4. Parámetros de simulación

En este apartado se definen los valores necesarios que necesita el motor de cálculo de *Canalflowmodel*. De esta manera se establecen diferentes parámetros relacionados con el método numérico de resolución de las ecuaciones expuestas en en el Capítulo 4, que gobiernan el flujo de superficie libre 1D.

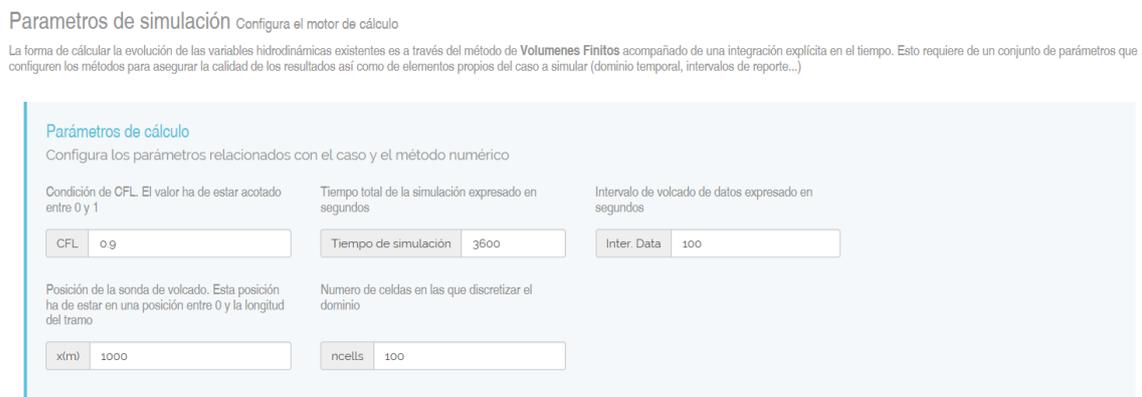


Figura 20: Menú en el que se definen los parámetros de cálculo de *Canalflowmodel*.

CFL será el parámetro que hace referencia al tamaño del paso temporal (Δt) que se utilizara en la resolución, según la expresión:

$$\Delta t = CFL_{min} \frac{\Delta x}{|V| + \sqrt{\frac{gA}{B}}} \quad (42)$$

Donde Δx será la distancia entre nodos de cálculo, V la velocidad del flujo a lo largo del cauce, g será el valor de la aceleración de la gravedad, A será el área mojada en cada una de las secciones transversales y B es la anchura en cada sección a la altura de calado. De manera predeterminada *Canalflowmodel* utiliza un valor de CFL de 0.9 que optimiza la velocidad de cálculo sin pérdida de precisión.

Los demás parámetros que condicionaran el cálculo de la simulación serán:

- Tiempo de simulación: como su propio nombre indica define el tiempo que simulará el flujo por el canal definido.
- $x(m)$: Establecerá el punto a lo largo del canal donde se colocará la sonda que en la fase de Post-proceso nos proporcionara datos precisos de la simulación en ese punto. En concreto nosotros estableceremos la sonda de medición en los puntos en los que se midió en la realidad, buscando así que coincidan los medidos con los simulados.
- $ncells$: Definirá el número de volúmenes finitos de igual longitud en los que se fraccionará el canal para la simulación, el valor de este parámetro se establece teniendo en cuenta la separación de las secciones definidas ya que si las celdas de cálculo fueran más grandes que esta separación podría omitirse alguna perdiendo precisión (en nuestro caso variara según la configuración de obstáculos).
- Inter.data: Establece la frecuencia temporal de volcado de resultados a fichero y por pantalla.

B.2. Fase II - Cálculo

Al pulsar el botón 'simular' da comienzo la Fase II. En esta fase se muestra una ventana con los datos del Pre-proceso (Fase I) y un ticket que será el código de la simulación de cada caso. Este código permite cargar cada caso cuando se considere necesario, ya sea para volver a lanzar una simulación reajustando algún parámetro, o para ser simulado y visualizado por otro usuario en cualquier otro ordenador.

Una vez se cambia de pantalla, *Canalflowmodel* va realizando la simulación mostrando por pantalla la evolución temporal del caudal en la entrada y en la salida del canal.

A su vez, también nos muestra de forma dinámica, y el error de conservación de masa que nos garantizará la precisión de los resultados obtenidos.



Figura 21: Pantalla de visualización del cálculo en CanalFowmodel. Evolución temporal de : caudal aguas arriba y aguas abajo (gráfico superior), paso de tiempo (inferior izquierda) y error de masa (inferior derecha).

Una vez se haya completado la simulación (barra superior completamente verde), habrá terminado la fase de Cálculo y se pasará a la siguiente fase.

B.3. Fase III - Post-proceso

En esta Fase se muestran los resultados obtenidos de la simulación, los cuales se componen de una serie de gráficas:

- Altura del calado a lo largo del canal en diferentes instantes de tiempo, en caso de que varíe con este. Se representa como un gráfico donde el eje horizontal será la longitud del canal y el eje vertical el nivel del agua. En el caso de que no se trate de un caso estacionario, para cambiar el instante de tiempo representado se introducirá el valor del tiempo que se desea visualizar en el cuadro que está arriba a la derecha de la pantalla.
- Valores del caudal a lo largo del canal en diferentes instantes de tiempo. Se representa de la misma manera que la altura de calado, donde se representa el

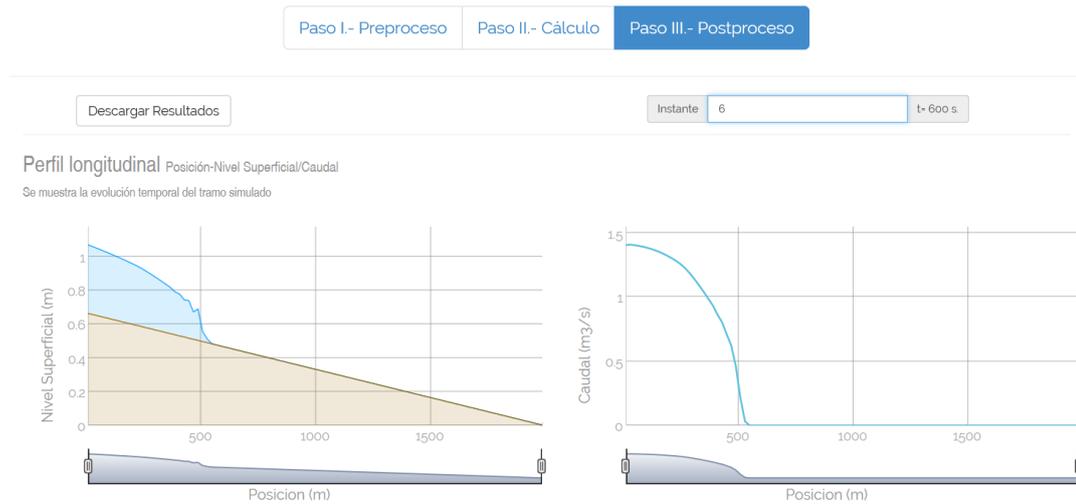


Figura 22: Pantalla de visualización de resultados del perfil longitudinal del nivel superficial (izquierda) y caudal (derecha) en un instante de tiempo dado.

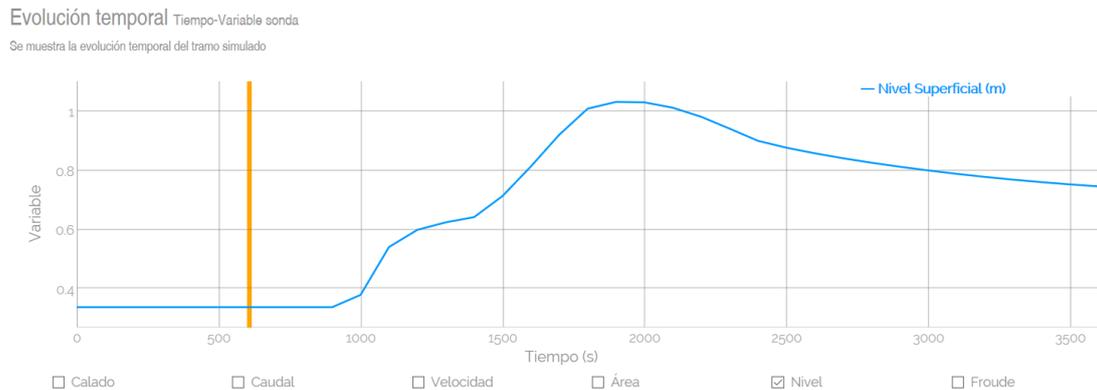


Figura 23: Pantalla de visualización de resultados de la evolución temporal de las variables que intervienen en el cálculo(calado, caudal, velocidad, área, nivel, número de Froude) en un punto del dominio determinado.

estado de la variable caudal en un determinado instante a lo largo de la longitud del canal.

No solamente se visualizan los datos en estos gráficos, sino que los resultados se pueden descargar en ficheros, de forma que pueden ser representados con otra herramienta, por ejemplo, Gnu-Plot. En nuestro caso, nos centraremos en el fichero que muestra los datos obtenidos por la sonda que se darán por buenos cuando coincidan estos con los medidos.

C. Sonda de medición de la velocidad del fluido

Para medir la velocidad se ha usado una sonda ADV de la marca SONTEK (ver Figura 24a y 24b)[12]. Es una sonda de medición de velocidades en 2D que capta simultáneamente las componentes (x , y) del vector velocidad, especialmente diseñada para poder medir cerca de superficies verticales (paredes del canal).

Esta sonda mide la velocidad del flujo gracias al efecto Doppler, es decir, en la compresión y descompresión (alta y baja frecuencia) de las ondas, según el movimiento relativo entre el emisor y el receptor. El proceso de medición comienza con la transmisión de una onda, proveniente del centro de la sonda, con una frecuencia determinada, es entonces cuando los propios brazos de la sonda, que apuntan hacia el volumen sobre el que se mide, reciben la onda reflejada con otra frecuencia que dependerá de la velocidad del flujo. De esta manera, sabiendo la frecuencia emitida y la frecuencia reflejada, se calculará el valor de la velocidad del flujo en direcciones x e y , cada una, medida por un brazo del dispositivo (ver Figura 24c). Esta misma marca dispone de modelos de esta misma sonda preparados para medir velocidades en 3D, pero dado que no era posible acercarse tanto a las paredes, y el flujo que se produce es estacionario sobre un canal recto, es más que suficiente una medida en dos dimensiones de la velocidad.

