



ANEJO Nº 2: ESTUDIO DE SOLUCIONES

Autora: Nuria Estivill Manzanaro



ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	3
2	CAUDAL DE DISEÑO	3
3	DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ENCAUZAMIENTO	4
3.1	Trazado en planta	4
3.2	Trazado en alzado.....	4
3.3	Planteamiento inicial de la actuación.....	6
4	Estudio de alternativas	7
4.1	Encauzamiento en el “Paseo Barranco la Cala”	7
4.2	Diseño del colector de la Av. Marina Baixa	19

1 INTRODUCCIÓN

El presente documento “Anejo nº 2. Estudio de soluciones” ha sido redactado por Nuria Estivill Manzanaro. Con él se pretende justificar el diseño hidráulico por el que definitivamente se ha optado para el encauzamiento del barranco de La Cala en Finestrat, (Alicante) a partir de la antigua nacional N-332.

El tramo del barranco en el que se centra esta actuación es a partir de su paso por el puente de la antigua nacional N-332 que actualmente recibe el nombre de Avenida de Finestrat. Tras el puente el cauce queda totalmente constreñido por el alto grado de urbanización y tras una actuación realizada en 2008 adquiere apariencia de calle al quedar pavimentado.

Para poder empezar con el planteamiento del diseño hidráulico se han de tener en cuenta los siguientes condicionantes, los cuales se desarrollan con mayor detalle en los posteriores apartados de este anejo:

- Caudal de diseño: constituye el elemento base para comenzar con el dimensionamiento de la estructura. Con el fin de cumplir con el Plan de Acción Territorial de carácter sectorial sobre prevención del Riesgo de Inundación en la Comunitat Valenciana (PATRICOVA) se opta por el caudal asociado a un evento de tormenta de período de retorno 500 años. En este caso, se tienen dos caudales de diseño: para el tramo soterrado en lámina libre es de $66 \text{ m}^3/\text{s}$ y para el tramo en presión de $67 \text{ m}^3/\text{s}$. En el apartado 2 del presente documento se justifican estos valores.
- Trazado en planta: La fuerte antropización ha dejado el barranco completamente encajonado. Esto fuerza a que el encauzamiento discurra por el propio cauce sin opción a poder plantear otro trazado alternativo y ajustándonos a las dimensiones del mismo. Las curvas existentes tras el paso del puente de la nacional suponen dificultades para la construcción del encauzamiento y obligan a que éste se inicie en un tramo que permita un trazado más rectilíneo.
- Trazado en alzado: Las pendientes que existen en el barranco son fuertes, por lo que, el flujo discurrirá en régimen rápido. La cota del paseo marítimo constituye una limitación muy importante: no es lo suficientemente elevada como para desaguar el caudal de diseño, así que, obliga a que el tramo final deba transcurrir en presión. Respecto al tramo enterrado, se busca una pendiente longitudinal que no acelere el flujo a más de 6 m/s y que permita que la

cota final del tramo enterrado no supere los 3.6 metros. Además, se busca evitar elevar demasiado la actual rasante de la calle, como máximo 0.70 metros.

- Dimensiones de las estructuras: La anchura mínima del cauce impone que el encauzamiento pueda ser como máximo de 9 metros de ancho. Por otro lado, por motivos de mantenimiento y limpieza se opta por una altura de la infraestructura de al menos 2.2 metros para que éste sea visitable. La transición de lámina libre a presión debe caber en 15 metros de ancho y respecto a las tuberías lo único a tener en cuenta es que la anchura mínima de la avenida por la que discurrirán es de 10 metros.

2 CAUDAL DE DISEÑO

En el artículo 32 del Plan de Acción Territorial de carácter sectorial sobre prevención del Riesgo de Inundación en la Comunitat Valenciana (PATRICOVA) donde se dictan las condiciones que deben cumplir las actuaciones estructurales contra inundaciones, se establece que *“los encauzamientos cubiertos se permitirán excepcionalmente en tramos urbanos altamente antropizados y con un nivel de protección de, al menos, quinientos (500) años de período de retorno. Además, para evitar su obstrucción durante una crecida, deberán disponer de un elemento de retención de los sólidos gruesos arrastrados inmediatamente aguas arriba del mismo.”*

Por ello para cumplir con la normativa se ha escogido el caudal asociado a un evento de tormenta con período de retorno 500 años.

Como se explicará posteriormente, la actuación a realizar comprende, además del encauzamiento en el barranco de La Cala, la ejecución de un colector que recoge las aguas que discurren por la Avenida Marina Baixa.

El agua que baja por esta vía repercute en la zona urbana que el presente proyecto pretende salvaguardar. Así que, en caso de no recoger este caudal las edificaciones seguirían viéndose afectadas. Por tanto, para proteger totalmente el tramo de la calle hasta el paseo marítimo se hace necesaria esta captación de este caudal.

Teniendo en cuenta lo anterior, según el *“Anejo 2. Análisis hidrológico del Trabajo Final de Grado redactado por Laia Llin Esteller (2015)”*, se tienen tres caudales de diseño relativos a un nivel de protección de 500 años.



Fig. 1. *Puntos de desagüe que determinan los caudales de diseño.*

Por un lado, el análisis hidrológico determina un caudal de $66 \text{ m}^3/\text{s}$ asociado al punto de simulación *B* que permite diseñar el tramo en lámina libre. Por otro lado, caudal recogido de la Av. Marina Baixa se obtiene en el punto de desagüe *C* y es de $7.4 \text{ m}^3/\text{s}$. Por último, el tramo en presión será diseñado para un caudal de $67 \text{ m}^3/\text{s}$, ya que, al caudal procedente del barranco hay que añadirle el de la Av. Marina Baixa. Este valor es el resultante de la suma de hidrogramas de los puntos *B* y *C* y se corresponde con el punto de simulación *D* donde aproximadamente confluirán los caudales.

3 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ENCAUZAMIENTO

3.1 Trazado en planta

Como se ha comentado en la introducción de este documento, el tramo del barranco en el que se centra el proyecto es a partir del puente de la nacional N-332 donde el cauce está rodeado de urbanizaciones y adquiere apariencia de calle por estar pavimentado. Ese elevado grado de urbanización ha agotado prácticamente todo el suelo alrededor del barranco dejándolo

completamente encajonado. La falta de espacio no deja posibilidad a un trazado alternativo por el que pueda discurrir el encauzamiento, así que, la única opción es ubicarlo en el propio cauce y respetando sus dimensiones.

Las curvas existentes aguas abajo del puente de la nacional dificultan el inicio del encauzamiento en este tramo. La pendiente del cauce es elevada, por lo que, el flujo discurrirá en régimen rápido. Cuando ocurre este tipo de régimen se debe procurar realizar un trazado rectilíneo o, si no fuera posible, con giros pequeños. De lo contrario al golpear el agua con las esquinas de las curvas se generan familias de ondas que perturban las líneas de corriente dando lugar a un flujo incontrolado.

3.2 Trazado en alzado

Las pendientes existentes en el barranco son fuertes, así que, el flujo discurrirá en régimen rápido siendo controlado desde aguas arriba.

La principal limitación de cota que condiciona el diseño es la cota del paseo marítimo. El paseo posee una cota de 1.8 metros respecto del nivel del mar. Ésta resulta una altura insuficiente como para desaguar el caudal de diseño. Se fuerza entonces a que el vertido del flujo en su tramo final se realice mediante tuberías.

Se procurará no modificar demasiado la rasante actual del cauce. No obstante, no supondría grandes modificaciones el hecho de incrementar su cota hasta una altura de 70 centímetros. Existen tres puertas traseras de las urbanizaciones que tienen salida al barranco. Dos de ellas son peatonales mientras que las otras dos permiten el paso de vehículos.



Fig. 2. Puertas peatonales que dan acceso al barranco.

altura de 3.6 metros. Este incremento es posible, ya que, las construcciones colindantes se encuentran sobreelevadas o bien, por un muro de mampostería o por unos escalones.



Fig. 4. Muro de mampostería que eleva las construcciones situadas en el lateral derecho del cauce



Fig. 3. Puertas para vehículos en el barranco

Se observa que todas ellas se encuentran sobreelevadas respecto del cauce. En el caso de las puertas para vehículos, además de situarse por encima de la cota de la calle, en el interior de la urbanización la cota del acceso sigue subiendo. Por tanto, se llega a la conclusión de que un aumento de la cota de la rasante actual de hasta 0.7 metros no provocaría grandes modificaciones en las urbanizaciones.

Por otro lado, en el tramo final del barranco justo antes de convergen con la Av. Marina Baixa, la cota actual de la rasante es de 2.79 metros. En caso de necesitar más altura se permite llegar hasta una



Fig. 5. Escalones que elevan las construcciones situadas en el lateral izquierdo del cauce

3.3 Planteamiento inicial de la actuación

Teniendo en cuenta los factores limitantes anteriores se plantea que la solución a adoptar se divida en tres tramos:

- Tramo 1: Se inicia aguas abajo del puente de la carretera N-332 y en él se mantiene la morfología del cauce existente. El caudal discurre libremente en lámina libre sobre la superficie de la calle.
- Tramo 2: Las aguas pasan a ser transportadas mediante un cajón de hormigón armado hasta aproximadamente la confluencia del barranco de la Cala con la Av. Marina Baixa.
- Tramo 3: el caudal discurre en presión hasta que se vierta el caudal al mar o a la playa.

Además, del encauzamiento principal del barranco se ejecutará un colector que recoja el agua procedente de la Avenida Marina Baixa para dejar totalmente protegida la zona urbana próxima a la playa.

A continuación, se justifica la distribución definitiva de los tres tramos relativos al encauzamiento del "Paseo Barranco de La Cala".

Tramo 1: Mantenimiento de la morfología actual

La mejor opción es que en el tramo inicial las aguas fluyan por la calle existente.

