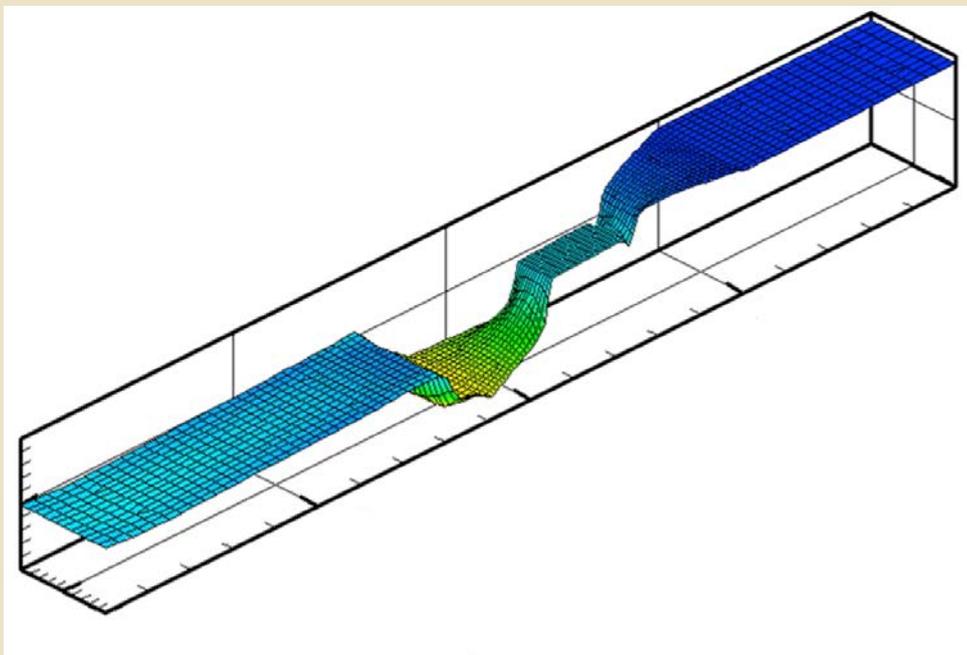




UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Cálculo de curvas de remanso y fenómenos locales con Iber



Luis Cea Gómez

María Bermúdez Pita

Brais Sobral Areán

Cálculo de curvas de remanso y fenómenos locales con Iber

Luis Cea Gómez
María Bermúdez Pita
Brais Sobral Areán

A Coruña
2018

Servizo de Publicacións
Universidade da Coruña

Cálculo de curvas de remanso y fenómenos locales con Iber

CEA GÓMEZ, Luis

BERMÚDEZ PITA, María

SOBRAL AREÁN, Brais

A Coruña, 2018

Universidade da Coruña, Servizo de Publicacións

DOI: <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497496834>

ISBN: 978-84-9749-683-4

Dep. legal: C 529-2020

CDU: [519.62:004.4][556.53/.54:627.13](035)*IBER

IBIC: TNF | UM | 4GE

EDICIÓN

Universidade da Coruña, Servizo de Publicacións <<http://www.udc.gal/publicacions>>

© de la edición, Universidade da Coruña

© de los textos, los autores



Esta obra se edita bajo una licencia

Creative Commons BY-NC-SA (Atribución-NoComercial-CompartirIgual) 4.0 Internacional

Contenidos

1. INTRODUCCIÓN.....	7
2. EL MODELO IBER.....	9
3. PENDIENTE MODERADA	13
3.1 INTRODUCCIÓN.....	13
3.2 CREACIÓN DEL MODELO.....	14
3.3 CURVA M1.....	19
3.4 CURVA M2.....	27
3.5 CURVA M3.....	29
4. PENDIENTE PRONUNCIADA.....	35
4.1 CURVA S1 Y S2.....	36
4.2 CURVA S3.....	39
5. CAMBIOS DE RÉGIMEN	43
5.1 CAMBIO DE RÉGIMEN LENTO A RÉGIMEN RÁPIDO	43
5.2 CAMBIO DE RÉGIMEN RÁPIDO A RÉGIMEN LENTO	45
6. EJERCICIO CURVAS DE REMANSO	49
7. FENÓMENOS LOCALES.....	53
7.1 ESTRECHAMIENTOS Y ENSANCHAMIENTOS	53
7.1.1 Estrechamiento de gran longitud en régimen lento.....	53
7.1.2 Estrechamiento de poca longitud en régimen lento	56
7.1.2.1 Nivel de agua impuesto aguas abajo	57
7.1.2.2 Vertido libre aguas abajo.....	61
7.1.3 Estrechamiento de gran longitud en régimen rápido	63
7.2 ESCALONES.....	66
7.2.1 Escalón de gran longitud en régimen lento.....	66
7.2.2 Escalón de poca longitud en régimen lento	69
7.2.2.1 Nivel de agua impuesto aguas abajo	69
7.2.2.2 Vertido libre aguas abajo.....	71
7.2.3 Escalón de gran longitud en régimen rápido.....	73
7.3 PROBLEMA CON FENÓMENOS LOCALES	75
7.4 FENÓMENOS LOCALES EN CANALES LARGOS.....	78
7.4.1 Estrechamientos.....	78
7.4.1.1 Estrechamiento de gran longitud en régimen lento.....	79
7.4.1.2 Estrechamiento de poca longitud en régimen lento – Nivel impuesto	80
7.4.1.3 Estrechamiento de poca longitud en régimen lento – Vertido libre.....	81
7.4.1.4 Estrechamiento de gran longitud en régimen rápido	82
7.4.2 Escalones	83
7.4.2.1 Escalón de gran longitud en régimen lento	84
7.4.2.2 Escalón de poca longitud en régimen lento – Nivel impuesto	85
7.4.2.3 Escalón de poca longitud en régimen lento – Vertido libre	86
7.4.2.4 Escalón de gran longitud en régimen rápido.....	87
8. DATOS DE PARTIDA PARA LA REALIZACIÓN DE LOS EJERCICIOS	89

1. INTRODUCCIÓN

Iber es un software que resuelve numéricamente las ecuaciones de Saint-Venant bidimensionales. Estas ecuaciones también se conocen como ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad, porque son aplicables a flujos poco profundos (aguas someras) y proporcionan valores de velocidad promediada en profundidad. Su aplicación principal es la modelización del flujo en canales, ríos y estuarios. Es un programa de uso libre que se puede descargar de forma gratuita desde la web www.iberaula.es.

El objetivo de este manual es la utilización del modelo Iber como herramienta docente de ayuda al aprendizaje y al análisis de las curvas de remanso y de los fenómenos locales que se producen en canales abiertos. Para ello se proponen diferentes ejercicios de modelización numérica en los que se reproducen, en orden creciente de complejidad, distintos fenómenos hidráulicos que permiten comprender conceptos fundamentales del flujo en lámina libre (pendiente moderada y pronunciada, régimen rápido y lento, curvas de remanso, cambios de régimen, fenómenos locales, etc.).

Se asume que el alumno ha estudiado previamente las bases teóricas del flujo en lámina libre. En este sentido, este manual debe tomarse como un complemento, y no un sustituto, de las clases teóricas de un primer curso de hidráulica en lámina libre.

A lo largo del manual se irá explicando de forma progresiva el manejo básico del software Iber. Se expondrán las distintas opciones y posibilidades del modelo a medida que se vayan necesitando para hacer los ejercicios propuestos. Sin embargo, no se realizará una descripción detallada de todas las opciones y posibilidades de cálculo del programa. Únicamente se explicarán las herramientas necesarias para resolver los ejercicios propuestos.

Para cada ejercicio propuesto se proporciona un proyecto de Iber que incluye la definición geométrica del caso a estudiar, por lo que sólo será necesario modificar ciertas condiciones de contorno (caudal y/o calado en los extremos del canal) y de rugosidad con el fin de observar su efecto en el comportamiento del flujo.

2. EL MODELO IBER

Iber es un modelo numérico para la simulación de flujo en lámina libre en régimen no permanente. El rango de aplicación de Iber abarca la hidrodinámica fluvial, la simulación de rotura de presas, la evaluación de zonas inundables, el cálculo de transporte de sedimentos, calidad de agua en ríos y zonas costeras no estratificadas, y el flujo de marea en estuarios.

El modelo Iber consta de diversos módulos de cálculo: un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia, un módulo de transporte de sedimentos, un módulo de calidad de aguas y un módulo hidrológico. En este manual únicamente se utilizará el módulo hidrodinámico, que constituye la base de Iber. Todos los módulos utilizan una discretización del dominio formada por elementos triangulares o cuadriláteros.

El módulo hidrodinámico resuelve las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad, o ecuaciones de St. Venant bidimensionales. Dichas ecuaciones asumen una distribución de presión hidrostática y una distribución uniforme de la velocidad en profundidad. La hipótesis de presión hidrostática se cumple razonablemente en el flujo en ríos, así como en las corrientes generadas por la marea en estuarios. Asimismo, la hipótesis de distribución uniforme de velocidad en profundidad se cumple habitualmente en ríos y estuarios poco profundos no estratificados, aunque pueden existir zonas en las que dicha hipótesis no se cumpla debido a flujos locales tridimensionales o a cuñas salinas. En estos casos es necesario estudiar la extensión de dichas zonas y su posible repercusión en los resultados del modelo.

En el módulo hidrodinámico se resuelven las ecuaciones de conservación de la masa y de momento en las dos direcciones horizontales:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hU}{\partial x} + \frac{\partial hV}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial hU}{\partial t} + \frac{\partial hU^2}{\partial x} + \frac{\partial hUV}{\partial y} = -gh \frac{\partial z_s}{\partial x} - \tau_{b,x}$$

$$\frac{\partial hV}{\partial t} + \frac{\partial hUV}{\partial x} + \frac{\partial hV^2}{\partial y} = -gh \frac{\partial z_s}{\partial y} - \tau_{b,y}$$

en donde h es el calado, U y V son las dos componentes de la velocidad horizontal promediada en profundidad, g es la aceleración de la gravedad, Z_s es la elevación de la lámina libre, τ_b es la fricción debido al rozamiento del fondo y ρ es la densidad del agua. Adicionalmente el modelo puede considerar la fuerza de Coriolis, el rozamiento superficial por viento, las tensiones turbulentas, el aporte de caudal por lluvia y la detracción por infiltración en el subsuelo. Estas acciones no se considerarán en este manual.

Para poder resolver las ecuaciones de St. Venant es necesario imponer el valor de ciertas variables (caudal, calado, etc.) en los contornos del dominio de cálculo en el cual se va a calcular el flujo. Los contornos se pueden clasificar en abiertos o cerrados. Por los contornos abiertos el agua puede entrar y salir del dominio de cálculo. Los contornos cerrados se comportan como paredes verticales impermeables al flujo.

Los contornos cerrados (o de tipo pared), además de impedir la entrada y salida de agua, generan una fuerza de rozamiento en el fluido, de manera similar a la fricción ejercida por el fondo. Esta fuerza se puede calcular en función de la rugosidad del contorno, del calado y de la velocidad del agua en las cercanías del contorno.

En los contornos abiertos se pueden imponer diferentes tipos de condiciones de contorno. Para que las ecuaciones de aguas someras bidimensionales estén bien planteadas desde el punto de vista matemático, el número de condiciones a imponer en los contornos abiertos depende de si se trata de un contorno de entrada o de salida de flujo, así como del tipo de régimen en el contorno (rápido/lento). En un contorno de entrada es necesario imponer 3 condiciones de contorno si el régimen es supercrítico (una para cada una de las tres ecuaciones de St. Venant), mientras que si se produce régimen subcrítico es suficiente con imponer 2 condiciones. En un contorno de salida es suficiente con imponer una única condición si el régimen es subcrítico, mientras que no es necesario imponer ninguna condición si el régimen es supercrítico. Si el usuario impone menos condiciones de las necesarias desde un punto de vista matemático las ecuaciones estarán indeterminadas y no se obtendrá una solución correcta. Las condiciones concretas a imponer pueden ser el calado, las componentes de la velocidad, o una combinación de ambos. En Iber se consideran diferentes opciones para imponer las condiciones de contorno, las cuales se recogen en la Tabla 1.

Lo más habitual en hidráulica fluvial es que el flujo discurra en régimen lento en los contornos del tramo modelado. En este caso lo más habitual es imponer el calado o el nivel de la superficie libre en el contorno de aguas abajo. En el contorno aguas arriba se suele imponer el caudal total de entrada (m^3/s) y la dirección del flujo, que en general, a falta de datos más precisos, se asume perpendicular al contorno de entrada. Aunque menos habitual, también es posible introducir aguas arriba las componentes de la velocidad (m/s) o del caudal específico (m^2/s). En el caso de que se imponga el caudal total en el contorno de entrada, se realiza una distribución del caudal unitario (m^2/s) en el contorno de entrada, asignando un mayor caudal unitario a las zonas con mayor calado y menor rugosidad de fondo.

Tabla 1: Condiciones de contorno implementadas en los contornos

Contorno	Régimen	Condiciones impuestas	
Entrada	Caudal total	Subcrítico / Crítico	Caudal total en dirección normal
		Supercrítico	Caudal total en dirección normal y velocidad media
	Caudal específico	Subcrítico / Crítico	Caudal específico en dirección normal
		Supercrítico	a) Caudal específico en dirección normal y calado b) Caudal específico en dirección normal y cota de agua
Salida	Subcrítico	a) Calado b) Cota de agua c) Vertedero d) Curva de gasto	
	Supercrítico / Crítico	Nada	

En el siguiente artículo puede encontrarse una descripción más detallada del modelo, así como referencias bibliográficas especializadas referentes a las ecuaciones y métodos numéricos implementados en Iber:

Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, M.E., Dolz, J., Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(1), 1-10.

3. PENDIENTE MODERADA

3.1 Introducción

Se considera que la pendiente de un canal es moderada cuando **el calado normal es superior al crítico**. Nótese que el calado normal de un canal depende del caudal, de su anchura, del coeficiente de Manning y de la pendiente del fondo, mientras que el calado crítico depende únicamente del caudal y de la anchura del canal. Por lo tanto, el concepto de pendiente moderada no depende únicamente de la pendiente geométrica del canal, sino también del caudal circulante y de la rugosidad del fondo.

Se recuerda asimismo que no existe identidad entre pendiente moderada y régimen lento. La principal diferencia entre régimen lento y rápido es la dirección en la que se propagan las perturbaciones en la lámina de agua. En régimen lento se propagan en todas las direcciones (hacia aguas arriba y aguas abajo), mientras que en régimen rápido sólo se propagan hacia aguas abajo. El número de Froude es el que determina si el flujo discurre en régimen lento o rápido.

Las curvas de remanso generadas en condiciones de pendiente moderada son tres: la M1, la M2 y la M3. **Las 2 primeras (M1 y M2) se producen en régimen lento, mientras que la M3 se produce en régimen rápido.**

Para este ejercicio se parte de la geometría de un canal rectilíneo de longitud $L = 200$ m, con sección rectangular de anchura $B = 0.5$ m, coeficiente de Manning $n = 0.015$ s/m^{1/3} y pendiente $i = 0.002$. A partir de esta geometría, variando las condiciones de contorno de caudal y calado asignadas a la entrada y salida del canal, podemos generar las tres curvas de remanso en pendiente moderada. En la Figura 1 se presenta un diagrama de la geometría del canal con sus datos.

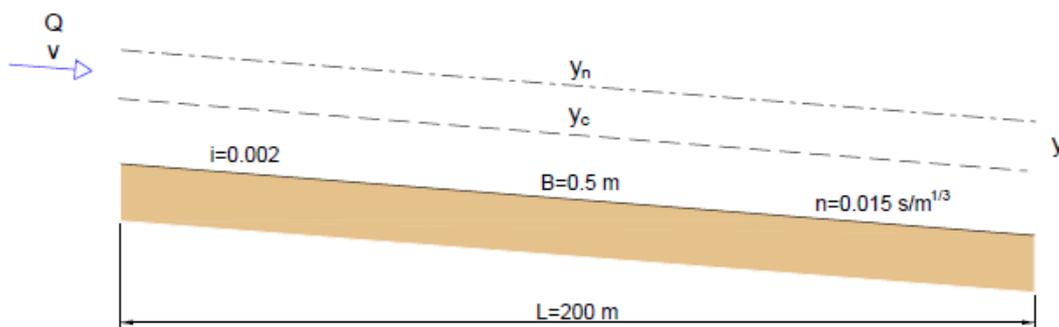


Figura 1: Esquema del canal rectangular.

La Tabla 2 presenta las condiciones de contorno que utilizaremos para generar cada una de las curvas de remanso, así como los calados normal y crítico correspondientes a cada caso.

Tabla 2: Condiciones de contorno y calados normal y crítico de cada curva de remanso en pendiente moderada.

Curva	Condición de entrada		Condición de salida	Y _n (m)	y _c (m)
	Q (m ³ /s)	v (m/s)			
M1	0.04	-	Nivel dado = 0.4 m	0.135	0.087
M2	0.50	-	Crítico	0.980	0.470
M3	0.50	15	Crítico	0.980	0.470

3.2 Creación del Modelo

En primer lugar abrimos el programa Iber y guardamos un proyecto con el nombre deseado (Archivo >> Guardar como >> “Nombre del archivo”>> Salvar).

Para hacer zum o moverse por el modelo se puede utilizar el *Desplazamiento dinámico* (Figura 2) o la rueda del ratón (sólo Zum). Al terminar de usar cualquier herramienta en Iber se pulsa la tecla *Esc* para liberar el ratón.



Para ver el modelo completo se puede utilizar la herramienta “Zum Todo” en *Vista >> Zum >> Todo*.

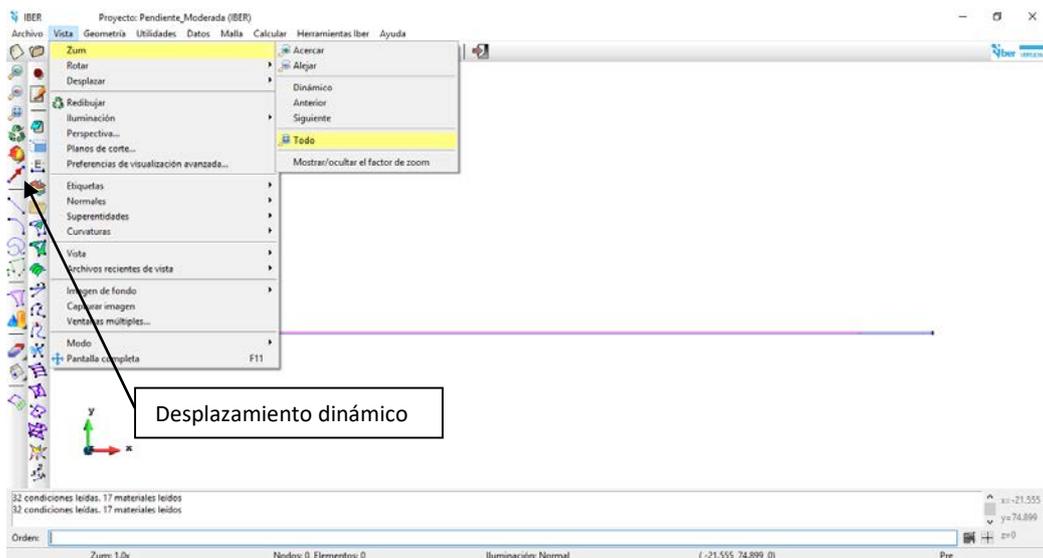


Figura 2: Herramienta “Desplazamiento dinámico” y “Zum todo”.

Una vez definidas las acciones básicas, se puede comenzar a definir las paredes del canal que se va a utilizar para este apartado con la herramienta “Línea”.

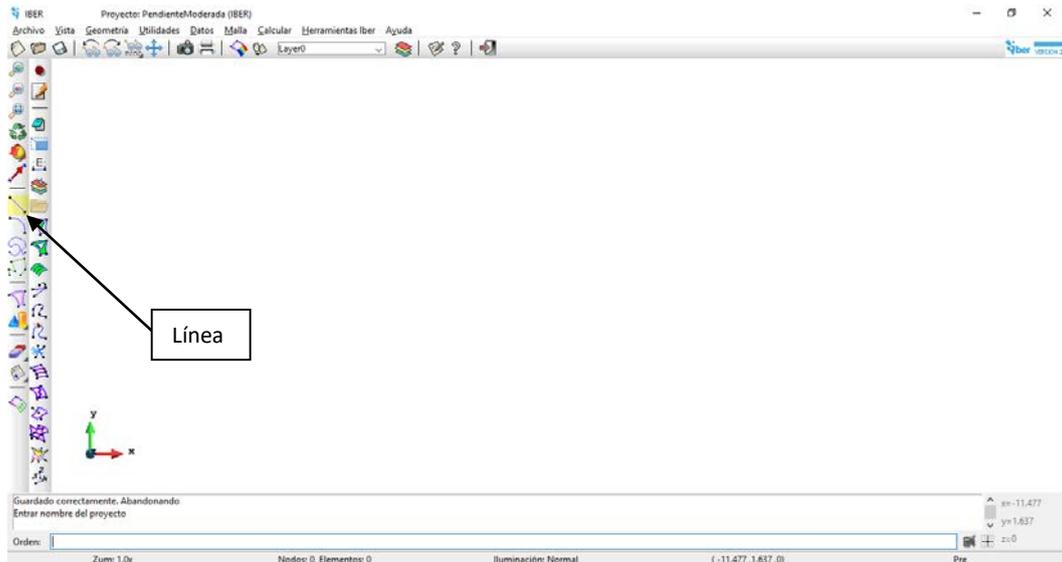


Figura 3: Herramienta “Línea”.

Al definir el canal se van a asignar a la vez, en función de los puntos escogidos, longitud, ancho y pendiente. Con la herramienta “Línea” se puede dibujar una cualquiera en el espacio del modelo, o introducir las coordenadas X,Y y Z. Por ello, para este ejercicio se propone utilizar los siguientes puntos para poder comparar los resultados con los explicados en los siguientes apartados.

Tabla 3: Coordenadas de los puntos del canal rectangular.

Punto	Coordenada X	Coordenada Y	Coordenada Z
1	0	0	0.40
2	200	0	0
3	200	0.5	0
4	0	0.5	0.40

Después de introducir las coordenadas del punto 4 el programa da opción de “No juntar” o “Juntar”, en este caso, se desea juntar para cerrar la superficie. A partir de esos puntos se obtiene el canal rectangular definido en la **Figura 1** de longitud 200 metros, ancho 0.50 metros y pendiente 0.20%. Se podría utilizar cualquier otra serie de puntos que cumplierse las condiciones del canal, en este caso se opta por la más sencilla.

El siguiente paso es crear una superficie NURBS. El software Iber funciona con superficies NURBS a las cuales se asignan las condiciones de contorno, la rugosidad, las condiciones iniciales, etc. Se crean desde (Geometría >> Crear >> Superficie NURBS >> Por contorno o Automático).

Cálculo de curvas de remanso y fenómenos locales con Iber

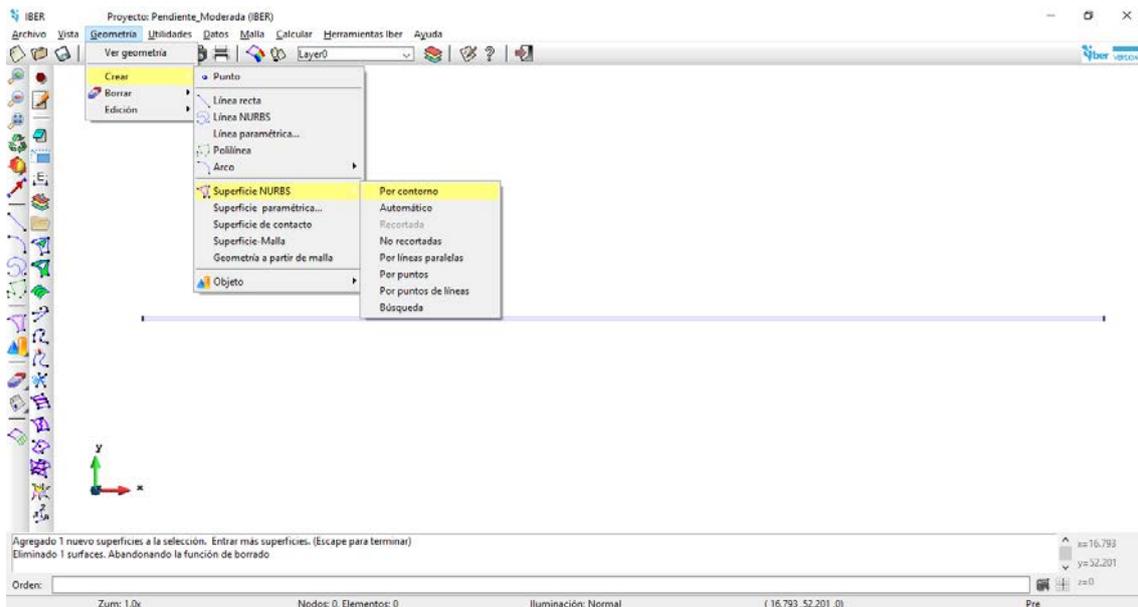


Figura 4: Herramientas Crear superficie NURBS “Por contorno” y “Automático”.

“Por contorno” se utiliza para crear superficies seleccionando las líneas que la definen. En este caso, las 4 líneas creadas anteriormente. En cambio, con “Automático”, simplemente definiendo el número de líneas que forman la superficie se creará una para todos los polígonos que cumplan ese requisito. Para poder crear la superficie, es importante que esta sea un polígono cerrado, en caso contrario no funcionará.

El siguiente paso es definir la rugosidad de la superficie en forma de número de Manning. Para ello, se asignará un uso del suelo a la superficie que tendrá un valor de número de Manning asociado (Datos >> Rugosidad >> Uso del Suelo...).

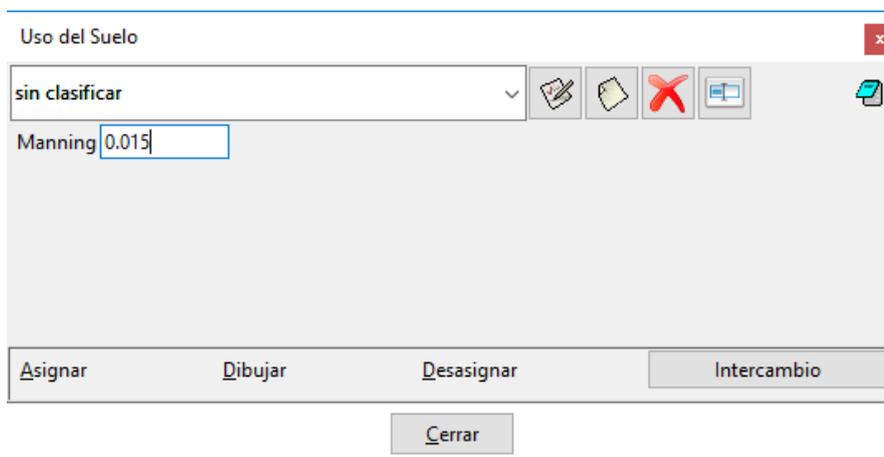


Figura 5: Asignación de número de Manning a superficies NURBS.

En esta pantalla se puede escoger entre una selección de superficies con un determinado coeficiente de Manning asociado. En este caso el valor de $0.015 \text{ s/m}^{1/3}$ se le ha asignado a la superficie llamada *sin clasificar*. El usuario puede crear nuevas superficies o modificar el valor del coeficiente de Manning para

cualquier superficie existente. Una vez escogido el número, se pulsa “Asignar”, se selecciona la superficie del canal y se pulsa “Esc” o “Terminar”.



Con el objetivo de comparar los resultados obtenidos con el modelo con la solución analítica es necesario igualar el rozamiento de las paredes del canal con el de la solera. En (Datos >> Datos del problema >> General (Figura 6) se pulsa “Mostrar” en *Opciones generales* y se modifica la *Fricción en las paredes* (Figura 7). El valor será igual que el de la solera, $0.015 \text{ s/m}^{1/3}$.

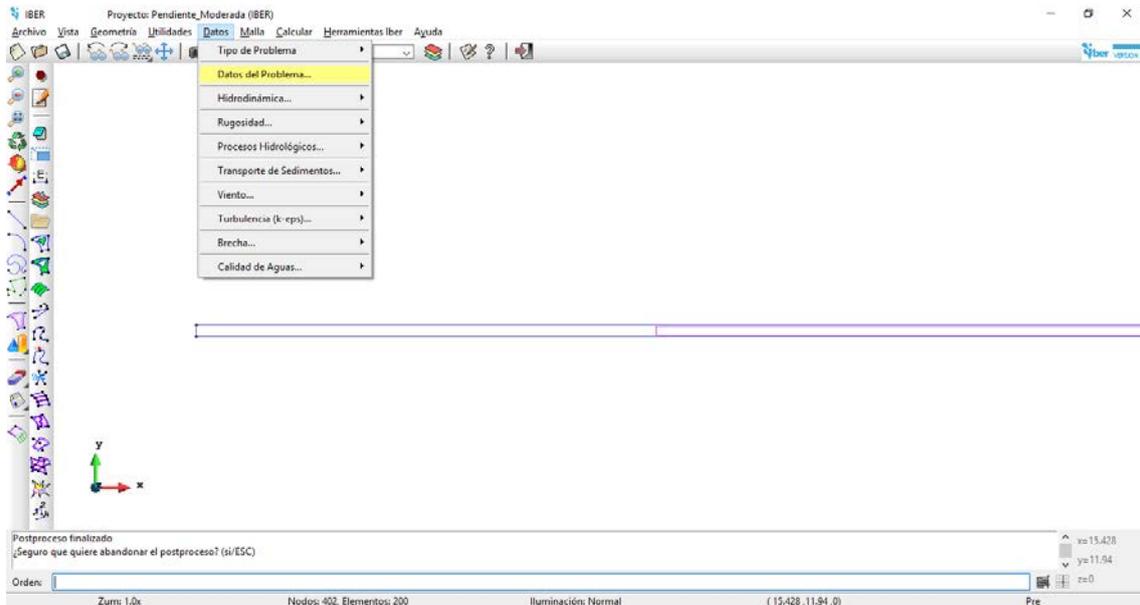


Figura 6: Modificar Datos del Problema.

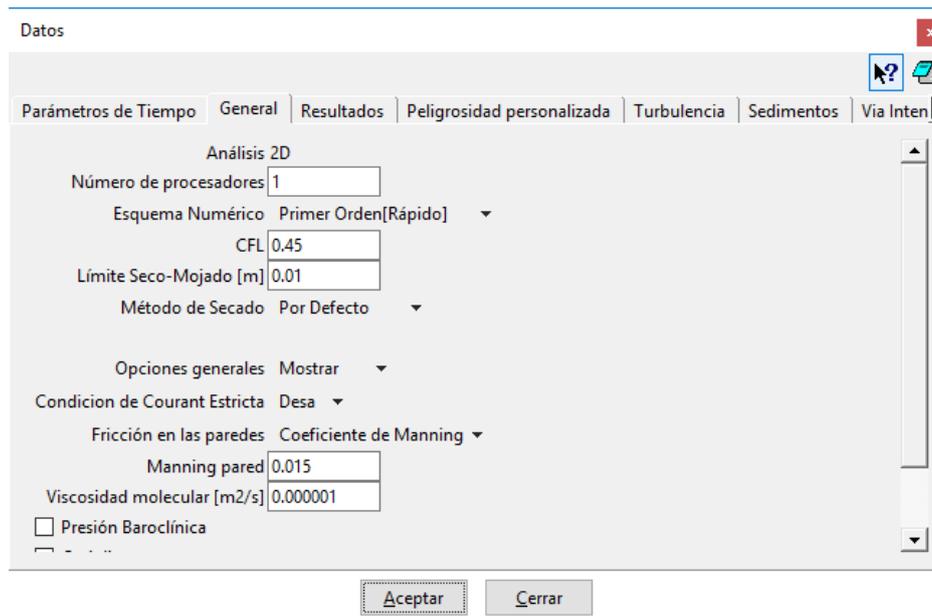


Figura 7: Modificar rozamiento con las paredes del canal.

El siguiente paso es definir los “Parámetros de tiempo”. Estos se pueden consultar y modificar en *Datos >> Datos del problema >> Parámetros de Tiempo* (Figura 8). En esta ventana se definen los instantes en los cuales Iber comienza y termina a calcular, así como el intervalo de tiempo para la escritura de resultados (todas las unidades de tiempo se miden en segundos).