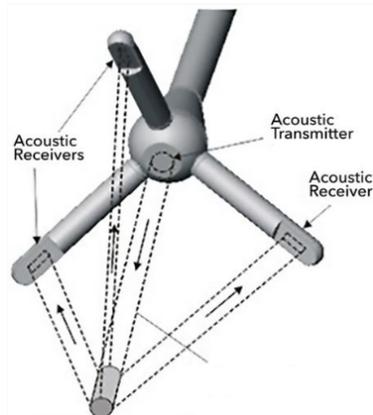
La tabla (7) representa diferentes características técnicas acerca de el método de medición de la sonda.

Tasa de muestreo	0.1 - 50 Hz
Tamaño celda de muestreo	0.09 cc
Distancia medidor-celda	5 cm
Error	1.5 cm/s
Rango de medida	0 - 250 cm/s

Tabla 7: Características técnicas de la sonda.



(a) Vista en planta de la sonda. (b) Vista del sensor de la sonda.



(c) Funcionamiento de la sonda.

Figura 24: Vistas y funcionamiento de la sonda ADV utilizada para medir las componentes (x,y) de la velocidad del flujo [12].

D. Caracterización del rozamiento en otras configuraciones

Como ya se ha explicado en el capítulo (2) se han medido y analizado dos configuraciones más de obstáculos en el canal. En estas geometrías se han seguido y utilizado exactamente los mismos criterios que se exponen en la memoria principal y fueron utilizados en el caso del canal sin obstáculos (Geometría 1). Es por ello que en algunos casos se exponen directamente los resultados obtenidos, y en otros, como en los parámetros de simulación de cada caso solo se expone que valor es necesario introducir.

D.1. Geometría 2 : Canal Recto con obstáculos cúbicos

En esta sección se expone todas las medidas, resultados, análisis y conclusiones relacionados con la Geometría 2. El orden será el mismo que el seguido en la memoria principal para la Geometría 1.

D.1.1. Análisis de los datos medidos en el laboratorio

En las tablas (8),(9),(10),(11),(12),(13) y (14) se exponen las diferentes velocidades y alturas de calado medidas en el laboratorio para la Geometría 2. Para ayudar al lector a visualizar los perfiles de velocidad medidos, en el Anexo E se adjuntan para este caso las Figuras 38,39 y 40 que representan de una forma gráfica estos perfiles de velocidad según el punto y el material con el que fueron medidos.

Metacrilato (Gris) De la misma manera que en el canal recto sin obstáculos, el metacrilato presenta un perfil de velocidades normal, excepto en los puntos en los que acaban de manera brusca los obstáculos produciendo zonas de turbulencia y remansos. Estas zonas provocan que las medidas tomadas por la sonda sean bastante dispares y sin sentido. Se puede observar que este comportamiento anormal aumenta a medida que aumenta el canal, hasta el punto de que con Q3 se producen anomalías hasta en el punto 5, donde con caudales más bajos había un comportamiento normal. La diferencia de calados de unos puntos a otros es mucho más acentuada que en el caso de la Geometría 1 debido a que en este caso hay obstáculos que condicionan de manera importante esta altura de agua.

Césped (Césped) El comportamiento de desaceleración característica del césped a lo largo del todo el experimento, en esta configuración de obstáculos desaparece

un poco. En cambio, parece que la alta rugosidad relativa provoca que el mismo comportamiento anormal que se da en el metacrilato se ensalce provocando comportamiento más dispares, si cabe, que en el metacrilato y en más puntos. Al igual que pasa en el metacrilato, el efecto de la turbulencia se hace más notable a medida que aumenta el caudal. Como es normal, este material presenta los valores de velocidad más bajos debido a que este produce un mayor rozamiento que los otros materiales. La disposición de los obstáculos produce que la variación de calado a lo largo del canal sea mucho más acentuada que en los otros casos.

Malla (Azul) El flujo sobre este material se comporta de manera análoga a como lo hace en el metacrilato, presentando perfiles de velocidad normales a lo largo del canal, excepto en los puntos conflictivos donde se producen turbulencias y remansos.

Q	Material	z(mm)	Velocidad	h
Q1	Metacrilato	0.9	15.620	4
		1.7	17.790	
		2.5	18.039	
	Césped	0.9	7.362	4.5
		1.7	15.579	
		2.5	19.048	
	Malla	0.9	12.899	4
		1.7	6.145	
		2.5	13.959	
Q2	Metacrilato	0.9	22.751	5.5
		1.7	24.933	
		2.5	26.249	
	Césped	0.9	18.248	6.3
		1.7	23.629	
		2.5	27.498	
	Malla	0.9	20.244	5.5
		1.7	25.550	
		2.5	26.789	
Q3	Metacrilato	0.9	26.863	6.6
		1.7	28.538	
		2.5	29.447	
	Césped	0.9	20.630	8
		1.7	27.027	
		2.5	31.390	
		3.7	33.904	
		4.5	34.371	
	Malla	0.9	26.139	6.8
		1.7	29.288	
		2.5	32.318	
		3.7	33.109	

Tabla 8: Velocidades (cm/s) y calados (cm) medidos en P1 en el caso de la Geometría 2.

Q	Material	z(mm)	Velocidad	h
Q1	Metacrilato	0.9	28.919	2.8
		1.7	29.687	
		2.5	30.904	
	Césped	0.9	4.844	4.1
		1.7	28.683	
		2.5	29.981	
	Malla	0.9	20.728	3.5
		1.7	22.752	
		2.5	25.810	
Q2	Metacrilato	0.9	41.198	4
		1.7	42.106	
		2.5	43.579	
	Césped	0.9	34.913	5.6
		1.7	38.627	
		2.5	40.507	
	Malla	9	32.297	4.8
		1.7	38.906	
		2.5	41.134	
Q3	Metacrilato	0.9	52.115	4.9
		1.7	53.846	
		2.5	55.003	
		3.7	56.568	
	Césped	0.9	42.712	6.9
		1.7	45.468	
		2.5	46.619	
		3.7	48.158	
	Malla	4.5	47.393	4.8
		0.9	42.676	
		1.7	46.592	
		2.5	48.623	
		3.7	48.940	

Tabla 9: Velocidades (cm/s) y calados (cm) medidos en P2 en el caso de la Geometría 2.

Q	Material	z(cm)	Velocidad	h
Q1	Metacrilato	0.9	26.640	3.6
		1.7	28.393	
		2.5	28.518	
	Césped	0.9	0.314	4.1
		1.7	29.637	
		2.5	36.133	
	Malla	0.9	16.948	3.6
		1.7	27.436	
		2.5	30.075	
Q2	Metacrilato	0.9	38.650	4.5
		1.7	41.465	
		2.5	42.841	
	Césped	0.9	10.520	5.4
		1.7	35.926	
		2.5	43.248	
	Malla	0.9	10.162	4.8
		1.7	33.698	
		2.5	42.269	
Q3	Metacrilato	0.9	48.045	5.8
		1.7	49.770	
		2.5	50.203	
		3.7	51.742	
	Césped	0.9	10.431	6.8
		1.7	49.773	
		2.5	-33.412	
		3.7	-31.782	
		4.5	-30.849	
	Malla	0.9	34.191	5.8
		1.7	45.748	
		2.5	49.750	
3.7		51.276		

Tabla 10: Velocidades (cm/s) y calados (cm) medidos en P3 en el caso de la Geometría 2.

Q	Material	z(cm)	Velocidad	h
Q2	Metacrilato	0.9	25.227	3.6
		1.7	26.625	
		2.5	27.492	
	Césped	0.9	8.057	4.1
		1.7	31.479	
		2.5	34.591	
	Malla	0.9	15.148	3.6
		1.7	25.459	
		2.5	27.055	
Q2	Metacrilato	0.9	40.793	4.8
		1.7	42.200	
		2.5	42.666	
	Césped	0.9	28.963	5.4
		1.7	40.619	
		2.5	45.536	
	Malla	0.9	33.936	4.8
		1.7	40.183	
		2.5	42.391	
Q3	Metacrilato	0.9	46.039	5.8
		1.7	48.096	
		2.5	22.671	
	Césped	0.9	10.630	6.8
		1.7	45.325	
		2.5	55.050	
		3.7	57.792	
	Malla	0.9	39.702	5.8
		1.7	46.519	
		2.5	49.072	
		3.7	49.522	

Tabla 11: Velocidades (cm/s) y calados (cm) medidos en P4 en el caso de la Geometría 2.

Q	Material	z(cm)	Velocidad	h
Q1	Metacrilato	0.9	35.825	2.7
		1.7	37.618	
		2.5	37.048	
	Césped	0.9	11.464	3.6
		1.7	44.176	
		2.5	42.556	
	Malla	0.9	35.602	3.4
		1.7	38.074	
		2.5	36.268	
Q2	Metacrilato	0.9	36.216	3.5
		1.7	34.677	
		2.5	32.525	
	Césped	0.9	0.015	4.8
		1.7	29.855	
		2.5	58.628	
	Malla	0.9	54.164	4.3
		1.7	58.003	
		2.5	59.479	
Q3	Metacrilato	0.9	-18.350	3.9
		1.7	-16.747	
		2.5	-16.651	
		3.7	-17.691	
	Césped	0.9	17.988	5.9
		1.7	-20.445	
		2.5	-18.211	
		3.7	9.746	
		4.5	-33.791	
	Malla	0.9	-20.642	4.8
		1.7	-18.267	
		2.5	-17.469	
3.7		-21.969		

Tabla 12: Velocidades (cm/s) y calados (cm) medidos en P5 en el caso de la Geometría 2.