Las pendientes existentes en el barranco son fuertes. Así que, el agua circulará en régimen rápido ($F > 1$). Esto limita a un trazado en planta rectilíneo o con giros muy pequeños. De lo contrario al golpear el agua con las esquinas de las curvas se generan familias de ondas que perturban las líneas de corriente, dando lugar a un flujo incontrolado. Por ello, queda descartado el comienzo del encauzamiento seguidamente desde la nacional puesto que se complicaría mucho el diseño y supondría un elevado coste económico.



Fig. 6. Curvas en planta tras el paso del barranco por la nacional

Tras la actuación de 2008, esta zona adquiere un peculiar aspecto que recuerda al de un canal. Se trata de una sección rectangular con muros de mampostería a ambos lados y en la cual las urbanizaciones muestran su cara trasera sin ninguna puerta que de acceso al barranco. De manera que, no se aprecia una morfología urbana y dejar que el agua circule directamente sobre el cauce no supone un gran problema. La única actuación acometida en este tramo es el acondicionamiento del mismo para que el agua circule por el cauce y no desborde al paseo lateral existente. Para ello, se ejecuta un murete lateral de 1.1 metros que evita que el agua se escape.

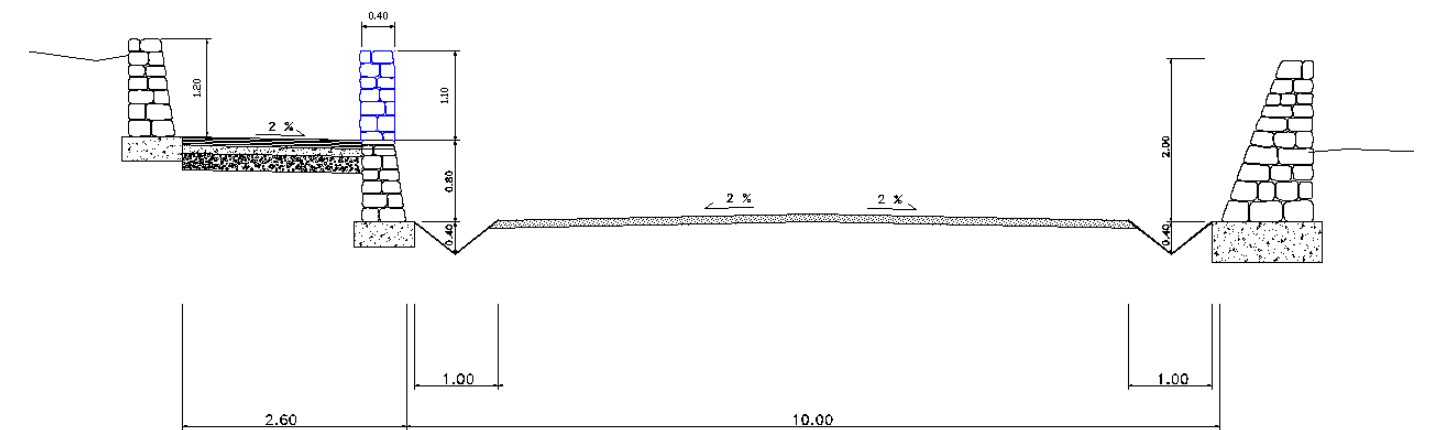


Fig. 7. Ejecución de un muro lateral en el paseo de 1.1 metros dibujado en azul

Tramo 2: Cajón enterrado

Al contrario que en el tramo anterior, a unos doscientos metros de la antigua nacional el cauce se va ensanchando lo que le concede una morfología urbana. Esta falsa apariencia de calle, hace posible

que en él se puedan encontrar coches y personas y, por tanto, es más que considerable dar inicio al encauzamiento para evitar posibles daños y tragedias.

Por tanto, se decide que a unos 300 metros aguas abajo del puente, es decir, en torno al P.K. 0+600 del plano “3.2 Planta” que encontramos en el “Documento Nº 2. Planos” el encauzamiento esté ya ejecutado. A partir de ese tramo, resultaría peligroso no proteger el cauce: la zona cuenta con características más propias de una calle que de un cauce. Este hecho puede confundir a los ciudadanos quienes pensando que realmente se encuentran en una vía podrían realizar un uso indebido de la misma, como por ejemplo, estacionar sus vehículos. Además, salvaguardando el cauce a partir de esta sección se gana un amplio espacio que podría ser aprovechado por los habitantes del municipio; como por ejemplo, se podrían implantar zonas verdes que revitalizasen social y ambientalmente el lugar.

Una vez sabido el entorno en el que se iniciará el encauzamiento, la siguiente consideración es la elección del cajón a ejecutar. Por cuestiones constructivas se ha optado por un cajón de hormigón in situ que cuenta con 0.25 metros de espesor de clave y 0.4 metros de solera. Con estos grosores se estima una resistencia suficiente a los esfuerzos que se originan, en especial en la solera que debe resistir los esfuerzos tangenciales por fricción. La clave del cajón estará constituida por losas prefabricadas de hormigón. Habrá tantas losas como celdas y se encontrarán biapoyadas sobre los muros que las separa. Puesto que el mar se encuentra cercano a la actuación, existe un ambiente muy agresivo y el hormigón a utilizar debe ser resistente a sulfatos. Para facilitar y agilizar la ejecución de la obra se pretende que las dimensiones del cajón se mantengan en todo su recorrido, consiguiendo así también un mejor ajuste económico de la misma.

Se contemplan las opciones de cajones de dos o tres celdas. Una sola celda conlleva una sección muy alargada cuyo comportamiento mecánico no es el deseado ya que pueden generarse elevados esfuerzos flectores que acabarían deteriorando el cajón. Además, en caso de obstrucción de la celda no existe otra alternativa de paso al flujo.

Algunos condicionantes a tener en cuenta para escoger las dimensiones de cajón son:

- La anchura mínima del cauce es de 9 metros.
- Se limita la velocidad máxima de la lámina libre a 6 m/s para que el hormigón no sea deteriorado por las altas velocidades. Se permitirá superar esta velocidad en puntos singulares hasta un valor de 12 m/s en los que se empleará un hormigón de mayor calidad.

- La cota final del cauce en la confluencia con la Av. Marina Baixa no podrá ser superior a 3.6 m. La cota actual es de 2.79 metros pero se podría aumentar hasta 3.6 m, ya que, las edificaciones colindantes se encuentran elevadas, o bien, sobre unos escalones, o bien, sobre un muro de mampostería. Por tanto, un incremento hasta 3.6 metros no produce afecciones en las mismas.

Tramo 3: Tuberías en presión

Debido a la escasa cota que presenta el paseo marítimo, 1.8 metros, resulta inviable desaguar el caudal correspondiente al periodo de retorno 500 años en lámina libre, así que, se debe realizar en presión.

Las tuberías van a estar permanentemente en contacto con el agua del mar, por lo que, el ambiente en el que se encuentran es altamente agresivo. En consecuencia, por su elevada durabilidad, se opta por la instalación de tuberías de poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV).

4 Estudio de alternativas

4.1 Encauzamiento en el “Paseo Barranco la Cala”

Decidido el trazado del encauzamiento y aproximadamente el inicio de cada uno de los tramos se realiza un estudio de soluciones para alcanzar un diseño hidráulico óptimo tanto del cajón enterrado como de las tuberías en presión.

Se desarrolla a continuación el procedimiento seguido hasta llegar a la solución final adoptada.

En primer lugar, se comienza el diseño por la condición de energía que imponen las tuberías aguas abajo del barranco, justo antes de la confluencia con la Av. Marina Baixa.

Se tantea qué tuberías son adecuadas para desaguar el caudal del diseño. Se trata de un caudal de 67 m³/s resultado de la suma de los hidrogramas que llegan del barranco de La Cala y del que baja por la Av. Marina Baixa.

La velocidad máxima alcanzada en las tuberías debe ser inferior a 6 m/s para evitar el deterioro de las mismas y que las pérdidas de carga sean muy elevadas. Para conseguir desaguar un caudal de 67

m³/s cumpliendo con dicho criterio de velocidad y con diámetros razonables es necesaria la instalación de al menos tres tuberías.

En primer lugar, se calculan las pérdidas de energía que tienen lugar. Se consideran:

- Pérdidas continuas por fricción (m). Se calculan a partir de la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$Hl = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Donde f es el coeficiente de fricción de Darcy, L la longitud de la tubería en metros, D el diámetro de la misma en metros, v la velocidad media del flujo en m/s y g la aceleración de la gravedad en m/s².

El coeficiente de fricción de Darcy (f) se halla por iteración a través de la fórmula de Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.71} + \frac{2.51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right)$$

La rugosidad de los tubos de PRFV es de $\varepsilon=0.029$ mm

- Pérdida de la altura de velocidad (m). El caudal transportado por las tuberías pierde toda su velocidad al confluir con el agua del mar.

$$Hv = \frac{v^2}{2g}$$

- Pérdidas por el cambio de densidad (m): El agua de precipitación posee una densidad de 1.00 g/m³ mientras que la del agua del mar es de 1.04 g/m³. Por tanto, por cada metro de agua salada tenemos una pérdida de 0.04 metros más. Como los tubos se encuentran a la cota -2 metros respecto del nivel del mar, esta cota se justifica a continuación, las pérdidas causadas por el cambio de densidad son de:

$$\text{Diferencia densidad} = 1.04 - 1.00 = 0.04$$

$$\text{Pérdidas densidad} = 0.04 \cdot 2 = 0.08 \text{ m}$$

- Pérdidas por marea viva (m): Para un período de retorno de 500 años se estima que el nivel de marea aumenta en 70 centímetros. Así pues, se añade una pérdida de energía de 0.07 metros.