Figura 8: Parámetros de tiempo del problema

Iber siempre resuelve las ecuaciones de flujo no estacionario (variables en tiempo). Si se quiere obtener un estado estacionario (constante en tiempo) debe calcularse como el estado final de un proceso no estacionario con condiciones de contorno estacionarias. Inicialmente las variables de flujo variarán en el tiempo hasta que llegue un momento en el cual, dado que las condiciones de contorno no varían, los calados y velocidades se vuelvan estacionarios. El tiempo que tarda en alcanzarse el estado estacionario depende del problema considerado y debe estimarlo el usuario del modelo. En caso de duda es conveniente poner un valor de tiempo de simulación largo, ya que posteriormente podemos parar el cálculo antes de que se llegue a dicho valor, sin perder por ello los resultados en los instantes de tiempo ya calculados. En este caso definimos 1500 segundos como *Tiempo máximo de simulación* (Figura 8), ya que es tiempo suficiente para que se alcance el estado estacionario.

En el apartado de *Intervalo de resultados* se define cada cuantos segundos el programa escribe los resultados a las ecuaciones de flujo no estacionario. Se escoge un valor en función de las necesidades del problema. En este caso, como solo interesa el resultado estacionario (el último instante de tiempo), cualquier valor es apropiado. Si escogemos un valor pequeño, por ejemplo 10 segundos, durante el cálculo se podremos observar la evolución no estacionaria de caudales, velocidades y calado hasta alcanzar el estado estacionario.

3.3 Curva M1

En el apartado anterior se ha definido como crear el modelo desde el principio. En los sucesivos apartados, a partir del modelo ya creado se explica como asignar las condiciones de contorno, crear la malla, etc. para obtener diferentes curvas en pendiente moderada y, en el apartado 0, en pendiente pronunciada.

A continuación se describe la manera de introducir las condiciones de contorno que producirán la curva de remanso M1. Desde el menú (*Datos >> Hidrodinámica >> Condiciones de contorno*) se introducen las condiciones de contorno de entrada y salida (**Figura 9**). Vamos a asignar primero las condiciones de contorno de entrada. En este caso, se asigna un caudal total de $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ (*Entrada: Caudal total >> Régimen Crítico/Subcrítico >> Caudal total: 0.04*). Para indicar que se trata de un caudal constante se define un único valor correspondiente al instante $t=0.0$, tal como se muestra en la **Figura 10**. En esta misma ventana se podría introducir un hidrograma con caudal variable en función del tiempo en caso de que fuese necesario.

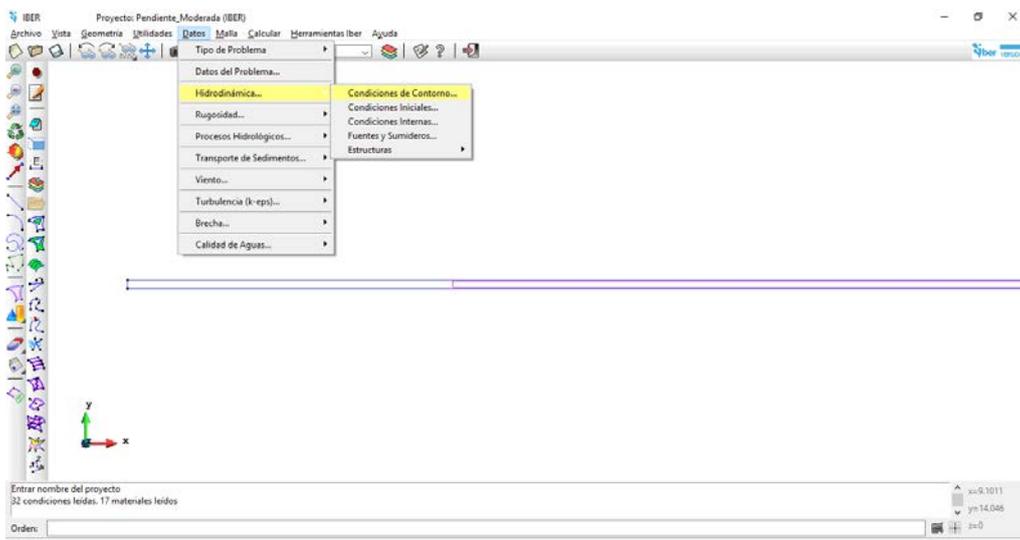


Figura 9: Definición de las condiciones de contorno.

Cálculo de curvas de remanso y fenómenos locales con Iber

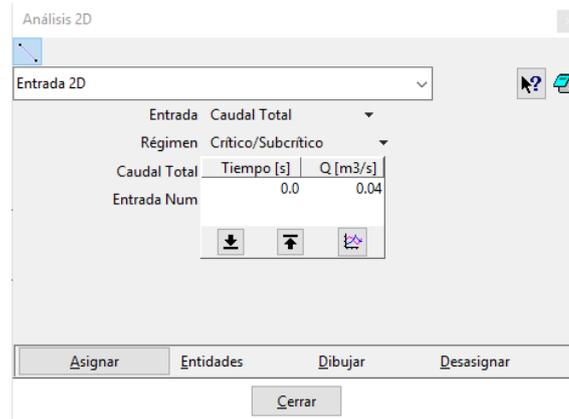


Figura 10: Condición de contorno de entrada para generar una curva M1.

Por último se le da a *Asignar*, se selecciona la línea vertical de entrada (a la izquierda) y se pulsa *Terminar* o *Esc*.

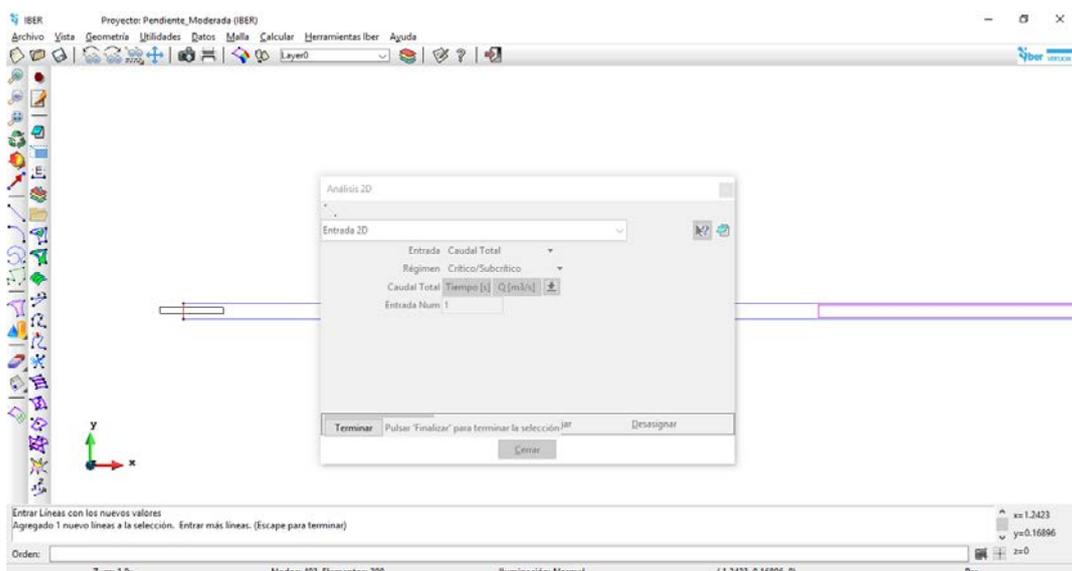


Figura 11: Asignación de condición de contorno de entrada.

A continuación se asignará la condición de contorno de salida. En este caso se introduce como un nivel de cota de lámina de agua impuesto, tal como se muestra en la Figura 12 (*Condición de flujo: Subcrítico >> Tipo: Nivel dado >> Nivel dado (m): 0.40*). Es importante destacar, que se impone una cota, no un calado, es decir, si la cota de solera del canal en la salida fuese distinto de 0, sería necesario realizar la operación: $Cota\ de\ agua = Cota\ de\ solera + Calado$. En este caso, la salida tiene cota de solera igual a 0, por lo tanto, la cota del agua es igual al calado. Como se trata de un nivel dado constante en el tiempo únicamente se impone el valor de cota correspondiente al instante $t=0$. Se asigna dicha condición a la línea del contorno de salida (a la derecha del modelo) y se pulsa *Terminar* o *Esc*.

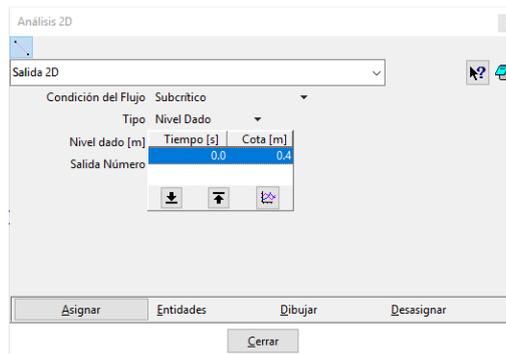


Figura 12: Condición de contorno de salida para generar una curva M1.

Para comprobar que ambas condiciones han sido introducidas correctamente se puede pulsar en la misma ventana *Dibujar >> Todos los Análisis 2D*. Si se han asignado deberían aparecer representadas en la geometría, tal como se muestra en la Figura 13.

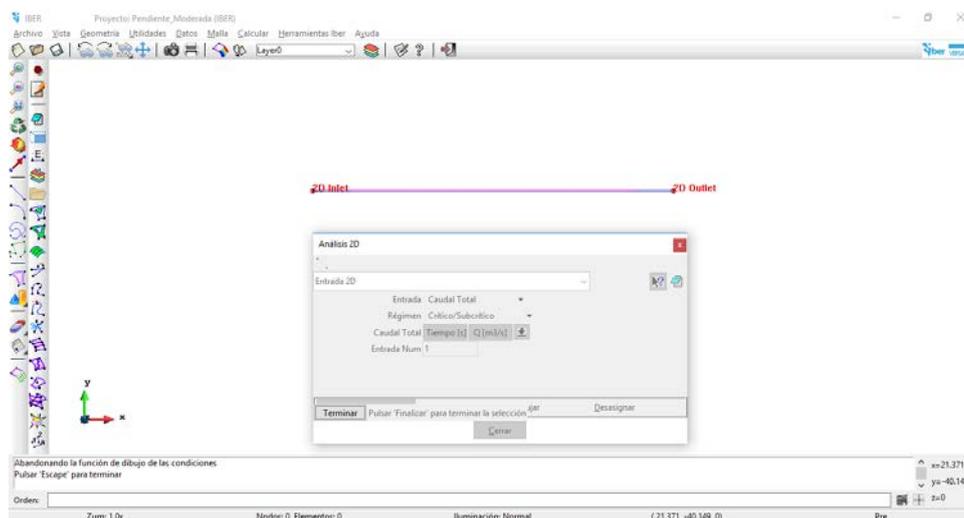


Figura 13: Comprobación de la correcta introducción de las condiciones de contorno.

El último paso antes de calcular es realizar una discretización espacial de la geometría del canal. Dicha discretización constituye la malla de cálculo, y es en ella en la que se resuelven numéricamente las ecuaciones de Saint Venant. Iber calculará el valor de las variables hidrodinámicas en cada elemento de la malla de cálculo. Asimismo, utilizará dichos valores para discretizar espacialmente las distintas derivadas que aparecen en las ecuaciones de Saint Venant. La malla de cálculo es por lo tanto muy importante en los resultados, ya que determina la resolución espacial de la solución y la precisión de los resultados obtenidos. Una malla excesivamente gruesa no proporcionará resultados precisos, pero una malla fina tendrá un tiempo de cálculo demasiado elevado.

En este caso, como se trata de un canal recto idealizado, se puede utilizar una malla estructurada (formada por elementos cuadriláteros). Para asignar el tamaño de los elementos a crear en la superficie se pueden utilizar varios métodos. Como en este caso solo interesan los valores en la dirección longitudinal, se va a hacer una malla 1D, es decir, solo con divisiones en una dirección. Para ello, desde (Malla >> Estructurada >> Superficies >> Asignar

número de divisiones), se selecciona la superficie del canal, se pulsa “Esc” y se escoge un número suficientemente elevado (por ejemplo, 200), se pulsa asignar y se seleccionan las paredes del canal y “Esc”. Para las paredes laterales (donde se introdujeron las condiciones de contorno) se asigna 1 división. De esta manera, se obtiene solo 1 división transversal y 200 divisiones en el eje longitudinal. Otra opción sería, asignar tamaño a los elementos que se van a crear (Malla >> Estructurada >> Superficies >> Asignar número de divisiones). Con ese método se escoge 0.5 como tamaño y, debido a que el ancho es de 0.50 m, se creará una malla con un único elemento en la dirección transversal del canal.

Para crearla, simplemente se pulsa (*Malla >> Generar malla*). En la ventana emergente se acepta el tamaño de los elementos sugerido por el programa. Dicho tamaño no es el que el programa utilizará para crear la malla, ya que previamente se ha asignado en el modelo el tamaño que deberán tener sus elementos. La sugerencia de tamaño que da el programa se utilizará en el caso de que hubiese alguna superficie sin tamaño de malla asignado. También funciona como tamaño mínimo de elementos de la malla. Una vez creada la malla se verá tal como se muestra en la Figura 14.

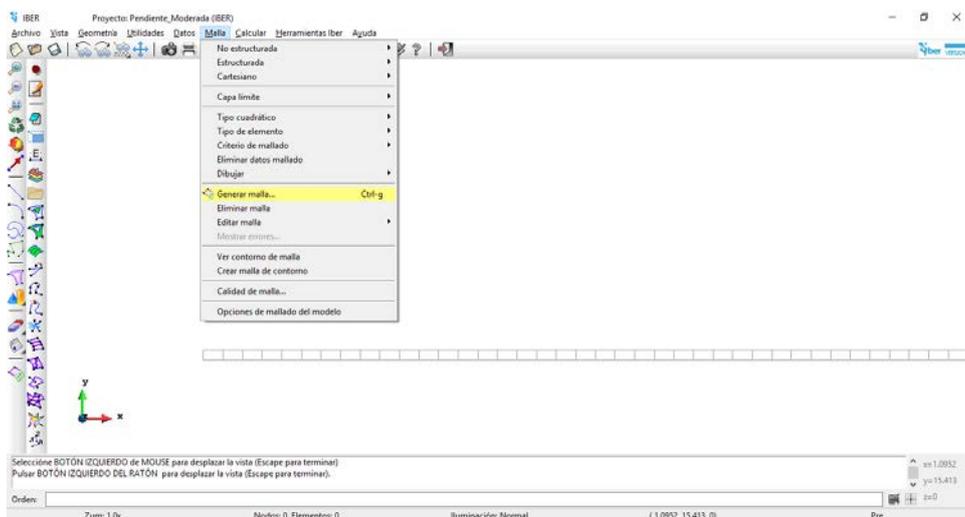


Figura 14: Generación de la malla.

En los archivos proporcionados, además de la geometría, ya se ha definido la rugosidad del canal como un coeficiente de Manning asignado a la superficie del canal. Asimismo se ha asignado el tiempo de simulación. Si se desea variar alguno de los dos, la explicación se encuentra en el apartado 3.2 de este documento.

Por último, para calcular simplemente seleccionamos *Calcular >> Calcular*, o directamente la tecla *F5*. La evolución del proceso se puede seguir desde el menú *Calcular >> Ver información de proceso*.

Cálculo de curvas de remanso y fenómenos locales con Iber

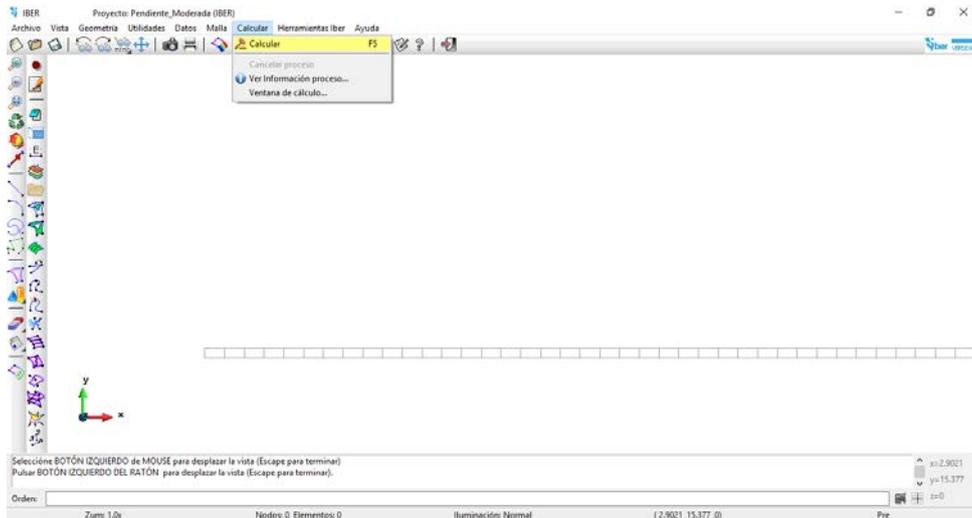


Figura 15: Herramienta “Calcular” y “Ver información del proceso”.

Después de unos segundos el proceso debería finalizar y salir el siguiente mensaje:

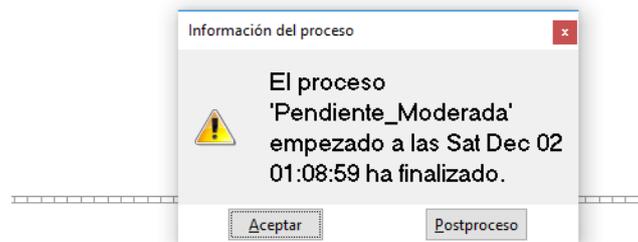


Figura 16: Mensaje de finalización del proceso de cálculo.

Se selecciona *Postproceso* para ver los resultados.

Una vez en esta pantalla, es preciso definir un corte longitudinal para obtener los resultados calculados en un gráfico. Para ello, se utiliza la herramienta “Crear secciones”.

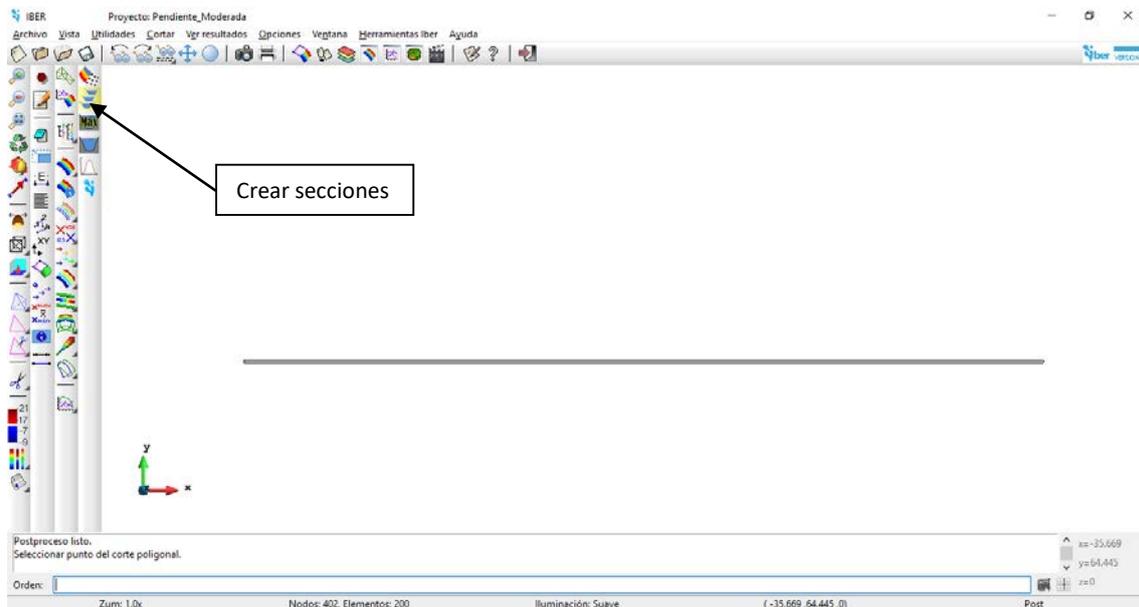


Figura 17: Herramienta "Crear secciones"

Con esta herramienta se puede definir en cualquier zona del modelo para, posteriormente obtener los resultados. Como en este caso interesan los resultados a lo largo del canal, se define a partir de los dos siguientes puntos: (0,0.25) y (200,0.25).

Una vez creada la sección, para dibujar el gráfico Cota - Distancia solo hay que pulsar "Dibujar lámina de agua de un instante".

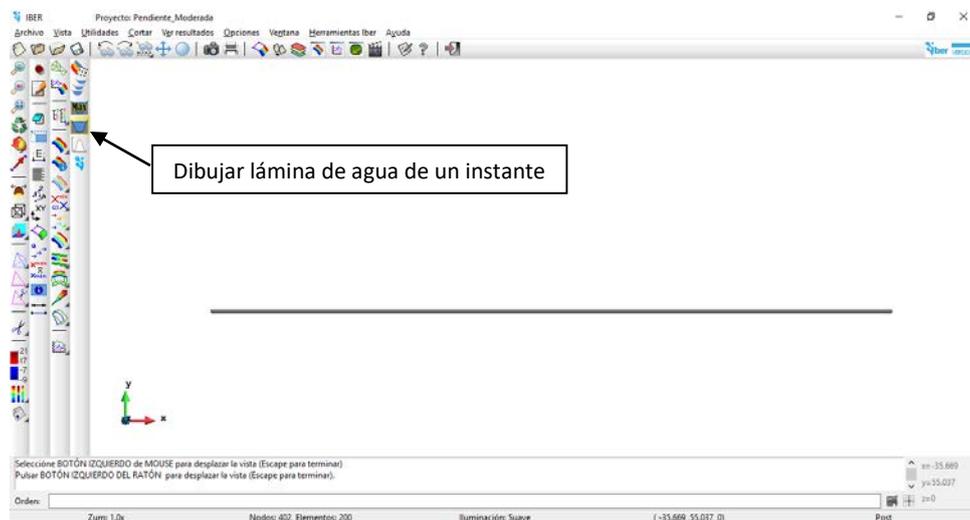


Figura 18: Dibujar la lámina de agua de un instante según una sección definida.

Se selecciona la *C_CutWire_1_Layer0*, que es un corte longitudinal a la mitad y a lo largo de todo el canal, y el último instante de tiempo (1500 s). El gráfico debería tener la apariencia que se muestra en la Figura 19.

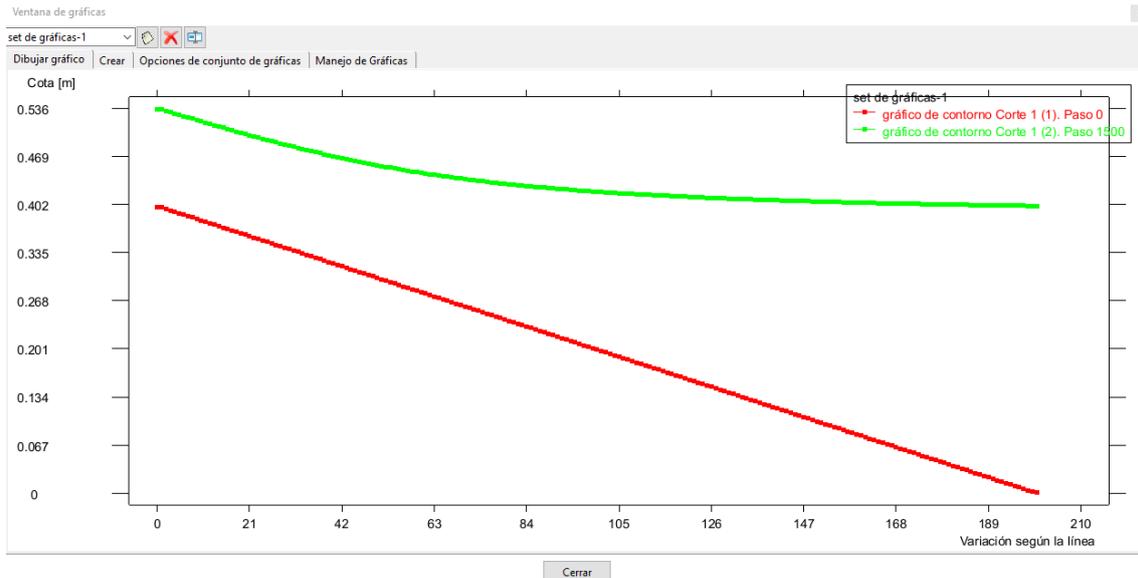


Figura 19: Curva M1 en la sección longitudinal "C_CutWire_1_Layer0" en el instante 1500 s.

Pulsando el botón derecho del ratón y seleccionando el menú *Etiquetas >> Seleccionar >> Res*, se puede obtener el valor de las variables representadas en los puntos que se seleccionen. De esa manera se puede comprobar que aguas arriba el valor de calado normal es de 0.135 m (diferencia entre cota del agua y cota del fondo del canal aguas arriba).

Pregunta: ¿Con que otra condición de salida se podría generar esta curva?

Respuesta: En lugar de un nivel impuesto se podría utilizar un vertedero con una altura mayor que el calado normal, por ejemplo: *Condición de flujo: Subcrítico >> Tipo: Vertedero >> Coeficiente: 1.6 >> Vertedero: Altura >> Altura de vertedero (m): 0.32*. La lámina sería muy parecida a la de la Figura 19.

Pregunta: ¿Qué pasaría si en vez de 0.40 m, en el contorno de salida se impusiese un valor inferior a 0.40, pero superior al calado normal (0.135)?

Respuesta: Cuanto menor sea el calado impuesto, menor será la energía aguas abajo, y por tanto, menor su distancia de influencia aguas arriba. Probando con un nivel impuesto **de 0.2 m** se obtiene la curva de remanso representada en la Figura 20. Se recuerda, que al modificar la condición de salida (el nivel impuesto), es necesario volver a crear la malla.

Cálculo de curvas de remanso y fenómenos locales con Iber

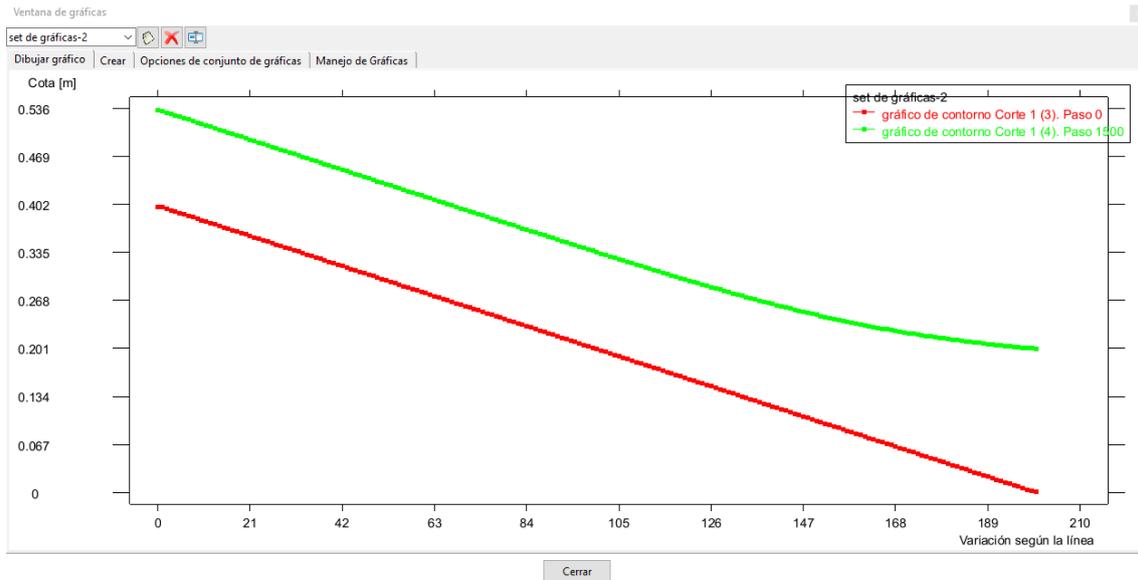


Figura 20: Curva M1 en la sección longitudinal "C_CutWire_1_Layer0" en el instante 1500 s con un nivel impuesto aguas abajo inferior.

Como se observa en la Figura 20, el calado normal se mantiene durante más distancia.

Pregunta: ¿Si aumentamos el coeficiente de Manning en el caso anterior (calado a la salida = 0.2 m), por ejemplo hasta $n = 0.025 \text{ s/m}^{1/3}$, la curva de remanso M1 aumentará o disminuirá su longitud?

La modificación del número de Manning se ha explicado en el apartado 3.2. Como se puede comprobar en la Figura 21 al aumentar el número de Manning se aumenta la pérdida de energía a lo largo del canal (a la vez que el calado normal aumenta) provocando que la curva M1 se haga más pequeña. De nuevo, al modificar el rozamiento hay que generar una nueva malla.

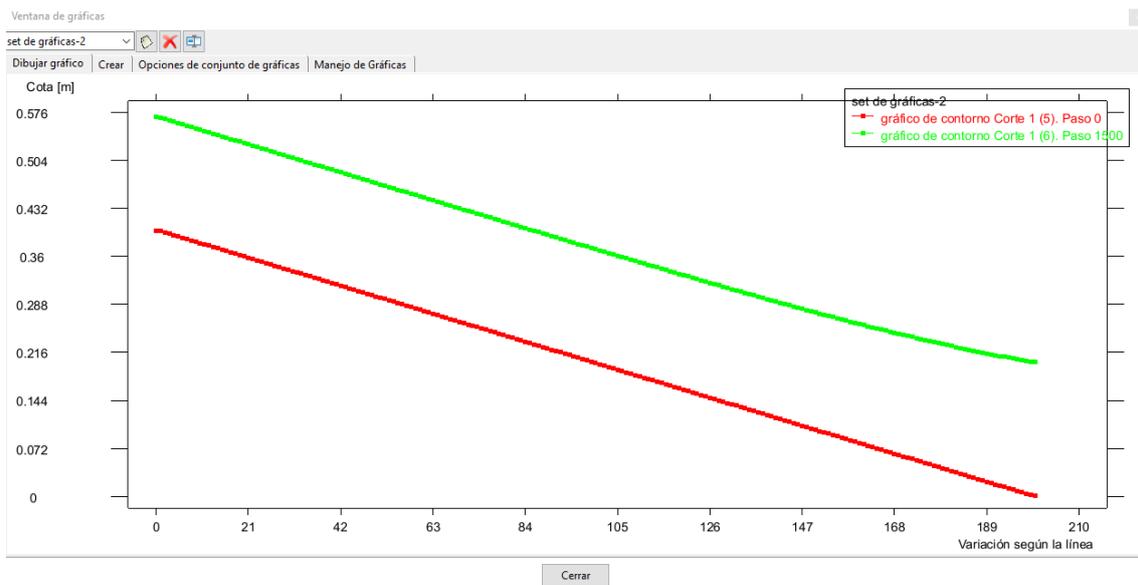


Figura 21: Curva M1 en la sección longitudinal "C_CutWire_1_Layer0" en el instante 1500 s con un nivel impuesto aguas abajo inferior y número de Manning superior.

3.4 Curva M2

Una vez obtenida la curva M1, se puede aprovechar la misma geometría para calcular la M2. Se sale del Post-Proceso (Figura 22) y se elimina la vista de malla con el botón de la esquina inferior izquierda. Con este botón únicamente cambiamos la vista entre geometría y malla, pero la malla sigue existiendo (no se borra). Además, se mantienen los tamaños de malla asignados a la superficie, por lo tanto, una vez realizadas las modificaciones pertinentes, solo habrá que crear la malla.

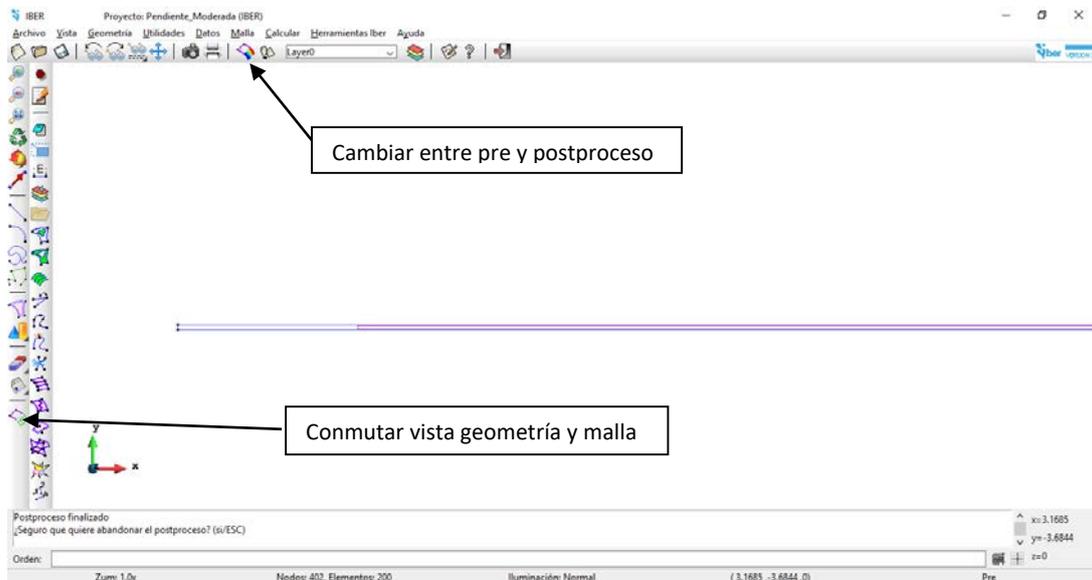


Figura 22: Herramientas “Cambiar entre pre y postproceso” y “Conmutar vista geometría y malla”.