Q	Material	z(cm)	Velocidad	h
Q1	Metacrilato	0.9	32.746	3.4
		1.7	31.112	
		2.5	31.167	
	Césped	0.9	1.217	3.6
		1.7	9.664	
		2.5	8.797	
	Malla	0.9	29.035	3.4
		1.7	31.150	
		2.5	27.714	
Q2	Metacrilato	0.9	48.805	4.1
		1.7	45.227	
		2.5	43.045	
	Césped	0.9	7.543	4.2
		1.7	18.564	
		2.5	16.142	
	Malla	0.9	44.658	4.2
		1.7	53.345	
		2.5	54.732	
Q3	Metacrilato	0.9	64.490	4.6
		1.7	63.450	
		2.5	61.530	
		3.7	49.735	
	Césped	0.9	13.910	5
		1.7	24.384	
		2.5	25.730	
		3.7	15.279	
		4.5	20.423	
	Malla	0.9	50.291	4.7
		1.7	60.169	
		2.5	67.103	
3.7		67.277		

Tabla 13: Velocidades (cm/s) y calados (cm) medidos en P6 en el caso de la Geometría 2.

Q	Material	z(cm)	Velocidad	h
Q1	Metacrilato	0.9	2.404	3.4
		1.7	-3.343	
		2.5	-1.521	
	Césped	0.9	0.005	3.6
		1.7	37.661	
		2.5	39.892	
	Malla	0.9	2.999	3.4
		1.7	1.090	
		2.5	0.146	
Q2	Metacrilato	0.9	-52.465	4.1
		1.7	-52.516	
		2.5	-56.099	
	Césped	0.9	0.298	4.2
		1.7	-39.166	
		2.5	55.072	
	Malla	0.9	7.572	4.2
		1.7	2.754	
		2.5	-1.238	
Q3	Metacrilato	0.9	7.433	4.6
		1.7	2.160	
		2.5	-4.207	
		3.7	-2.585	
	Césped	0.9	0.232	0.050
		1.7	-33.691	
		2.5	-19.667	
		3.7	-19.288	
	Malla	4.5	-17.624	4.7
		0.9	4.421	
		1.7	2.622	
		2.5	-1.784	
		3.7	-0.213	

Tabla 14: Velocidades (cm/s) y calados (cm) medidos en P7 en el caso de la Geometría 2.

D.1.2. Valores promedio de la velocidad según los perfiles medidos

Al existir 7 puntos de medición, tenemos 7 tablas con los respectivos resultados de cada uno de estos puntos de medición, estas se encuentran a continuación en orden numérico. Las variaciones del valor medio de la velocidad entre puntos se deben a su posición relativa en el canal, ya que aquellos puntos que se encuentran a la misma altura de los obstáculos (entre obstáculo y pared del canal), al producirse en ellos una gran disminución de la sección la velocidad del fluido será mayor que en aquellos puntos donde se dispone de todo el canal para el flujo del agua. En las tablas a continuación expuestas, aparecen los diferentes valores medios de velocidad obtenidos según los diferentes criterios.

Q	Material	V. referencia	V.criterio 1	V.criterio 2
Q1	Césped	12.747	15.727	14.280
	Malla	14.540	11.194	12.043
	Metacrilato	14.504	17.200	17.201
Q2	Césped	18.256	27.473	23.674
	Malla	20.930	26.483	25.072
	Metacrilato	20.892	25.839	25.239
Q3	Césped	21.756	32.523	29.672
	Malla	26.029	31.871	31.174
	Metacrilato	26.068	29.636	28.834

Tabla 15: Velocidades medias (cm/s) obtenidas según los diferentes criterios de cálculo, comparadas con la velocidad de referencia (cm/s) en P1 para la Geometría 2.

Q	Material	V. referencia	V.criterio 1	V.criterio 2
Q1	Césped	30.458	29.496	23.591
	Malla	24.384	22.604	23.268
	Metacrilato	30.458	29.496	23.591
Q2	Césped	30.728	40.045	35.865
	Malla	36.169	40.999	39.182
	Metacrilato	42.761	42.787	42.527
Q3	Césped	37.742	46.656	43.192
	Malla	47.348	47.334	47.078
	Metacrilato	53.474	54.754	54.611

Tabla 16: Velocidades medias (cm/s) obtenidas según los diferentes criterios de cálculo, comparadas con la velocidad de referencia (cm/s) en P2 para la Geometría 2.

Q	Material	V. referencia	V.criterio 1	V.criterio 2
Q1	Césped	14.046	24.494	23.532
	Malla	16.256	25.804	24.689
	Metacrilato	16.165	27.681	27.809
Q2	Césped	21.394	40.559	33.329
	Malla	24.013	35.405	32.187
	Metacrilato	25.835	42.871	41.380
Q3	Césped	25.606	-7.168	-14.706
	Malla	30.037	55.983	46.405
	Metacrilato	29.728	50.836	50.386

Tabla 17: Velocidades medias (cm/s) obtenidas según los diferentes criterios de cálculo, comparadas con la velocidad de referencia (cm/s) en P3 para la Geometría 2.

Q	Material	V. referencia	V.criterio 1	V.criterio 2
Q1	Césped	14.046	26.125	24.637
	Malla	16.256	23.447	22.349
	Metacrilato	16.165	26.577	26.476
Q2	Césped	21.394	49.234	48.785
	Malla	24.013	42.585	39.745
	Metacrilato	23.913	44.998	42.087
Q3	Césped	25.606	53.643	46.090
	Malla	30.037	48.483	46.820
	Metacrilato	29.728	38.936	31.356

Tabla 18: Velocidades medias (cm/s) obtenidas según los diferentes criterios de cálculo, comparadas con la velocidad de referencia (cm/s) en P4 para la Geometría 2.

Q	Material	V. referencia	V.criterio 1	V.criterio 2
Q1	Césped	23.717	30.586	30.301
	Malla	25.456	36.516	36.438
	Metacrilato	32.150	36.328	36.628
Q2	Césped	36.094	44.242	47.748
	Malla	39.911	57.780	57.620
	Metacrilato	50.032	34.886	34.404
Q3	Césped	44.138	-8.943	-12.077
	Malla	54.538	-19.685	-20.046
	Metacrilato	66.433	-17.486	-17.452

Tabla 19: Velocidades medias (cm/s) obtenidas según los diferentes criterios de cálculo, comparadas con la velocidad de referencia (cm/s) en P5 para la Geometría 2.

Q	Material	V. referencia	V.criterio 1	V.criterio 2
Q1	Césped	15.855	6.560	6.121
	Malla	16.823	29.300	29.013
	Metacrilato	17.021	31.675	31.758
Q2	Césped	27.042	5.401	20.786
	Malla	27.362	51.719	51.374
	Metacrilato	28.229	44.433	45.298
Q3	Césped	34.310	19.946	18.034
	Malla	36.939	60.810	61.332
	Metacrilato	37.742	59.277	58.855

Tabla 20: Velocidades medias (cm/s) obtenidas según los diferentes criterios de cálculo, comparadas con la velocidad de referencia (cm/s) en P6 para la Geometría 2.

Q	Material	V. referencia	V.criterio 1	V.criterio 2
Q1	Césped	15.855	25.521	24.982
	Malla	16.823	1.412	1.444
	Metacrilato	17.021	-0.820	-0.449
Q2	Césped	27.042	5.401	20.786
	Malla	27.362	3.030	2.225
	Metacrilato	28.229	-54.489	-54.248
Q3	Césped	34.310	-18.008	-16.33
	Malla	36.939	1.261	1.217
	Metacrilato	37.742	0.700	0.719

Tabla 21: Velocidades medias (cm/s) obtenidas según los diferentes criterios de cálculo, comparadas con la velocidad de referencia (cm/s) en P7 para la Geometría 2.

Se observa que el Criterio 2 obtiene valores medios más cercanos a la velocidad esperada que el Criterio 1. En algunos puntos donde se produce reflujos o turbulencias (P5,P6 Y P7) donde las velocidades medidas son un tanto anómalas se han obtenido velocidades medias que obviamente no corresponden con la esperada debido a las medidas tomadas.

D.1.3. Valores del coeficiente de rozamiento de Manning obtenidos según criterios teóricos

En este caso no ha podido aplicarse la ecuación de variación de la altura de agua a lo largo del canal, ya que no tenemos medidas de calado en secciones contiguas de igual anchura, es decir, que la variación en la anchura de la sección de paso del agua debido a los obstáculos producen una variación extra del calado independiente del rozamiento. Es por ello que en esta Geometría solo va a ser posible aplicar el modelo de Darcy (A.1) para obtener un coeficiente de rozamiento de Manning de manera teórica.

Caudal	Material	Manning
Caudal 1	Césped	0.0166
	Malla	0.0105
	Metacrilato	0.0069
Caudal 2	Césped	0.0163
	Malla	0.0106
	Metacrilato	0.0070
Caudal 3	Césped	0.0161
	Malla	0.0106
	Metacrilato	0.0071

Tabla 22: Coeficientes de Manning obtenidos teóricamente a partir de los datos medidos en la Geometría 2.

Como se esperaba el césped posee el mayor coeficiente de rozamiento de los 3, mientras que el metacrilato al ser el más liso, el menor. Estos valores son muy parecidos a los obtenidos en el caso de la Geometría 1, teóricamente este coeficiente depende en gran medida de la rugosidad relativa y al ser la misma las variaciones de velocidad y calado no lo hacen variar apenas de una Geometría a otra.

D.1.4. Elaboración de datos de partida para realizar la simulación

En esta sección solamente se explica que datos se han introducido en este caso, solamente lo relacionado con la geometría del canal y de los parámetros de simulación ya que son estos los únicos parámetros que varían de la Geometría 1 expuesta en la memoria a la Geometría 2.