Teniendo en cuenta todos esos factores se calculan las pérdidas unitarias originadas con diferentes diámetros de tubería:

Caudal (m3/s)	Diámetro (m)	Velocidad (m/s)	Fricción unitaria	Hv (m)	Cambio densidad (m)	Marea Viva (m)	Pérdidas unitarias totales (m)
67	2	7.109	0.0118	2.58	0.08	0.7	3.368
67	2.2	5.875	0.0073	1.76	0.08	0.7	2.547
67	2.4	4.937	0.0047	1.24	0.08	0.7	2.027
67	2.5	4.550	0.0038	1.06	0.08	0.7	1.839
67	2.6	4.206	0.0031	0.90	0.08	0.7	1.685

Se observan que las pérdidas unitarias son razonables y que se requiere un diámetro mayor de 2 metros para conseguir velocidades menores de 6 m/s. Esta consideración conlleva que las tuberías deban verter las aguas al mar, ya que, la elevación del paseo marítimo sobre el nivel del mar es de 1.8 metros, es decir, insuficiente para albergar unos tubos de tales dimensiones. Así pues, se decide que las tuberías finalicen en la batimétrica de -2 metros del fondo marino la cual se encuentra aproximadamente a 70 metros de la playa. De esta manera, las tuberías tienen una longitud aproximada de 250 metros.

Se calculan las pérdidas de energía totales:

Diámetro (m)	Velocidad (m/s)	Perd. Continuas	Hv (m)	Cambio densidad (m)	Marea Viva (m)	Pérdidas totales (m)
2.2	5.875	1.820	1.76	0.08	0.7	4.36
2.4	4.937	1.174	1.24	0.08	0.7	3.20
2.5	4.550	0.957	1.06	0.08	0.7	2.79
2.6	4.206	0.786	0.90	0.08	0.7	2.47

Estas pérdidas totales imponen una condición de contorno vital para el diseño hidráulico: para que el caudal pueda ser desaguado por las tuberías, la cota de la lámina de agua en el punto de toma debe ser al menos igual que la pérdida total calculada menos la altura de velocidad.

$$\text{Cota de la lámina libre (m)} = H_T - Hv$$

Atendiendo a este criterio, la primera opción posible es la implantación de tres tuberías de 2.4 metros de diámetro subiendo la cota de la calle a 3.55 metros. El uso de un diámetro inferior supone elevar

la calle a más de 4.5 metros de altura sobre el nivel del mar, hecho inviable debido a que afectaría a las edificaciones adyacentes.

La cota actual del tramo final de la calle donde se sitúa la entrada a las tuberías es de 2.79, existiendo la posibilidad de incrementarla hasta los 3.6 metros sin producir grandes afecciones a lo ya edificado. Mirando hacia aguas arriba del barranco, en la margen izquierda del mismo la única construcción susceptible de ser afectada por este aumento de cota es una caseta eléctrica. No obstante no significa una limitación ya que ésta se encuentra elevada sobre un muro de mampostería de 0.8 metros. El factor limitante viene dado por la terraza en la margen derecha: una serie de escalones la sitúan a 3.5 metros de altura sobre el nivel del mar. Así pues, un incremento de la cota del cauce hasta 3.55 metros no ocasiona grandes modificaciones en la morfología actual de la calle.

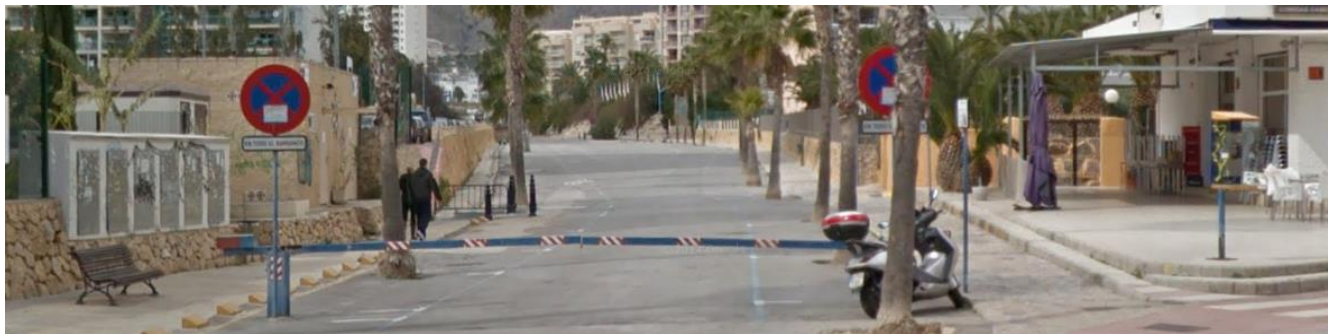


Fig. 8. Tramo final del barranco, mirado desde aguas abajo, donde se aprecia la sobreelevación de las construcciones colindantes.



Fig. 9. Detalle del muro de mampostería y de los escalones que permiten un aumento de cota.

Así pues, se elige la instalación de tres tuberías de 2.4 metros de diámetro. Este diámetro es el más grande que se encuentra normalizado por las normas UNE.

Se realizan una serie de cálculos que permitan dimensionar la cámara de presurización en la que tendrá lugar la transición del flujo en lámina libre a presión. Cabe destacar que todas las cotas de las que se hable en este documento estarán referidas respecto del nivel del mar, si no se dice lo contrario.

La energía total necesaria para poder desaguar el caudal de diseño es de +3.2 metros respecto del nivel del mar. El flujo debe llegar a la cámara calmado con una velocidad baja: se impone una velocidad de 2 m/s. Por tanto, la lámina de agua se hallará a +3 metros sobre el nivel del mar:

$$H_T = 3.2 \text{ m}$$

$$\text{Velocidad impuesta} = 2 \text{ m/s} \rightarrow H_v = \frac{v^2}{2g} = \frac{2^2}{2 \cdot 9.81} = 0.20 \text{ m}$$

$$\text{Altura lámina libre sobre nivel del mar} = H_T - H_v = 3.2 - 0.2 = 3.0 \text{ m}$$

La clave de la cámara de presurización se sitúa a una cota de +3.25 metros, dejando un resguardo de unos 25 centímetros. La losa superior de la estructura es de 25 centímetros y se reservan 5 centímetros para la pavimentación. Por tanto, la cota de la calle se sube de +2.79 metros, que tiene actualmente, a +3.55 metros sobre el nivel del mar.

$$\text{Cota pavimento} = \text{Cota lámina libre} + \text{resguardo} + \text{losa hormigón} + \text{pavimentación}$$

$$\text{Cota pavimento} = 3.0 + 0.25 + 0.25 + 0.05 = 3.55 \text{ m}$$

La anchura necesaria para albergar tres tuberías de 2.4 metros de diámetro es de 8.2 metros: correspondientes a los tres tubos de 2.4 metros de diámetros separados por dos muros de 0.5 metros. Así que, para obtener una velocidad de 2 m/s el calado requerido es de 4.09 metros:

$$\text{Velocidad impuesta} = 2 \text{ m/s}$$

$$Q = v \cdot S = v \cdot B \cdot y \rightarrow y = \frac{Q}{v \cdot B} = \frac{67}{2 \cdot 8.2} = 4.09 \text{ m}$$

Para conseguir el calado estando la lámina de agua en la cota +3 metros, la solera de la cámara se coloca a la cota -1.1 metros y tendrá un grosor de 0.40 metros.

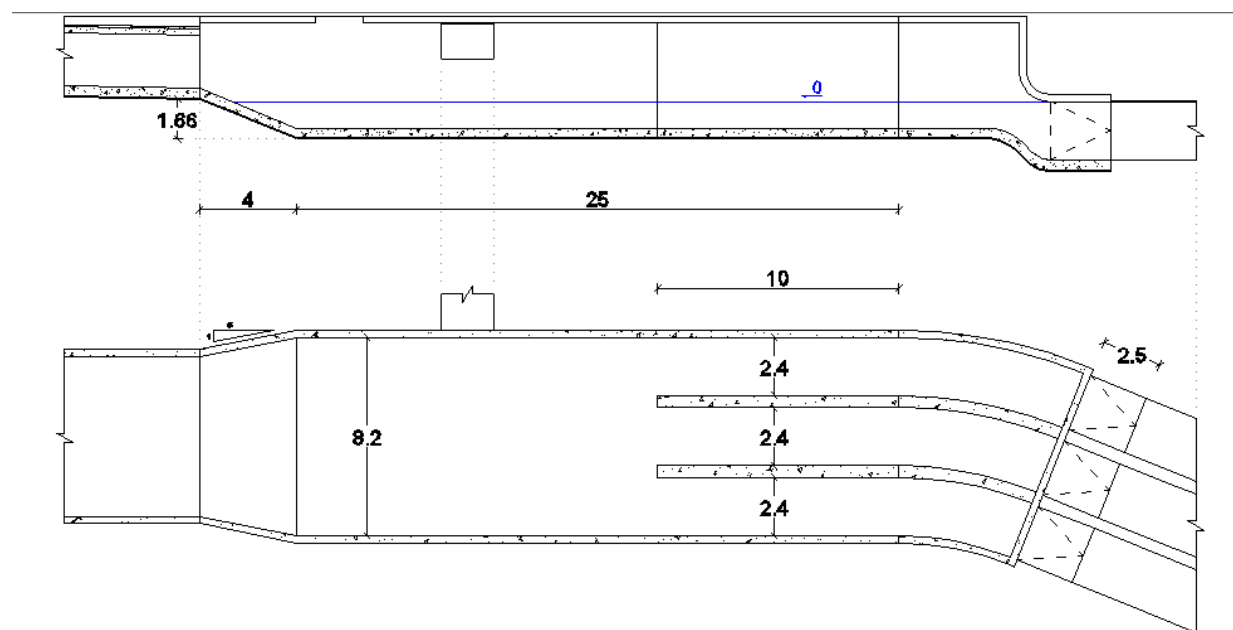


Fig. 10. Planta y alzado de la cámara de presurización.

El calado en la obra singular supone la imposición de un régimen lento aguas abajo del barranco. Sin embargo, antes de llegar a la cámara de presurización, el agua discurre en régimen rápido (el cual es controlado aguas arriba desde la sección crítica en el estrechamiento inicial). Por tanto, cuando el flujo llegue a la cámara se producirá un resalto hidráulico. En el punto en que se origine el resalto, aprovechando las turbulencias generadas, se incluirá el caudal procedente de la Av. Marina Baixa.