Cambiaremos las condiciones de contorno para conseguir la curva M2.

Se vuelve a utilizar el menú *Datos >> Hidrodinámica >> Condiciones de contorno* descrito en la Figura 9. En este caso imponemos un caudal de entrada constante e igual a $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ (*Entrada: Caudal total >> Régimen: Crítico/Subcrítico >> Caudal total: 0.5*), y se asigna a la línea de entrada.

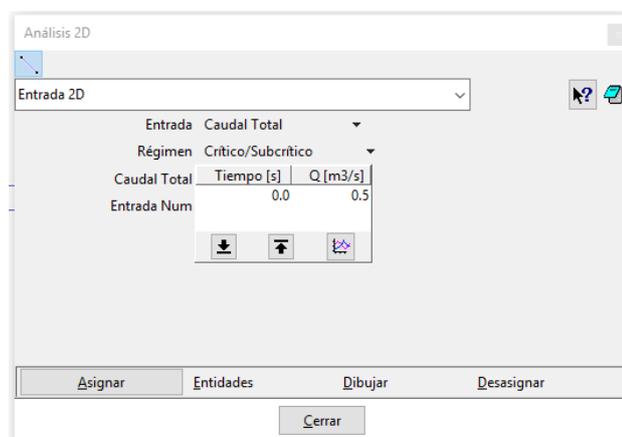


Figura 23: Condición de contorno de entrada para generar una curva M2.

Como condición de salida se impone régimen *Supercrítico/Crítico*, y se le asigna a la línea de salida, tal como se muestra en la Figura 24.

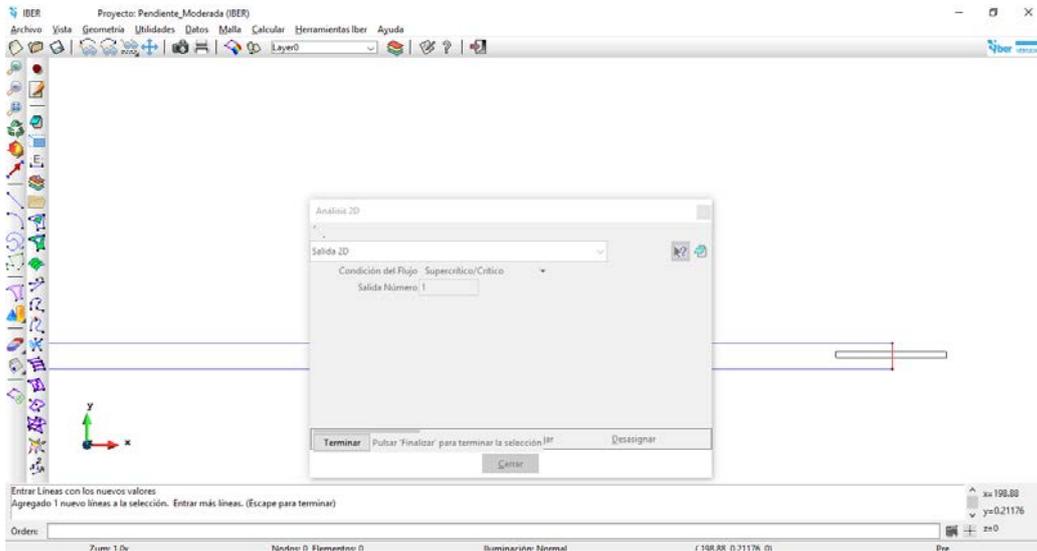


Figura 24: Asignación de condición de contorno de salida para generar una curva M2.

Cada vez que se realice un cambio en las condiciones de contorno, es necesario volver a generar la malla para que se transfieran las condiciones impuestas en la geometría a la malla de cálculo. Se calcula con las nuevas condiciones y se vuelve a seleccionar la misma sección y el instante final. No es necesario crear una nueva sección de cada vez si no se cambia de archivo. Se debe obtener la curva representada en la Figura 25.

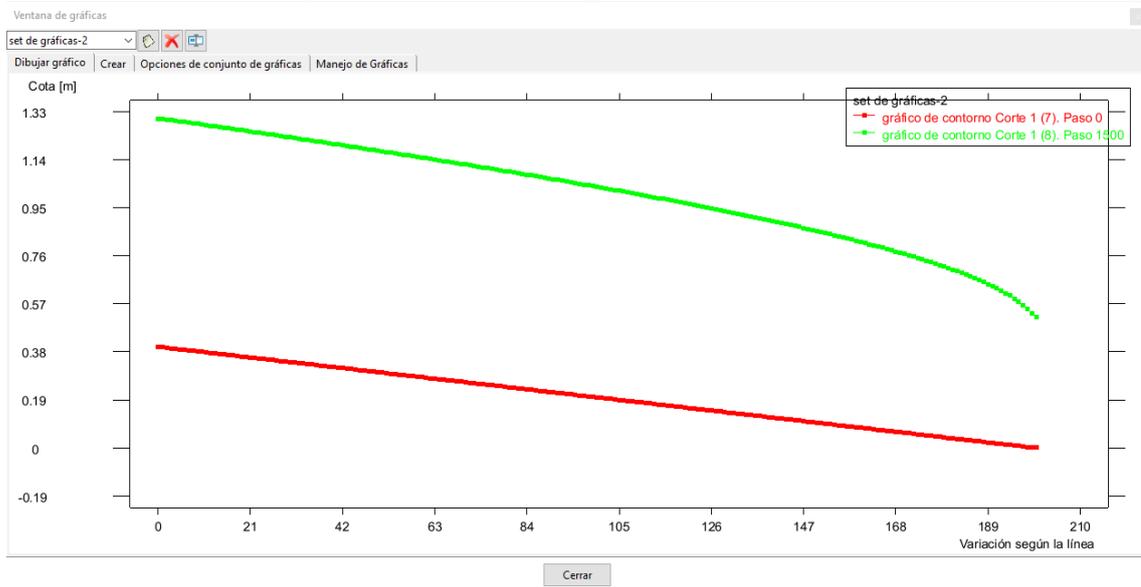


Figura 25: Curva M2 en la sección longitudinal "C_CutWire_1_Layer0" en el instante 1500 s.

Aguas arriba se alcanza casi el calado normal (0.98 m), la lámina de agua tiende hacia el calado normal, pero el canal no es lo suficientemente largo. Aguas abajo se alcanza el calado crítico de 0.50 m.

Pregunta: ¿Qué pasaría si se modificase el caudal (por ejemplo de 0.5 m³/s a 1.0 m³/s)?

Respuesta: Los calados normal y crítico aumentan, es decir, los calados aguas arriba y aguas abajo aumentan.

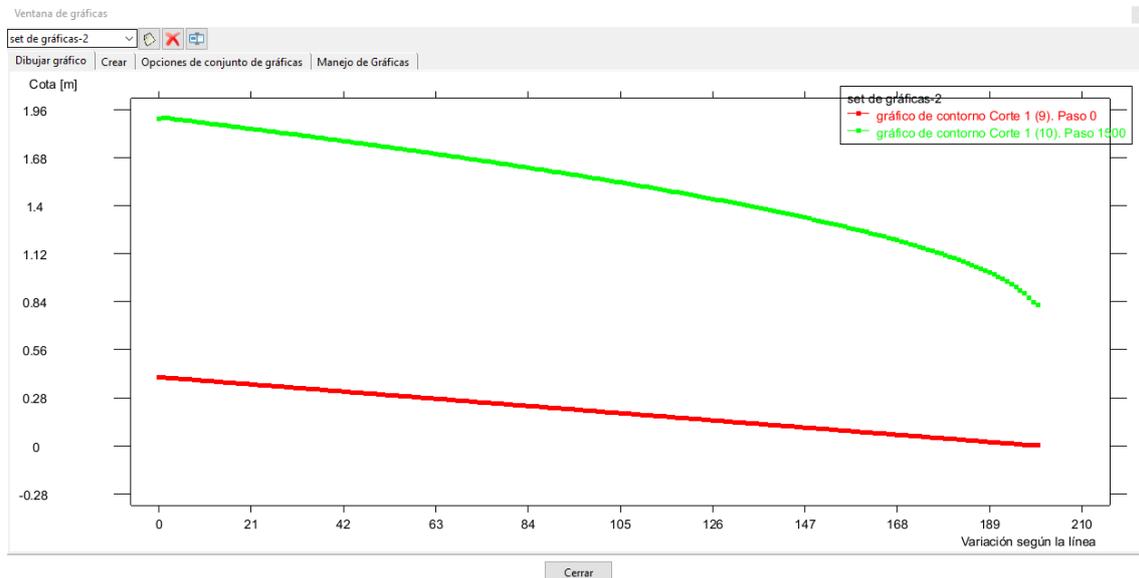


Figura 26: Curva M2 en la sección longitudinal "C_CutWire_1_Layer0" en el instante 1500 s con caudal de entrada de 1 m³/s.

Pregunta: ¿Qué pasaría si como condición de contorno aguas abajo se impusiese un valor del calado igual a 0.25 m?

La condición aguas debajo de un calado inferior al calado crítico (la energía del agua es superior a la condición impuesta), por tanto, no varía en absoluto la lámina de agua ni para un caudal de entrada de 0.50 m³/s, ni para 1.0 m³/s.

3.5 Curva M3

La última curva que se va a calcular con esta geometría es la M3, la cual se produce en régimen rápido. Salimos del Post-Proceso y cambiamos a la vista de geometría (conmutar vista geometría-malla) para volver a cambiar las condiciones de contorno.

En este caso, al tratarse de régimen rápido vamos a definir las siguientes condiciones. En el contorno de entrada asignamos una condición de *Caudal Total* >> *Régimen: Supercrítico* >> *Caudal total: Q = 0.5 m³/s y v = 15 m/s*. En este caso, debido a que la entrada del agua se produce en régimen rápido (número de Froude es mayor que 1) es necesario imponer además del caudal total (como en los casos anteriores) la velocidad del agua (también se podría imponer el calado, ya que ambos están relacionados por el caudal unitario). El calado a la entrada será:

$$y = \frac{Q}{v \cdot B} = \frac{0.5}{15 \cdot 0.5} = 0.07 \text{ m}$$

En este caso, la mayor parte de la energía del agua será la debida a su velocidad.

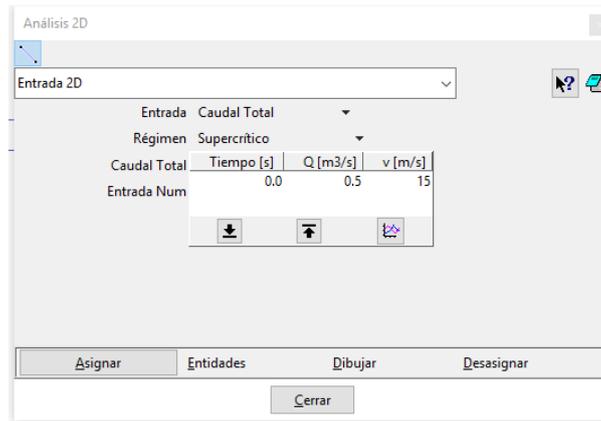


Figura 27: Condición de contorno de entrada para generar una curva M3.

Como condición de salida se impone un nivel igual al calado normal (Figura 28) para que, una vez la curva M3 que se va a generar alcance el calado normal conjugado y se produzca el resalto hidráulico no se forme ninguna curva, es decir, que se mantenga el calado normal de 0.98 m.

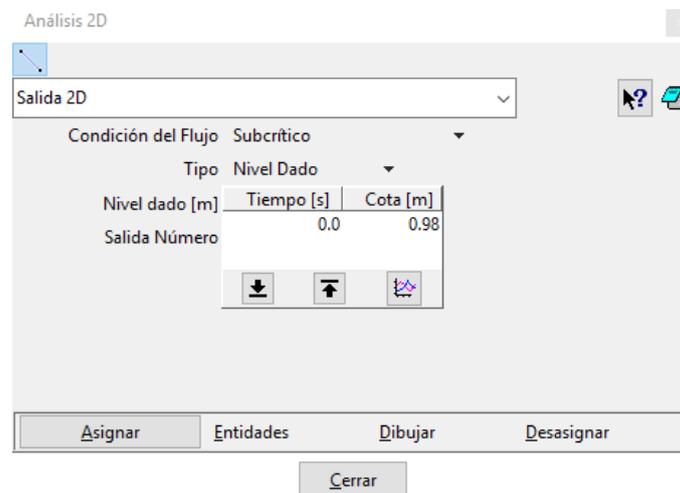


Figura 28: Condición de contorno de salida para generar una curva M3.

Se vuelve a generar la malla y se calcula. En este caso el gráfico debería salir como se muestra en la Figura 29.

Cálculo de curvas de remanso y fenómenos locales con Iber

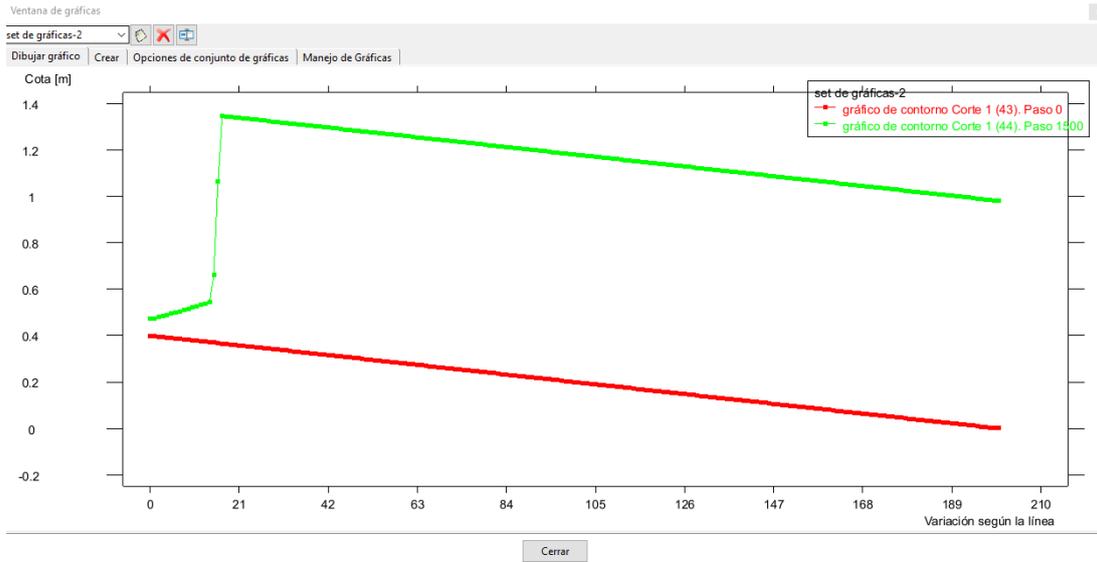


Figura 29: Curva M3 en la sección longitudinal "C_CutWire_1_Layer0" en el instante 1500 s.

Justo aguas abajo del contorno de entrada, debido a la elevada velocidad del agua se produce un descenso muy rápido de la energía a causa del rozamiento del fondo. Al encontrarse el flujo en régimen rápido, dicho descenso se traduce en un aumento del calado y una disminución de la velocidad. Cuando el calado alcanza un valor de 0.19 m (que es el calado conjugado del calado normal) se produce un resalto hidráulico que produce una elevación de la cota de la lámina de agua hasta el calado normal (0.98 m). Aguas abajo se mantiene este calado por la condición de salida impuesta en la Figura 28.

Pregunta: ¿Qué sucedería si en lugar de imponer el calado normal aguas abajo se impusiese una condición de flujo supercrítico?

Respuesta: Después de la curva M3 y el resalto hidráulico (que son iguales a los visto en la Figura 29) se formará una curva M2 que parte del calado normal (0.98 m), alcanzado mediante el resalto, y tiende al calado crítico (0.47 m).

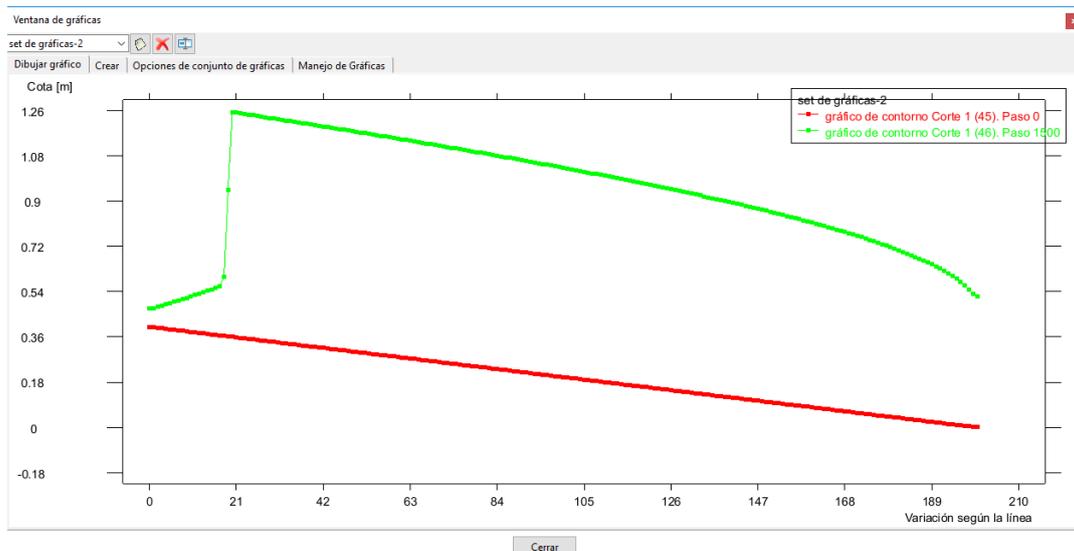


Figura 30: Curva M3 en la sección longitudinal "C_CutWire_1_Layer0" en el instante 1500 s sin condición de contorno aguas abajo.

Pregunta: ¿Cómo podría hacerse que el resalto hidráulico se produjese más lejos de la entrada del canal?

Respuesta: Una forma es disminuyendo el coeficiente de Manning, ya que de esta forma se reduce el rozamiento y por tanto la pérdida de energía se producirá más lentamente. En el pre-proceso, se modifica en el menú *Datos >> Rugosidad >> Uso del Suelo*.

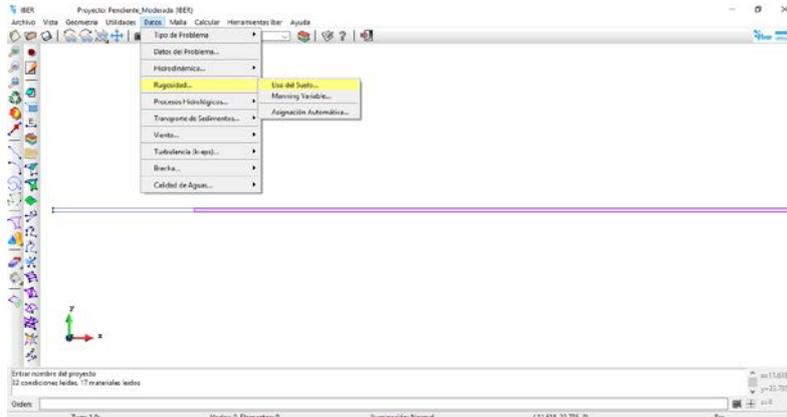


Figura 31: Introducción del coeficiente de Manning.

Escogiendo un valor inferior (por ejemplo $n = 0.008 \text{ s/m}^{1/3}$) y se asigna a la superficie del canal.

Además hay que modificar el rozamiento de las paredes para igualarlo con el nuevo coeficiente de Manning de la solera. En (*Datos >> Datos del problema >> General >> “Mostrar” en Opciones generales >> Manning pared >> 0.008*)

De esta manera, se reduce la pérdida de energía y por tanto, el resalto hidráulico se producirá a más distancia. La nueva lámina de agua se muestra en la Figura 32.

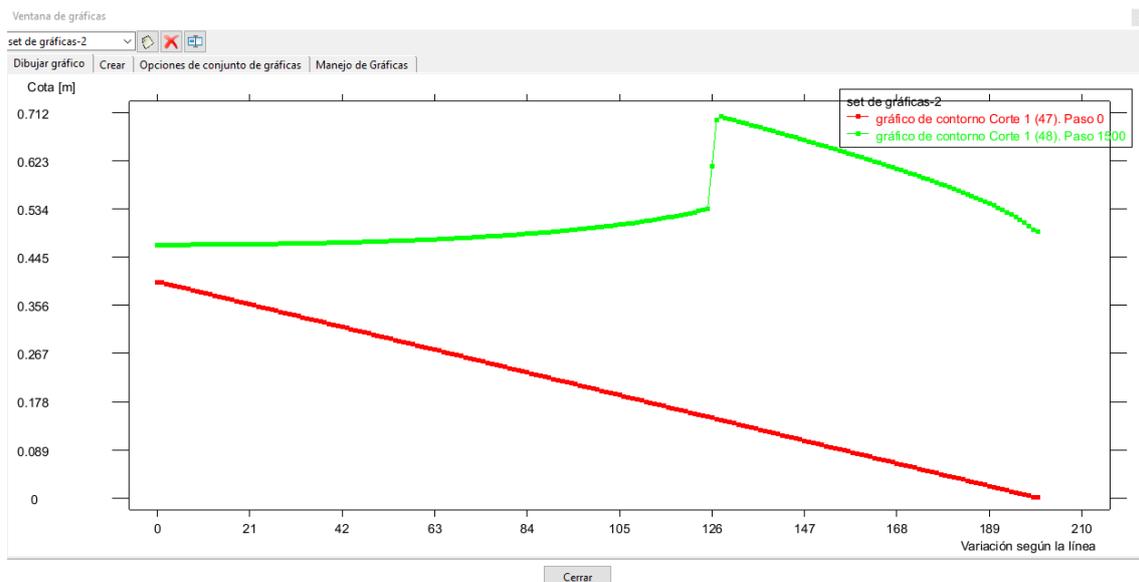


Figura 32: Curva M3 en la sección longitudinal “C_CutWire_1_Layer0” en el instante 1500 s con nuevo coeficiente de Manning.

4. PENDIENTE PRONUNCIADA

Se dice que la pendiente de un canal es pronunciada cuando **el calado crítico es superior al normal**. Los tipos de curvas asociados a la pendiente pronunciada son **la S1 en régimen lento y las S2 y S3 en rápido**.

En los siguientes ejemplos se describe cómo generar las curvas de remanso S1, S2 y S3 con Iber. Los pasos seguidos van a ser similares a los realizados en el apartado anterior para pendiente moderada.

Para la realización del ejercicio se proporciona el archivo de Iber con la geometría del canal ya introducida (Figura 33). En este caso el coeficiente de Manning es igual a $n = 0.015 \text{ s/m}^{1/3}$, la pendiente del canal $i = 0.05$, su anchura $B = 0.5 \text{ m}$, y su longitud $L = 200 \text{ m}$. Con respecto al caso de pendiente moderada, únicamente se ha modificado la pendiente del canal.

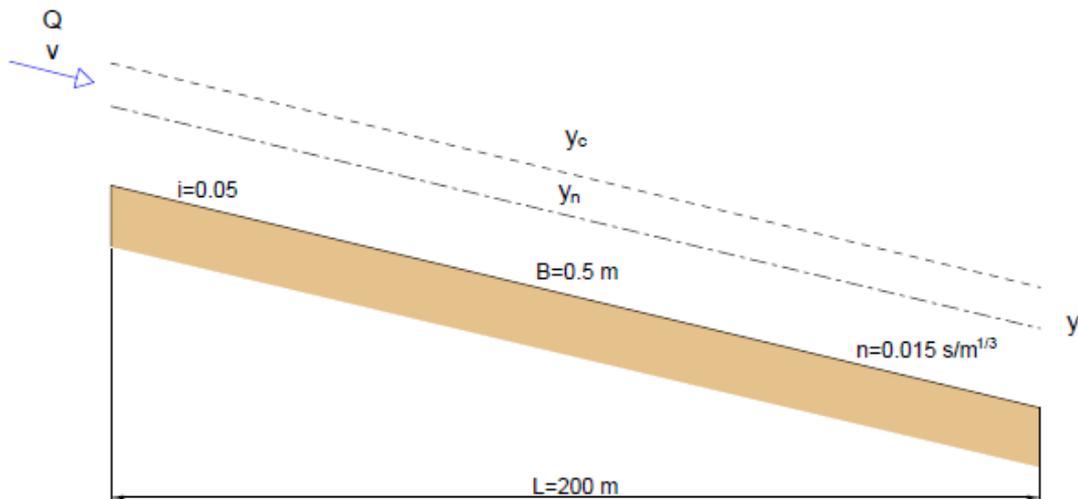


Figura 33: Diagrama del canal rectangular con pendiente pronunciada.

Generaremos las curvas de remanso mencionadas modificando únicamente las condiciones de contorno a la entrada y salida del canal, según los valores que se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4: Condiciones de contorno y calados normal y crítico de cada curva de remanso en pendiente pronunciada.

Curva	Condición de entrada		Condición de salida	Y_n	Y_c
	$Q \text{ (m}^3/\text{s)}$	$v \text{ (m/s)}$			
S1 y S2	1.0	2.70	Nivel dado = 8 m	0.45	0.74
S3	1.0	20	Crítico	0.45	0.74

4.1 Curva S1 y S2

En este apartado generaremos las curvas S1 y S2. La curva S2 parte aguas arriba del calado crítico y tiende aguas abajo hacia el calado normal, mientras que la S1 parte del calado crítico y tiende a aumentar su calado. En función del nivel impuesto se observará como se puede modificar el resalto que une ambas curvas.

Abrimos el proyecto con la geometría de pendiente pronunciada proporcionada *Archivo >> Abrir >> Pendiente_Pronunciada*.

Introducimos las condiciones de contorno en la entrada y salida del canal desde el menú *Datos >> Hidrodinámica >> Condiciones de contorno*. Como condición de entrada se introduce un valor de caudal de 1 m³/s y de velocidad 2.70 m/s (**Figura 34**) escogiendo: (Entrada >> Caudal Total y Régimen >> Supercrítico).

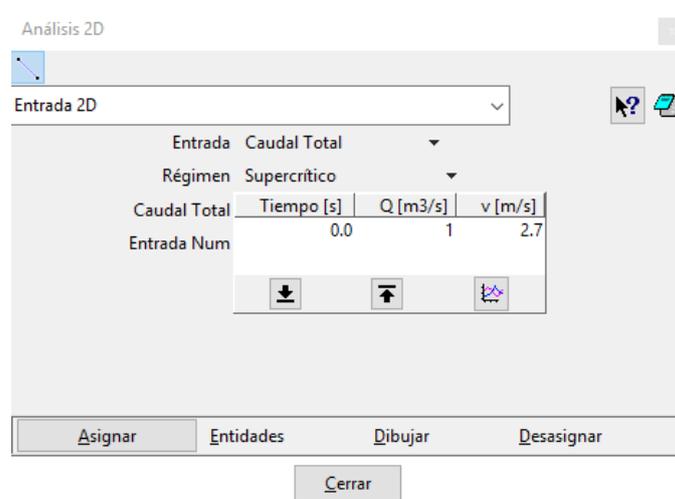


Figura 34: Condición de contorno de entrada para generar una curva S1.

La velocidad de 2.70 m/s se obtiene con la fórmula que relaciona el caudal con la velocidad:

$$v = \frac{Q}{B \cdot y_c} = \frac{1}{0.5 \cdot 0.74} = 2.70 \text{ m/s}$$

Como la curva S2 tiende al calado crítico (0.74 m) aguas arriba se utiliza este para calcular la velocidad.

Como condición de salida, para que se forme una curva S1 es preciso establecer un nivel dado de manera que se produzca régimen lento en el propio contorno. En este caso asignamos un nivel de 8 m (Figura 35).



Figura 35: Condición de contorno de salida para generar una curva S1.

Los parámetros de tiempo ya están definidos en el propio proyecto y son los mismos que los definidos en los casos anteriores. Se asignan los mismos tamaños de malla, se genera una nueva (*Ctrl + g*) y se calcula (*F5*).

La sección longitudinal ya está definida en el propio proyecto. Utilizando la herramienta *dibujar lámina de agua de un instante* escogemos la sección *C_CutWire_1_Layer0*, obteniéndose una curva como la representada en la Figura 36.

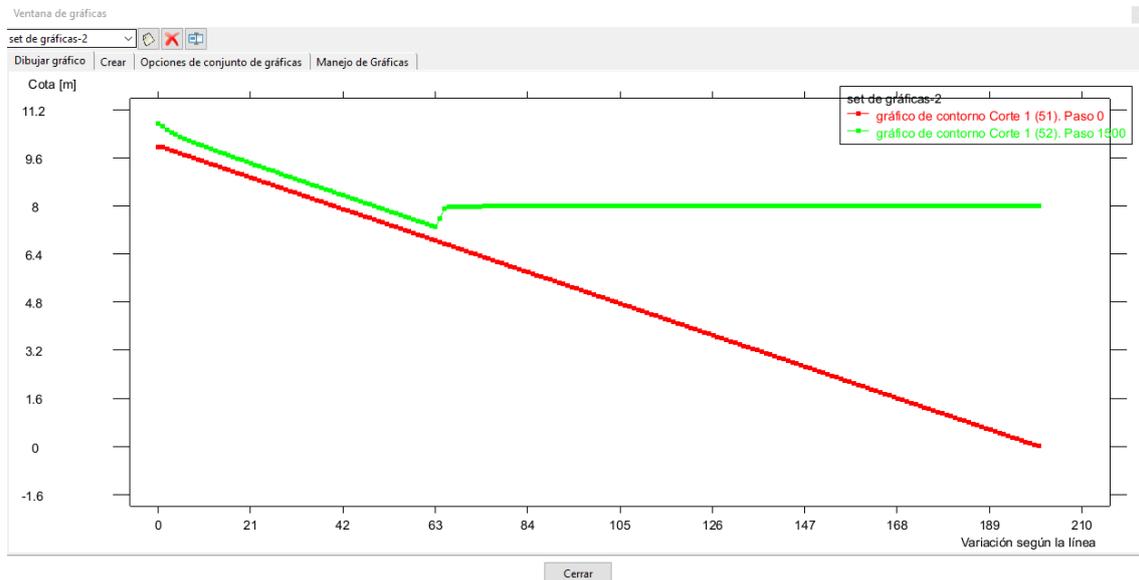


Figura 36: Curva S1 en la sección longitudinal "C_CutWire_2_Layer0" en el instante 1500 s.

Al inicio del canal se genera una curva S2 que hace de transición entre el calado impuesto a la entrada del canal y el calado normal. Aproximadamente 60 m aguas abajo se produce un resalto hidráulico que compatibiliza el calado normal (en régimen rápido) con una curva S1 (ya en régimen lento).

Pregunta: ¿Qué pasaría si se aumentase o disminuyese el nivel impuesto aguas abajo?

Respuesta: Con un nivel menor en el contorno de aguas abajo (por ejemplo de 4 m), la energía en el tramo de la curva S1 sería menor que en el caso anterior, y por lo tanto el tramo con calado normal en régimen rápido se mantendría durante una longitud del canal mayor y el resalto hidráulico se produciría más cerca de la salida del canal (Figura 37).