Geometría Introducir de una manera que el simulador entienda correctamente los obstáculos dispuesto va a acarrear la necesidad de usar un número mayor de secciones que en el caso anterior. En este caso vamos a utilizar un total de 10 secciones, las cuales se acumularan de dos en dos, excepto la inicial y la final, en los puntos donde empiezan y acaban los dos obstáculos cúbicos. Esta disposición de las secciones se debe

a que el simulador tiene que ver que la sección varía radicalmente en esos puntos, esto conlleva que al final, habrá que variar el número de celdas de manera que su tamaño sea menor que la separación entre las secciones para que a la hora del cálculo el simulador entienda correctamente donde se encuentra el principio y el final de cada obstáculo. La distribución de las secciones puede verse gráficamente en la Figura 25.

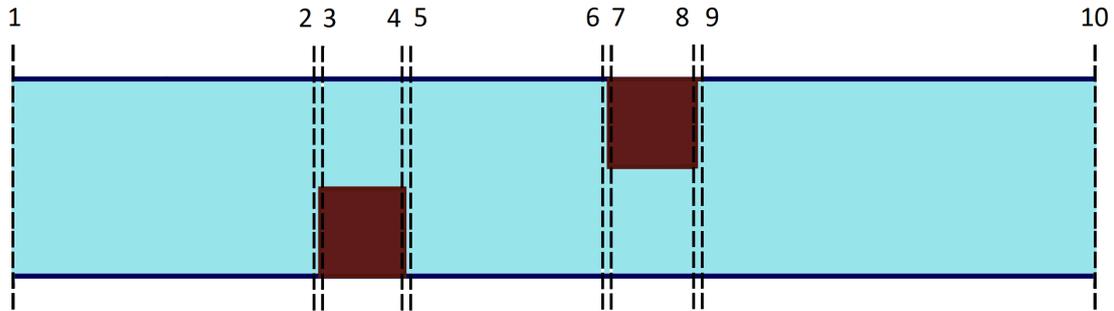


Figura 25: Secciones definidas en la Geometría 2

Parámetros de simulación Como la distancia entre las secciones que definen el principio y el final de los obstáculos es de $3mm$ ha de ajustarse un parámetro más que en el caso del canal Recto.

- Tiempo de simulación: Impondremos un valor de 1000 segundos de simulación, el mismo para el que hemos definido el valor final tanto del caudal como de la altura de calado a la salida
- Posición de la sonda $x(m)$: En este caso al existir más de un punto donde se realizaron las mediciones, dispondremos la sonda de recogida de datos en el primer punto $X1$, donde una vez los resultados de la simulación concuerden con los datos medidos, daremos por buena la simulación y compararemos (poniendo la sonda) los resultados de simulación del resto de puntos con los medidos. El valor de x de este primer punto es $2,375m$
- $ncell$: La longitud del canal son $6000mm$ ($6m$), y como ya se ha explicado, la longitud máxima de celda de cálculo puede ser $3mm$ necesitamos como mínimo dividir el canal en 2000 celdas.

Al dividir el canal en un número tan alto de celdas, provoca el disparo del tiempo de simulación, una mejora en el futuro sería poder implementar la opción en el programa de dividir el canal más finamente por zonas mallando así solamente con más celdas en las zonas donde sea necesario sin aumentar en gran medida el tiempo de cálculo.

D.1.5. Resultado de las simulaciones

En esta sección se exponen tanto los resultados numéricos como gráficos obtenidos en la fase de Post-proceso de la simulación de la Geometría 2.

Coefficientes de rozamiento de Manning utilizados en cada material En la tabla a continuación se exponen tanto los coeficientes utilizados en las simulaciones para reproducir los datos medidos en el laboratorio, como la velocidad y la altura de calado que se obtenían como resultado introduciendo este coeficiente. Junto a ellos se muestran los datos obtenidos a partir de las mediciones en el canal cómo el coeficiente de Manning (nm), velocidad (Vm) y calado (hm), para poder comparar a simple vista unos con otros. En las simulaciones se buscaba obtener como resultado la altura de calado medida en el laboratorio, por eso el valor obtenido en la simulación y el medido coinciden.

Material	Q	n	V	h	nm	Vm	hm
Metacrilato	Q1	0.0290	14.470	4	0.0069	17.201	4
	Q2	0.0235	20.886	5.5	0.070	25.239	5.5
	Q3	0.0197	26.061	6.6	0.0071	28.834	6.6
Césped	Q1	0.0397	12.750	4.5	0.166	14.280	4.5
	Q2	0.0372	18.243	0.063	0.0163	23.674	6.3
	Q3	0.0362	21.751	8	0.0161	29.672	8
Malla	Q1	0.0287	14.527	4	0.0105	12.043	4
	Q2	0.0259	20.926	5.5	0.0106	25.072	5.5
	Q3	0.0235	26.028	6.8	0.0106	31.174	6.8

Tabla 23: Datos obtenidos como resultado den las simulaciones de altura y velocidad junto con los medidos en el canal.

De manera análoga a la Geometría 1 puede observarse que el coeficiente de Manning necesario para replicar el flujo medido va decreciendo gradualmente con el aumento del valor del caudal, con los que se prevé que la influencia sobre el coeficiente de rozamiento del caudal circulante decrezca a medida que aumenta su valor.

La velocidad media obtenida en el simulador es la ideal ya que este trabaja con un modelo de flujo 1D, siendo la más cercana a esta la velocidad media obtenida experimentalmente a partir del criterio (3.2).

Comparación de los Coeficientes de rozamiento usados en la simulación frente a los calculados teóricamente En las Figuras 26,27 y 28 se puede presentar gráficamente la variación del coeficiente de rozamiento utilizado en las simulaciones frente al calculado con un modelo teórico. En general las observaciones que se pueden hacer de la evolución de estos son análogas a las descritas en el caso de la Geometría 1 en la memoria principal.

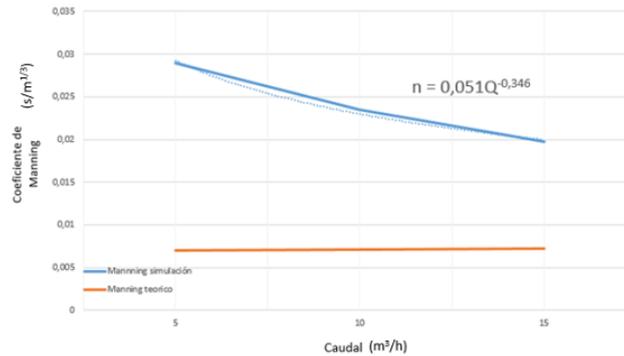


Figura 26: Comparación del coeficiente de Manning en el caso del metacrilato (Geometría 2).

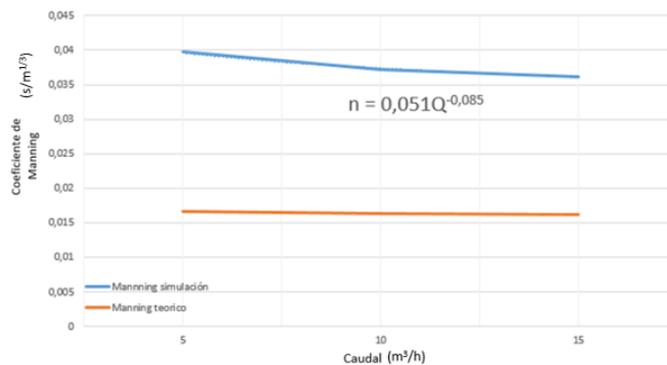


Figura 27: Comparación del coeficiente de Manning en el caso del césped (Geometría 2).

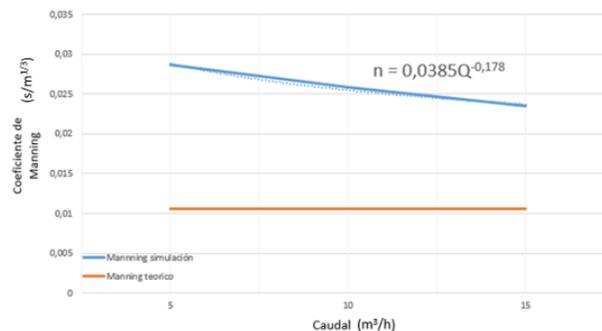


Figura 28: Comparación del coeficiente de Manning en el caso del malla (Geometría 2).

En todos los materiales pueden se observa la tendencia del coeficiente de Manning de las simulaciones a disminuir con el aumento del canal. Para todos ellos se ha aproximado esta tendencia a una función exponencial, donde al aumentar el valor del caudal Q el valor del Manning tenderá a descender hasta que alcance el valor obtenido teóricamente, tomándose este como válido en caudales superiores.

Como diferencia con la Geometría 1, resalta que la variación con el caudal no es tan acentuada debido , a que los obstáculos perturban tanto el flujo que no permiten que el coeficiente de rozamiento baje tanto como lo hacía en otros casos. Para saber si es culpa de la geometría que la altura de agua varíe menos, o la geometría influye en gran medida en el valor del rozamiento se debería acudir a un estudio con un modelo 2D. Con el modelo 1D que se usa en este proyecto, el aumento de la altura de agua se le atribuye solamente al Coeficiente de Manning, no a la geometría del canal.

Comparación del coeficiente (f) de los 3 materiales con el número de Reynolds. De la misma forma que en el caso de la Geometría 1 se realiza una parte de análisis adimensional. En este análisis se compara el coeficiente de Darcy (f) equivalente al Manning utilizado en las simulaciones con el número de Reynolds asociado a los resultados de estas.

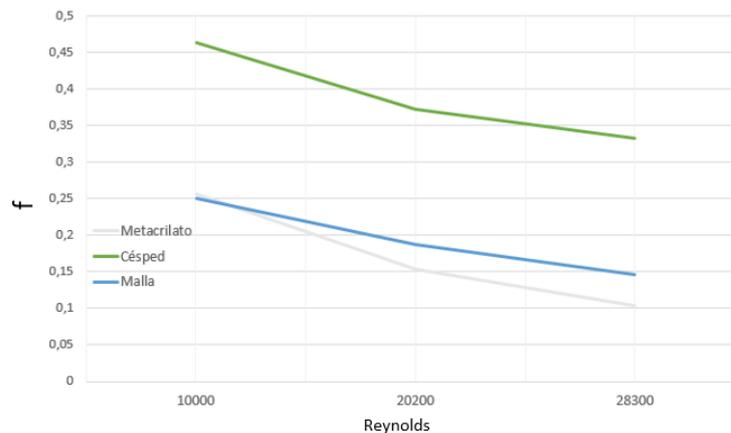


Figura 29: Comparación del coeficiente (f) de los 3 materiales con el número de Reynolds.