Como se justifica al final de este documento el resalto ordinario que ocurriría sería de aproximadamente 19.5 metros. Para quedarnos del lado de la seguridad se aumenta esta distancia un 20% y esta será la distancia que dejaremos en la cámara para que el flujo se calme y alcance el régimen lento. El resultado es que esta distancia es de 25 metros. Se ejecutarán unos muros que separan el caudal que entrará en cada tubería. Estos muros cuentan con una longitud de 10 metros. Además, se tendrá en cuenta que las tuberías comiencen bajo la cota 0 respecto del nivel del mar para que estén siempre sumergidas en el agua salada y evitando así problemas de durabilidad.

Con estas dimensiones el final de la cámara se produce en el P.K. 0+278.6. Desde ese punto hasta la batimétrica -2 metros no es posible realizar un trazado rectilíneo de las tuberías. Así que, se decide que el tramo final de la cámara, a partir de los muros, sea curvo. Como en esa sección el flujo se encuentra en régimen lento el giro no ocasiona ningún problema. De esta manera, se permite que las

tuberías en su inicio tengan trazado rectilíneo y que el leve giro que quede por dar tenga lugar lo suficientemente lejos del punto de toma de las tuberías. Por suficientemente lejos se entiende más de cinco veces el diámetro.

Ahora los esfuerzos se centran en la búsqueda de unas dimensiones y una pendiente adecuada para el cajón.

Diseño del cajón: Alternativa 1

En un primer momento se plantea que el encauzamiento comience en el P.K. 0+ 600 del plano “3.1 Planta” del documento Nº2 “Planos”; es decir, 288 metros aguas debajo de la antigua nacional; donde el ancho de la sección transversal es de 9 metros y su cota respecto el nivel del mar es de 8.68 metros. Justo aguas abajo de este perfil la sección se ensancha a 10 metros. La pendiente media que sigue el cauce actualmente existente es de 0.013: desde la cota 8.68 se desciende hasta 2.74 metros en 456 metros.

Se realiza un predimensionamiento suponiendo un régimen estacionario y uniforme, es decir, el flujo no varía temporal ni espacialmente. Aunque el régimen uniforme raramente ocurre en la realidad, permite encontrar de manera sencilla y satisfactoria unas dimensiones adecuadas para el caudal de diseño y sirve de apoyo para el posterior análisis del flujo estacionario gradualmente variado.

Para calcular el régimen uniforme se utiliza la extendida ecuación de Manning:

$$V = \frac{1}{n} \cdot R_H^{1/3} \cdot I^{1/2}$$

Donde V es la velocidad media del flujo en m/s; R es el radio hidráulico en metros; S es la pendiente de la línea de energía; y n es el coeficiente de rugosidad conocido como coeficiente de Manning en $s \cdot m^{-1/3}$ y cuyos valores están recogidos en tablas que se han obtenido de forma empírica.

Como se ha comentado anteriormente la altura de la sección del cajón será como mínimo de 2.2 metros para que sea visitable y puedan llevarse a cabo tareas de mantenimiento y limpieza. Se opta por escoger esta altura para que la profundidad de excavación y la sobreelevación de la rasante del cauce actual sea la mínima posible.

Para evitar un excesivo incremento de cota en el cauce la entrada en el cajón debe producirse tras una caída de varios metros. El cálculo del comportamiento de la lámina libre en el tramo en el que el

agua circula por el propio cauce, el cual se puede encontrar en el *Anejo 3. Cálculos Hidráulicos*, resulta que en el P.K. 0+600 se alcanza un calado de 1.16 metros.

Se recuerda que las limitaciones a tener en cuenta en el diseño del cajón son las siguientes:

- Anteriormente, se había comentado que la anchura mínima del cauce era de 9 metros. No obstante, en esta primera alternativa y en las restantes este condicionante para a ser de 10 metros, ya que, el encauzamiento se inicia pasado el tramo de 9 metros de ancho.
- Se limita la velocidad máxima de la lámina libre a 6 m/s para evitar que el hormigón sea deteriorado por las altas velocidades. No obstante, se permitirá superar esta velocidad en puntos singulares hasta un valor de 12 m/s en los que empleará un hormigón de mayor calidad.
- La cota final del cauce en la confluencia con la Av. Marina Baixa no podrá ser superior a 3.6 m. La cota actual es de 2.79 metros pero se podría aumentar hasta 3.6 m, ya que, las edificaciones colindantes se encuentran elevadas, o bien, sobre unos escalones, o bien, sobre un muro de mampostería. Por tanto, un incremento hasta 3.6 metros no produce afecciones en las mismas.

A partir de estos condicionantes se analizan diferentes opciones hasta alcanzar el diseño final de la estructura.

La primera opción planteada es la siguiente: a 288 metros aguas abajo del puente de la antigua N-332 (P.K. 0+600), se ejecuta una caída que permite la entrada al cajón con régimen rápido. El flujo mantiene este régimen hasta que alcanza la cámara de presurización.

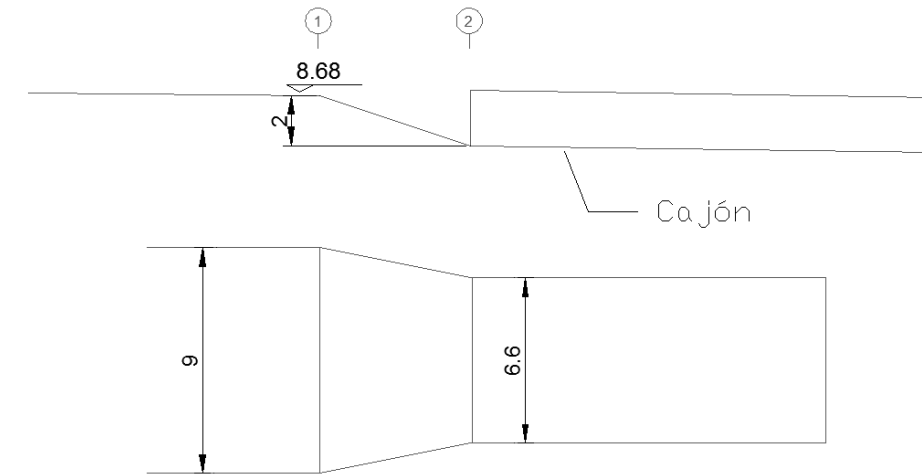


Fig. 11. Croquis alternativa 1

Se muestran los cálculos realizados:

1. Se calcula la energía específica en el P.K. 0+600 con 1.16 metros de calado, es decir en la sección 1 del croquis. Este calado se justifica en el “Anejo 3. Cálculos hidráulicos”:

$$H_{01} = y + \frac{Q^2}{2gB^2y^2} = 1.16 + \frac{66^2}{2 \cdot 9.81 \cdot 9^2 \cdot 1.16^2} = 3.2 \text{ m}$$

2. Energía específica tras la bajada de cota de 2 metros:

$$H_{02} = 3.2 + 2.0 = 5.2 \text{ m}$$

3. Se determina una pendiente fuerte de $I=0.015$ para ir disminuyendo la cota rápidamente y poder llegar a la cámara de transición con una elevación adecuada. Se tantean diferentes dimensiones de cajón:

- Se prueba con un cajón de dos celdas:

I	B (m)	n (s·m ^{-1/3})	y (m)	V (m/s)	Froude	yc (m)
0,015	2	0,016	2,67	6,19	1,2111	3,03
0,015	2,25	0,016	2,61	5,61	1,1095	2,80
0,015	2,5	0,016	2,04	6,46	1,4440	2,61

Donde B es el ancho de cajón, n el número de Manning, V la velocidad del flujo y y_c el calado crítico de la sección.

Se observa que los calados normales alcanzados superan los 2.2 metros que se quieren imponer como altura. Con una anchura de 2.5 metros sí se podría cumplir este requisito pero la velocidad en régimen uniforme es demasiado alta.

- Se prueba con un cajón de tres celdas:

I	B (m)	n (s·m ^{-1/3})	y (m)	V (m/s)	Froude	y_c (m)
0.015	1.8	0.016	2.16	5.66	1.2294	2.48
0.015	2	0.016	1.90	5.78	1.3374	2.31
0.015	2.2	0.016	1.71	5.86	1.4313	2.17

Los resultados son más apropiados con tres celdas. Se escoge el ancho de 2 metros por ser el que más aprovecha la sección permitiendo un resguardo adecuado. Se pasa así, de una anchura de 9 metros a una de 6 metros, que corresponde con la anchura con la que cuentan las tres celdas de 2 metros del cajón.

- Tras los seis metros en los que tiene lugar el descenso de cota, se produce un estrechamiento hasta los 6 metros que le corresponden a las tres celdas de 2 metros de ancho. Se comprueba si hay energía para pasar este cambio de sección:

- Energía específica crítica de la sección de 6 metros:

$$y_{c2} = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{gB^2}} = \sqrt[3]{\frac{66^2}{9.81 \cdot 6^2}} = 2.31 \text{ m}$$

$$H_{oc2} = \frac{3}{2} \cdot y_c = \frac{3}{2} \cdot 2.31 = 3.47 \text{ m}$$

- Como la energía en la sección es superior a la crítica el flujo pasa el estrechamiento manteniendo su energía específica:

$$H_{02} = 5.2 \text{ m} > H_{oc2} = 3.47 \text{ m} \rightarrow \text{El flujo pasa el estrechamiento}$$

- Se calcula qué calado en régimen rápido le corresponde a una energía específica de 5.2 metros con anchura de 6 metros:

$$H_{02} = y + \frac{Q^2}{2gB^2y^2} \rightarrow 5.2 = y + \frac{66^2}{2 \cdot 9.81 \cdot 6^2 \cdot y^2} \rightarrow y_2 = 1.25 \text{ m}$$

Por tanto, se entra al cajón con un calado de 1.25 metros, lo que conlleva una velocidad de 8.8 m/s. Con este calado y una pendiente de $I=0.015$ se desarrolla una F1 que no consigue alcanzar el régimen uniforme hasta pasados al menos 200 metros. Esto supone que el flujo en todos estos metros circula a una celeridad superior a 6 m/s, hecho que se considera inadecuado.