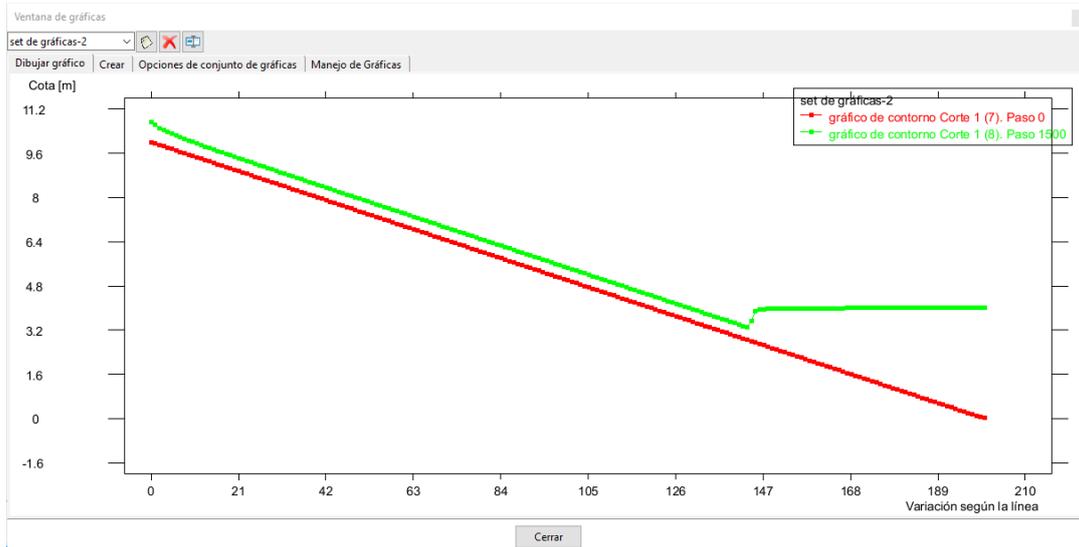


Figura 37: Curva S1 en la sección longitudinal "C_CutWire_2_Layer0" en el instante 1500 s con un nivel dado de 4 m.

Por el contrario, si el nivel impuesto en la salida fuese mayor (de 10 m), el resalto se produciría más cerca de la entrada del canal.

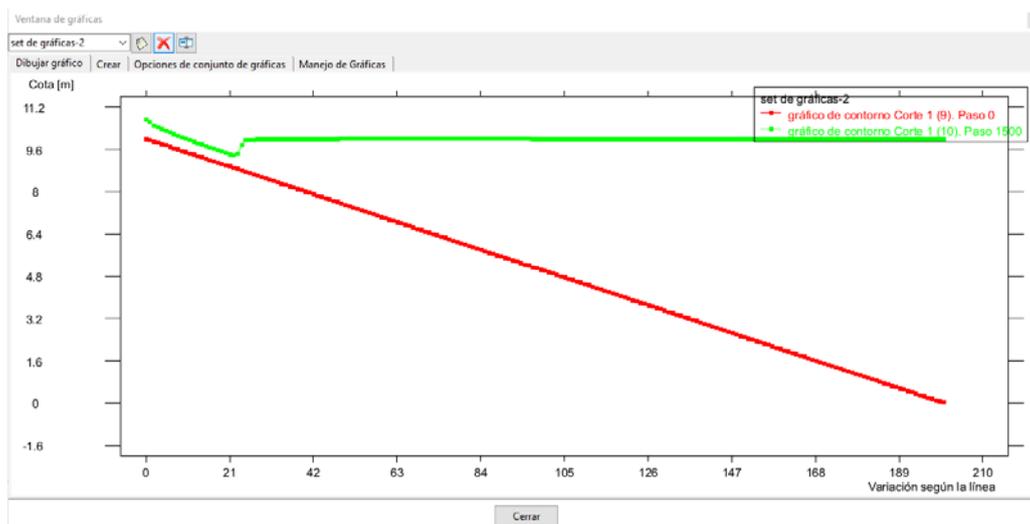


Figura 38: Curva S1 en la sección longitudinal "C_CutWire_2_Layer0" en el instante 1500 s con nivel dado de 10 m.

Si se impone un nivel muy alto desaparecería el resalto y se formaría únicamente una curva S1. El calado de inicio de la S1 mencionada depende del nivel impuesto aguas abajo. Existe un nivel determinado para el cual la curva S1

comienza en el calado crítico (0.74 m) a la entrada del canal. Si el nivel impuesto en la salida es todavía mayor la curva S1 anegará la entrada del canal y la curva S2 desaparecerá.

4.2 Curva S3

La curva S3 es aquella que tiende al calado normal aguas abajo y aguas arriba a un calado inferior al normal. Por lo tanto, para obtenerla, es necesario imponer una condición de entrada en la cual la mayoría de la energía esté en forma de velocidad. El calado de entrada debe ser inferior al normal (0.45 m), así que primero debe obtenerse la velocidad correspondiente a este canal:

$$v = \frac{Q}{B \cdot y_c} = \frac{1}{0.5 \cdot 0.45} = 4.42 \text{ m/s}$$

La velocidad en la entrada debe ser superior a 4.42 m/s. A medida que aumente, se reducirá el calado de entrada. Como se trata de un canal muy largo, para observar con mayor claridad la tendencia aguas arriba, se escoge una velocidad tal que el calado sea 0.10 m (**Figura 39**).

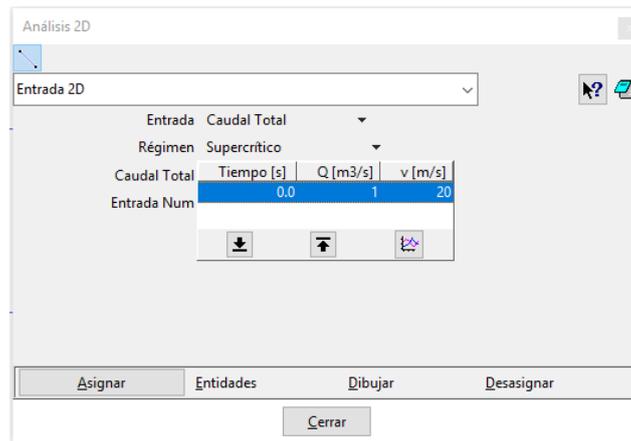


Figura 39: Condición de contorno de entrada para generar una curva S3.

Como condición de contorno aguas abajo imponemos la condición de flujo *Supercrítico/Crítico*.

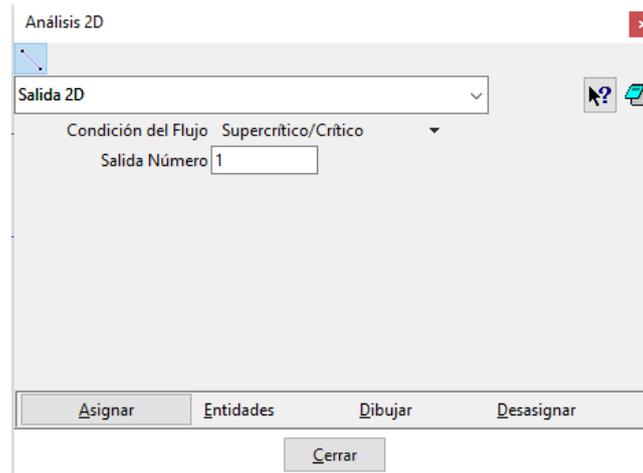


Figura 40: Condición de contorno de salida para generar una curva S3.

Generamos la malla y calculamos.

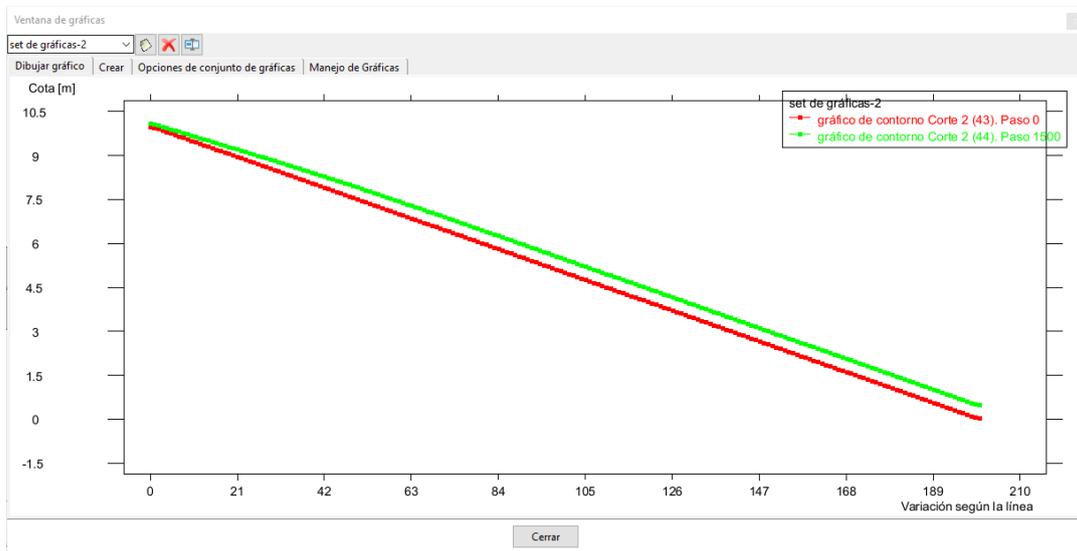


Figura 41: Curva S3 en la sección longitudinal "C_CutWire_1_Layer0" en el instante 1500 s.

El calado aguas arriba será el impuesto de 0.10 m, y aguas abajo el normal, igual a 0.45 m.

Pregunta: ¿Qué hay que modificar para aumentar o disminuir el calado a la entrada?

Respuesta: Como se ha descrito al inicio de este subapartado, a igual caudal unitario, cuanto mayor sea la velocidad de entrada menor será el calado (Figura 42).

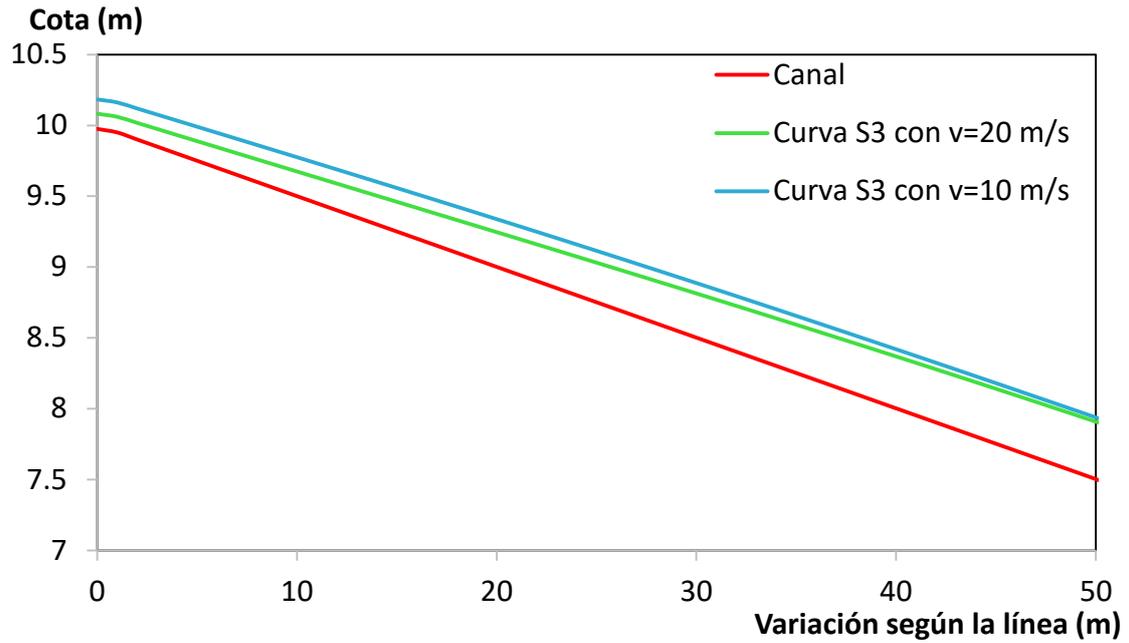


Figura 42: Curvas S3 en la sección longitudinal "C_CutWire_1_Layer0" en el instante 1500 s con velocidades de 20 y 10 m/s.

En la Figura 42 se representan las curvas S3 con las dos velocidades en los primeros 50 metros para observar la diferencia de calados al inicio del canal y cómo la tendencia hacia el calado normal es común en ambos casos.

5. CAMBIOS DE RÉGIMEN

En este apartado calcularemos diferentes situaciones típicas que dan lugar a cambios de régimen en un canal rectilíneo. Se entiende como cambio de régimen en un canal por el que circule agua en lámina libre a la transición de un tipo de curva de remanso en régimen lento a otra de régimen rápido, o viceversa.

5.1 Cambio de régimen lento a régimen rápido

Abrimos el proyecto de Iber *CambioRegimenLentoRapido.gid*, que incluye la geometría de un canal formado por dos tramos rectilíneos con un cambio de pendiente en el medio. Los datos de geometría, rugosidad y condición de entrada se representan de forma esquemática en la Figura 43.

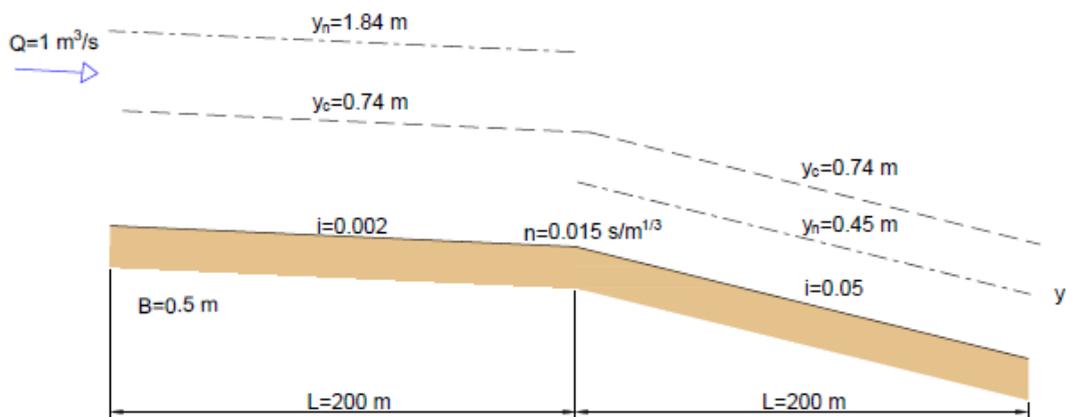


Figura 43: Diagrama del canal rectangular con transición de pendiente moderada a pronunciada.

Se debe introducir la condición de entrada en régimen *Crítico/Subcrítico*. Se utiliza el mismo caudal que en el apartado anterior, $1 \text{ m}^3/\text{s}$.

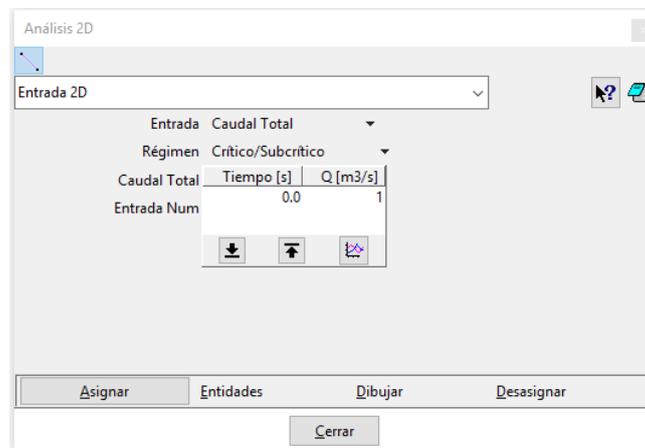


Figura 44: Condición de contorno de entrada para generar un cambio de régimen de una curva M2 a una S2.

En la salida simplemente asignamos *Condición de flujo* >> *Supercrítico/Crítica* a la línea que define el contorno de salida.

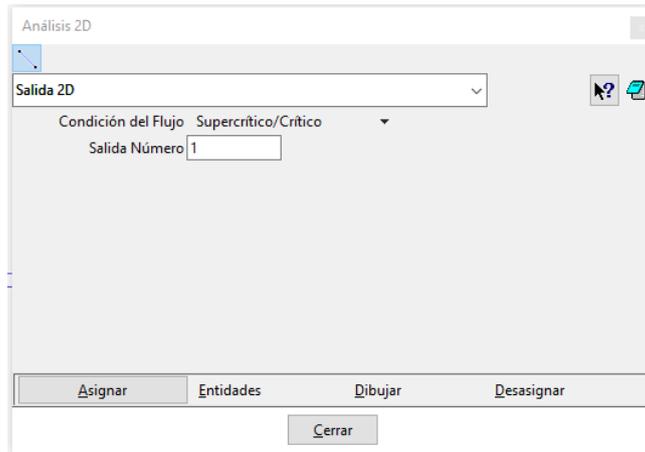


Figura 45: Condición de contorno de salida para generar un cambio de régimen de una curva M2 a una S2.

Como siempre generamos la malla, calculamos y dibujamos la lámina de agua en un instante dado a lo largo de un corte, escogiendo el corte longitudinal y el instante final.

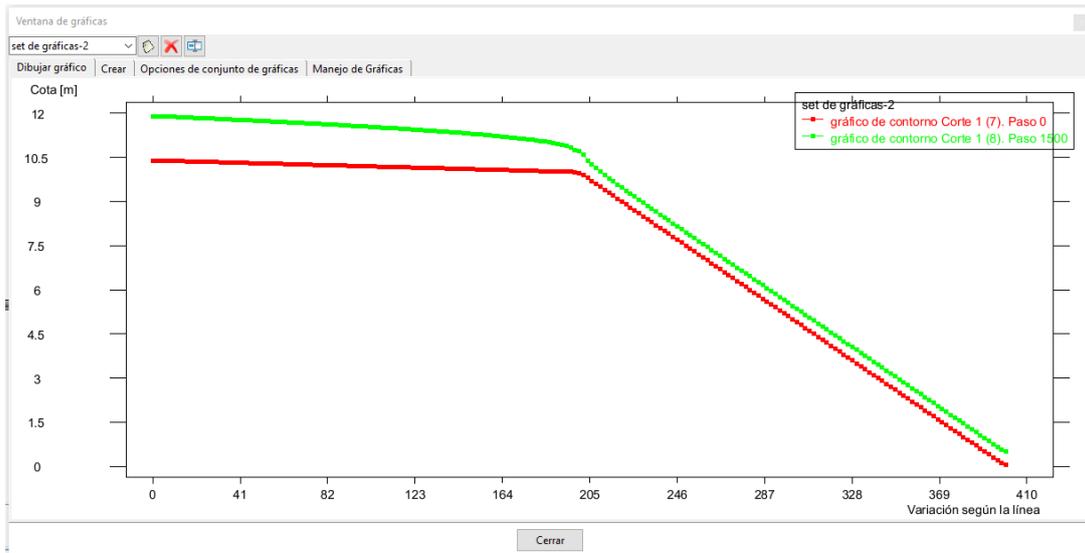


Figura 46: Cambio de régimen lento a rápido en la sección longitudinal "C_CutWire_1_Layer0" en el instante 1500 s.

Como se ve en la Figura 46, la transición entre las curvas M2 y S2 se produce en el cambio de pendiente pasando por el calado crítico, que es igual a 0.74 m. La curva en pendiente moderada (M2) tiende a su calado normal aguas arriba (calado normal igual a 1.80 m), y la de pendiente pronunciada (S2), hace lo mismo hacia aguas abajo (calado normal igual a 0.45 m).

Pregunta: ¿Qué otra condición aguas abajo generaría una lámina de agua igual?

Respuesta: Un vertedero que funcione como vertido libre (con altura igual a 0), o cualquier calado inferior al crítico.

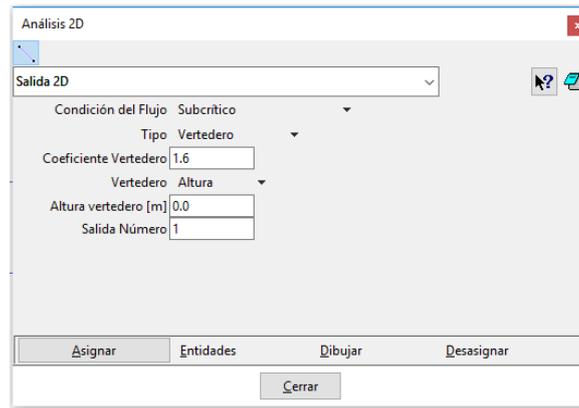


Figura 47: Condición de salida alternativa para generar el mismo cambio de régimen.

Pregunta: ¿Cómo afectaría a la curva M2 del primer tramo imponer como condición de salida un nivel dado superior al calado crítico?

Respuesta: Un nivel dado no afectaría en absoluto a la M2. Al pasar por el calado crítico ambas curvas son independientes. Sólo afectaría a la curva S2, ya que se generaría un resalto hidráulico en el tramo de pendiente pronunciada para alcanzar el nivel impuesto a la salida con una S1 (en régimen lento). Únicamente podría afectar a la M2 si el nivel impuesto en el contorno de salida fuese tan elevado que el resalto hidráulico alcanzase el punto en el que se produce calado crítico debido al cambio de pendiente en el canal.

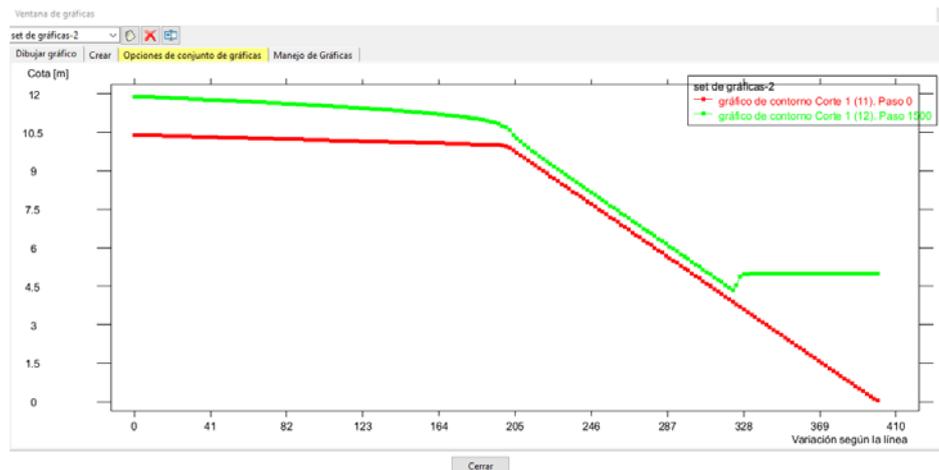


Figura 48: Cambio de régimen lento a rápido con un nivel dado aguas debajo de 10m.

5.2 Cambio de régimen rápido a régimen lento

Para hacer este caso abrimos un proyecto Iber en el cual está definido un canal con dos tramos de diferente pendiente *CambioRegimenRapidoLento*. En este caso se pasa de un tramo de 200 m con una pendiente de 0.05 a otra tramo con pendiente de 0.002, también de 200 m.

Cálculo de curvas de remanso y fenómenos locales con Iber

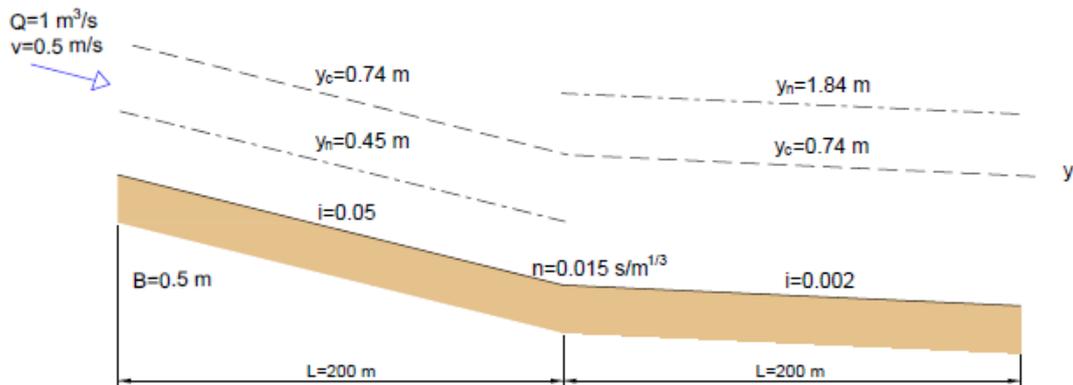


Figura 49: Diagrama del canal rectangular con transición de pendiente pronunciada a moderada

La condición de entrada que utilizaremos en este caso es *Entrada Caudal Total* >> *Régimen Supercrítico* >> *Caudal total: Q = 1 y v = 0.5* (Figura 50). A la salida imponemos la misma condición que en el caso anterior (Figura 51).

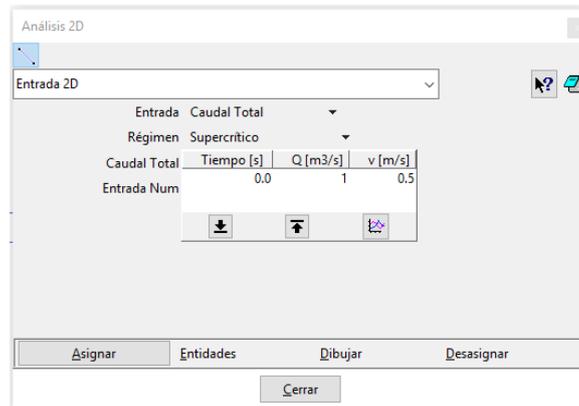


Figura 50: Condición de contorno de entrada para generar un cambio de régimen de una curva S2 a una M2.

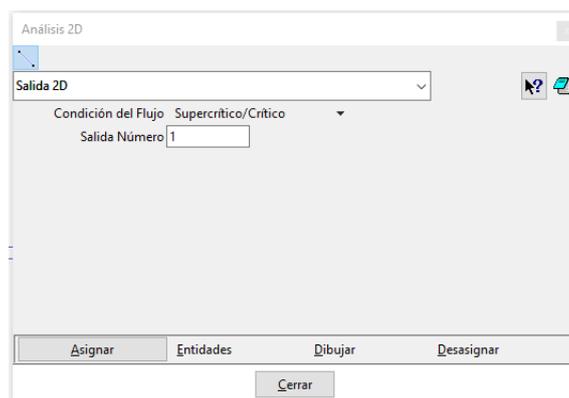


Figura 51: Condición de contorno de salida para generar un cambio de régimen de una curva S2 a una M2.

Procedemos como en los casos anteriores, y una vez realizado el cálculo se obtienen los perfiles que se muestran en la Figura 52.

Cálculo de curvas de remanso y fenómenos locales con Iber

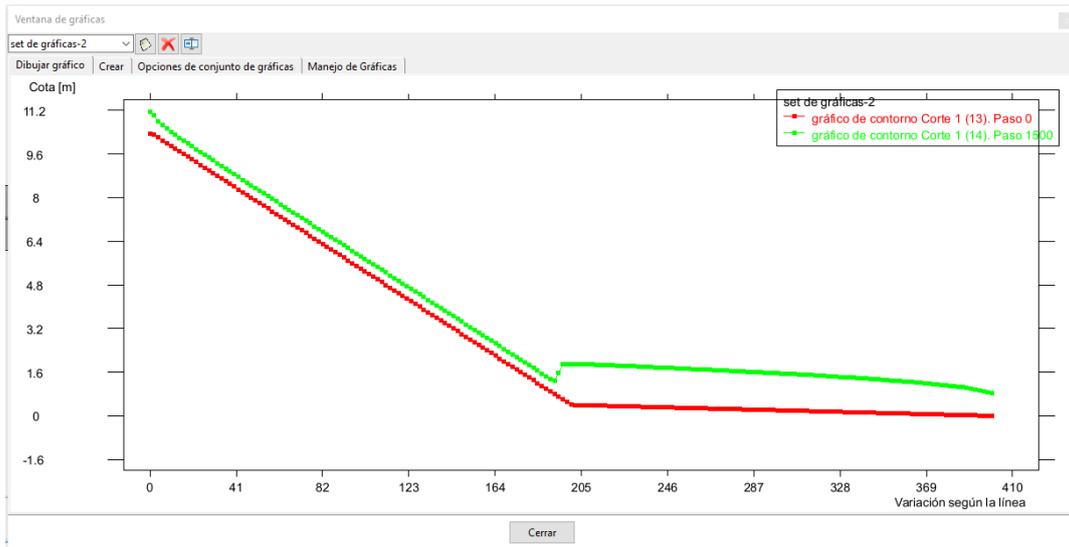


Figura 52: Cambio de régimen rápido a lento en la sección longitudinal "C_CutWire_1_Layer0" en el instante 1500 s.

La primera curva es una S2 que parte del calado crítico (igual a 0.75 m) y tiende rápidamente al calado normal, de 0.45 m. Antes de llegar al cambio de pendiente, aún en el tramo de pendiente pronunciada, se produce un resalto hidráulico que forma primero una S1 (prácticamente inapreciable en la Figura 43), y pasado $x = 200$ m, una M2.

Pregunta: Aumentando la velocidad de entrada, por ejemplo a 15 m/s, ¿qué diferencia habrá en la curva de entrada?

Respuesta: La primera curva de remanso será una S3 en lugar de una S2. El resto no cambia.

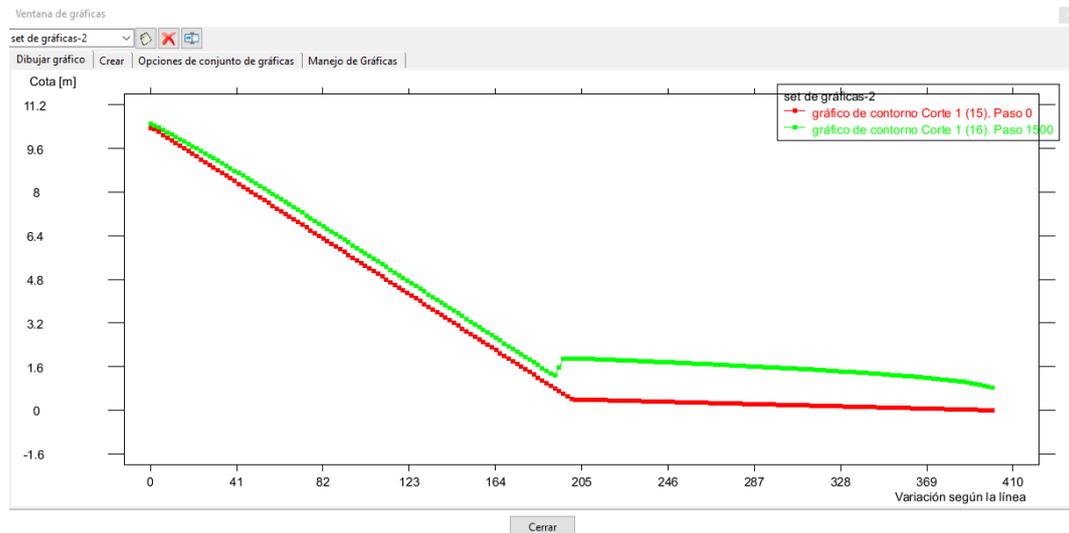


Figura 53: Cambio de régimen rápido a lento en la sección longitudinal "C_CutWire_1_Layer0" en el instante 1500 s con una velocidad superior.

6. EJERCICIO CURVAS DE REMANSO

En este ejercicio se propone realizar el cálculo de las curvas de remanso que se forman en un canal rectangular con 4 tramos de diferente pendiente. Los datos y el diagrama en perfil del problema se presentan en la Figura 45. Los tramos son de 500 m cada uno, de forma que se garantiza que se alcancen las tendencias asintóticas de la lámina libre en cada uno de ellos. El nombre del modelo es "Ejemplo_4.2.gid".

Este mismo ejercicio se recoge en el libro *Apuntes de Ingeniería Hidráulica* (Ejercicio de Recapitulación 4.2 del tema H8 - Movimiento permanente gradualmente variado, pp. 390-394).

$Q = 50 \text{ m}^3/\text{s}$; $B = 10 \text{ m}$; $n = 0.015$; Calado aguas arriba = 0.72 m ; Calado aguas abajo = 2 m

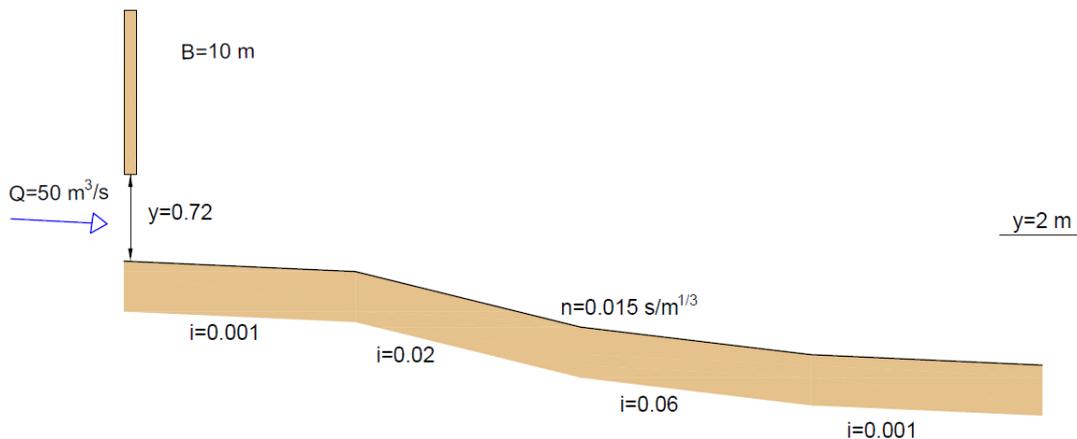


Figura 54: Enunciado del Ejemplo 4.2 del libro de hidráulica.