En la Figura 29 se puede observar como de la misma manera que pasaba con el coeficiente de Manning, f va disminuyendo a medida que aumenta el valor del número de Reynolds (y con ello el caudal). Aunque ha de resaltarse que los valores de f son mayores que en el caso de la Geometría 1 dando a entender una geometría de obstáculos más abrupta provoca un aumento en el rozamiento.

D.2. Geometría 3 : Canal Recto con obstáculo suave

En esta sección se expone todas las medidas, resultados, análisis y conclusiones relacionados con la Geometría 3. El orden será el mismo que el seguido en la memoria principal para la Geometría 1.

D.2.1. Análisis de los datos medidos en el laboratorio

En las tablas (24),(25),(26) y (27) se exponen las diferentes velocidades y alturas de calado medidas en el laboratorio para la Geometría 3. Para ayudar al lector a visualizar los perfiles de velocidad medidos, en el Anexo E se adjuntan para este caso las Figuras 41,42 y 43 que representan de una forma gráfica estos perfiles de velocidad según el punto y el material con el que fueron medidos.

Metacrilato (Gris) El flujo sobre el metacrilato se comporta de la forma esperada, es un material con poca rugosidad relativa que no provoca comportamientos anormales en la corriente de agua, ni siquiera en el punto de medición 3 y 4 donde podrían producirse turbulencias en el flujo debido al obstáculo.

Césped (Verde) Como siempre el césped es el material que más afecta al flujo, en el que se puede observar el comportamiento característico del flujo en este material, donde en laminas de agua cercanas a la superficie de contacto la velocidad es prácticamente 0, acelerándose de manera sustancial a medida que nos acercamos a la superficie libre. Donde ocurre esto de manera más exagerada es en el punto 4, cuando el fluido recupera la sección máxima por la que discurrir y donde se producen efectos como turbulencias, remansos o efectos de separación de capa limite, pero pudiéndose observar que a medida aumenta el caudal este efecto se produce en menos puntos dando a entender que a medida que aumenta el caudal el rozamiento tiene una menor influencia. Como el valor de la rugosidad es el más alto de los 3 materiales, el césped presenta de manera general los valores de velocidad más bajos en todos los caudales medidos.

Malla El comportamiento del agua sobre la malla es análogo al del metacrilato, aunque este material presenta en general valores de velocidad un poco más bajos los cuales se pueden suponer que son debido a un mayor rozamiento al no ser tan liso como el metacrilato. El único punto a destacar es el perfil de velocidades en el punto 4 donde los efectos que provoca tanto el recuperar la sección completa del canal como el estar cerca del obstáculo, hacen que los valores de velocidad se comporten de manera extraña, llegando, incluso, a tener la forma opuesta a un perfil de velocidades teórico.

Q	Material	z(cm)	Velocidad	h
Q1	Metacrilato	0.9	15.894	3.7
		1.7	16.740	
		2.5	18.425	
	Césped	0.9	0.024	4.2
		1.7	9.744	
		2.5	19.933	
	Malla	0.9	12.450	3.8
		1.7	14.838	
		2.5	16.613	
Q2	Metacrilato	0.9	24.113	4.8
		1.7	25.519	
		2.5	27.078	
	Césped	0.9	12.746	5.7
		1.7	24.050	
		2.5	30.480	
	Malla	0.9	19.671	5
		1.7	26.436	
		2.5	27.804	
Q3	Metacrilato	0.9	33.588	5.8
		1.7	34.807	
		2.5	36.659	
	Césped	0.9	21.959	7.1
		1.7	31.172	
		2.5	35.345	
		3.7	38.980	
	Malla	0.9	24.768	6.1
		1.7	34.093	
2.5		36.123		

Tabla 24: Velocidades (cm/s) y calados (cm) medidos en P1 en el caso de la Geometría 3.

Q	Material	z(cm)	Velocidad	h
Q1	Metacrilato	0.9	25.865	3.6
		1.7	27.039	
		2.5	27.768	
	Césped	0.9	27.410	3.8
		1.7	29.505	
		2.5	32.028	
	Malla	0.9	23.203	3.6
		1.7	24.514	
		2.5	21.810	
Q2	Metacrilato	0.9	42.466	4.4
		1.7	43.343	
		2.5	44.113	
	Césped	0.9	40.037	5.1
		1.7	42.747	
		2.5	45.513	
	Malla	0.9	42.903	4.6
		1.7	45.016	
		2.5	46.353	
Q3	Metacrilato	0.9	55.846	4.8
		1.7	57.657	
		2.5	58.752	
		3.7	59.326	
	Césped	0.9	49.043	7.1
		1.7	52.052	
		2.5	52.922	
		3.7	55.136	
	Malla	0.9	53.650	6.1
		1.7	56.834	
		2.5	58.958	

Tabla 25: Velocidades (cm/s) y calados (cm) medidos en P2 en el caso de la Geometría 3.

Q	Material	z(cm)	Velocidad	h
Q1	Metacrilato	0.9	19.578	3.5
		1.7	22.944	
		2.5	23.900	
	Césped	0.9	1.391	3.5
		1.7	26.565	
		2.5	34.3826	
	Malla	0.9	18.377	3.5
		1.7	22.611	
		2.5	25.566	
Q2	Metacrilato	0.9	34.103	4.5
		1.7	36.177	
		2.5	37.312	
	Césped	0.9	16.850	4.7
		1.7	42.283	
		2.5	52.351	
	Malla	0.9	30.807	4.4
		1.7	38.422	
		2.5	43.911	
Q3	Metacrilato	0.9	45.503	5
		1.7	47.198	
		2.5	49.037	
		3.7	47.810	
	Césped	0.9	1.300	5.3
		1.7	44.852	
		2.5	65.209	
		3.7	68.290	
	Malla	0.9	40.765	5.1
		1.7	52.444	
		2.5	56.224	

Tabla 26: Velocidades (cm/s) y calados (cm) medidos en P3 en el caso de la Geometría 3.

Q	Material	z(cm)	Velocidad	h
Q1	Metacrilato	0.9	19.637	3.5
		1.7	22.228	
		2.5	23.074	
	Césped	0.9	0.004	3.5
		1.7	0.775	
		2.5	30.095	
	Malla	0.9	5.475	3.5
		1.7	4.932	
		2.5	2.732	
Q2	Metacrilato	0.9	31.248	4.5
		1.7	35.186	
		2.5	36.407	
	Césped	0.9	1.137	4.7
		1.7	33.063	
		2.5	51.729	
	Malla	0.9	19.151	4.4
		1.7	20.454	
		2.5	18.002	
Q3	Metacrilato	0.9	43.606	5
		1.7	47.639	
		2.5	49.213	
		3.7	50.182	
	Césped	0.9	0.328	5.3
		1.7	6.829	
		2.5	48.173	
	Malla	0.9	19.682	5.1
		1.7	18.203	
2.5		15.514		

Tabla 27: Velocidades (cm/s) y calados (cm) medidos en P4 en el caso de la Geometría 3.

D.2.2. Valores promedio de la velocidad según los perfiles medidos

En la Geometría 3 existe más de un punto de medición de alturas y velocidad, en este caso tenemos 4 puntos de medición. Como en este caso también se produce una disminución de la sección de paso del agua haciendo que en estos puntos, si el caudal es constante, el fluido se acelera aumentando así la velocidad del fluido provocando a la vez una bajada de la altura de calado. En las tablas a continuación expuestas, aparecen los diferentes valores medios de velocidad obtenidos según los diferentes criterios.

Q	Material	V. referencia	V.criterio 1	V.criterio 2
Q1	Césped	13.845	15.178	11.789
	Malla	15.070	15.206	14.834
	Metacrilato	15.812	17.226	17.158
Q2	Césped	20.377	29.923	24.394
	Malla	23.148	26.661	25.471
	Metacrilato	24.113	26.867	26.016
Q3	Césped	24.452	36.481	32.926
	Malla	28.649	36.686	33.419
	Metacrilato	30.141	37.234	35.709

Tabla 28: Velocidades medias (cm/s) obtenidas según los diferentes criterios de cálculo, comparadas con la velocidad de referencia (cm/s) en P1 para la Geometría 3.

Q	Material	V. referencia	V.criterio 1	V.criterio 2
Q1	Césped	26.385	30.167	26.250
	Malla	27.750	23.674	22.922
	Metacrilato	27.867	26.716	26.909
Q2	Césped	39.212	45.608	39.713
	Malla	43.369	45.288	45.139
	Metacrilato	45.507	43.801	43.481
Q3	Césped	50.020	53.873	48.897
	Malla	58.934	59.216	57.255
	Metacrilato	62.329	57.857	57.979

Tabla 29: Velocidades medias (cm/s) obtenidas según los diferentes criterios de cálculo, comparadas con la velocidad de referencia (cm/s) en P2 para la Geometría 3.

Q	Material	V. referencia	V.criterio 1	V.criterio 2
Q1	Césped	16.348	20.309	20.304
	Malla	16.440	22.455	22.240
	Metacrilato	16.394	22.316	22.092
Q2	Césped	24.626	43.654	39.026
	Malla	26.245	40.834	39.053
	Metacrilato	25.720	36.307	36.183
Q3	Césped	32.511	49.673	47.772
	Malla	34.175	52.927	51.673
	Metacrilato	34.862	47.440	47.356

Tabla 30: Velocidades medias (cm/s) obtenidas según los diferentes criterios de cálculo, comparadas con la velocidad de referencia (cm/s) en P3 para la Geometría 3.