Tras modificar numerosas veces la geometría del cajón y la pendiente, se observa que esta situación se repite en todas las alternativas analizadas. Se llega a la conclusión de que el problema reside en la gran energía que se adquiere tras la fuerte bajada de cota. En consecuencia, se busca una manera de frenar el agua tras el descenso para que vaya perdiendo energía. Se pasa a plantear así una segunda alternativa.

Diseño del cajón: Alternativa 2

El objetivo es decelerar el flujo con el fin de que disminuya la energía específica. Para ocasionar esta pérdida de energía se barajan dos opciones: provocar un resalto hidráulico a través de un umbral o aumentar la rugosidad de la solera.

Se opta por aumentar la rugosidad de la solera a través de escollera con el siguiente diseño:

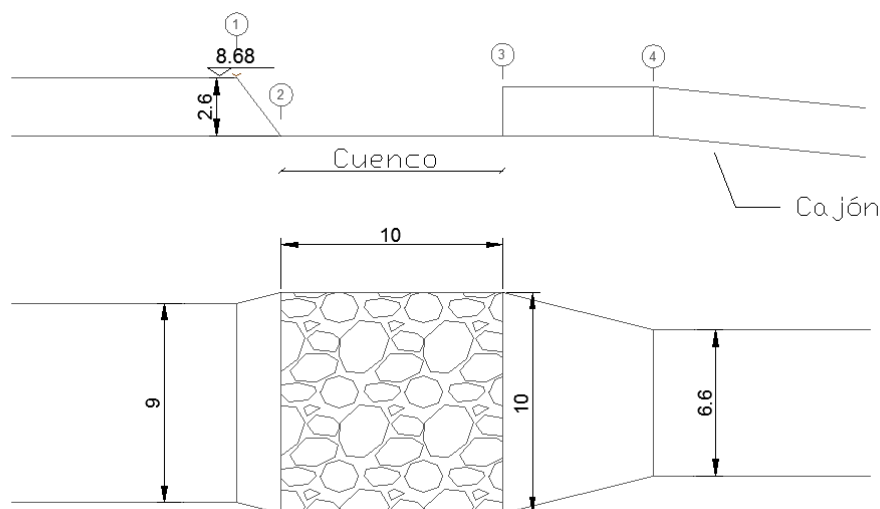


Fig. 12. Croquis alternativa 2

Se ejecuta una caída de 2.6 metros. Tras ella, para disipar la mayor energía posible, se ensancha la sección hasta 10 metros que es lo máximo permitido por la anchura del cauce si respetamos el paseo lateral existente. El ensanchamiento tiene lugar a lo largo de 2 metros siguiendo una relación 1:4. Posteriormente, se mantiene una pendiente de $I=0$ y se emplea escollera para aumentar el coeficiente de rugosidad. Se calcula el calado resultante en el perfil 2 del croquis tras la caída y el ensanchamiento, recordando que a la sección 1 se llega con un calado de 1.16 metros y una energía específica de 3.2 metros:

1. Energía tras la caída de 2.6 metros:

$$H_{02} = 3.2 + 2.6 = 5.8 \text{ m}$$

2. Un ensanchamiento en régimen rápido no supone ningún problema, ya que, siempre se tiene energía suficiente para superarlo. Así pues, se pasa a calcular el calado en régimen rápido que se obtiene con una energía de 5.8 metros.

$$H_{02} = y + \frac{Q^2}{2gB^2y^2} \rightarrow 5.8 = y + \frac{66^2}{2 \cdot 9.81 \cdot 9^2 \cdot y^2} \rightarrow y_2 = 0.66 \text{ m}$$

Resulta un calado menor a 1.64 metros que es calado crítico de una sección de 10 metros de ancho. En consecuencia, se desarrolla una H2 que va aumentando su calado hacia aguas abajo. Aplicando una escollera de número de Manning igual a $0.040 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$ a lo largo de 10 metros de longitud hace que la H2 alcance un calado de 0.89 en la sección 3.

3. Energía específica en la sección 3 y comprobación de que supera el estrechamiento:

$$H_{03} = y + \frac{Q^2}{2gB^2y^2} = 0.89 + \frac{66^2}{2 \cdot 9.81 \cdot 10^2 \cdot 0.89^2} = 3.7 \text{ m}$$

Energía específica crítica en la sección 4 con un ancho de 6.6 metros correspondientes a tres celdas de 2 metros con dos muros intermedios de 0.3 metros:

$$yc_4 = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{gB^2}} = \sqrt[3]{\frac{66^2}{9.81 \cdot 6.6^2}} = 2.17 \text{ m}$$

$$H_{0c4} = \frac{3}{2} \cdot yc = \frac{3}{2} \cdot 2.17 = 3.26 \text{ m}$$

Como $H_{03} = 3.7 > H_{0c4} = 3.26 \rightarrow$ El flujo pasa el estrechamiento

4. Calado en régimen rápido con $H_0 = 3.7$ metros y un ancho de 6.6 metros tras el estrechamiento:

$$H_{04} = y + \frac{Q^2}{2gB^2y^2} \rightarrow 3.7 = y + \frac{66^2}{2 \cdot 9.81 \cdot 6.6^2 \cdot y^2} \rightarrow y_4 = 1.66 \text{ m}$$

5. A continuación, tiene lugar la entrada al cajón que significa una nueva reducción del ancho a 6 metros. La energía específica crítica para este ancho ha sido calculada en la alternativa 1 resultando ser de $H_{0c}=3.47$ metros, valor menor a la energía poseída por el flujo ($H_0=3.7$). De manera que, el estrechamiento es sobrepasado y se calcula el nuevo calado obtenido:

$$H_{04} = y + \frac{Q^2}{2gB^2y^2} \rightarrow 3.7 = y + \frac{66^2}{2 \cdot 9.81 \cdot 6^2 \cdot y^2} \rightarrow y_4 = 1.8 \text{ m}$$

Este calado supone una velocidad de 6.11 m/s y una altura de velocidad de $H_v=1.9$ metros. Se considera que un 10% de dicha altura de velocidad se pierde en el estrechamiento y por el choque del agua con las rejas que evitan el paso de obstáculos. Así que, el calado que se obtiene es de:

$$H_{04} = 3.7 - 0.19 = 3.51 \text{ m}$$

$$H_{04} = y + \frac{Q^2}{2gB^2y^2} \rightarrow 3.51 = y + \frac{66^2}{2 \cdot 9.81 \cdot 6^2 \cdot y^2} \rightarrow y_4 = 2.07 \text{ m}$$

De esta manera se entra al cajón con una celeridad aceptable de 5.31 m/s que permite que hasta que se alcance el régimen uniforme se mantengan velocidades por debajo de 6m/s.

Parece que esta alternativa resuelve el problema, pero se plantea uno nuevo: se ha comentado que el régimen rápido en los ensanchamientos no supone ningún problema, pero no ocurre lo mismo en los estrechamientos. Éstos pueden perturbar las líneas de corriente y, además en este caso, hay que añadir la alteración que provocan las rejas, de manera que se puede originar a un flujo tridimensional. Sin embargo, el cálculo realizado está basado en un flujo unidimensional, así que, no se está representando de forma fiable el comportamiento de la lámina de agua y se corre el riesgo de que se originen problemas inesperados.

Para evitar que esa situación se produzca se plantea una nueva alternativa.

Diseño del cajón: Alternativa 3

El provocar una sección crítica es la mejor opción para reordenar el flujo. Esto es lo que se busca en la tercera alternativa para evitar ocasionar un flujo tridimensional.

La idea que propicia esta alternativa es alargar el tramo de elevada rugosidad para disminuyendo la energía del flujo, para que justo antes de la entrada en el cajón se origine una sección crítica que permita reorganizar las líneas de corriente.

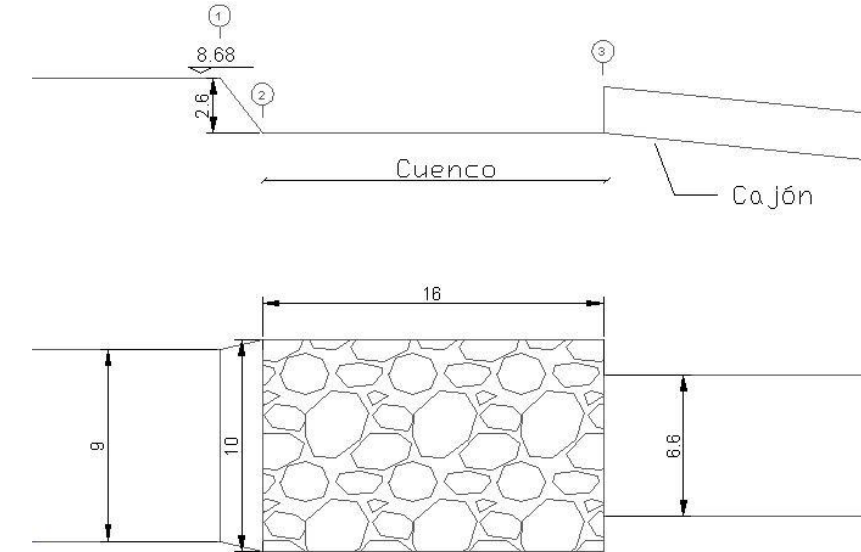


Fig. 13. Croquis alternativa 3

Además, se toma la decisión de ejecutar un estrechamiento brusco de 10 a 6 metros directamente. No importa que esa brusquedad genere perturbaciones, ya que, el resalto que se produce ya origina alteraciones en el flujo y éste al pasar por la sección crítica será reordenado.