Introducimos las condiciones de contorno siguiendo los mismos pasos que en los casos anteriores: *Datos >> Hidrodinámica >> Condiciones de contorno*.

En el contorno de entrada la velocidad del agua se puede calcular a partir del caudal, ancho del canal y calado impuesto. Su valor será igual a 6.94 m/s . El número de Froude para estas condiciones es de 2.6 , lo cual implica régimen supercrítico. Por lo tanto, imponemos la condición de contorno *Entrada: Caudal Total >> Régimen: Supercrítico >> Caudal total: $Q = 10$ y $v = 6.94$ (Figura 55)*.

Cálculo de curvas de remanso y fenómenos locales con Iber

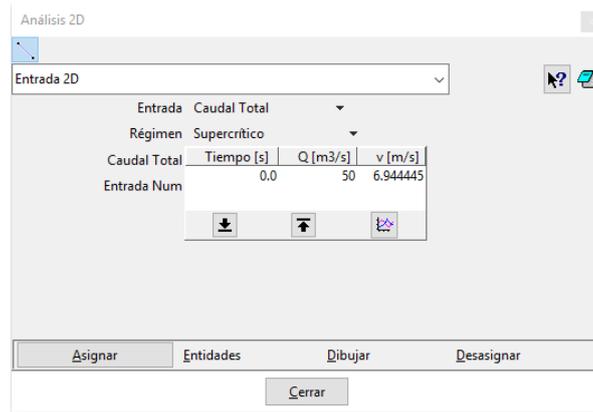


Figura 55: Condición de contorno de entrada para provocar el calado de entrada del problema.

En la salida imponemos *Condición de flujo: Subcrítico* >> *Tipo: Nivel dado* >> *Nivel dado (m): 2* (Figura 56).

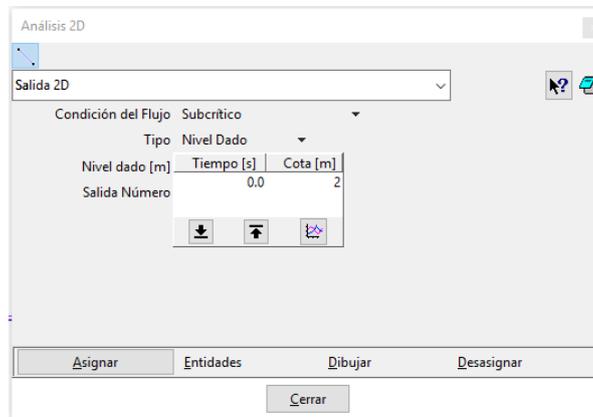


Figura 56: Condición de salida en forma de nivel impuesto.

Finalmente generamos la malla y calculamos, obteniendo el resultado mostrado en la Figura 57.

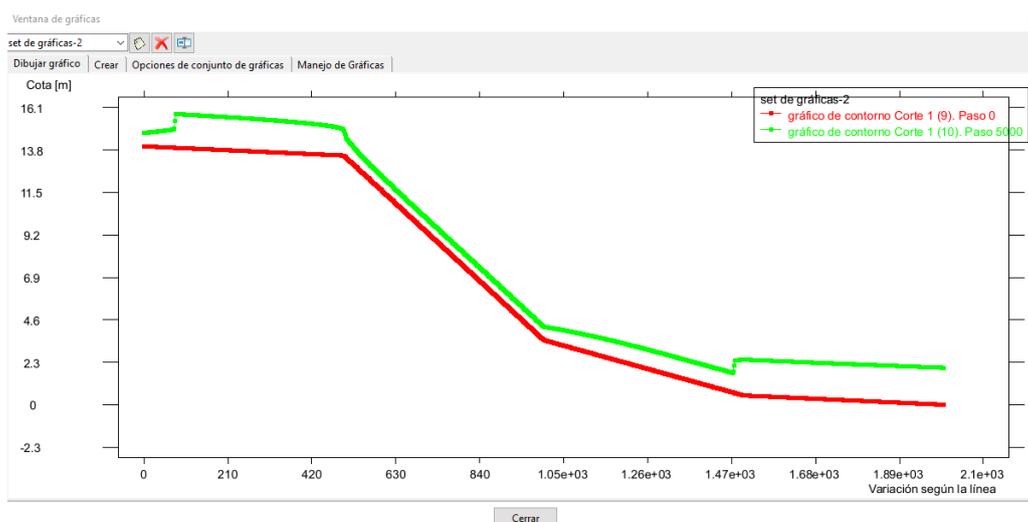


Figura 57: Solución del Ejemplo 4.2 con IBER.

Pregunta: ¿Los resultados obtenidos son iguales a la solución del libro?

Respuesta: Comprobando con la herramienta etiquetas, se ve que existen diferencias únicamente de centésimas.

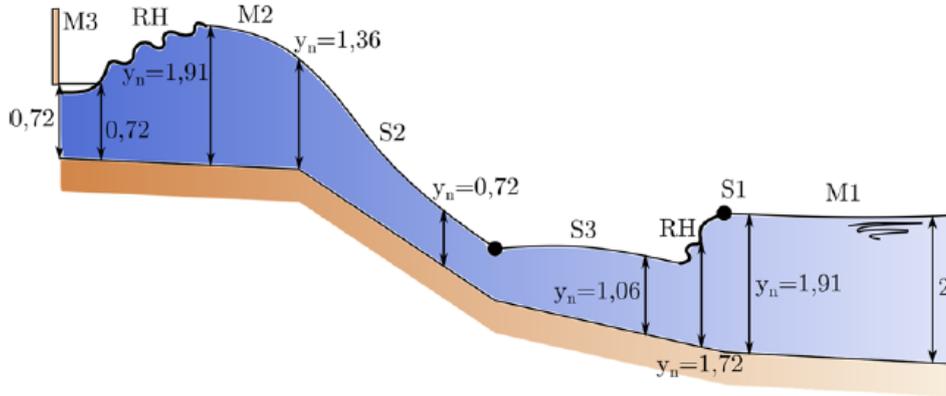


Figura 58: Solución del Ejemplo 4.2 según el libro de hidráulica.

7. FENÓMENOS LOCALES

En esta sección se propone la simulación de fenómenos locales en un canal ideal con objetivo de analizar cómo se comporta la lámina de agua ante variaciones repentinas de la geometría del canal. En el primer apartado, 7.1, se calculan los fenómenos locales asociados a la variación repentina de ancho de canal. En el segundo apartado 7.2, se calculan los fenómenos asociados a variaciones en la cota de la solera. En el apartado 7.3 se resuelve el problema H9-3 del libro *Apuntes de Ingeniería Hidráulica* (pp. 474-480). Por último, en el apartado 7.4 se realiza el mismo cálculo que en 7.1 y 7.2 pero con canales largos.

7.1 Estrechamientos y ensanchamientos

Para este apartado se proporcionan tres archivos Iber, correspondientes a diferentes geometrías de estrechamientos en un canal rectangular. En cada uno se ha definido la geometría de un canal, que está formado por dos o tres tramos con una cierta pendiente, anchura y longitud. En los archivos proporcionados, además de la geometría, ya se ha definido la rugosidad del canal mediante el coeficiente de Manning. El rozamiento con las paredes se ha desactivado (Datos >> Datos del problema >> General >> “Mostrar” en Opciones generales >> Fricción en las paredes >> No fricción), ya que, para analizar lo que sucede en estos fenómenos locales no es necesario tenerlo en cuenta. En estos ejemplos se han definido canales de poca longitud para analizar lo que sucede en las inmediaciones del estrechamiento, por lo tanto, no se observarán las tendencias asintóticas aguas arriba y aguas abajo.

Para analizar cada caso, simplemente hay que partir del archivo .gid de Iber correspondiente dentro de la carpeta “Fenomenos_locales_canales_cortos” proporcionada al alumno e imponer unas ciertas condiciones de contorno en los extremos de aguas arriba y abajo del canal. Los datos de los tres estrechamientos y el proceso a seguir para realizar los cálculos se explica a continuación.

7.1.1 Estrechamiento de gran longitud en régimen lento

El primer caso estudiado es un canal con un estrechamiento brusco a la mitad de su longitud. El estrechamiento se prolonga hasta el final del canal. Los datos de ejercicio y el esquema de la planta y perfil del canal se muestran en la Figura 59.

Datos: caudal $Q = 1 \text{ m}^3/\text{s}$; anchura $B_1 = 5 \text{ m}$; anchura $B_2 = 1 \text{ m}$; pendiente $i = 0.002$; coeficiente de Manning $n = 0.015 \text{ s}/\text{m}^{1/3}$; longitud $L = 40 \text{ m}$; Estrechamiento en $x = 20 \text{ m}$.

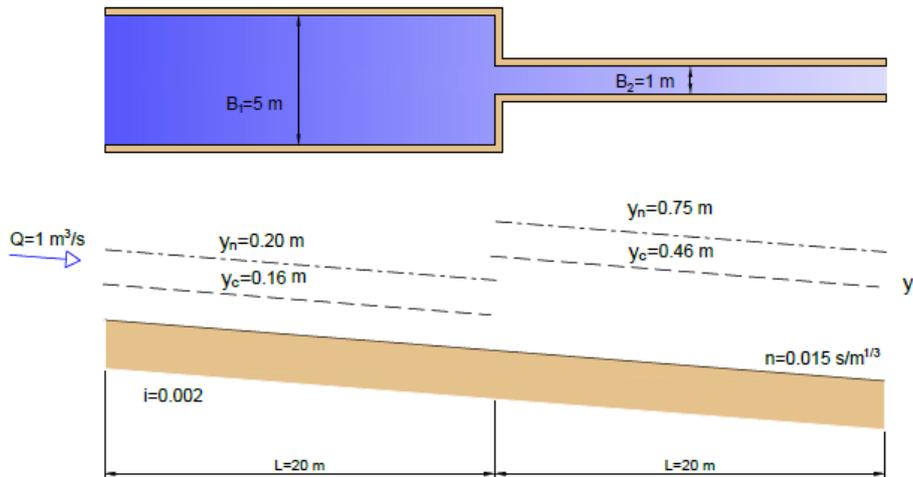


Figura 59: Diagramas en planta y en perfil del estrechamiento de gran longitud en régimen lento.

Una vez abierto el archivo de Iber “Estrechamiento_gran_longitud_reg_lento.gid” solo será necesario introducir las condiciones de contorno aguas arriba y aguas abajo. Se trata de una pendiente moderada en la cual se va a estudiar la influencia de un estrechamiento. Por lo tanto, se impone un caudal total constante como condición de entrada (Entrada: Caudal total >> Régimen Crítico/Subcrítico >> Caudal total: 1).

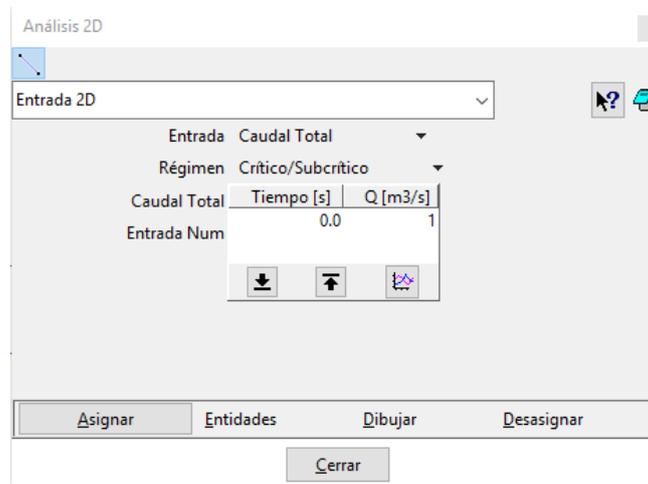


Figura 60: Condición de contorno de entrada del estrechamiento de gran longitud en régimen lento.

Y de salida, cualquier condición que no tenga influencia aguas arriba, ya sea en forma de vertido libre, o como régimen Supercrítico/Crítico. En este caso se propone un vertido con cota de vertedero igual a 0.

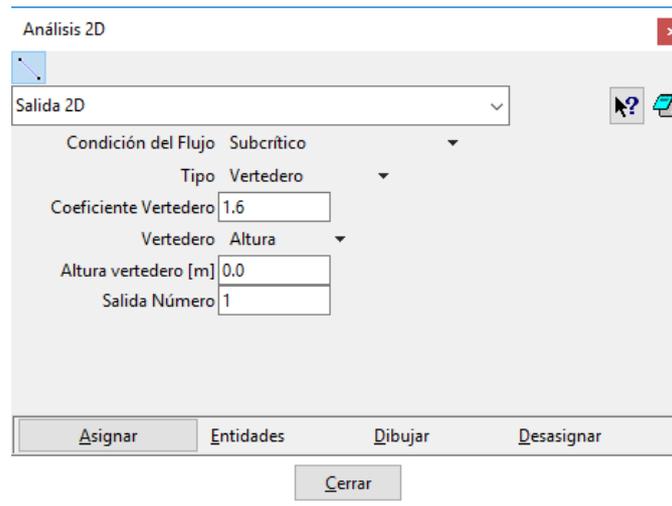


Figura 61: Condición de contorno de salida del estrechamiento de gran longitud en régimen lento.

Como en los apartados anteriores, los parámetros de tiempo ya han sido definidos en el archivo Iber. Pueden consultarse y modificarse en Datos >> Datos del problema >> Parámetros de Tiempo. El tiempo de cálculo fijado es de 500 segundos. Es un tiempo suficiente para que se alcance el estado estacionario y la lámina de agua se estabilice, ya que se trata de un canal corto.

Los tamaños de malla están definidos también en el archivo IBER. Para generar la malla se utiliza el menú “Malla >>Generar malla” o la combinación de teclas “Ctrl + g”. La malla generada debe ser similar a la mostrada en la Figura 62. En este caso la malla es no estructurada, formada por elementos triangulares de tamaño uniforme. La principal ventaja de trabajar con mallas no estructuradas es que se adaptan con facilidad a cualquier geometría. En las proximidades del estrechamiento la distribución de velocidades en la sección no es uniforme, por lo que el número de elementos de la malla en dirección transversal al canal tiene influencia en los resultados (a diferencia de lo que ocurre en los ejemplos de apartados anteriores).

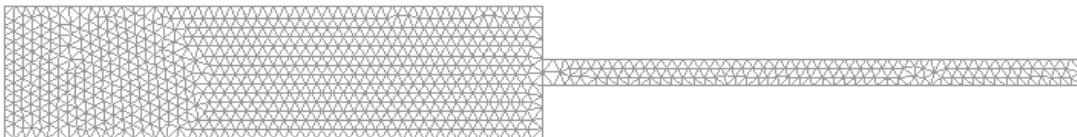


Figura 62: Malla no estructurada del canal con estrechamiento de gran longitud.

A continuación, se ejecuta el cálculo mediante el menú Calcular >> Calcular. Una vez finalizado, se accede a la pantalla de post-proceso. Con la herramienta de “dibujar lámina de agua de un instante” se debe obtener un resultado parecido al de la Figura 63.

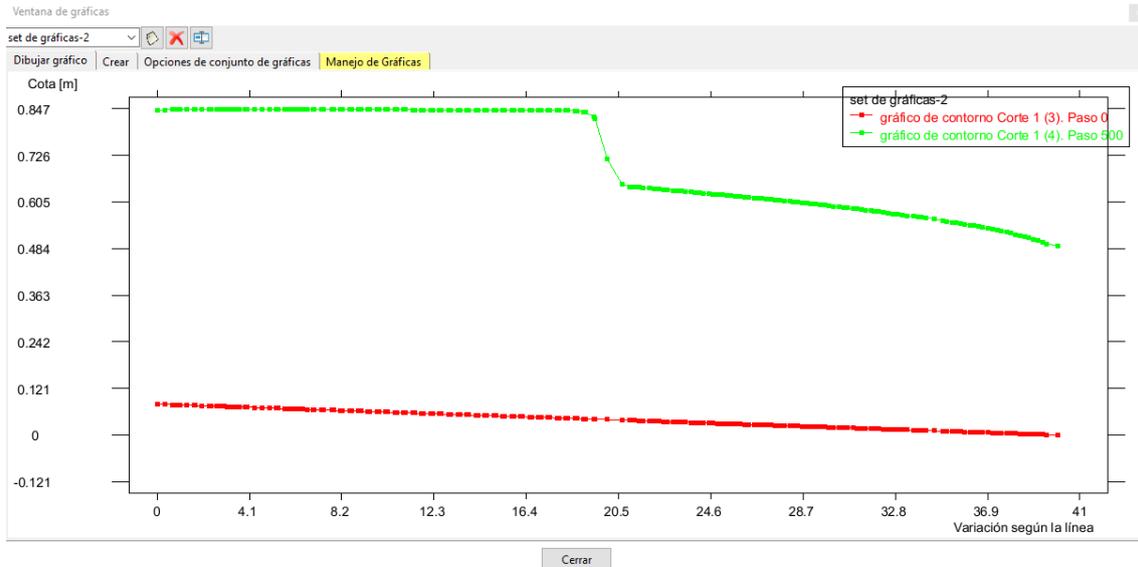


Figura 63: Lámina de agua en la sección longitudinal "C_CutWire_1_Layer0" en el instante 500 s.

Antes del estrechamiento, se genera una curva M1 que tiende al calado normal aguas arriba, aunque debido a la poca longitud del canal no se llega a alcanzar dicho calado. El estrechamiento provoca un embalsamiento aguas arriba, por lo que el calado justo antes del estrechamiento es superior al que existiría si no existiese fenómeno local. Al pasar por el estrechamiento, el nivel baja.

La simulación comienza desde una condición inicial de calado 0 (canal seco), con un caudal de entrada en el contorno de aguas arriba. Inicialmente no todo el caudal de entrada puede circular por el segundo tramo (el estrechamiento) porque carece de energía suficiente. El volumen de agua excedente se almacena en el primer tramo. A medida que aumenta el calado antes del estrechamiento, aumenta el caudal de desagüe (porque aumenta la energía aguas arriba de la obstrucción), hasta que se alcanza una situación de equilibrio. En resumen, partiendo de un calado normal en el contorno de aguas arriba, se acumula energía en forma de aumento de calado aguas arriba del estrechamiento hasta un nivel compatible con la salida de caudal.

7.1.2 Estrechamiento de poca longitud en régimen lento

El segundo caso consiste en un canal rectangular en el que se produce un estrechamiento de poca longitud. Es decir, un canal con una determinada anchura, se estrecha y recupera su geometría original poco después. El esquema del ejercicio y los datos del mismo se muestran a continuación.

Datos: caudal $Q = 1 \text{ m}^3/\text{s}$; anchura $B_1 = 5 \text{ m}$; anchura $B_2 = 2 \text{ m}$; pendiente $i = 0.002$; coeficiente de Manning $n = 0.015 \text{ s}/\text{m}^{1/3}$; longitud $L = 60 \text{ m}$; Estrechamiento entre $x = 25 \text{ m}$ y $x = 35 \text{ m}$.

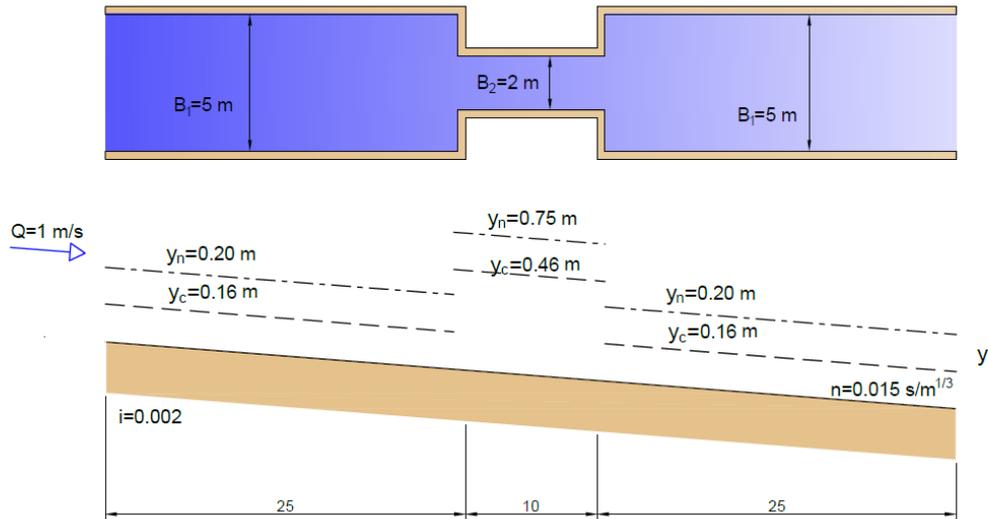


Figura 64: Diagramas en planta y en perfil del estrechamiento de poca longitud en régimen lento.

A partir del modelo “Estrechamiento_poca_longitud_reg_lento.gid”, se van a realizar dos simulaciones en Iber, que explican en los sub-apartados siguientes. La diferencia entre las dos simulaciones radica en la condición de contorno de salida impuesta en el extremo de aguas abajo del canal.

Este modelo se crea de una manera ligeramente distinta a los demás. Debido los fenómenos locales que tienen lugar en el estrechamiento y, especialmente en la expansión, es necesario definir varias superficies en las zonas del canal de mayor anchura. Por lo tanto, la geometría quedaría como se ve en la Figura 65.



Figura 65: Superficies NURBS para el estrechamiento de poca longitud.

A su vez, la malla vuelve a ser estructurada (como en apartados anteriores de este documento) y de un tamaño reducido (0.5 por elemento). En la Figura 66 se puede ver como queda.

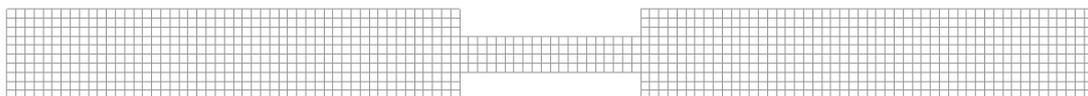


Figura 66: Malla estructurada para el estrechamiento de poca longitud.

7.1.2.1 Nivel de agua impuesto aguas abajo

Como condición de contorno de entrada se fija el caudal de $1 \text{ m}^3/\text{s}$, como se indica en la Figura 67. A tratarse de 3 superficies de entrada hay que asignar la condición a todas ellas.

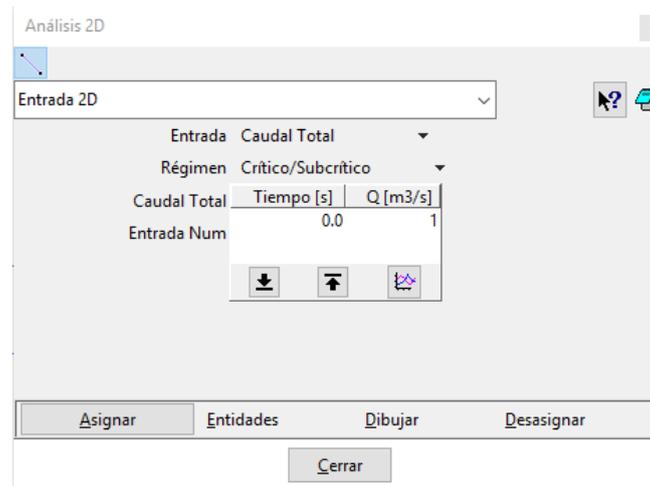


Figura 67: Condición de contorno de entrada del estrechamiento de gran longitud en régimen lento.

Como condición de contorno aguas abajo, de nuevo a las 3 líneas de salida, se fija un nivel dado de 0.5 m.

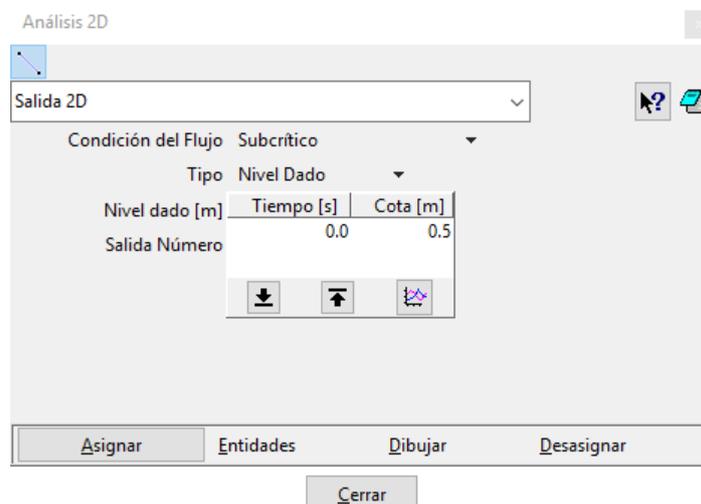


Figura 68: Condición de contorno de salida del estrechamiento de gran longitud en régimen lento.

Al igual que en los anteriores ejemplos, se genera la malla y se lanza el cálculo. Una vez finalizado el cálculo, se accede al postproceso y se representa la lámina de agua siguiendo un corte longitudinal del canal. El gráfico obtenido debe ser similar al mostrado en la siguiente figura.

Cálculo de curvas de remanso y fenómenos locales con Iber

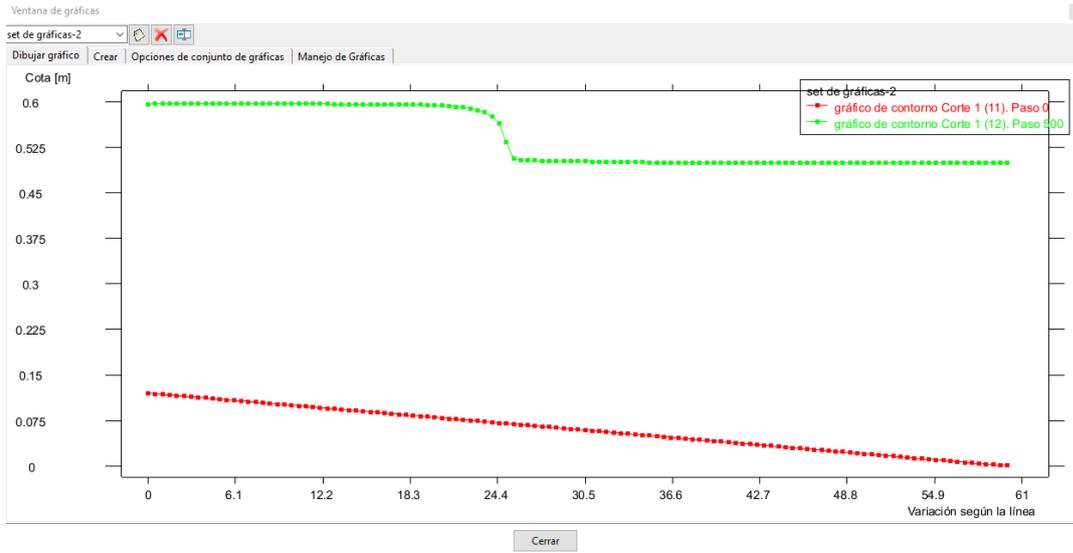


Figura 69: Lámina de agua del estrechamiento en la sección longitudinal “C_CutWire_1_Layer0” en el instante 500 s con un nivel impuesto aguas abajo.

La entrada de flujo en el estrechamiento provoca un descenso de calado brusco. Si se supone que las pérdidas de carga en el estrechamiento son despreciables, el calado aguas abajo de la obstrucción debería ser igual al de aguas arriba. Sin embargo, tal y como puede verse en la sección de la Figura 69, los calados aguas arriba y abajo del estrechamiento difieren. Esto es debido a que las pérdidas que se producen en el estrechamiento no son despreciables, en especial las producidas en la expansión. Habrá pérdidas, tanto mayores cuanto mayor sea la velocidad. Como el nivel impuesto aguas abajo es de 0.50 m, en el último tramo de canal se genera una curva M1.

En este caso es interesante analizar también la distribución del flujo en la sección, ya que no es uniforme. Para ello se pueden visualizar en Iber los campos 2D de las variables de interés, como pueden ser las velocidades. Una vez en el post-proceso, se utiliza la herramienta “Ventana de resultados” para este fin (Figura 70).

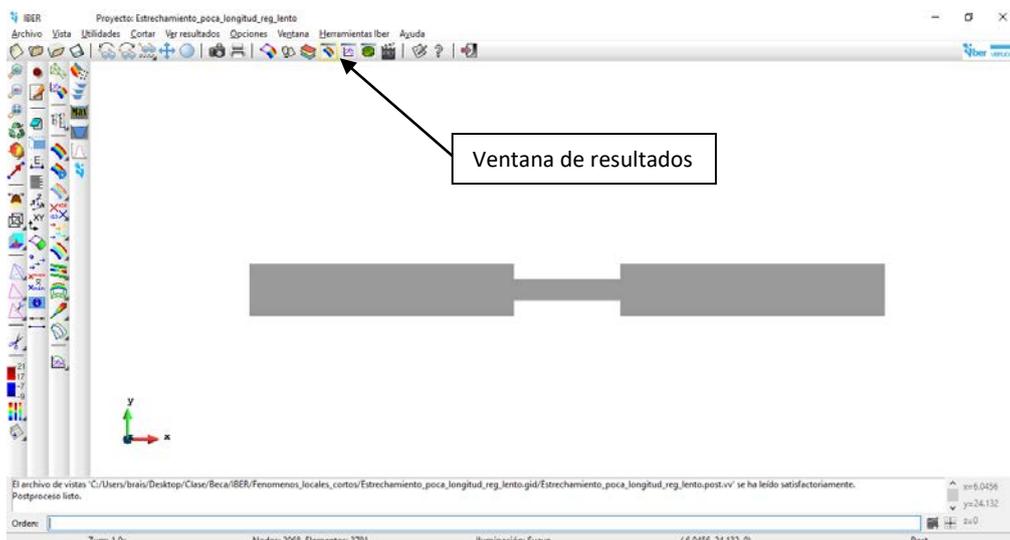


Figura 70: Herramienta de post-proceso “Ventana de resultados”.

En la ventana de visualización se selecciona: Vista>> Áreas coloreadas suaves y Análisis>> Hidráulica. Se pueden visualizar todos los resultados calculados, en este caso, los más interesantes son el módulo de la velocidad y el módulo del número de Froude.

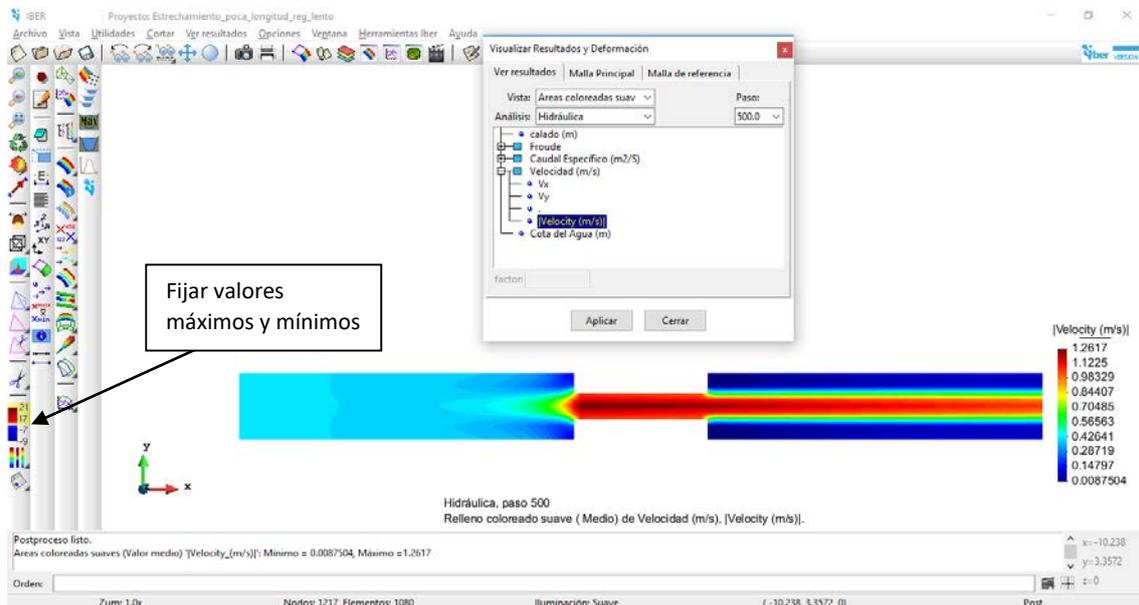


Figura 71: Visualización de los valores del número de Froude en “Ventana de resultados y deformación” y modificación de escala de los resultados con “Fijar valores máximo y mínimo”.