Q	Material	V. referencia	V.criterio 1	V.criterio 2
Q1	Césped	16.348	10.292	12.419
	Malla	16.440	4.277	4.246
	Metacrilato	16.394	21.295	21.617
Q2	Césped	24.626	37.771	34.438
	Malla	26.245	18.840	18.785
	Metacrilato	25.720	35.006	34.700
Q3	Césped	32.511	18.444	30.301
	Malla	34.175	28.845	17.005
	Metacrilato	34.862	47.786	47.863

Tabla 31: Velocidades medias (cm/s) obtenidas según los diferentes criterios de cálculo, comparadas con la velocidad de referencia (cm/s) en P4 para la Geometría 3.

Se observa que el Criterio 2 obtiene valores medios más cercanos a la velocidad esperada que el Criterio 1. En algunos puntos donde se produce reflujos o turbulencias (P5, P6 Y P7) donde las velocidades medidas son un tanto anómalas se han obtenido velocidades medias que obviamente no corresponden con la esperada debido a las medidas tomadas.

D.2.3. Valores del coeficiente de Manning obtenidos según criterios teóricos

En este caso no ha podido aplicarse la ecuación de variación de la altura de agua a lo largo del canal debido a que no tenemos medidas de calado en secciones contiguas de igual anchura, es decir que hay variación en la anchura de la sección de paso del agua debido a los obstáculos presentes que producen una variación extra del calado que no depende del rozamiento. Es por ello que en esta Geometría solo va a ser posible aplicar el modelo de Darcy (A.1) para obtener un coeficiente de rozamiento de Manning de manera teórica.

Q	Material	Manning
Q1	Césped	0.0167
	Malla	0.0105
	Metacrilato	0.0069
Q2	Césped	0.0164
	Malla	0.0106
	Metacrilato	0.0070
Q3	Césped	0.0162
	Malla	0.0106
	Metacrilato	0.0071

Tabla 32: Coeficientes de Manning obtenidos teóricamente a partir de los datos medidos en la Geometría 3.

El césped vuelve a presentar el coeficiente de Manning más alto de los 3 materiales con valores muy parecidos a los pasados casos, debido a que este coeficiente depende en gran medida de la rugosidad relativa siendo esta la misma al no variar los materiales.

D.2.4. Elaboración de datos de partida para realizar la simulación

Solamente se exponen los datos que varían a los definidos en la memoria en el caso de la Geometría 1, siendo solamente lo relacionado con la geometría del canal y de los parámetros de simulación.

Geometría El obstáculo suave propio de esta configuración del canal, tiene el problema de que no produce un estrechamiento repentino del canal (como sí hacían los obstáculos cúbicos), sino que produce un estrechamiento progresivo del canal hasta su vértice y después un ensanchamiento también progresivo. Es por esto que no podemos introducir correctamente en el programa la curvatura del obstáculo con dos secciones como en los cúbicos. Para ello, se han utilizado 17 secciones a lo largo del obstáculo (19 en total si contamos la del comienzo y final del canal). Las 15 secciones pertenecientes

al tramo del obstáculo son equidistante entre ellas de manera que hay una distancia de $1,75\text{cm}$ aproximadamente entre cada una. Como esto es difícil de entender sin visualizarlo, en la Figura 30 pueden verse todas las secciones nombradas, donde puede observarse la disposición de las 15 secciones a lo largo del obstáculo curvo. De manera que posteriormente habrá que ajustar a esta distancia el número de celdas de cálculo.

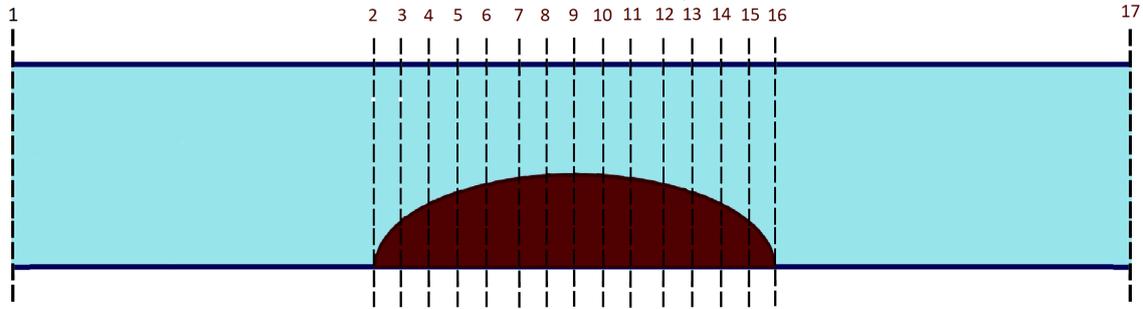


Figura 30: Secciones definidas en la Geometría 3.

Parámetros de simulación Este caso es análogo al expuesto en la Geometría 2, donde debido a la disposición contigua de las secciones ha de adaptarse el número de celdas de cálculo.

- Tiempo de simulación: Impondremos un valor de 1000 segundos de simulación, el mismo para el que hemos definido el valor final tanto del caudal como de la altura de calado a la salida
- $x(m)$::En este caso al existir más de un punto donde se realizaron las mediciones, dispondremos la sonda de recogida de datos en el primer punto $X1$, donde una vez los resultados de la simulación concuerden con los datos medidos, daremos por buena la simulación y compararemos (poniendo la sonda) los resultados de simulación del resto de puntos con los medidos. El valor de x de este primer punto es $3,085\text{m}$ desde el comienzo del canal.
- $ncell$: Como la longitud del canal son 6000mm (6m), y como ya se ha explicado, la longitud máxima de celda de cálculo puede ser $17,5\text{mm}$ se necesita dividir como mínimo el canal en 354 celdas, donde al existir decimales aproximaremos a 400 el número de celdas de cálculo.

D.2.5. Resultado de las simulaciones

En esta sección se exponen tanto los resultados numéricos como gráficos obtenidos en la fase de Post-proceso de la simulación de la Geometría 3.

Coefficientes de rozamiento de Manning utilizados en la simulación de cada material En la tabla a continuación se exponen tanto los coeficientes utilizados en las simulaciones para reproducir los datos medidos en el laboratorio, como la velocidad y la altura de calado que se obtenían como resultado introduciendo este coeficiente. Junto a ellos se muestran los datos obtenidos a partir de las mediciones en el canal cómo el coeficiente de Manning (nm), velocidad (Vm) y calado (hm), para poder comparar a simple vista unos con otros. En las simulaciones se buscaba obtener como resultado la altura de calado medida en el laboratorio, por eso el valor obtenido en la simulación y el medido coinciden.

Material	Q	n	V	h	nm	Vm	hm
Metacrilato	Q1	0.0236	15.815	3.7	0.0069	17.158	3.7
	Q2	0.0165	24.112	4.8	0.0070	26.016	4.8
	Q3	0.0127	30.136	5.8	0.0071	35.709	5.8
Césped	Q1	0.03425	13.845	4.2	0.0167	11.789	4.2
	Q2	0.0296	20.377	5.7	0.0164	24.394	5.7
	Q3	0.0278	24.452	7.1	0.0162	32.926	7.1
Malla	Q1	0.0272	15.070	3.8	0.0105	14.834	3.8
	Q2	0.0185	23.148	5	0.0106	25.471	5
	Q13	0.0152	28.649	6.1	0.0106	33.419	6.1

Tabla 33: Datos obtenidos como resultado en las simulaciones de altura y velocidad junto con los medidos en el canal.

Las conclusiones a las que se llega observando los resultados, son análogas a las de la Geometría 1, donde el coeficiente de Manning necesario para replicar el flujo medido en el laboratorio va decreciendo con el aumento del caudal. Donde a medida que aumentamos más el caudal la variación del coeficiente tiende a ser menor, esta tendencia podrá observarse gráficamente en la siguiente sección.

Los valores de la velocidad calculados a partir del perfil de velocidades obtenido en el laboratorio se encuentran relativamente cercanas en la mayoría de los casos, pero nunca se consigue que sean iguales debido a la dificultad de ajustar el perfil de velocidades a un modelo 1D. Resalta que en casi todos los casos la velocidad obtenida experimentalmente según la Ley potencial de distribución de velocidades por encima de la rugosidad (3.2) sea la que mejor se aproxime a la obtenida en la simulación.

Comparación de los coeficientes de rozamiento usados en la simulación frente a los calculados teóricamente En las Figuras 31,32 y 33 se ha compuesto

una representación de la variación tanto del coeficiente de Manning usado en las simulaciones, como del calculado teóricamente.

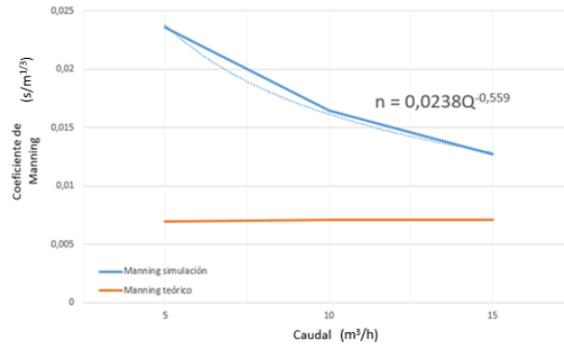


Figura 31: Comparación del coeficiente de Manning en el caso del metacrilato (Geometría 3).

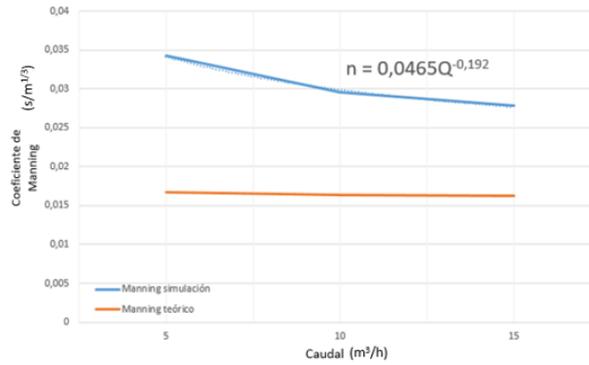


Figura 32: Comparación del coeficiente de Manning en el caso del césped (Geometría 3).