Así pues, se calculan las curvas de remanso con los calados y energías específicas alcanzados con diferentes longitudes y un número de Manning de $0.035 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$. Se recuerda que se desarrolla una H_2 que parte de un calado de 0.66 metros. Los resultados obtenidos son:

$n \text{ (s} \cdot \text{m}^{-1/3})$	Longitud (m)	$y \text{ (m)}$	$H_0 \text{ (m)}$
0,035	20	1,025	3,14
0,035	17	0,97	3,33
0,035	16	0,95	3,41

La energía crítica correspondiente a una sección de 6 metros de ancho es de 3.47 metros, por lo que, una longitud de 16 metros se adecúa perfectamente.

Para conseguir un número de Maning de $0.035 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$ se requieren rocas de metros de diámetro 0.57 metros:

$$n = \frac{D^{1/6}}{26} \rightarrow 0.035 = \frac{D^{1/6}}{26} \rightarrow D = 0.57 \text{ m}$$

En el perfil 3 del croquis, donde se produce el cambio de sección, se provoca la sección crítica correspondiente a una anchura de 6 metros: con un calado crítico de 2.31 metros y una energía específica de 3.41 metros. Aguas arriba se tiene el calado en régimen lento asociado a una energía específica de 3.41 metros pero con 10 metros de anchura. Obteniéndose un calado de 3.26 metros.

$$H_{03} = y + \frac{Q^2}{2gB^2y^2} \rightarrow 3.41 = y + \frac{66^2}{2 \cdot 9.81 \cdot 10^2 \cdot y^2} \rightarrow y_3 = 3.26 \text{ m}$$

Este calado plantea un problema, ya que, se considera demasiado elevado y genera un resalto hidráulico fuerte. Por esta razón, se decide plantear una nueva alternativa que genere un calado menor.

Diseño del cajón: Alternativa 4

En este nuevo diseño se busca llegar a la sección en la que se modifica el ancho con una energía específica que permita un calado menor de 3.26 metros. Para ello, se busca que la sección crítica se origine en un ancho mayor que supone un calado crítico menor.

Para conseguir este objetivo se opta por suprimir el paseo lateral con el que cuenta el cauce. De esta manera, se consigue una anchura de 12 metros. Si se provoca la sección crítica en este ancho el calado crítico alcanzado es de 1.46 metros, un valor más pequeño que los 3.26 metros que antes se tenía y mucho más apropiado. Para evitar que la sección del cauce cambie varias veces de anchura, se decide retrasar el punto de inicio de la caída para ejecutarlo en el P.K. 0+747, es decir, a 230 metros aguas abajo del puente de la antigua nacional, donde la cota de terreno se encuentra a 9.69 metros. Se recuerda que en la alternativa anterior este punto se situaba a 288 metros de dicho puente. De este modo, se pasa directamente de los 10 metros de ancho que posee la calle en su tramo inicial a los 12 metros que se han comentado.

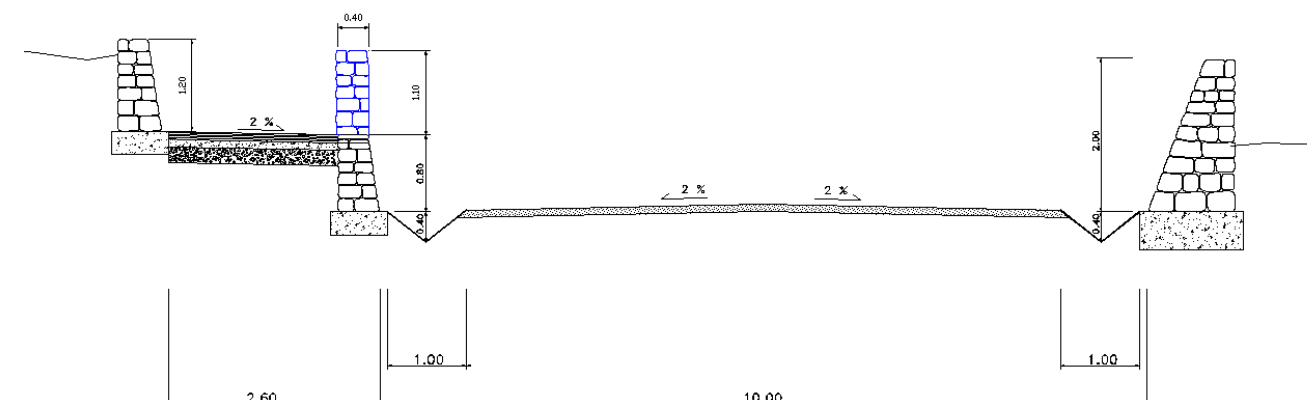


Fig. 14. Sección transversal en el P.K. 0+747 donde comienza la embocadura

Otra modificación planteada es que la caída a ejecutar para permitir el soterramiento del cajón, se realice en dos saltos, en lugar de en uno sólo como se había hecho en la alternativa anterior. El diseño sería el siguiente:

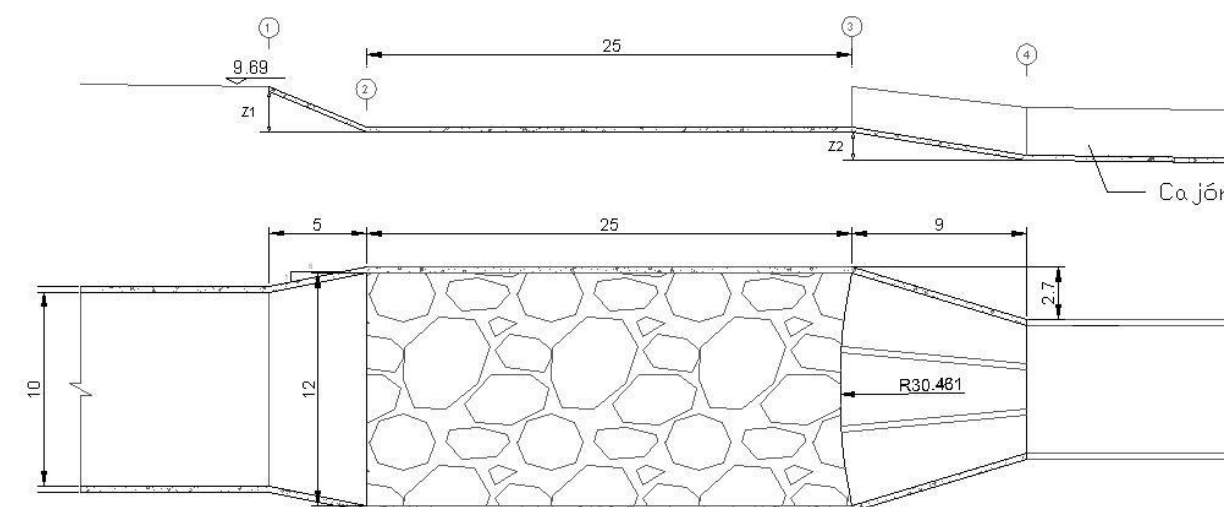


Fig. 15. Croquis alternativa 4

Se analizan los resultados obtenidos con unas longitudes de Z1=2.15m y Z2=1.35m y se procede a calcular la lámina de agua.

En el “Anejo 3. Cálculos hidráulicos” se justifica que la lámina de agua alcanza un calado de 1.08 metros en la sección 1 del croquis, es decir, en el P.K. 0+747. Así que, la energía específica acumulada en este momento es de 2.99 metros.

$$H_{01} = y + \frac{Q^2}{2gB^2y^2} = 1.08 + \frac{66^2}{2 \cdot 9.81 \cdot 10^2 \cdot 1.08^2} = 2.99 \text{ m}$$

Por tanto, el calado en la sección 2 es:

$$H_{02} = 2.99 + 2.15 = 5.14 \text{ m}$$

$$H_{02} = y + \frac{Q^2}{2gB^2y^2} \rightarrow 5.14 = y + \frac{66^2}{2 \cdot 9.81 \cdot 12^2 \cdot y^2} \rightarrow y = 0.58 \text{ m}$$

Se emplea una escollera que genera un coeficiente de rugosidad de $0.045 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$ a lo largo de 25 metros de longitud y con pendiente nula. Al calcular la curva de remanso a los 25 metros se obtiene un calado superior al calado crítico en el cuenco que es de 1.46 metros. Este resultado es incorrecto, puesto que, una única curva de remanso no puede sobrepasar el calado crítico. Este valor erróneo nos indica que en 25 metros la H2 que se desarrolla se queda sin energía. Por tanto, en la sección 3, en la cual se modifica la sección y la pendiente, se genera una sección crítica que provoca un resalto hidráulico en el cuenco disipador.

Para conseguir un número de Maning de $0.045 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$ se requieren rocas de diámetro 1.1 metros:

$$n = \frac{D^{1/6}}{26} \rightarrow 0.045 = \frac{D^{1/6}}{26} \rightarrow D = 1.1 \text{ m}$$

Para localizar el resalto se calculan los calados de la H3 cada cinco metros, así como, sus calados conjugados. Además, en la sección 3 tiene lugar el calado crítico y se desarrolla hacia aguas arriba una H2. Se calculan también sus calados cada 5 metros hacia aguas arriba.

1. El calado crítico en la sección del cuenco con un ancho de 12 metros es de 1.46 metros:

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{gB^2}} = \sqrt[3]{\frac{66^2}{9.81 \cdot 12^2}} = 1.46 \text{ m}$$

Para obtener los calados conjugados se emplea la fórmula de Bélanger:

$$y_2 = \frac{y_1}{2} \cdot \left[\sqrt{1 + 8 \cdot F_1^2} - 1 \right]$$

Donde y_2 es el calado conjugado en metros, y_1 el calado en la curva de remanso en metros y F_1 el número de Froude de éste último calado.