En la Figura 71 se muestra también cómo modificar los valores máximos y mínimos de la escala. Esto es especialmente interesante para imponer 1 como valor máximo para los resultados de Froude. Aquellos puntos en los que se supere el valor máximo corresponderán a las zonas en las cuales el régimen es rápido.

Los campos de velocidades y número de Froude deberían tener la apariencia que se muestra en las Figura 72 y Figura 73. Se observa como la velocidad aumenta considerablemente en el tramo del estrechamiento. La aceleración del flujo sufrida en el estrechamiento provoca la aparición de zonas de recirculación de baja velocidad aguas abajo del estrechamiento, en los laterales del canal. Como puede ver en la Figura 73, el número de Froude máximo es inferior a 1 en todo el canal, por lo tanto, no existen zonas de régimen rápido.

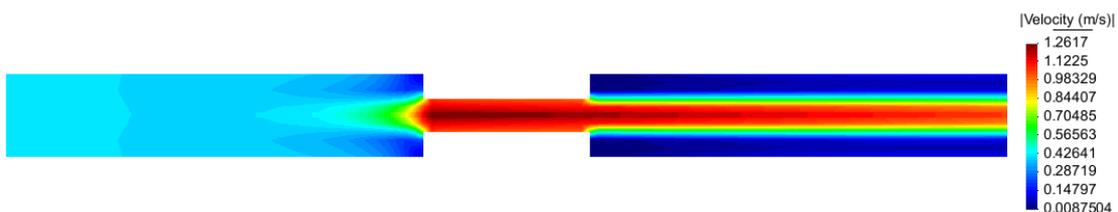


Figura 72: Módulo de la velocidad del flujo en un estrechamiento de poca longitud en régimen lento con nivel impuesto aguas abajo.

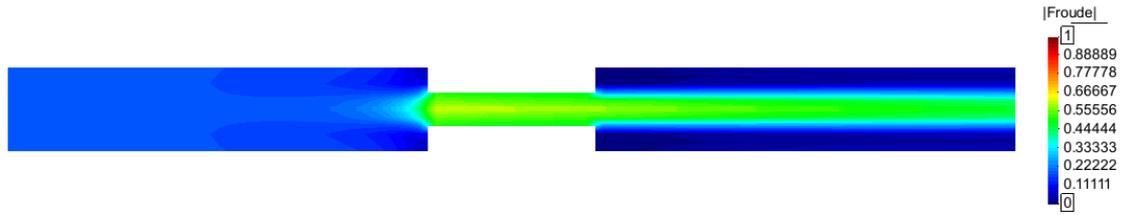


Figura 73: Módulo del número de Froude en un estrechamiento de poca longitud en régimen lento con nivel impuesto aguas abajo.

7.1.2.2 Vertido libre aguas abajo

Este caso es muy similar al anterior y se parte del mismo modelo IBER. La condición de contorno aguas arriba es igual que en el caso anterior, un caudal constante de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 68). Se impone, una condición de flujo en crítica, de manera que esta condición no afecte a la lámina de agua (Figura 74).

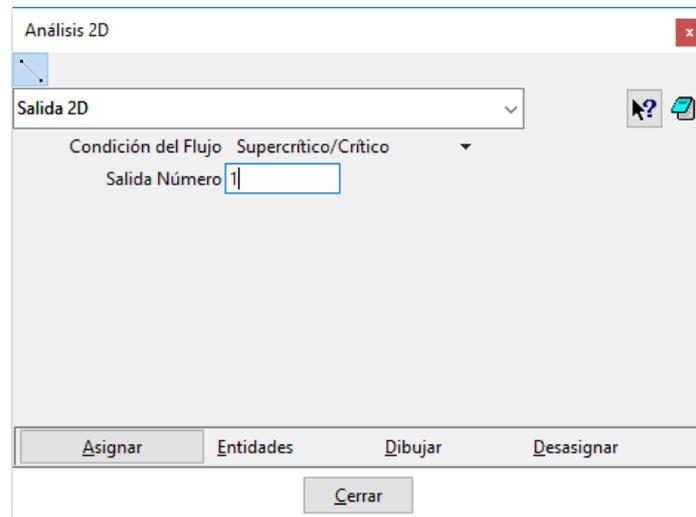


Figura 74: Condición de contorno de salida del estrechamiento de gran longitud en régimen lento.

Como se ha realizado un cambio en las condiciones de contorno, es necesario volver a generar la malla para que se transfieran las condiciones impuestas en la geometría a la malla de cálculo. Se calcula con las nuevas condiciones y se accede al postproceso. Se representa de nuevo la lámina siguiendo el corte longitudinal del canal, en el instante final. El gráfico debería tener la apariencia mostrada en la siguiente figura.

Cálculo de curvas de remanso y fenómenos locales con Iber

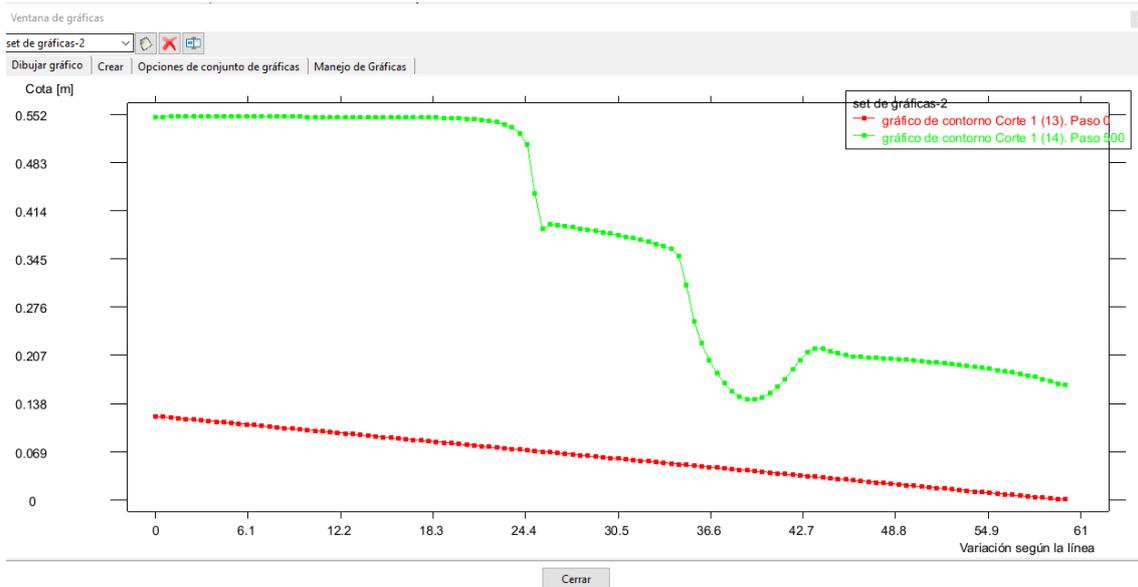


Figura 75: Lámina de agua del estrechamiento en la sección longitudinal “C_CutWire_1_Layer0” en el instante 500 s con vertido libre.

Como se puede comprobar en la Figura 75, la lámina de agua sufre variaciones notables entre aguas arriba del estrechamiento y aguas abajo. Esto es debido a que no existe compatibilidad de energías entre los flujos antes y después. Antes del estrechamiento se produce un aumento del calado que funciona como acumulación de energía para permitir el paso del caudal, de forma similar a lo descrito en el apartado 7.1.1. Sin embargo, el nivel de energía mínimo en el estrechamiento es superior al nivel impuesto desde aguas abajo, por lo que a la salida del estrechamiento se produce un desacoplamiento, similar al que se da en un vertido libre a un depósito con un nivel inferior al del calado crítico. El vertido a la salida del estrechamiento provoca una alteración de la lámina de agua y la disipación de energía.

Es especialmente interesante ver en planta qué sucede en las proximidades del estrechamiento. Para ello, se vuelven a utilizar las herramientas descritas en 7.1.2.1 Nivel de agua impuesto aguas abajo para visualizar los campos 2D de velocidad y Froude.

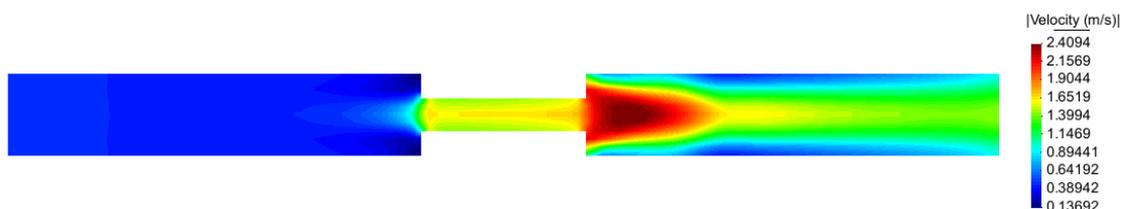


Figura 76: Módulo de la velocidad del flujo en un estrechamiento de poca longitud en régimen lento con vertido libre.

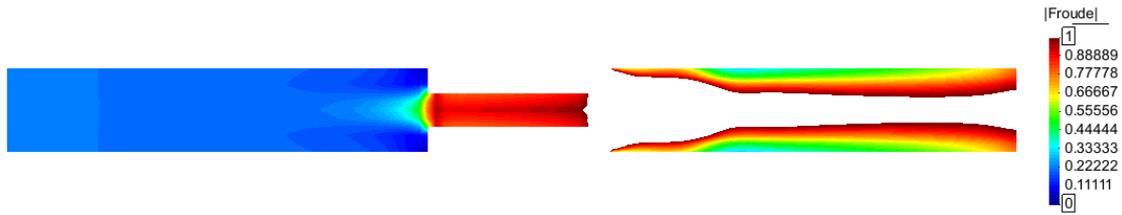


Figura 77: Módulo del número de Froude en un estrechamiento de poca longitud en régimen lento con vertido libre.

Las zonas sin color corresponden a zonas que quedan fuera del rango de valores, es decir, en aquellas en las cuales el número de Froude es superior a 1. Se puede modificar como se muestran las zonas que quedan fuera del rango de valores en (Opciones>>Áreas coloreadas>>Opciones Máximo / Opciones Mínimo>>Color fuera del rango máximo/mínimo Figura 78).

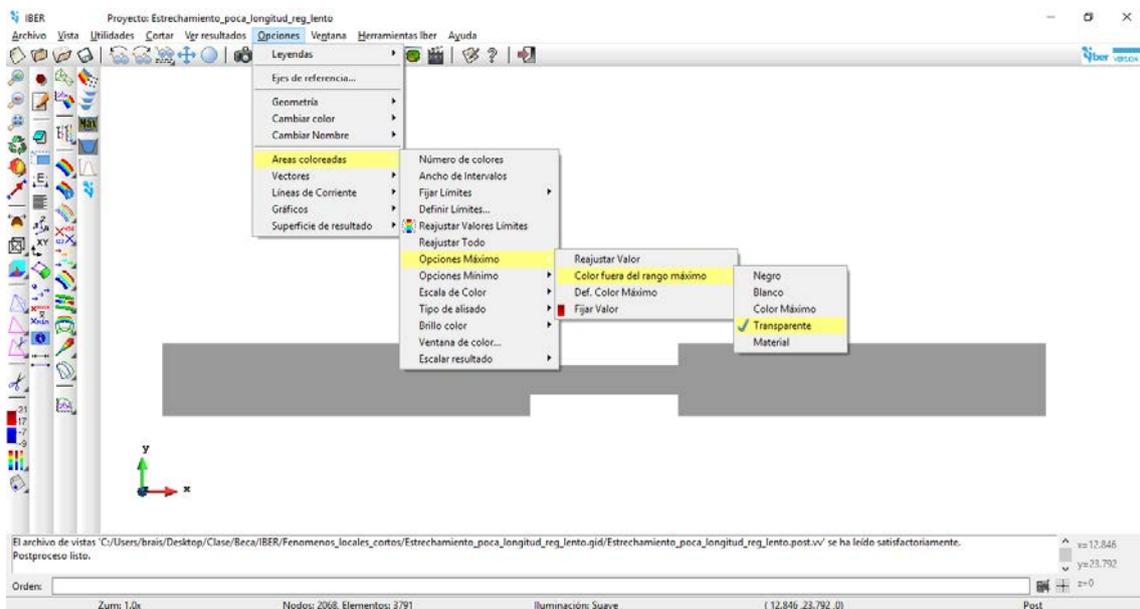


Figura 78: Configuración de color fuera de rango

Por tanto, en este caso, a la salida del estrechamiento el régimen es rápido. Como se ve en el perfil (Figura 75) a la salida del estrechamiento se reduce notablemente el calado, lo que se corresponde con un aumento de la velocidad y un cambio de régimen. Aguas abajo del estrechamiento la velocidad es el doble que en el caso de nivel impuesto (apartado 7.1.2.1).

7.1.3 Estrechamiento de gran longitud en régimen rápido

El último estrechamiento estudiado es igual al primer caso (7.1.1), salvo que en éste la pendiente es pronunciada. El canal sufre un estrechamiento brusco en el mismo punto. Además de la pendiente, se ha variado el coeficiente de Manning para que se aprecien con mayor claridad las variaciones de calado. A continuación se presentan los datos y el diagrama:

Cálculo de curvas de remanso y fenómenos locales con Iber

Datos: $Q = 1 \text{ m}^3/\text{s}$ – $v = 1 \text{ m/s}$; $B_1 = 5 \text{ m}$; $B_2 = 1 \text{ m}$; $i = 0.05$; coeficiente de Manning $n = 0.032 \text{ s/m}^{1/3}$; $L = 40 \text{ m}$; Estrechamiento en $x = 20 \text{ m}$

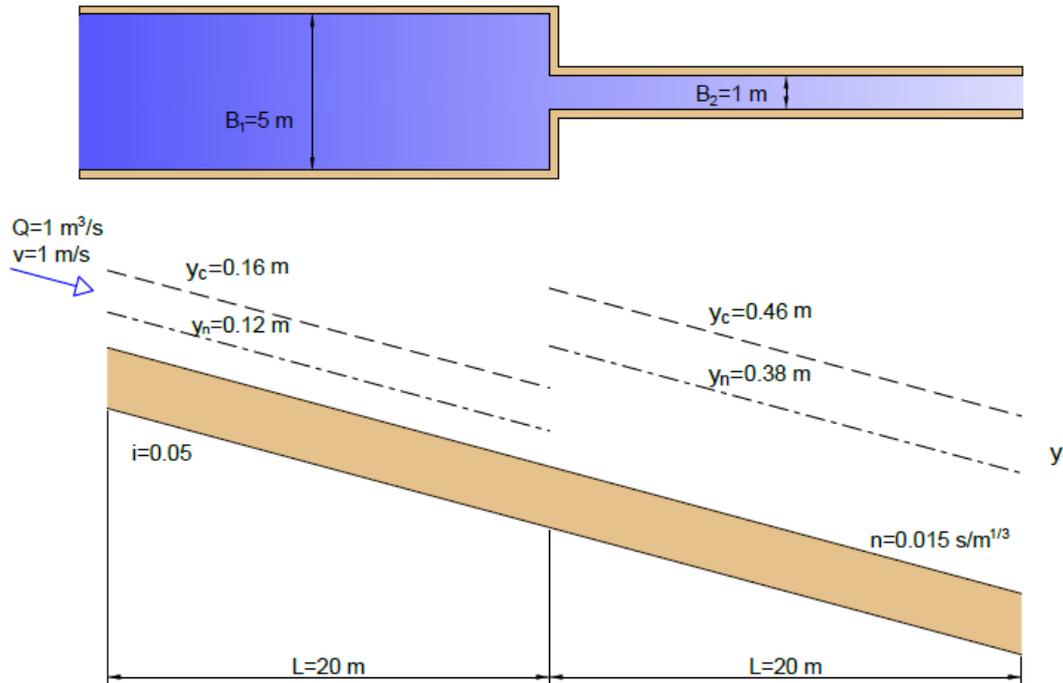


Figura 79: Diagramas en planta y en perfil del estrechamiento de gran longitud en régimen rápido.

El nombre del modelo es “Estrechamiento_gran_longitud_reg_rapido.gid”. Como se trata de una pendiente pronunciada, además de imponer un caudal de entrada, es necesario asignar una velocidad en el contorno de entrada. Se proponen valores de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ y 1 m/s , respectivamente.

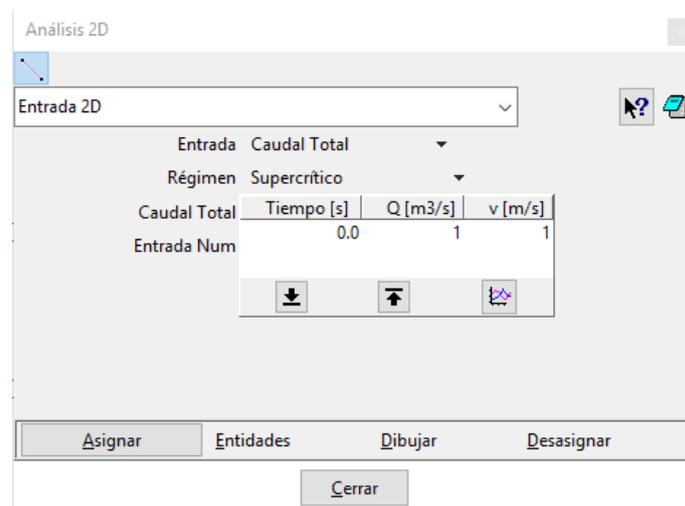


Figura 80: Condición de contorno de entrada del estrechamiento de gran longitud en régimen rápido.

En la salida se impone una condición de calado crítico.

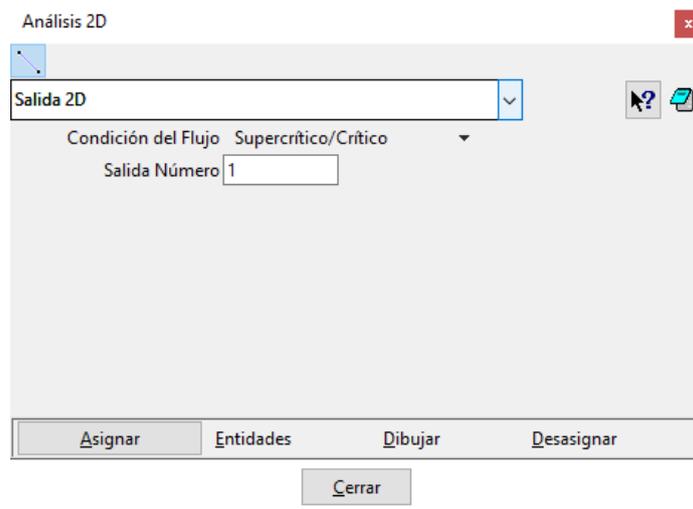


Figura 81: Condición de contorno de salida del estrechamiento de gran longitud en régimen rápido.

Como cada vez que se modifican las condiciones de contorno, se genera la malla de nuevo. A continuación, se lanza el cálculo. El resultado obtenido se puede observar en la Figura 82.

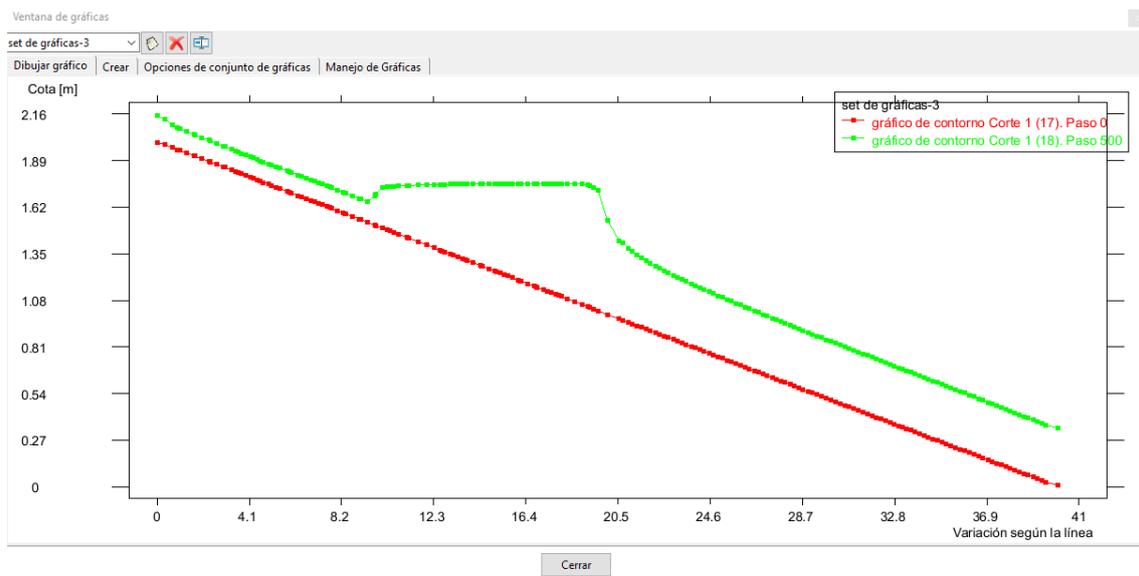


Figura 82: Lámina de agua del estrechamiento en la sección longitudinal "C_CutWire_1_Layer0" en el instante 500 s.

A partir de 500 segundos de simulación se alcanza el estado estacionario y la lámina de agua ya es estable. El calado inmediatamente aguas abajo del estrechamiento será igual al crítico del segundo tramo, logrando así el desagüe del máximo caudal para la energía disponible. Sin embargo, en un primer momento el caudal aportado no puede atravesar el estrechamiento, quedando un remanente almacenado en las puertas del estrechamiento. Como el flujo de entrada es en régimen rápido, para alcanzar un nivel de agua alto, tiene que hacerse compatible con el embalsamiento mediante un resalto tal y como se observa en la Figura 82.

7.2 Escalones

En este apartado se estudia cómo afecta a la lámina de agua en un canal una variación repentina de la cota de la solera en forma de escalón. Debido a que la geometría del canal es distinta en cada caso, se proporcionarán diferentes archivos IBER. En cada caso, partiendo del modelo IBER, será necesario asignar las condiciones de contorno apropiadas aguas arriba y aguas abajo del canal. De nuevo, los canales son de poca longitud, por lo tanto, en general, no se observarán las tendencias aguas arriba o debajo del flujo.

7.2.1 Escalón de gran longitud en régimen lento

El primer caso estudiado consiste en un canal rectangular con pendiente moderada en el cual la solera sube bruscamente un determinado valor Δy , justo en la mitad del canal. Los datos de ejercicio, así como un diagrama explicativo de la geometría se muestra en la Figura 83.

Datos: $Q = 1 \text{ m}^3/\text{s}$; $B = 5 \text{ m}$; $i = 0.002$; coeficiente de Manning $n = 0.015 \text{ s}/\text{m}^{1/3}$; $L = 40 \text{ m}$;
Escalón en $x = 20 \text{ m}$; $\Delta y = 0.04 \text{ m}$

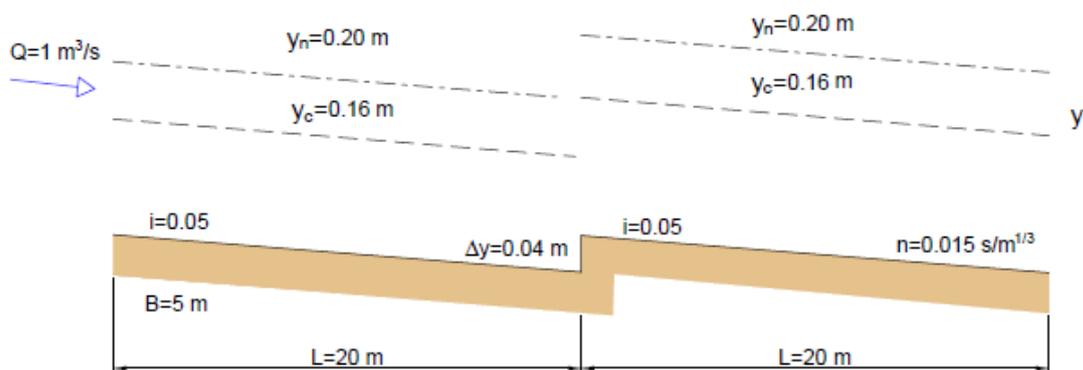


Figura 83: Diagrama del canal con un escalón de gran longitud en régimen lento.

Se abre el archivo con la geometría "Escalon_gran_longitud_reg_lento.gid". Se imponen las condiciones de contorno de entrada y salida, tal y como se ha realizado en los ejemplos anteriores. Los datos se recuerdan en Figura 84 y Figura 85.

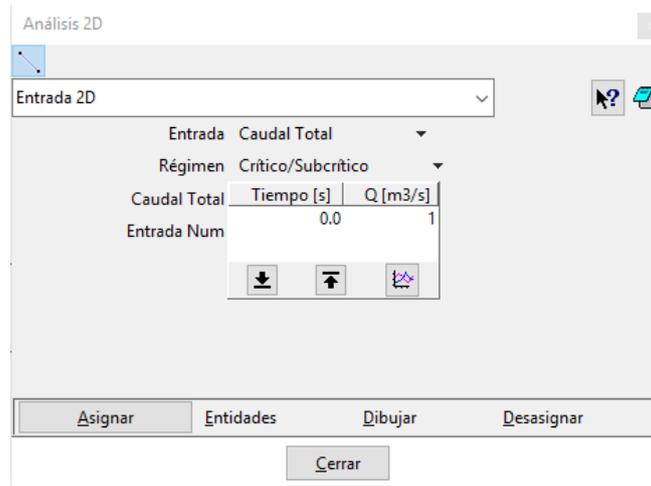


Figura 84: Condición de contorno de entrada canal con un escalón de gran longitud en régimen lento.

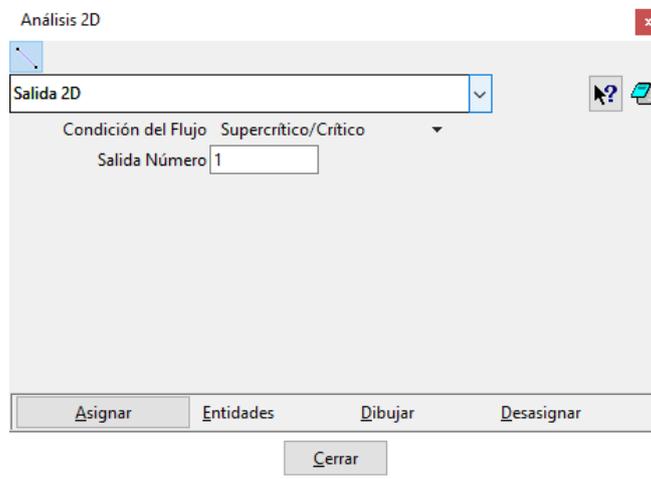


Figura 85: Condición de contorno de salida canal con un escalón de gran longitud en régimen lento.

Se genera la malla, que es no estructurada y se lanza el cálculo. Una vez en el postproceso, se dibuja la lámina de agua siguiendo un corte longitudinal al canal. El resultado se muestra en la Figura 86.

Cálculo de curvas de remanso y fenómenos locales con Iber

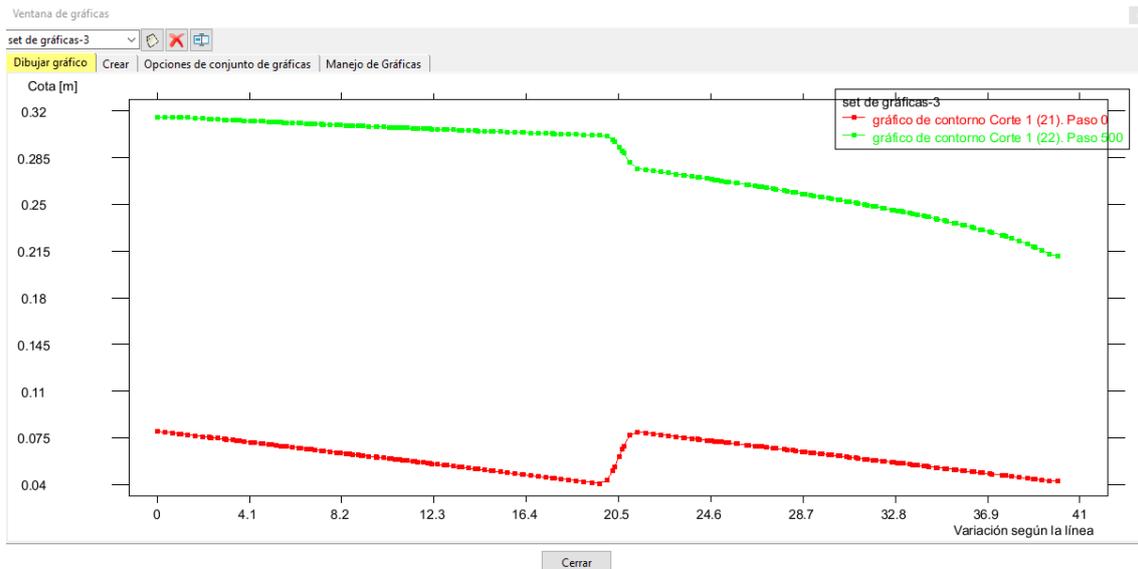


Figura 86: Lámina de agua del canal con un escalón de gran longitud en la sección longitudinal "C_CutWire_1_Layer0" en el instante 500 s.

Como se puede observar, la lámina de agua es muy similar a la obtenida en el apartado 7.1.1. Estrechamiento de gran longitud en régimen lento. El efecto del escalón en la solera es el mismo que tiene un estrechamiento repentino, es decir, aguas arriba el calado aumenta para superar el escalón y la transición consiste en una reducción del calado hasta el calado normal. Tal y como se vio en el diagrama de la Figura 83, los calados normal y crítico son iguales en los dos tramos.

7.2.2 Escalón de poca longitud en régimen lento

El segundo caso consiste en un canal de sección rectangular en el cual hay un escalón de poca longitud en el medio del canal. El aumento en la cota de la solera se extiende por tanto durante pocos metros (manteniendo las mismas propiedades que el resto del canal) y, posteriormente, se produce un descenso de cota de la solera del mismo valor. En la Figura 87 se presenta de forma esquemática el ejercicio.

$Q = 1 \text{ m}^3/\text{s}$; $B = 5 \text{ m}$; $i = 0.002$; coeficiente de Manning $n = 0.015 \text{ s}/\text{m}^{1/3}$; $L = 60 \text{ m}$; Escalón de $x = 26 - 35 \text{ m}$; $\Delta y = 0.05 \text{ m}$

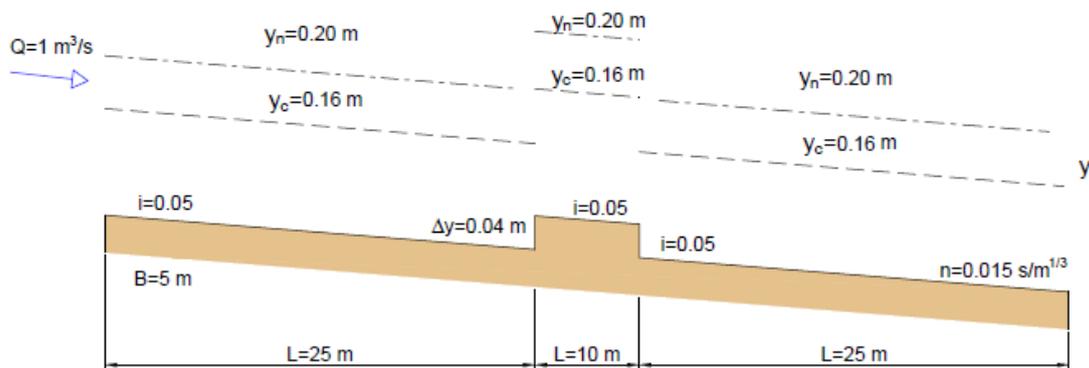


Figura 87: Diagrama del canal con un escalón de poca longitud en régimen lento.

Para este modelo, se van a calcular dos casos distintos en función de la condición de salida utilizando el modelo "Escalon_poca_longitud_reg_lento.gid".