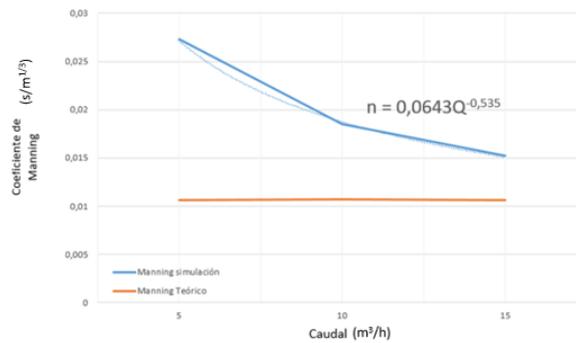


Figura 33: Comparación del coeficiente de Manning en el caso del malla (Geometría 3).

El comportamiento que se visualiza es similar al las otras Geometrías donde el Manning propio de las simulaciones varia de manera notable a medida que aumenta el caudal. Para poder estimar un valor de este coeficiente en todo el dominio del

caudal para realizar futuras simulaciones, se ha aproximado esta variación a una función exponencial la cual tendrá validez hasta que el valor del Manning tome el valor aproximado del teórico el cual se tomara como válido para caudales superiores.

En este caso la variación del Manning es tan acentuada como en la Geometría 1, haciendo este menos dependiente de la geometría y más del Caudal circulante, siendo el obstáculo suave mucho menos perturbador del flujo que los presentes en la Geometría 2.

Comparación de los coeficientes de rozamiento usados en la simulación con el parámetro adimensional de Reynolds asociado De la misma forma que en el caso de la Geometría 1 se realiza una parte de análisis adimensional. En este análisis se compara el coeficiente de Darcy (f) equivalente al Manning utilizado en las simulaciones con el número de Reynolds asociado a los resultados de estas.

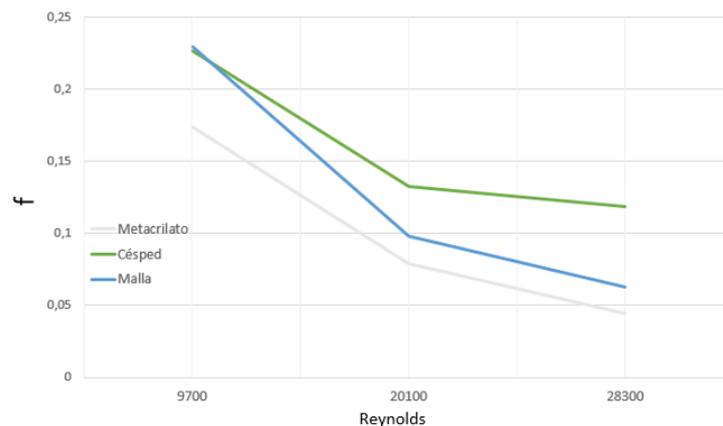


Figura 34: Comparación del coeficiente (f) de los 3 materiales con el número de Reynolds.

En la Figura 34 se puede observar como de la misma manera que pasaba con el coeficiente de Manning, f va disminuyendo a medida que aumenta el valor del número de Reynolds (y con ello el caudal). Como era de esperar el coeficiente de rozamiento más alto es del césped seguido por el de la malla de fibra de vidrio y por último el metacrilato. Los valores de f están entre los de los otros dos casos ya que este no presenta una disposición de obstáculos tan abrupta como la Geometría 2, ni tan suave como la Geometría 1.

E. Perfiles de velocidad

En esta sección se exponen los perfiles de velocidad medidos de manera gráfica. Los perfiles de velocidad están dispuestos dentro de las figuras en el punto en el que fueron medidos. Parte de las conclusiones que se obtienen tanto en la memoria como en el Anexo (D) se han obtenido visualizando de esta manera los perfiles. Se disponen en este capítulo como ayuda para que el lector sea capaz de visualizar el comportamiento de la velocidad en cada caso y punto de medida. Los diferentes colores presentes en estos perfiles de velocidades corresponden a los diferentes materiales usados en la campaña de medidas, siendo los mismos colores para cada material que se utilizan a lo largo de todo el estudio.

Las Figuras 35,36 y 37 corresponde al caso de la Geometría 1 (Canal Recto), las Figuras 38,39 y 40 corresponde a la Geometría 2 (Canal Recto con obstáculos cúbicos) y las Figuras 41,42 y 43 al caso de la Geometría 3 (Canal recto con obstáculo lateral)

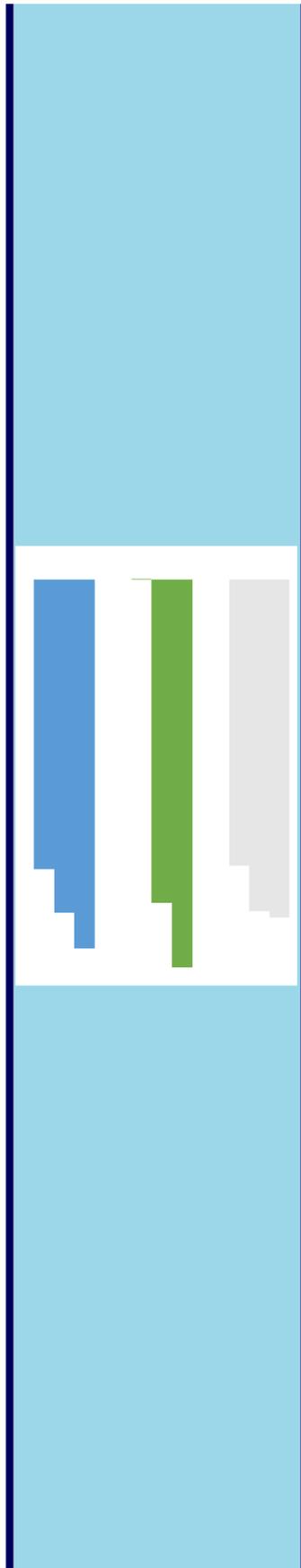


Figura 35: Medidas del perfil de velocidades obtenido en la Geometría 1 con $Q1$.

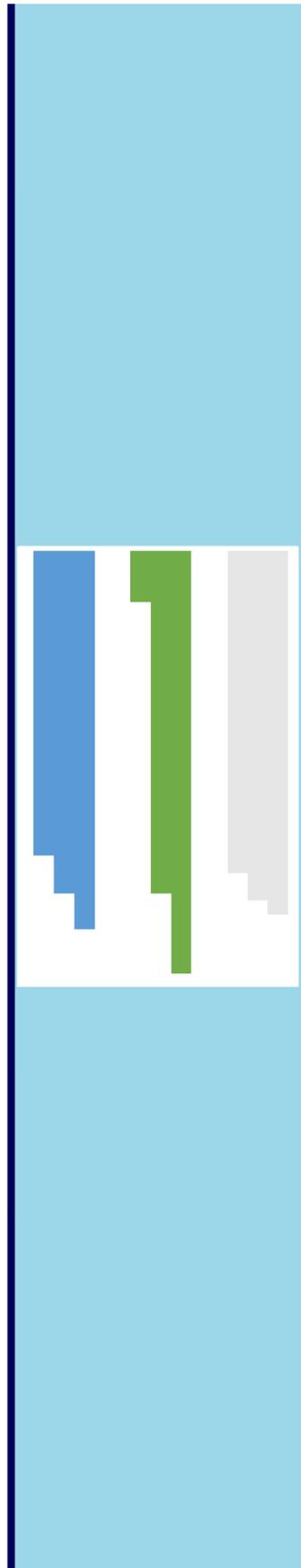


Figura 36: Medidas del perfil de velocidades obtenido en la Geometría 1 con $Q2$.

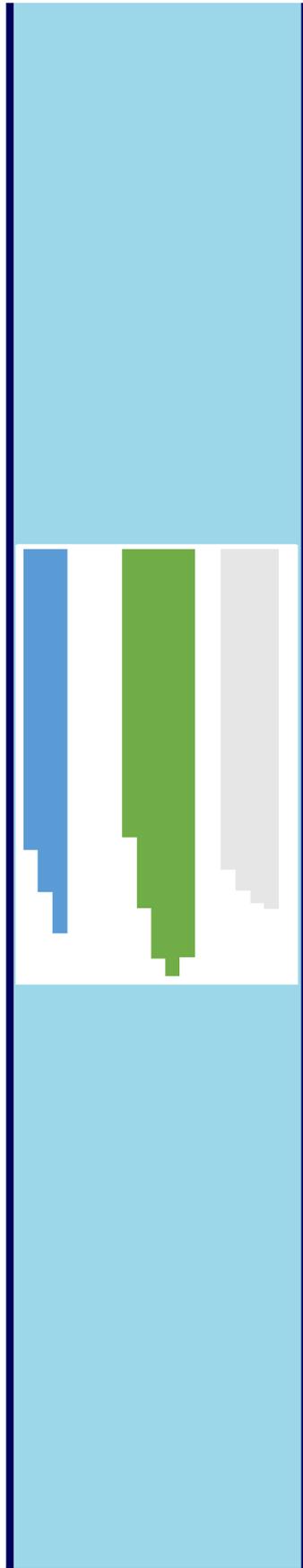


Figura 37: Medidas del perfil de velocidad obtenido en la Geometría 1 con $Q3$.

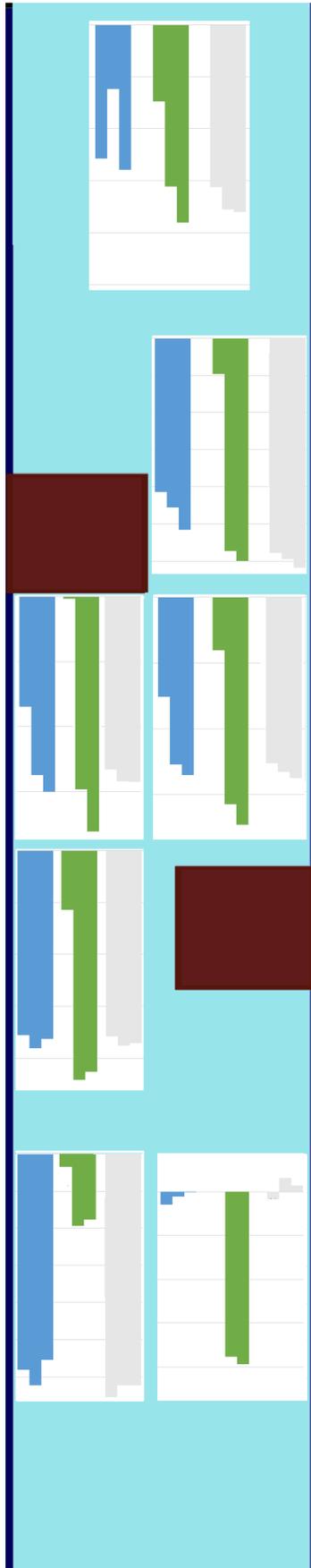


Figura 38: Medidas del perfil de velocidades obtenido en la Geometría 2 con $Q1$.