El perfil de la lámina libre que se obtiene en el siguiente:

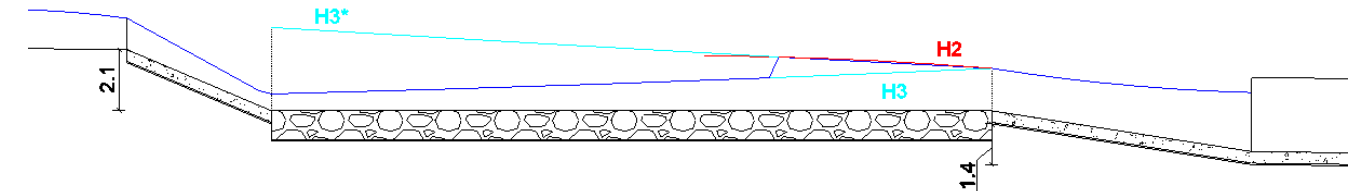


Fig. 16. Comportamiento de la lámina libre en azul oscuro donde se aprecia el resalto hidráulico

Se llega a la conclusión de que el resalto se origina a 16.36 metros del inicio del cuenco con $y_1=1.1$ metros. Esto supone un calado conjugado $y_2=1.8$ metros aproximadamente y un Froude de 1.52.

La tabla de recomendaciones del U.S Bureau of Reclamation (USBR) permite calcular una longitud aproximada del resalto. Basándose en ella, se obtiene una longitud de 7.2 metros.

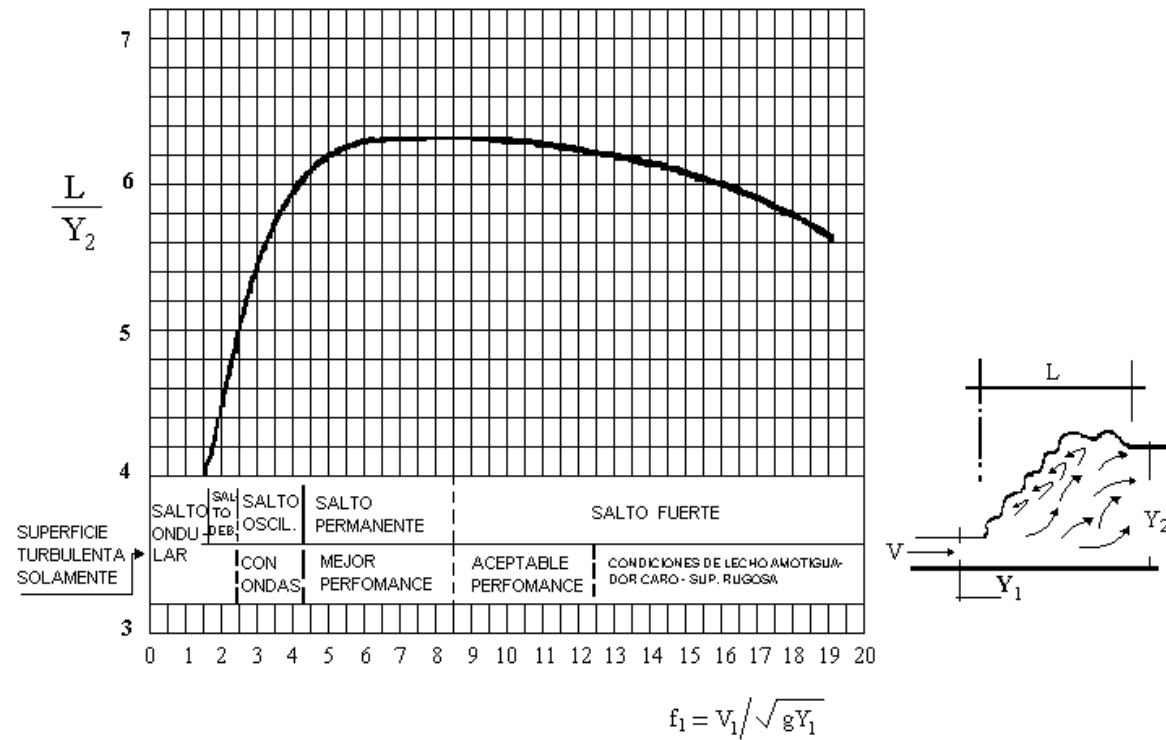


Fig. 17. Tabla de recomendaciones del USBR

2. Se calcula la longitud del resalto:

$$F_1 = 1.52$$

$$\frac{L}{y_2} = 4 \rightarrow L = y_2 \cdot 4 = 1.8 \cdot 4 = 7.2 \text{ m}$$

Por tanto, el resalto tiene lugar en el interior del cuenco.

3. Se continúa con los cálculos aguas abajo de la sección crítica, tras la caída de 1.35 metros:

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{gB^2}} = \sqrt[3]{\frac{66^2}{9.81 \cdot 12^2}} = 1.46 \text{ m}$$

$$H_{03} = H_{oc} = \frac{3}{2} \cdot y_c = \frac{3}{2} \cdot 1.46 = 2.18 \text{ m}$$

$$H_{04} = 2.18 + 1.35 = 3.53 \text{ m}$$

¿Es suficiente la energía adquirida en la sección 4 para pasar a la sección del cajón con un ancho de 6 metros?

$$y_{c \text{ cajón}} = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{gB^2}} = \sqrt[3]{\frac{66^2}{9.81 \cdot 6^2}} = 2.31 \text{ m}$$

$$H_{0c \text{ cajón}} = \frac{3}{2} \cdot y_c = \frac{3}{2} \cdot 2.31 = 3.47 \text{ m}$$

$$H_{04} = 3.53 \text{ m} > H_{0c \text{ cajón}} = 3.47 \text{ m} \rightarrow \text{Pasa el estrechamiento}$$

Cabe destacar que el estrechamiento se ejecuta con una relación 1:5 que permite un buen encauzamiento de la líneas de corriente y que las pérdidas por el cambio de sección sean mínimas. Además, previamente se pasa por la sección crítica que, como ya se ha comentado, las reorganiza y se produce en una corta longitud de 9 metros. Por ello, se considera que las pérdidas en el estrechamiento son mínimas y se puede trabajar con energías entre la sección 3 y 4.

El nuevo calado en régimen rápido asociado a una energía específica de 3.54 metros y un ancho de 6 metros es de 2.03 metros:

$$H_{04} = y + \frac{Q^2}{2gB^2y^2} \rightarrow 3.53 = y + \frac{66^2}{2 \cdot 9.81 \cdot 6^2 \cdot y^2} \rightarrow y = 2.03 \text{ m}$$

El cajón comienza a la cota 6.19 metros. La pendiente que mejor se ajusta al terreno existente y que nos permite llegar a la cámara de presurización con una altura adecuada es $I=0.013$. Con la fórmula de Manning se calcula su calado normal que resulta de 2.02 metros.

Q (m3/s)	I	B (m)	n Manning	y (m)	V (m/s)	F
66	0,013	2	0,016	2,02	5,45	1,225

La velocidad y el número de Froude también son aceptables.

Por tanto, la entrada al cajón se realiza con un calado casi idéntico al calado normal del cajón, lo que supone que se alcanza inmediatamente el régimen uniforme y garantizando que la velocidad es apropiada en todo el cajón.

Por último, se realiza un último cálculo respecto del diseño del cajón. La energía con la que pasa el flujo por la sección 4 es muy próxima a la crítica de la infraestructura. Aunque en un canal artificial como éste en el que se ha cuidado el diseño para que las pérdidas en el estrechamiento sean las mínimas, se calculan las pérdidas por fricción para tener unos cálculos más precisos.

Las pérdidas por fricción según Manning son:

$$If = \frac{v^2 \cdot n^2}{R_H^{4/3}} \cdot L$$

Siendo v la velocidad en la sección en m/s, n el número de Manning en $s \cdot m^{-1/3}$, R_H el radio hidráulico en m y L la longitud del tramo en m.

Así pues las pérdidas de energía por fricción son de 0.046 metros:

$$B_{medio} = \frac{3.8+2}{2} = 2.9 \text{ m} ; \quad Y_{medio} = \frac{1.46+2.03}{2} = 1.7 \text{ m}$$

$$v_{media} = \frac{22}{2.9 \cdot 1.7} = 4.4 \frac{\text{m}}{\text{s}} ; \quad R_{H_{medio}} = \frac{2.9 \cdot 1.7}{1.7 \cdot 2 + 2.9} = 0.78$$

$$If = \frac{v^2 \cdot n^2}{R_H^{4/3}} \cdot L = \frac{4.4^2 \cdot 0.016^2}{0.78^{4/3}} \cdot 9 = 0.046 \text{ m}$$

En consecuencia para quedarse del lado de seguridad se le quitan a la primera caída 5 centímetros que son ganados en la segunda. Así se compensan esas posibles pérdidas que se pueden producir por la fricción y se garantiza que el flujo pase al cajón sin problemas.

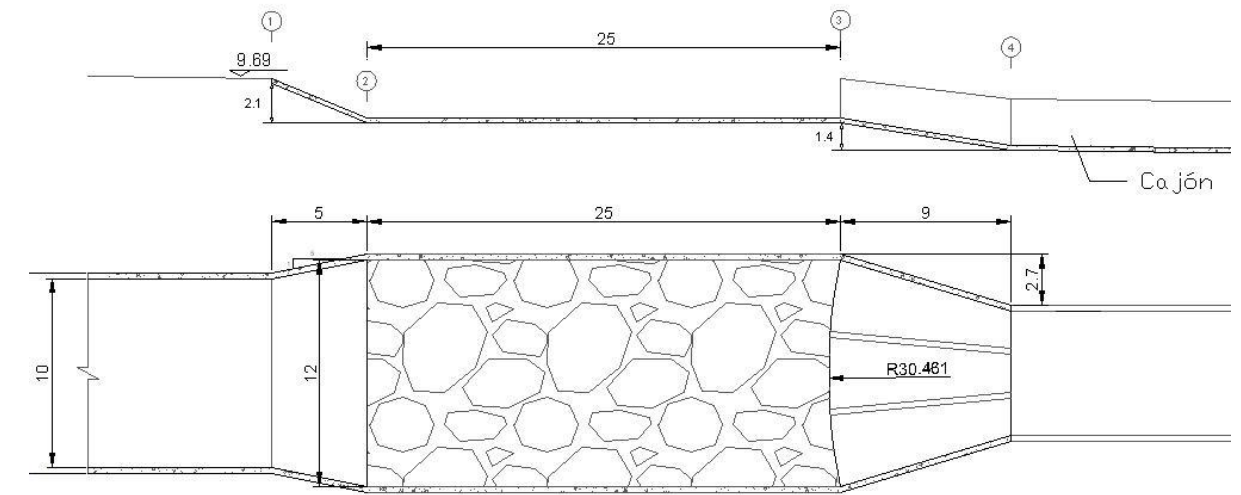


Fig. 18. Croquis final de la alternativa 4

Finalmente, se calcula que el cajón llegue con una cota suficiente como para que el resalto hidráulico se produzca dentro de la cámara y no en el cajón.