7.2.2.1 Nivel de agua impuesto aguas abajo

La condición de contorno aguas arriba es la ya descrita en los apartados anteriores de (Caudal total >> Régimen Crítico/Subcrítico >> Caudal total: 1).

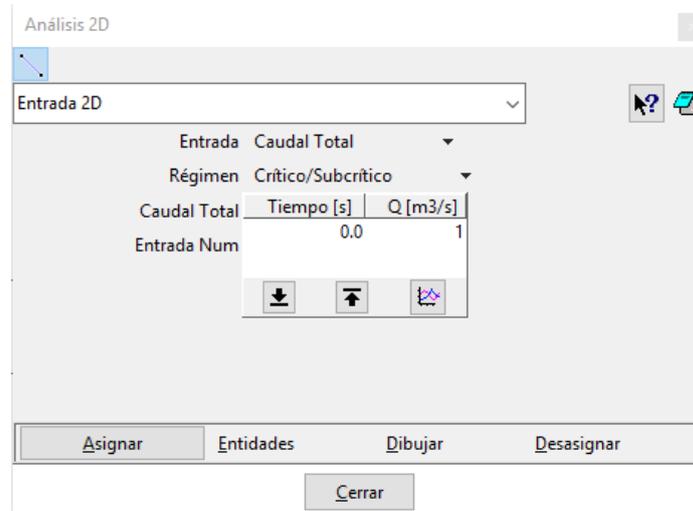


Figura 88: Condición de contorno de entrada canal con un escalón de poca longitud en régimen lento.

Y de salida, se va a imponer un nivel determinado. Cualquier valor suficientemente alto como para tener influencia en la variación de cota de solera. Para, este caso se utiliza 0.35 m para que en el perfil se aprecie lo que sucede en las proximidades del efecto local.



Figura 89: Condición de contorno de salida canal con un escalón de poca longitud en régimen lento con nivel impuesto aguas abajo.

Los resultados en perfil de este apartado son los siguientes:

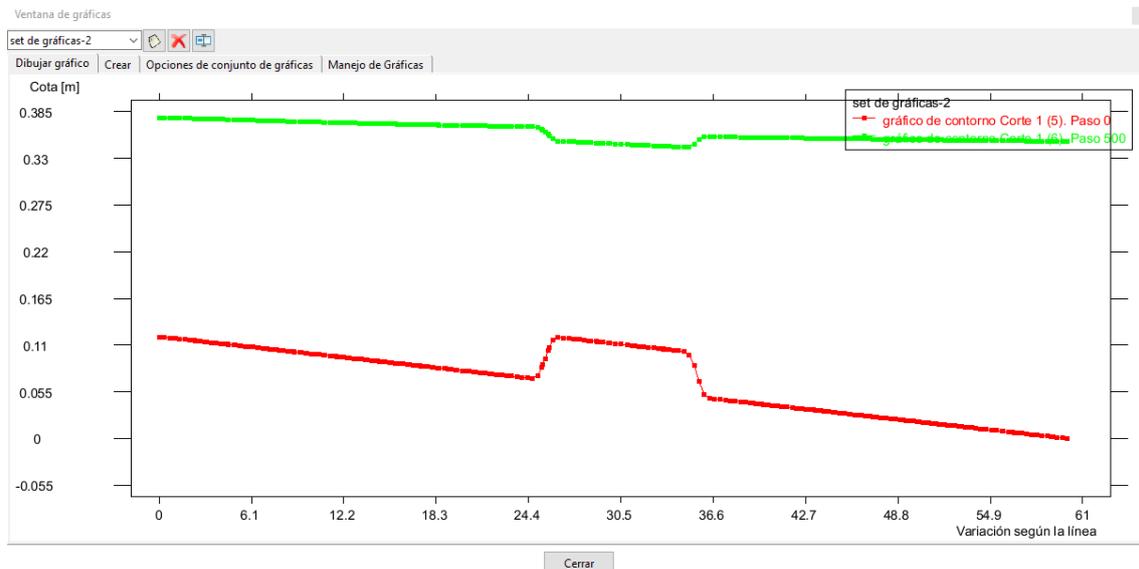


Figura 90: Lámina de agua del canal con un escalón de poca longitud en la sección longitudinal "C_CutWire_1_Layer0" en el instante 500 s con un nivel impuesto aguas abajo.

Antes de que se produzca el escalón se acumula energía en forma de calado para superar el fenómeno local. Al aumentar la cota de solera, se produce un descenso brusco de calado que se recuperará prácticamente en su totalidad después del descenso. No se alcanza el mismo valor porque tienen lugar pérdidas locales. En este caso no se aprecia su efecto, pero cuanto más brusco sea el escalón, mayores serán estas pérdidas. Como el nivel impuesto aguas abajo es de 0.35 m, en el último tramo de canal se genera una curva M1. Se

puede comprobar que se sigue cumpliendo la analogía con los casos de estrechamiento (en este caso con el de poca longitud en régimen lento).

Se representan también los resultados en planta para estudiar el comportamiento del flujo en cuanto a aumentos de velocidad o posibles cambios de régimen. El proceso para obtenerlos se describió previamente en el apartado 7.1.2.1.

A continuación, se presentan los resultados:

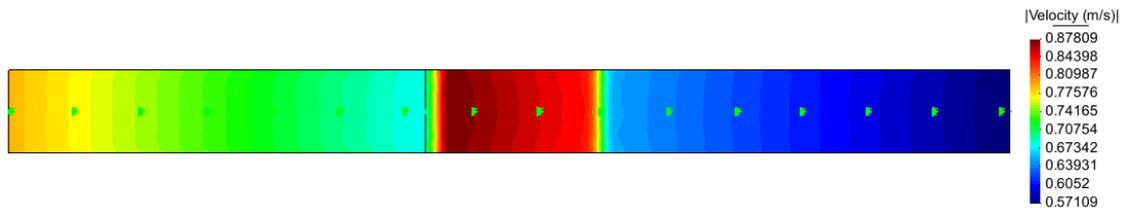


Figura 91: Módulo de la velocidad del flujo en un escalón de poca longitud en régimen lento con un nivel impuesto aguas abajo.

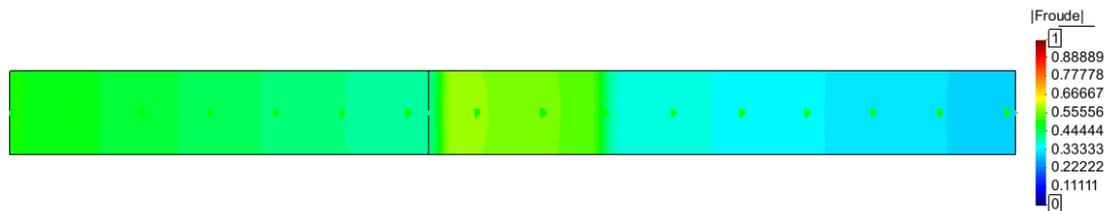


Figura 92: Módulo del número de Froude del flujo en un escalón de poca longitud en régimen lento con un nivel impuesto aguas abajo.

La velocidad es mucho mayor durante el tramo con cota de solera superior.

Como no se supera en ningún punto el valor límite superior del número de Froude, se puede asegurar que no existen zonas de régimen rápido en el canal.

7.2.2.2 Vertido libre aguas abajo

Este apartado es exactamente igual que el anterior, pero en lugar de imponer un nivel, se va a permitir la salida libre del caudal. La condición de contorno aguas arriba es la misma (Caudal total >> Régimen Crítico/Subcrítico >> Caudal total: 1).

Sin embargo, aguas abajo valdría cualquier condición de salida que no afecte a las proximidades del escalón, por ejemplo, una salida con: (Condición de flujo >> Supercrítico/Crítico):

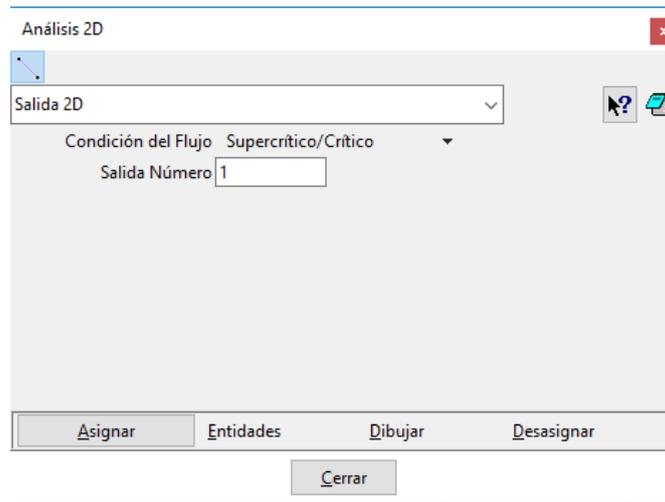


Figura 93: Condición de contorno de salida canal con un escalón de poca longitud en régimen lento con vertido libre.

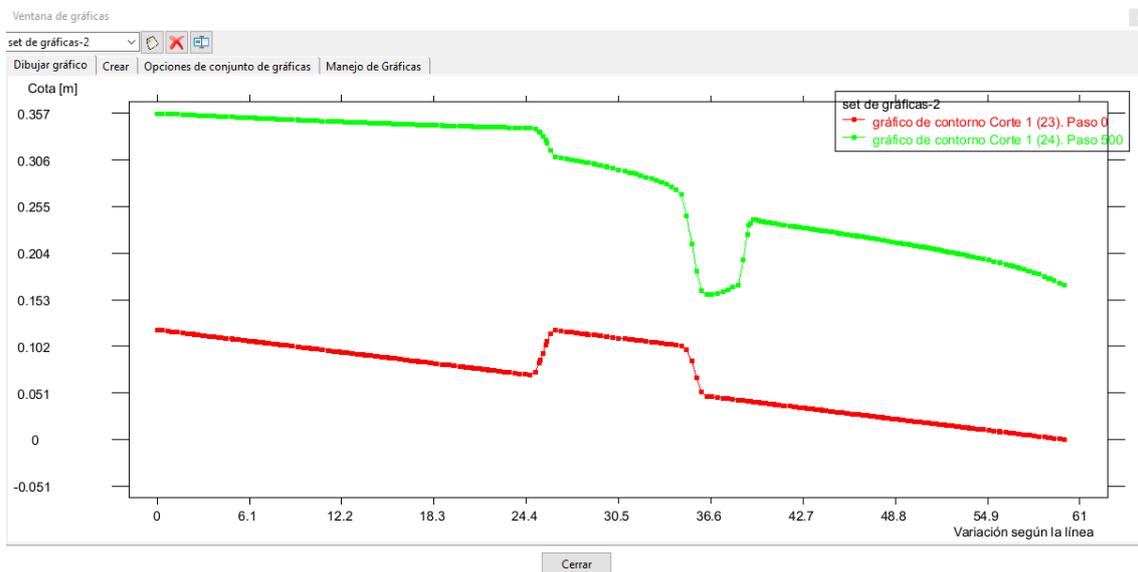


Figura 94: Lámina de agua del canal con un escalón de poca longitud en la sección longitudinal "C_CutWire_1_Layer0" en el instante 500 s con vertido libre.

De igual manera que en el caso 7.1.2.2, cuando no existe nada aguas abajo que afecte a la obstrucción de paso del flujo, predominará el efecto del fenómeno local. Antes del escalón se produce un incremento de energía (con una curva M1) hasta que la situación permita el paso del caudal total por encima del obstáculo. Durante el escalón la lámina de agua tiende al calado crítico. Como la energía durante el escalón es muy superior a la de la salida, tendrá lugar un vertido libre, con la correspondiente disipación de energía.

De nuevo, nos interesa ver los resultados del efecto local en planta, si se vuelven a sacar con la herramienta "Ventana de resultados" se obtiene lo siguiente:

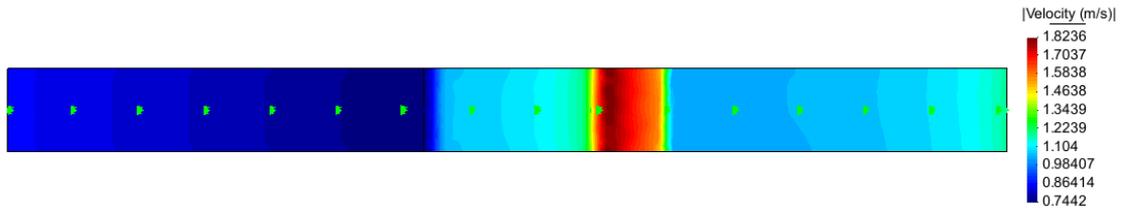


Figura 95: Módulo de la velocidad del flujo en un escalón de poca longitud en régimen lento con vertido libre.

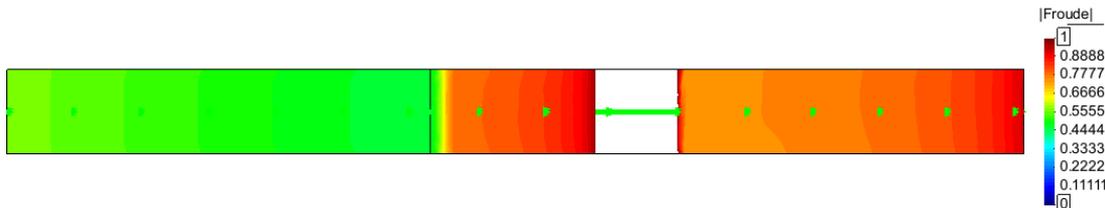


Figura 96: Módulo del número de Froude del flujo en un escalón de poca longitud en régimen lento con vertido libre.

La velocidad aumenta al comienzo del tramo con cota elevada, pero es especialmente alta justo después del descenso de cota. Aproximadamente 5 metros aguas abajo del mismo, se alcanzan las velocidades máximas y el tipo de régimen pasa a ser rápido. Si comparamos esos valores con los del perfil de la Figura 94 se comprueba como coincide exactamente con la zona de disipación de energía (descenso pronunciado de calado) y con el resalto hidráulico (aumento del calado). La zona con régimen rápido corresponde a la curva M3 vista en la Figura 94.

7.2.3 Escalón de gran longitud en régimen rápido

Se plantea el caso de un canal con pendiente pronunciada con un aumento de cota de solera en el medio. Los datos del problema y el diagrama explicativo de la geometría se muestran en Figura 97.

Datos: $Q = 1 \text{ m}^3/\text{s}$ – $v = 1 \text{ m/s}$; $B = 5 \text{ m}$; $i = 0.05$; coeficiente de Manning $n = 0.015 \text{ s/m}^{1/3}$; $L = 40 \text{ m}$; Escalón en $x =$; $\Delta y = 0.5 \text{ m}$

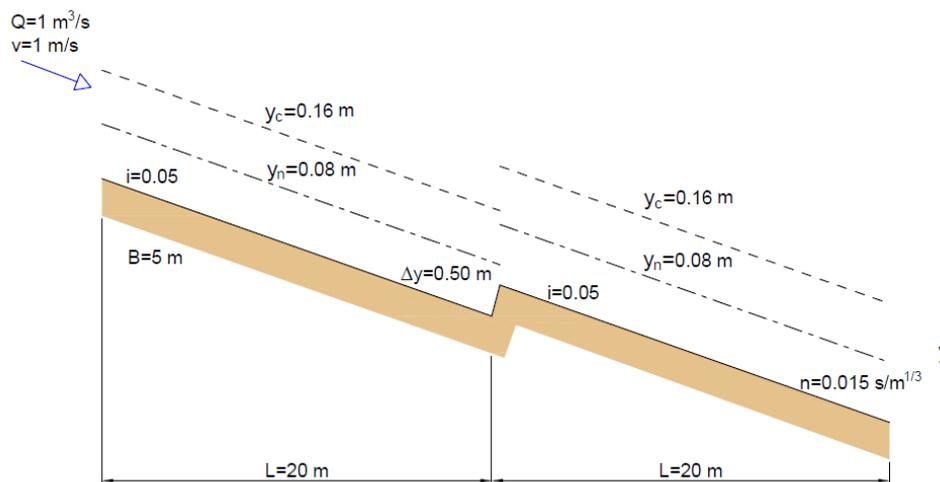


Figura 97: Diagrama del canal con un escalón de gran longitud en régimen rápido.

Se abre el archivo “Escalon_gran_longitud_reg_rapido.gid” y se imponen las condiciones de contorno impuestas ya descritas, que a su vez coinciden con las impuestas en el apartado 7.1.3 Estrechamiento de gran longitud en régimen rápido.

Generando la malla, calculando y pasando al post-proceso se puede ver la lámina de agua generada:

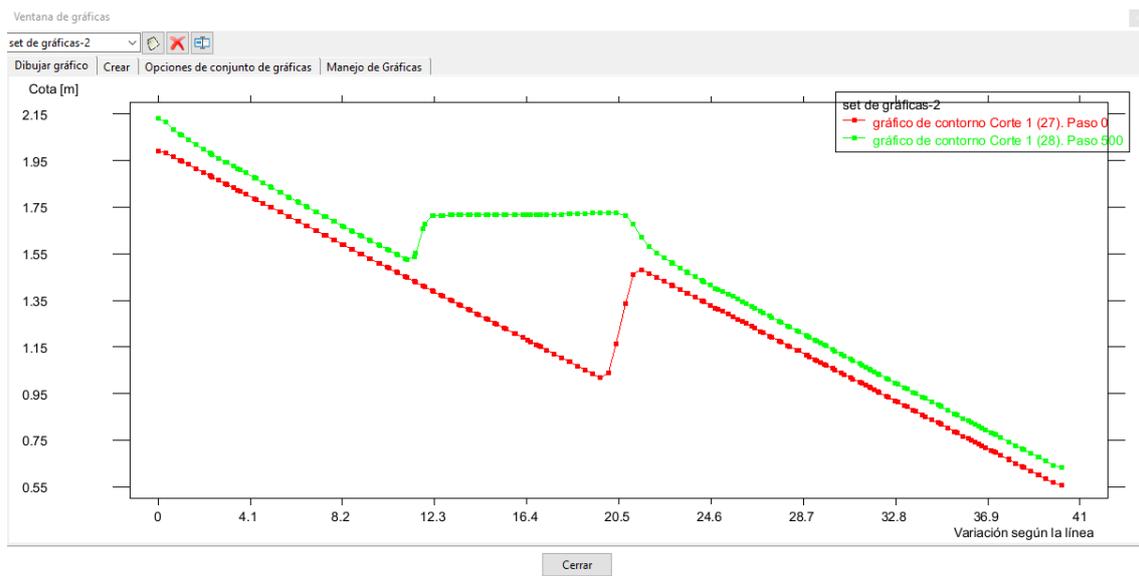


Figura 98: Lámina de agua del canal con un escalón de gran longitud en la sección longitudinal “C_CutWire_1_Layer0” en el instante 500 s.

El análisis de las variaciones de caudal es exactamente igual que en el caso 7.1.3, simplemente en este caso el fenómeno local es un escalón. Los equilibrios de energía con caudal desaguado y el resalto hidráulico se producen de la misma manera, en un primer momento el caudal aportado no puede atravesar el escalón, lo que provoca que quede un remanente almacenado. Al ser régimen de tipo rápido, para alcanzar un nivel de agua alto, tiene que hacerse compatible con el embalsamiento de agua mediante un resalto hidráulico. El calado inmediatamente aguas abajo del escalón será igual al crítico del segundo tramo, logrando así el desagüe del máximo caudal para la energía disponible.

7.3 Problema con fenómenos locales

En este ejercicio se propone realizar el cálculo de los fenómenos locales que tienen lugar en el canal que se define en la siguiente figura. Los tramos son de 500 m cada uno, de forma que se garantiza que se alcancen las tendencias asintóticas de la lámina libre en cada uno de ellos.

$Q = 8 \text{ m}^3/\text{s}$; $B_1 = 10 \text{ m}$; B_2 y $B_3 = 8 \text{ m}$; $n = 0.015$; $i_1 = 1\%$; $i_2 = 0.12\%$; $i_3 = 0.12\%$; $y_A = 0.33 \text{ m}$; $\Delta y = 0.40 \text{ m}$

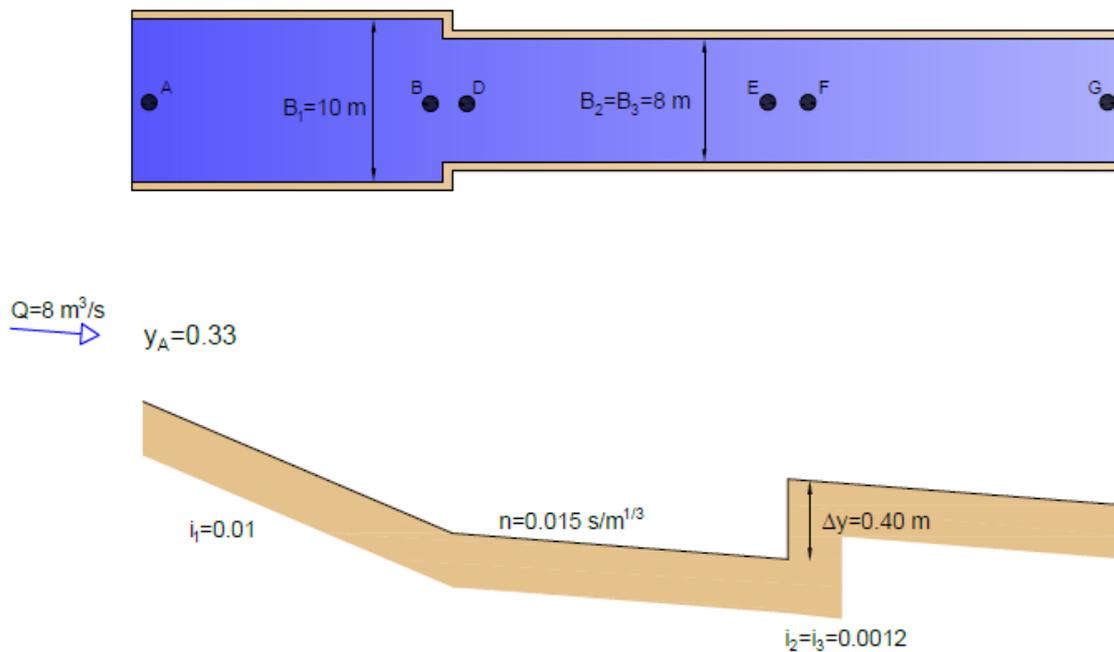


Figura 99: Enunciado del Problema H9-3 del libro de hidráulica

En el archivo con el modelo geométrico del problema "Problema_H9-3.gid" se introducen las condiciones de contorno descritas siguiendo los pasos ya descritos en este documento: *Datos* >> *Hidrodinámica* >> *Condiciones de contorno*. Se han introducido ya los valores de longitud, ancho, pendiente, número de Manning y tamaño de malla. En caso de querer modificarlos, se pueden seguir los pasos descritos en los apartados anteriores.

Como caudal, velocidad y calado están relacionados, para imponer la condición de entrada de caudal igual a $8 \text{ m}^3/\text{s}$ calado en A igual 0.33 m se el régimen Supercrítico. La velocidad es aproximadamente 2.42 m/s . Por lo tanto, imponemos la condición de contorno Entrada: Caudal Total >> Régimen: Supercrítico >> Caudal total: $Q = 8$ y $v = 2.42$

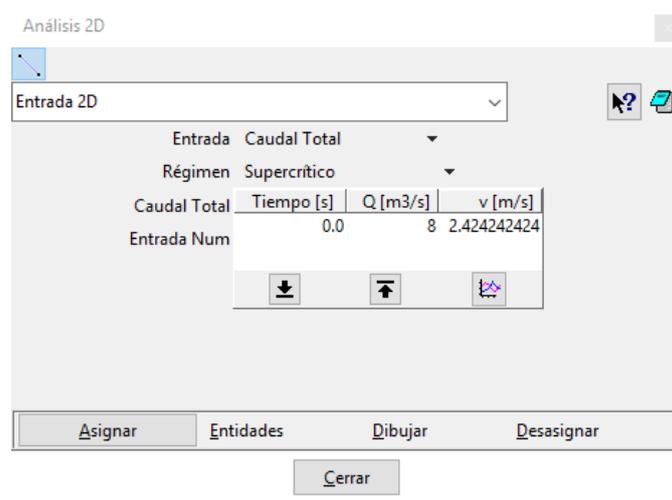


Figura 100: Condición de contorno de entrada para provocar el calado de entrada del problema.

La condición de salida es simplemente un vertido libre. Como se ha descrito en otros apartados, este se puede imponer como un vertedero con cota de labio inferior igual a 0, o como, simplemente, una salida en régimen Supercrítico/Crítico.

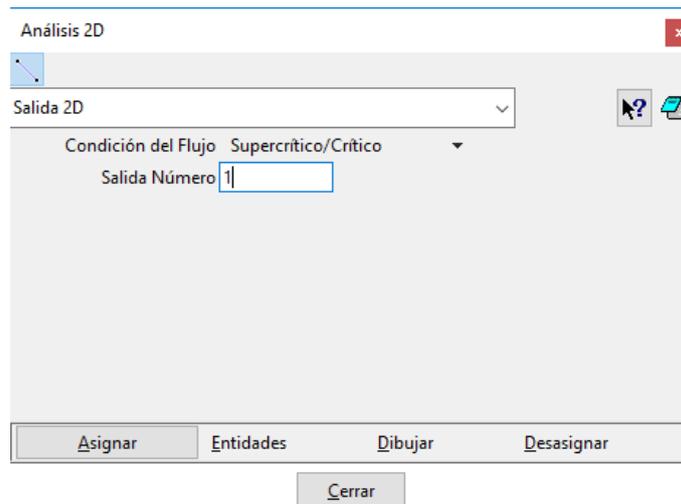


Figura 101: Condición de contorno de salida del problema.

Se genera la malla y se calcula como siempre y, posteriormente, se accede a la pantalla de postproceso, en la cual se pueden ver los resultados deseados.

La sección longitudinal ya está creada, por tanto, para dibujar el gráfico Cota - Distancia solo hay que pulsar “Dibujar lámina de agua de un instante”. Los resultados se pueden comprobar con (Botón derecho >> Seleccionar >> Res.). De esta manera se puede comprobar si los resultados obtenidos son iguales a los resultados del libro.

Cálculo de curvas de remanso y fenómenos locales con Iber

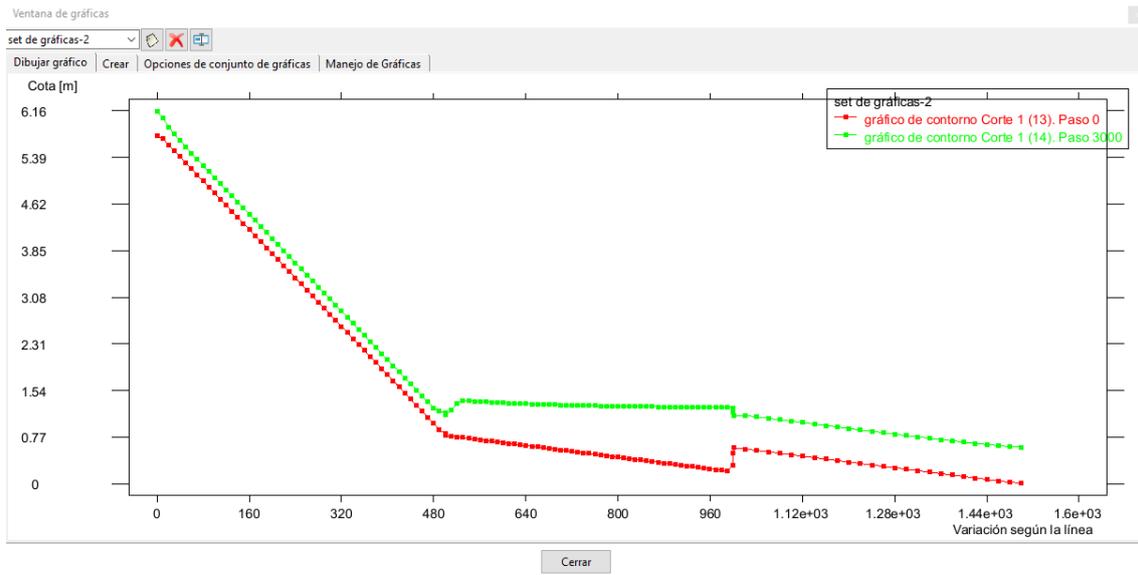


Figura 102: Solución del Problema H9-3 con IBER.

Se adjunta a continuación el dibujo de la lámina de agua de resultados del problema H9-3 del libro *Apuntes de Ingeniería Hidráulica* (pp. 474-480).

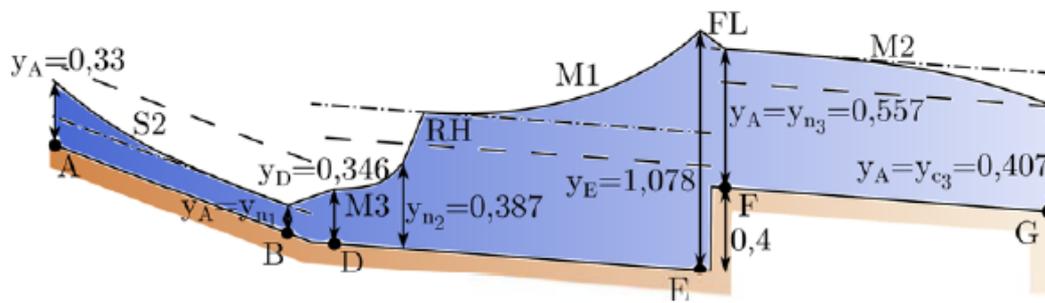


Figura 103: Solución del Problema H9-3 según el libro de hidráulica

7.4 Fenómenos locales en canales largos

En esta sección se propone la simulación de los fenómenos locales asociados a estrechamientos y escalones en un canal de una longitud suficiente para que se alcancen las tendencias asintóticas. No se busca analizar qué sucede en las inmediaciones del fenómeno en profundidad (véanse los apartados 7.1 y 7.2), sino las curvas de remanso que se producen aguas arriba y abajo del mismo.

7.4.1 Estrechamientos

Se completarán las descripciones dadas en el apartado 7.1 de los fenómenos locales que tienen lugar en estrechamientos. En este caso con canales largos. Al tratarse de un apartado complementario a los ya descritos con anterioridad, se prescindirá de descripciones pormenorizadas de cada modelo.

A continuación, se adjunta una tabla en la cual se describen la geometría, condiciones de contorno y demás valores de partida para los 3 casos de estrechamiento:

- Estrechamiento_gran_longitud_régimen_lento.gid
- Estrechamiento_poca_longitud_régimen_lento.gid
- Estrechamiento_poca_longitud_régimen_rápido.gid

Tabla 5. Dimensiones y datos de entrada de los modelos de estrechamientos en canales largos

Caso	Longitud (m)	Ancho (m)		Pendiente (%)	Coeficiente de Manning ($s/m^{1/3}$)	Condición de entrada		Condición de salida	
		B1	B2			Q (m^3/s)	V (m/s)		
Estrechamiento de gran longitud en régimen lento	200	0.50	0.30	0.2	0.015	0.04	-	Vertido libre	
Estrechamiento de poca longitud en régimen lento	Nivel impuesto	200	0.50	0.20	0.2	0.015	0.04	-	Nivel = 0.40 m
	Vertido libre	200	0.50	0.20	0.2	0.015	0.04	-	Vertido libre
Estrechamiento de gran longitud en régimen rápido	200	0.50	0.20	5	0.010	1	2.7	Crítico	

Una vez descritos los modelos, se adjuntan las imágenes de los resultados obtenidos para cada caso. Los modelos se proporcionarán al alumno con el mismo nombre que en el apartado 7.1 (los casos de la Tabla 5) en una carpeta con el nombre “Fenomenos_locales_canales_largos”. Las explicaciones de los resultados serán muy similares a la vistas en los fenómenos locales en canales cortos, pero teniendo en cuenta lo que sucede aguas arriba y abajo del estrechamiento o expansión.