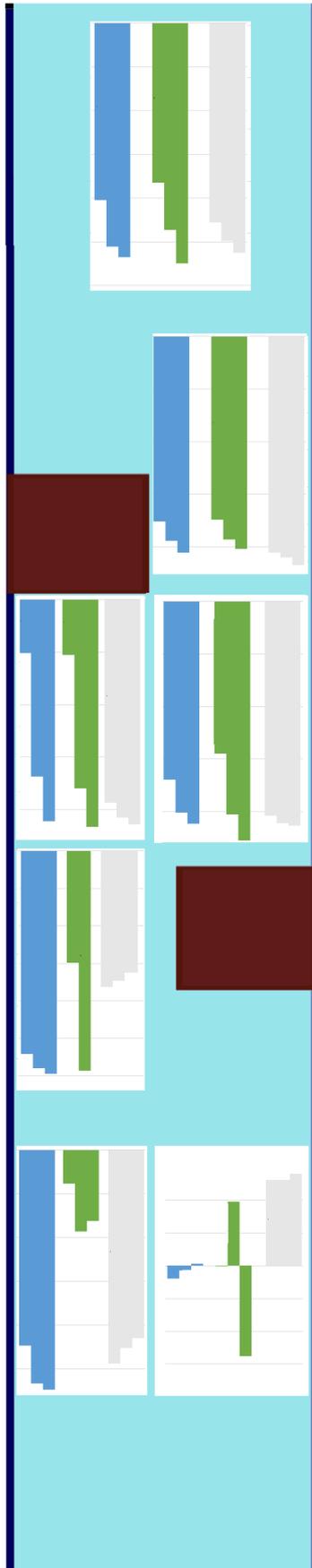


Figura 39: Medidas del perfil de velocidades obtenido en la Geometría 2 con $Q2$.

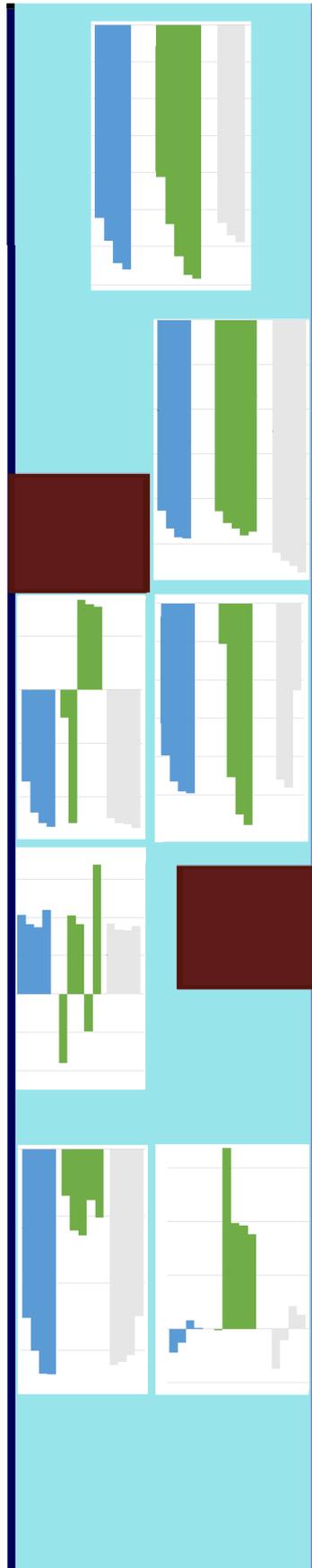


Figura 40: Medidas del perfil de velocidad obtenido en la Geometría 2 con $Q3$.

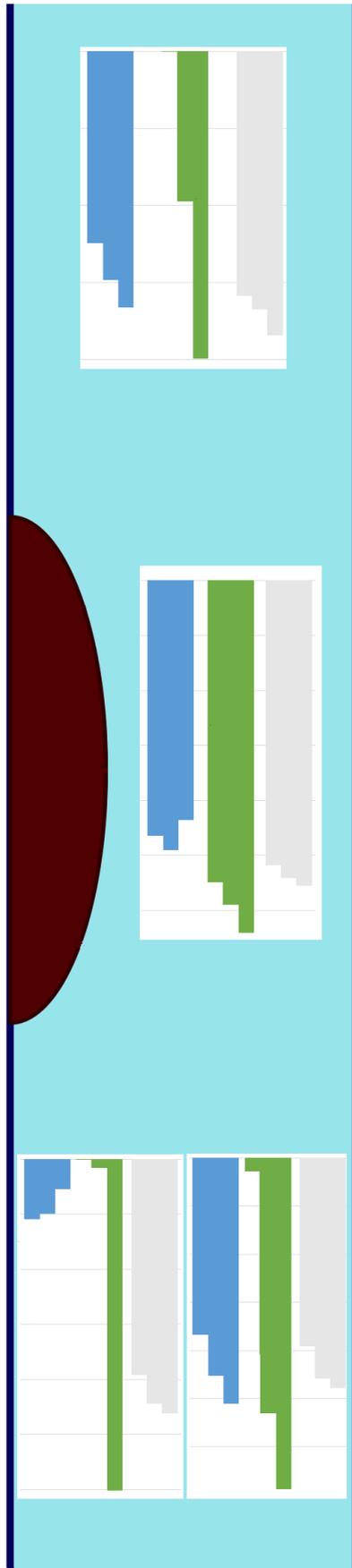


Figura 41: Medidas del perfil de velocidades obtenido en la Geometría 3 con $Q1$.

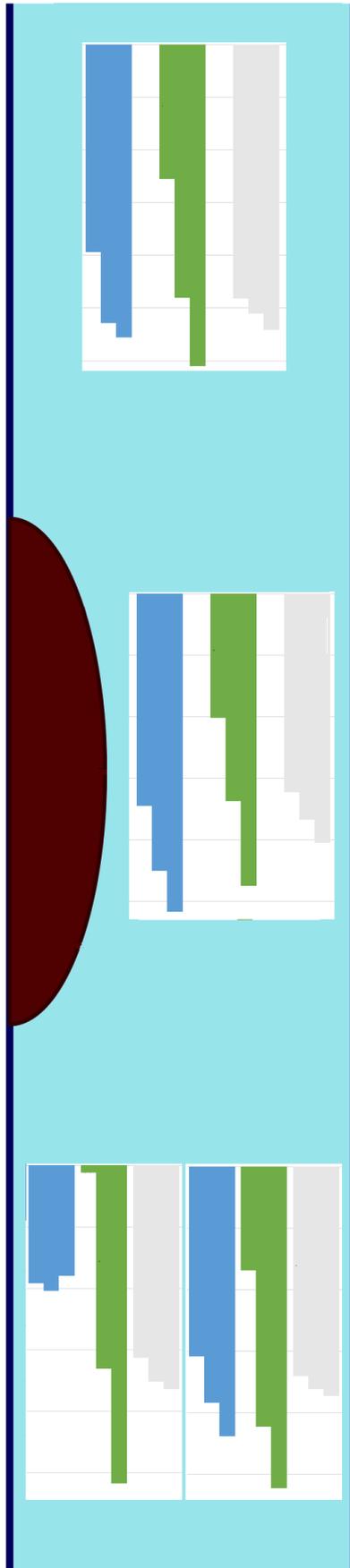


Figura 42: Medidas del perfil de velocidades obtenido en la Geometría 3 con $Q2$.

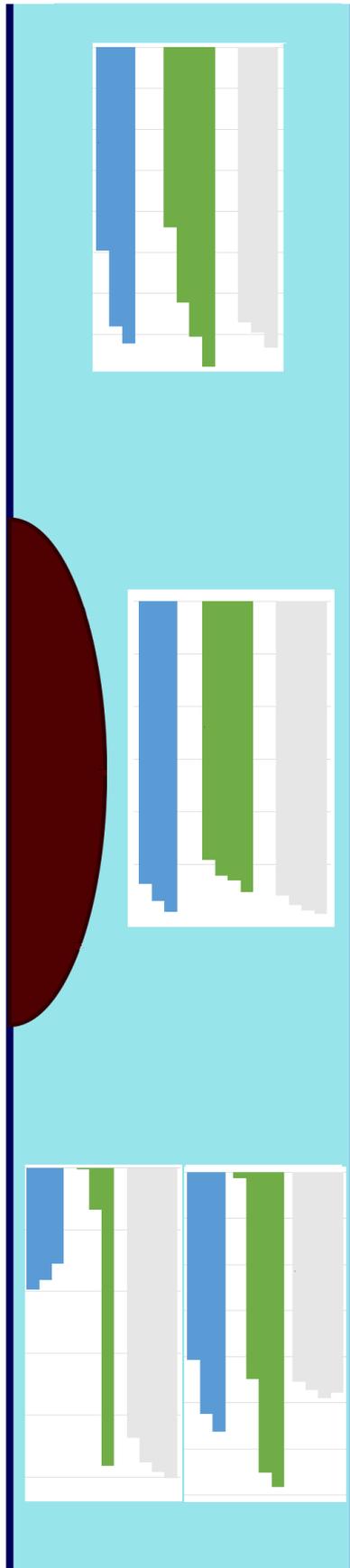


Figura 43: Medidas del perfil de velocidad obtenido en la Geometría 2 con $Q3$.