Esta estructura tiene una longitud aproximada de 430 metros y una pendiente $I=0.013$, de manera que, a la cámara se llega con una cota de 0.56 metros.

1. En el tramo final del cajón el flujo ya ha alcanzado el régimen uniforme, por lo que llega con un calado de 2.02 metros y una energía específica de:

$$H_o = y + \frac{Q^2}{2gB^2y^2} = 2.02 + \frac{66^2}{2 \cdot 9.81 \cdot 6^2 \cdot 2.02^2} = 3.53 \text{ m}$$

La energía total en la cámara es de 3.2 metros, así que, la cota mínima de solera es la diferencia entre ambas energías:

$$Cota \text{ mínima de solera} = 3.53 - 3.2 = +0.33 \text{ m}$$

Se cumple sobradamente con esta exigencia. Se calcula entonces el resalto que tiene lugar:

- De la cota +0.56 metros a -1.1 metros a la que se encuentra la solera de la cámara, se produce una caída de 1.66 metros, por lo que la energía en este punto es de:

$$H_o = 3.53 + 1.66 = 5.19 \text{ m}$$

Además, se lleva a cabo un ensanchamiento de 6.6 metros del cajón a 8.2 metros de la cámara a lo largo de cuatro metros, siguiendo una relación 1:5. Por tanto, el nuevo calado será de:

$$H_o = y + \frac{Q^2}{2gB^2y^2} \rightarrow 5.19 = y + \frac{66^2}{2 \cdot 9.81 \cdot 8.2^2 \cdot y^2} \rightarrow y = 0.85 \text{ m}$$

El conjugado de 0.85 metros es:

$$y^* = \frac{y}{2} \left(\sqrt{1 + 8F^2} - 1 \right) = \frac{0.85}{2} \left(\sqrt{1 + 8 \cdot 3.28^2} - 1 \right) = 3.54 \text{ m}$$

El calado impuesto en la cámara es de 4.09 metros, es decir, mayor que el calado conjugado resultante de 3.54 metros. Esto quiere decir que el resalto tendrá lugar durante la caída. Tal y como se explica en el libro *“Energy Dissipators (1995)”* de Daniel L. Vischer y Willi H. Hager para calcular la longitud en este tipo de resaltos que no se producen con pendiente nula se cuenta con la siguiente fórmula:

$$\frac{L_j}{L_j^*} = \exp\left(-\frac{4}{3} \cdot \theta\right)$$

Donde L_j es la longitud del resalto a media caída en metros, L_j^* es la longitud del resalto ordinario en metros y θ es el ángulo que forma la caída con la horizontal en radianes.

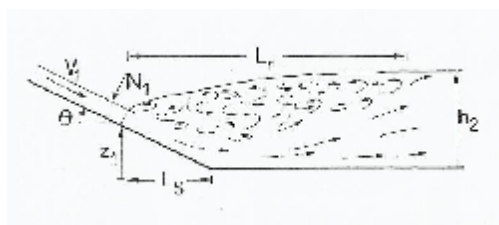


Fig. 19. Resalto hidráulico que se inicia en pendiente. FUENTE: *“Energy Dissipators (1995)”* de Daniel L. Vischer y Willi H. Hager

El resalto ordinario generaría un número de Froude de 3.28. Siguiendo la tabla de recomendaciones del USBR, el resalto tendría una longitud de 19.5 metros:

$$F_1 = 3.28$$

$$\frac{L}{y_2} = 5.5 \rightarrow L = y_2 \cdot 5.5 = 3.54 \cdot 5.5 = 19.5 \text{ m}$$

Por tanto, el resalto producido tendrá una longitud de:

$$\theta = \arctan\left(\frac{1.74}{4}\right) = 23.5^\circ = 0.41 \text{ rad}$$

$$\frac{L_j}{L_j^*} = \exp\left(-\frac{4}{3} \cdot \theta\right) \rightarrow \frac{L_j}{19.5} = \exp\left(-\frac{4}{3} \cdot 0.41\right) \rightarrow L_j = 11.3 \text{ m}$$

Esta cuarta alternativa constituye el diseño definitivo del cajón enterrado y, por tanto, se concluye el diseño del encauzamiento del Paseo Barranco la Cala.

4.2 Diseño del colector de la Av. Marina Baixa

Para proteger totalmente la zona urbana aguas abajo del barranco, además del encauzamiento realizado, se debe recoger el caudal que baja por la Av. Marina Baixa aguas arriba de la confluencia con dicho barranco.

El estudio hidrológico realizado por Laia Llin Esteller determina que para un período de retorno de 500 años, el caudal pico que discurre por esta calle sería de 7.4 m³/s. Permitir que este caudal discurra libremente por la vía causaría daños en viviendas y comercios. Para evitar esta situación, se decide instalar en la calzada de la Av. Marina Baixa unas rejillas que permitan que ese caudal caiga a un colector que transportará el flujo hasta la cámara de presurización. De esta manera, el caudal captado será vertido al mar mediante las tuberías junto con el caudal procedente del barranco.

El colector verterá el en la zona en la que se produce el resalto hidráulico dentro de la cámara de presurización, de manera que, las perturbaciones originadas por la caída del caudal tengan lugar junto con las del resalto.

El vertido no debe producirse muy cerca del inicio del resalto, ya que, en su inicio las oscilaciones existentes son muy fuertes y podrían remontar ondas hacia el interior del colector. Sin embargo, tampoco se debe realizar demasiado lejos para no perturbar el flujo que debe entrar en las tuberías. Teniendo en cuenta que la longitud del resalto es de 11.3 metros se decide que el cajón verterá a unos 6 metros de su inicio.

El principal condicionante en el diseño del colector, es que el agua del interior de la cámara no anegue la salida del colector. Para conseguir este objetivo, éste se debe colocar a una altura determinada: teniendo en cuenta en que el máximo nivel de agua impuesto en la cámara se encuentra a la cota +3 metros, se requiere que el calado normal del colector sea mayor que ese nivel.

Otro factor limitante es la cota existente en la calle la cual no se quiere modificar. La diferencia de cota entre el inicio y el final del colector es muy escasa, así que, el diseño queda muy condicionado. La cota donde se produce la toma de caudal en la Av. Marina Baixa es de 2,5 m.s.n.m.

El predimensionamiento se realiza, al igual que en el encauzamiento, basándose en un régimen uniforme y estacionario.

En un primer momento se planteó ejecutar un colector circular. Sin embargo, al realizar los cálculos se comprobó que los diámetros para desaguar el caudal debían ser muy grandes, de manera que, no podían ser albergados bajo tierra respetando las cotas de las calles existentes.

Así que, se opta por realizar un cajón rectangular. Tras el tanteo de diferentes alternativas se concluye que las dimensiones finales del colector sean 2.2x1.45 m² con una pendiente de $I = 0.0034$. Con estos valores el calado crítico es de 1.05 metros y, aplicando la ecuación de Manning, el calado normal es de 1.3 metros.

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{gB^2}} = \sqrt[3]{\frac{7.4^2}{9.81 \cdot 2.2^2}} = 1.46 \text{ m}$$

$$V = \frac{1}{n} \cdot R_H^{1/3} \cdot I^{1/2} \rightarrow y_o = 1.3 \text{ m}$$

Se coloca la clave del cajón 5 centímetros por debajo de la clave de la cámara. De manera que, el nivel máximo de cota alcanzable en la cámara, de cota +3 m.s.n.m., queda a 1.25 metros por encima de la solera del colector. Como este calado es menor que el calado normal, la curva de remanso que se desarrollaría hacia aguas arriba del cajón sería una S2. Esto garantiza que el cajón no entrará en presión y tendrá energía suficiente para que se produzca el vertido.

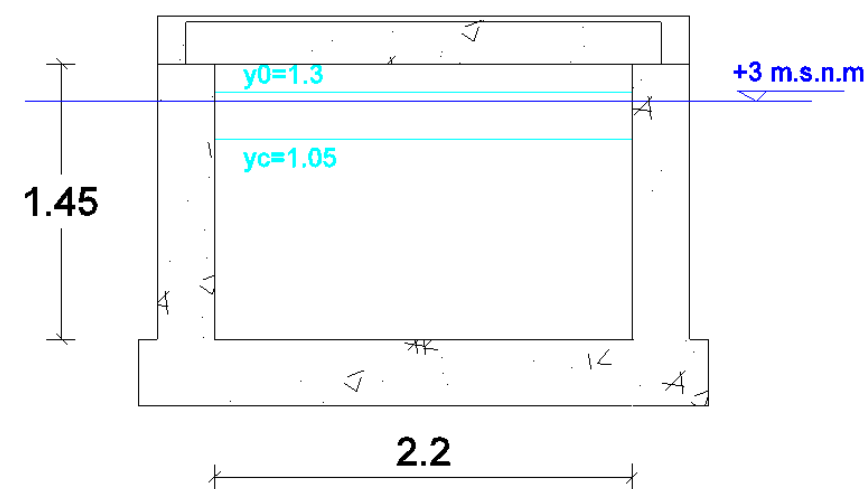


Fig. 20. Dimensiones del cajón con los calados crítico y normal respecto al nivel más desfavorable de agua en la cámara

Con estas dos actuaciones sobre el “Paseo Barranco la Cala” y la captación del caudal procedente de la Av. Marina Baixa se consigue el objetivo de evitar futuras inundaciones en el municipio de Finestrat.