7.4.1.1 Estrechamiento de gran longitud en régimen lento

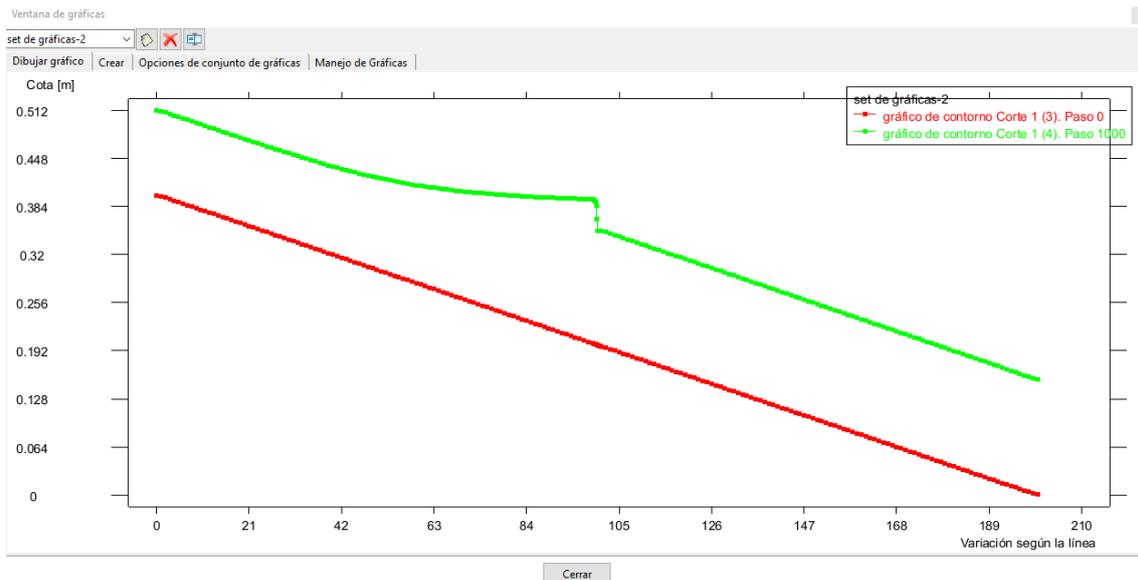


Figura 104: Lámina de agua en la sección longitudinal “C_CutWire_1_Layer0” en el instante 1000 s del Estrechamiento de gran longitud en régimen lento.

Antes del estrechamiento, se genera una curva M1 que tiende al calado normal aguas arriba (0.13 m). El estrechamiento provoca un embalsamiento aguas arriba, lo que, a su vez, provoca un aumento de la energía en forma de calado. Al inicio del cálculo parte del caudal no puede atravesar el estrechamiento por carecer de la energía suficiente, por lo tanto, se acumula aguas arriba del mismo. A medida que aumenta el calado antes del estrechamiento, aumenta el caudal de desagüe (porque aumenta la energía aguas arriba de la obstrucción). Cuando se alcanza la situación de equilibrio (Figura 104), se produce un aumento de calado aguas arriba del estrechamiento, seguido de un descenso brusco aguas abajo de él.

7.4.1.2 Estrechamiento de poca longitud en régimen lento – Nivel impuesto

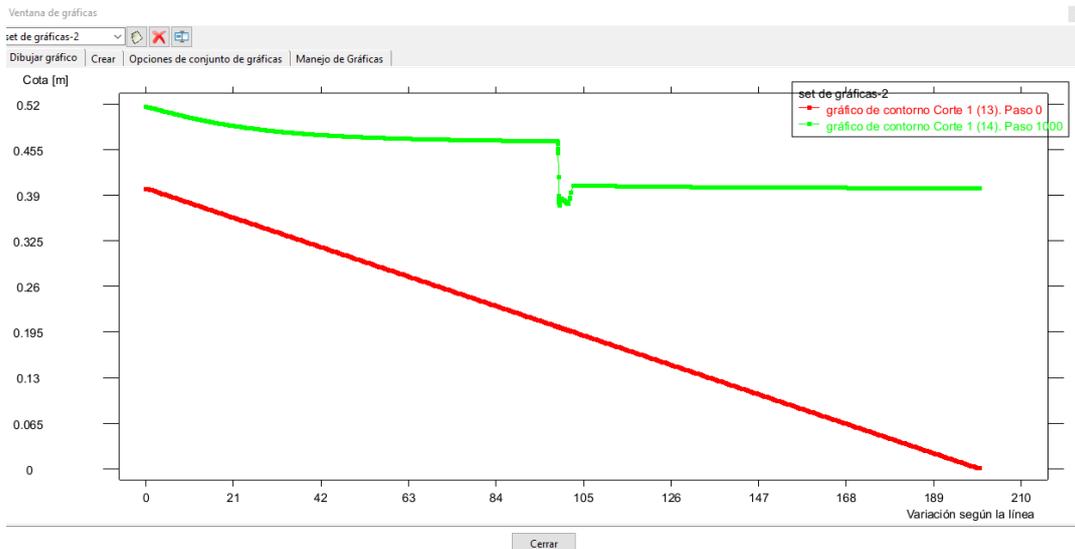


Figura 105: Lámina de agua en la sección longitudinal “C_CutWire_1_Layer0” en el instante 1000 s del Estrechamiento de poca longitud en régimen lento con nivel impuesto.



Figura 106: Módulo de la velocidad del flujo en el Estrechamiento de poca longitud en régimen lento con nivel impuesto.

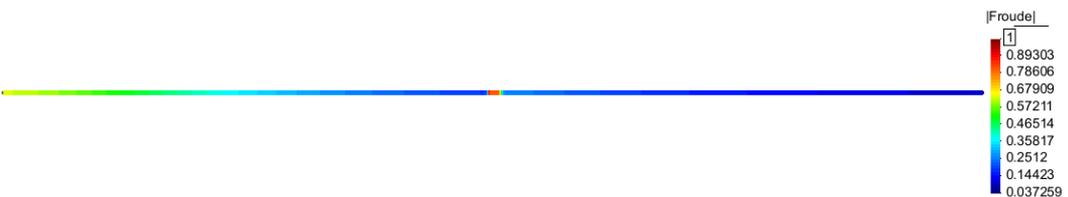


Figura 107: Módulo del número de Froude del flujo en el Estrechamiento de poca longitud en régimen lento con nivel impuesto

Igual que en el caso anterior, partiendo del calado normal (0.13 m) aumenta el calado provocando un embalsamiento de agua antes del estrechamiento (Figura 105) que provoca el aumento de la energía en forma de calado para poder superar el mismo. Sin embargo, como en este caso tiene poca longitud, a la salida se recupera la geometría inicial. Por lo tanto, cuando se alcanza la situación de equilibrio a la salida del estrechamiento se produce un aumento del calado. Teóricamente, debería recuperarse totalmente hasta alcanzar el calado a la entrada del fenómeno local, pero debido a las pérdidas que se producen en el estrechamiento y posterior expansión, solo se recupera parte del calado. Aguas abajo el nivel impuesto es de 0.40 m, que al ser la cota de solera igual a 0 m, se corresponde con el calado. En las Figura 106 y Figura 107 se observa como varían el módulo de la velocidad y del número de Froude en planta.

7.4.1.3 Estrechamiento de poca longitud en régimen lento – Vertido libre

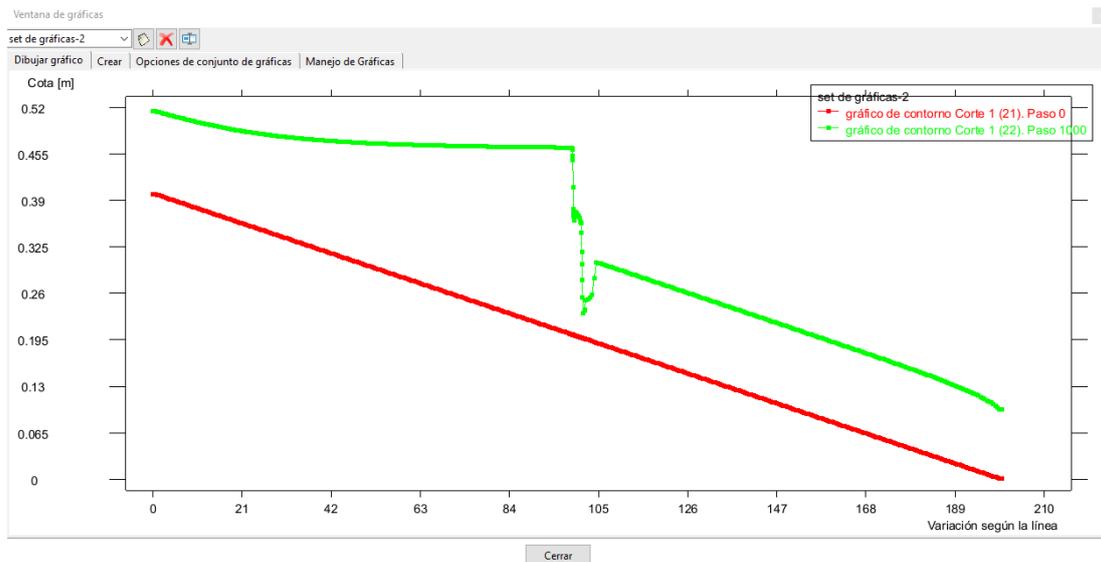


Figura 108: Lámina de agua en la sección longitudinal “C_CutWire_1_Layer0” en el instante 1000 s del Estrechamiento de poca longitud en régimen lento con vertido libre.

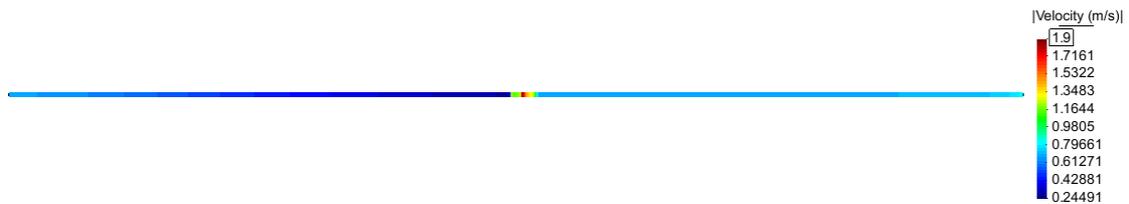


Figura 109: Módulo de la velocidad del flujo en el Estrechamiento de poca longitud en régimen lento con vertido libre.

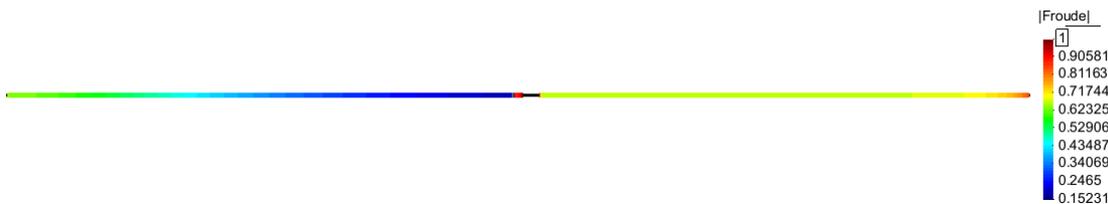


Figura 110: Módulo del número de Froude del flujo en el Estrechamiento de poca longitud en régimen lento con vertido libre.

Como se ve en la Figura 108, el aumento de calado en el primer tramo del canal es prácticamente igual al descrito en el apartado anterior. Sin embargo, en este caso, como no existe ninguna condición de contorno a la salida que ejerza influencia sobre la lámina de agua, esta sufre un descenso notable de calado, que no se recupera a la salida. Como la energía mínima en el estrechamiento es superior a la de aguas abajo, se produce un desacoplamiento.

Se adjunta a su vez en las Figura 109 y Figura 110 los módulos de la velocidad y del número de Froude en planta. Se comprueba como las velocidades son casi el doble que en el caso de nivel impuesto (igual que se veía en el apartado 7.2.2.2 en canales cortos). En la Figura 110 la zona del estrechamiento que se ve de

color negro corresponde con una zona en la que el número de Froude es superior a 1 (de régimen rápido), se ve negro debido al zum.

7.4.1.4 Estrechamiento de gran longitud en régimen rápido

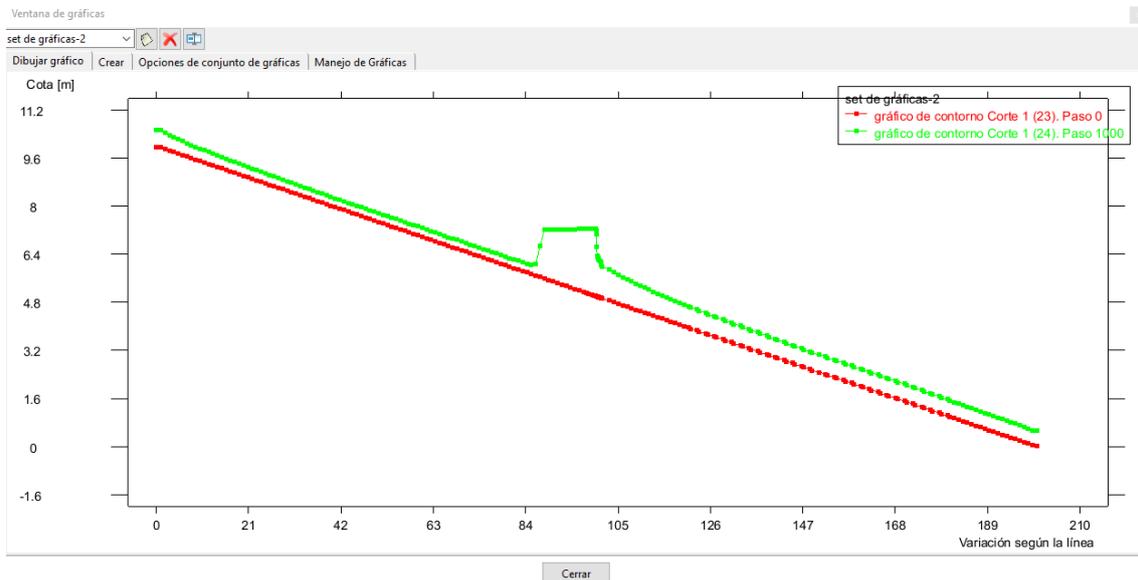


Figura 111: Lámina de agua en la sección longitudinal “C_CutWire_1_Layer0” en el instante 1000 s del Estrechamiento de gran longitud en régimen rápido.

Una vez se alcanza el régimen estacionario, la lámina de agua ya es estable (se considera que a partir de 1000 segundo las variaciones serán mínimas). La curva en el primer tramo es una S2 que parte del calado crítico y que tiende al calado normal. Sin embargo, al llegar a las inmediaciones del estrechamiento, no dispone de la energía suficiente para superarlo. Debido a que se trata de un régimen rápido, no se produce una acumulación de energía en forma de calado a lo largo del primer canal, sino que, 15 metros antes del fenómeno local, embalsamiento de agua. Este provoca que para superar el nivel de agua, se genere un resalto hidráulico. A partir del segundo tramo reduce de nuevo su calado de forma brusca al inicio, y con otra S2 en el segundo tramo.

7.4.2 Escalones

En este caso, se completa lo descrito en el apartado 7.2 de los fenómenos locales que tienen lugar en escalones, pero con canales largos para observar las tendencias aguas arriba y aguas abajo del fenómeno local en cuestión. Se seguirá un esquema igual, con una primera tabla resumen de datos de partida de cada modelo, seguido de una descripción con figuras de cada apartado.

Se presenta la tabla en la cual se describen los datos de partida para cada uno de los 3 casos de escalones:

- Escalon_gran_longitud_régimen_lento.gid
- Escalon_poca_longitud_régimen_lento.gid
- Escalon_poca_longitud_régimen_rápido.gid

Tabla 6. Dimensiones y datos de entrada de los modelos de escalones en canales largos

Caso	Longitud (m)	Ancho (m)	Pendiente (%)	Coeficiente de Manning ($s/m^{1/3}$)	Variación de cota de solera	Condición de entrada		Condición de salida	
						Q (m^3/s)	V (m/s)		
Escalon de gran longitud en régimen lento	200	0.50	0.2	0.015	0.10 m	0.04	-	Crítico	
Escalon de poca longitud en régimen lento	Nivel impuesto	200	0.50	0.2	0.015	0.20 m	0.04	-	Nivel = 0.55 m
	Vertido libre	200	0.50	0.2	0.015	0.20 m	0.04	-	Vertido libre
Escalon de gran longitud en régimen rápido	200	0.50	5	0.015	3 m	1	2.7	Crítico	

A continuación, se adjuntan los resultados obtenidos para cada caso. Los archivos .gid de los escalones se encuentran en la carpeta "Fenomenos_locales_canales_largos" proporcionada al alumno. Los nombres de cada modelo se corresponden con los mencionados en este apartado. De nuevo, los resultados de cada caso serán prácticamente iguales a los de los escalones en canales cortos.

7.4.2.1 Escalón de gran longitud en régimen lento

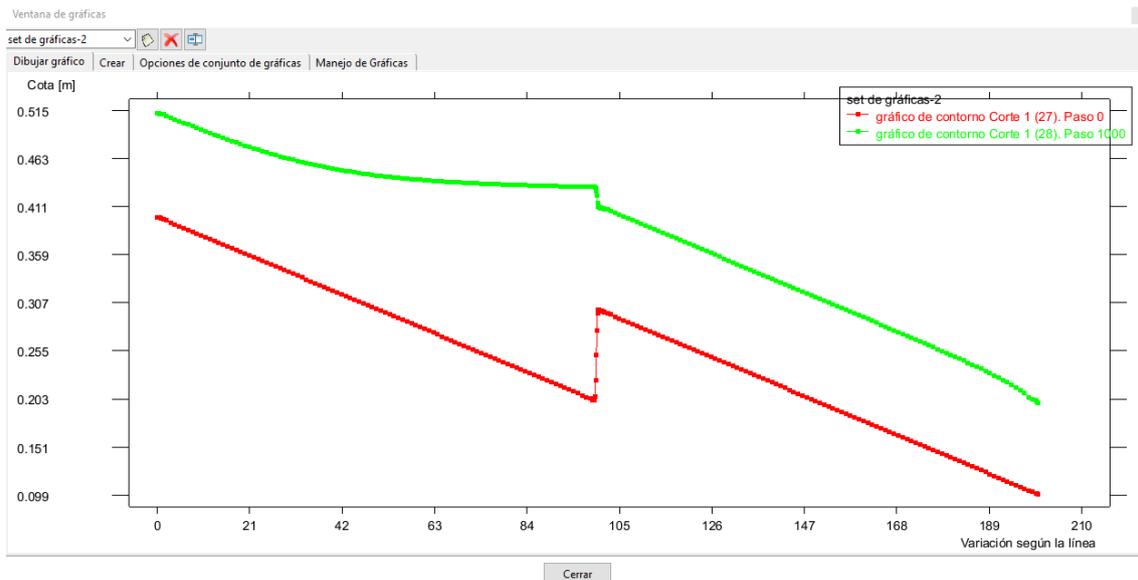


Figura 112: Lámina de agua en la sección longitudinal "C_CutWire_1_Layer0" en el instante 1000 s del Escalón de gran longitud en régimen lento.

Como se ve en la Figura 112, los resultados son muy parecidos al caso de Estrechamiento de gran longitud en régimen lento (Figura 104), ya que, los datos de partida son los mismos (sustituyendo variación de ancho por variación de cota de solera) y por tanto, los calados normal y crítico son iguales. Al inicio del canal se genera también una curva M1, desde 0.13 m (calado normal), cuyo calado va a aumentando hasta llegar al escalón. Para superar el mismo, tiene lugar una acumulación de energía (calado). Justo después del escalón se produce un descenso pronunciado del calado y a partir del segundo tramo se genera una curva S2 que tiende al calado crítico (0.09 m). Se recuerda que debido al aumento de cota de solera a la mitad, el final del canal tiene una cota de 0.10 m.

7.4.2.2 Escalón de poca longitud en régimen lento – Nivel impuesto

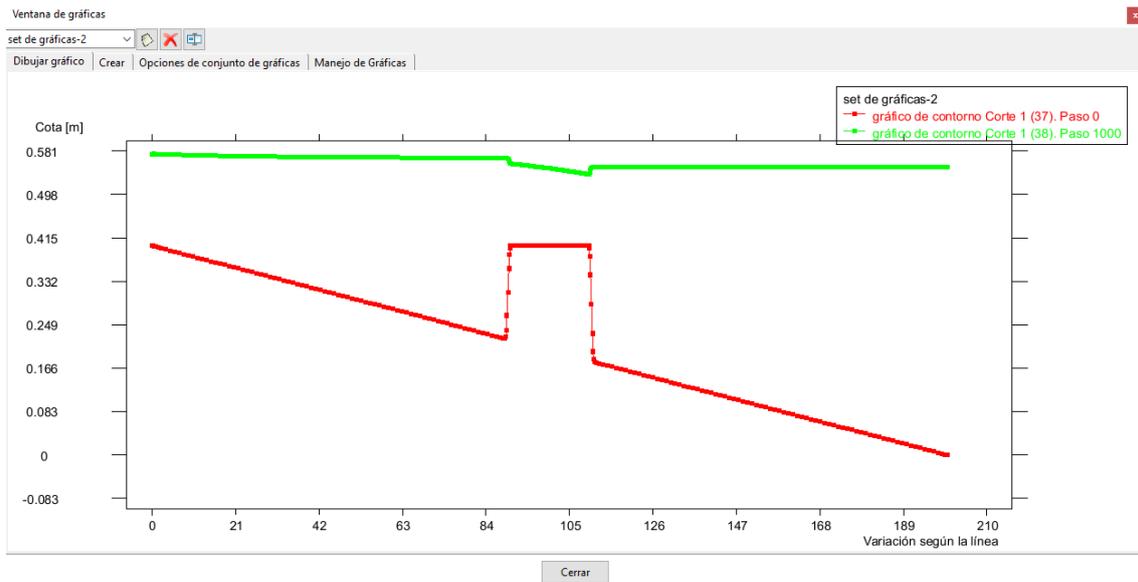


Figura 113: Lámina de agua en la sección longitudinal “C_CutWire_1_Layer0” en el instante 1000 s del Escalón de poca longitud en régimen lento con nivel impuesto.

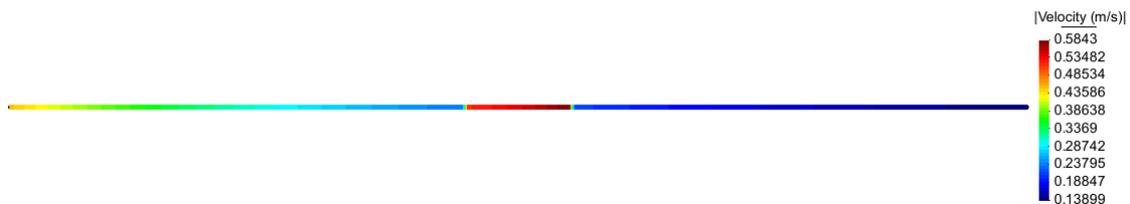


Figura 114: Módulo de la velocidad del flujo en el Escalón de poca longitud en régimen lento con nivel impuesto.

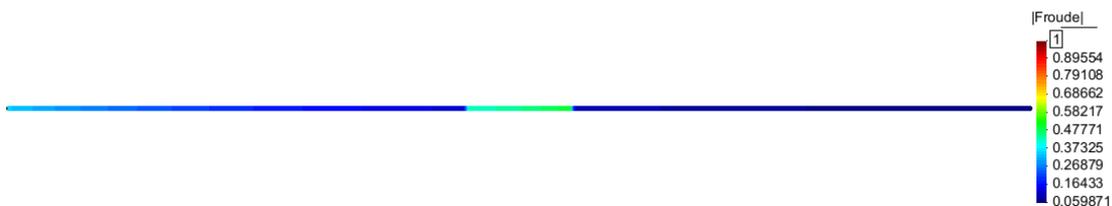


Figura 115: Módulo del número de Manning del flujo en el Escalón de poca longitud en régimen lento con nivel impuesto.

De nuevo, en el primer tramo de canal se genera una M1 que acumula calado para superar el escalón de 20 cm. Igual que sucedía en el 7.4.1 con el Estrechamiento de poca longitud en régimen lento con nivel impuesto, se produce un aumento repentino del calado cuando aumenta la cota de solera (estrechamiento) y una recuperación del mismo, no al completo debido a las pérdidas, cuando se reduce la cota de solera (expansión). El nivel impuesto aguas abajo es de 0.55 m, lo que provoca que, justo después del fenómeno local, se genere otra M1 para alcanzar ese calado.

Se adjuntan los resultados en planta de velocidad y número de Froude para comprobar como ambos aumentan durante el escalón. No se llega a producir un cambio de régimen.

7.4.2.3 Escalón de poca longitud en régimen lento – Vertido libre

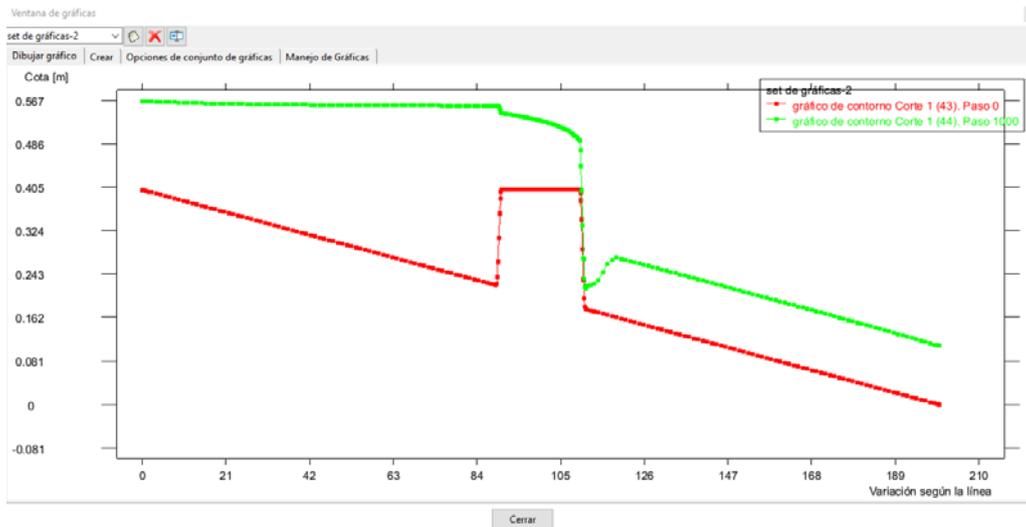


Figura 116: Lámina de agua en la sección longitudinal “C_CutWire_1_Layer0” en el instante 1000 s del Escalón de poca longitud en régimen lento con vertido libre.



Figura 117: Módulo de la velocidad del flujo en el Escalón de poca longitud en régimen lento con nivel impuesto.



Figura 118: Módulo del número de Manning del flujo en el Escalón de poca longitud en régimen lento con nivel impuesto.

Como se ha explicado en apartados anteriores (7.1.2.2, 7.2.2.2 y 7.4.1) cuando no existe ninguna condición aguas abajo que llegue a afectar al escalón, predominará el efecto del fenómeno local. Esto provoca que en el primer tramo se acumula energía, hasta que el flujo es capaz de superar el obstáculo que supone el aumento de cota de solera. En el momento en el que aumenta la cota, se produce un descenso brusco del calado. Durante el escalón se tenderá al calado crítico (0.09 m). Por último, a la salida del escalón se produce una reducción de energía en forma de calado debido a que la energía a la salida del escalón es notablemente inferior a la que tiene el flujo durante el mismo.

Se incluyen los resultados de velocidad y Froude en planta en las Figura 117 y Figura 118. Como siempre, la velocidad es muy superior al caso de nivel impuesto. La zona de color negro (debido al zum) en la Figura 118 se vuelve a corresponder con una zona fuera del límite superior de la escala, es decir, con una zona de régimen rápido durante el escalón Figura 119.

7.4.2.4 Escalón de gran longitud en régimen rápido

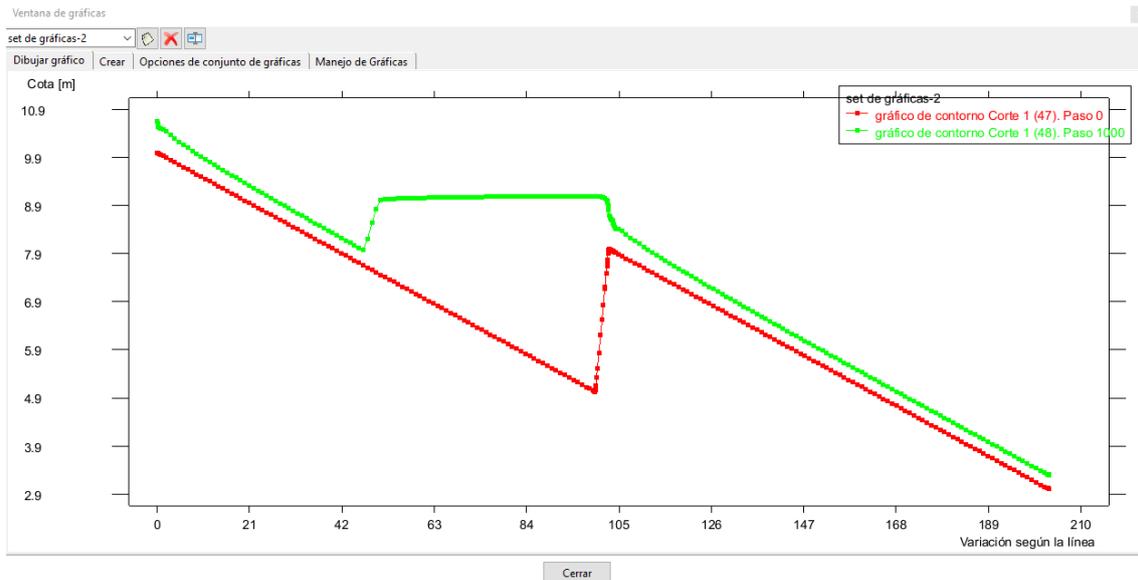


Figura 119: Lámina de agua en la sección longitudinal “C_CutWire_1_Layer0” en el instante 1000 s del Escalón de gran longitud en régimen rápido.

Los resultados de este apartado son prácticamente iguales a los vistos en la Figura 98. En este caso el fenómeno local se ve igual en un canal largo que en uno corto porque las tendencias aguas arriba y aguas abajo se dan con rapidez (las curvas S2 tienden rápido de calado crítico a calado normal). A su vez, el análisis es el mismo. Durante los primeros instantes el flujo no puede superar el obstáculo, de modo que se almacena agua en el mismo. Como se trata de régimen rápido para alcanzar el nivel de energía suficiente no se produce un aumento progresivo del calado durante el primer tramo, sino que se produce un resalto hidráulico que permite la acumulación de calado apropiada. En el segundo tramo se genera una S2, hasta el final del canal (que en este caso termina en cota 3 m, debido al escalón).

8. DATOS DE PARTIDA PARA LA REALIZACIÓN DE LOS EJERCICIOS

En este apartado se adjunta una tabla guía en la que se indica para cada caso calculado, el apartado del documento en el cual se encuentra (con referencias cruzadas), la carpeta en la cual se encuentra el modelo .gid y el nombre de cada uno de los archivos.

Tabla 7: Tabla guía de los modelos para cada apartado y caso estudiado.

Caso	Apartado del documento	Carpeta	Nombre del fichero Iber
Curva M1, curva M2 y curva M3	3.3, 3.4 y 3.5	Curvas_de_remanso	Pendiente_Moderada.gid
Curvas S1 y S2, y curva S3	4.1 y 4.2		Pendiente_Pronunciada.gid
Cambio de régimen de régimen lento a rápido	5.1		Cambio_de_regimen_Lento-Rapido.gid
Cambio de régimen de régimen rápido a lento	5.2		Cambio_de_regimen_Rapido-Lento.gid
Ejemplo 4.2	6	-	Ejemplo_4.2.gid
Estrechamiento de gran longitud en régimen lento en un canal corto	7.1.1	Fenomenos_locales_canales_cortos	Estrechamiento_gran_longitud_reg_lento.gid
Estrechamiento de poca longitud en régimen lento en un canal corto	7.1.2		Estrechamiento_poca_longitud_reg_lento.gid
Estrechamiento de gran longitud en régimen rápido en un canal corto	7.1.3		Estrechamiento_gran_longitud_reg_rapido.gid
Escalón de gran longitud en régimen lento en un canal corto	7.2.1		Escalon_gran_longitud_reg_lento.gid
Escalón de poca longitud en régimen lento en un canal corto	7.2.2		Escalon_poca_longitud_reg_lento.gid
Escalón de gran longitud en régimen rápido en un canal corto	7.2.3		Escalon_gran_longitud_reg_rapido.gid
Problema con fenómenos locales	7.3	-	Problema_H9-3.gid
Estrechamientos en canal largo	7.4.1	Fenomenos_locales_canales_largos	Estrechamiento_gran_longitud_reg_lento.gid
			Estrechamiento_poca_longitud_reg_lento.gid
			Estrechamiento_gran_longitud_reg_rapido.gid
Escalones en canal largo	7.4.2		Escalon_gran_longitud_reg_lento.gid
			Escalon_poca_longitud_reg_lento.gid
			Escalon_gran_longitud_reg_rapido.gid