

Modelo físico del aliviadero de la presa de Calanda

Roberto Carlos Martínez García

Ing. Téc. Obras Públicas; Técnico N22; CEH (CEDEX)

roberto.c.martinez@cedex.es

1 Introducción

La capacidad de desagüe del aliviadero actual de la Presa de Calanda se muestra claramente insuficiente para garantizar la seguridad de la presa frente a avenidas de periodos de retorno elevados.

El aliviadero actual es capaz de desaguar, únicamente, un tercio del caudal de la avenida de proyecto ($T=1000$ años $Q=3.481 \text{ m}^3/\text{s}$).

Para compensar esta diferencia se han proyectado 2 aliviaderos auxiliares tipo Morning Glory de 50 m de diámetro.

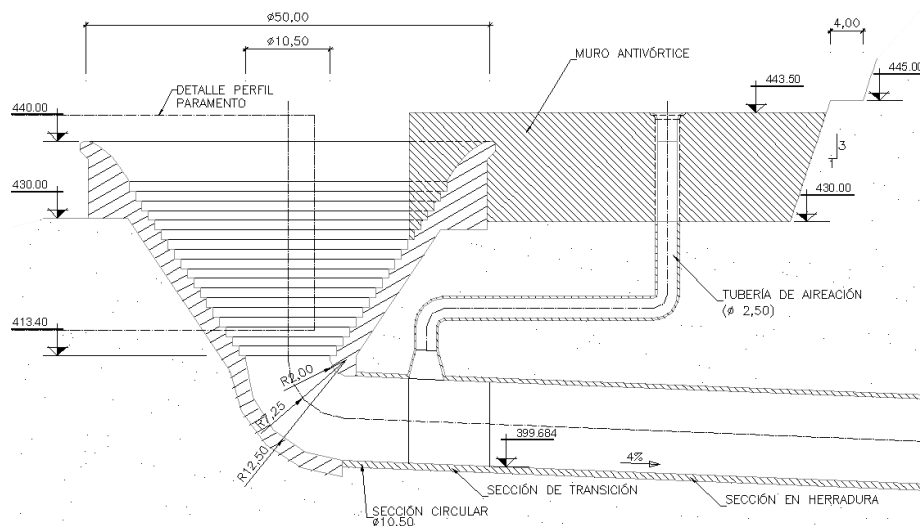


Figura 1 Sección transversal Nuevo aliviadero de Calanda

2 Descripción del proceso de diseño y construcción del modelo

2.1 Comparación con los modelos ensayados

Para el estudio en modelo reducido comenzamos, de acuerdo con los técnicos de la Confederación Hidrográfica del Ebro, por modificar la sección tipo inicialmente proyectada (figura 1) por otra que fuera semejante a la de los Morning Glory ensayados en el Centro de Estudios Hidrográficos, para intentar conseguir un funcionamiento similar, y por tanto, mas correcto desde los primeros ensayos.

En el Centro de Estudios Hidrográficos se han realizado 4 estudios en modelo reducido de aliviaderos en pozo o Morning Glory:

- Informe sobre los ensayos en modelo reducido del aliviadero de la Presa de Tirajana. 1972
- Informe sobre los ensayos en modelo reducido del aliviadero de la Presa de Taibilla. 1972
- Informe sobre los ensayos en modelo reducido del aliviadero y la salida de los desagües de fondo de la Presa de Barbate. 1978
- Estudio en modelo reducido de los desagües del embalse del recrecimiento de la Presa de Yesa. 1987

Para buscar el modelo que fuera más semejante al de Calanda comparamos la curva de capacidad de desagüe de cada uno de los modelos. Cada una de estas curvas, para la rama con la sección de control en la salida del túnel, debería responder a la ecuación de un desagüe bajo compuerta,

$$Q = K \cdot A \cdot \sqrt{h}$$

Donde:

K , es el coeficiente que engloba, tanto el coeficiente de desagüe, como la constante $\sqrt{2g}$.

A , es el área de la sección de salida del codo.

h , es la altura de la lámina de agua.

Para cada uno de los modelos ensayados obtendríamos una K que define la curva.

Si tomamos cada una de las K obtenidas y las aplicamos al modelo de Calanda, fijando el caudal de proyecto y una altura inferior al umbral de coronación obtendríamos el área necesaria en el modelo de Calanda para que se comportara según la curva de cada uno de los modelos ensayados. Comparando el área obtenida con la de cada uno de los modelos obtendríamos la razón de semejanza entre los modelos ensayados y el modelo de Calanda y podríamos comprobar cual encaja mejor, tanto por sección de salida como por la forma del codo.

Sin embargo, las ecuaciones que obtuvimos con Excel no respondían a un desagüe bajo compuerta ni se pudo extraer un valor de K que pudiera definir de forma aproximada las curvas y cumpliera la ecuación del desagüe bajo compuerta.

Al no obtener ningún resultado valido probamos a buscar la razón de semejanza de otra forma.

Teniendo en cuenta que para asegurar la semejanza hidráulica entre el prototipo y el modelo se considera invariable el nº de Froude, calculamos dicho número para cada uno de los modelos ensayados y el modelo de Calanda.

El nº de Froude se ha calculado para el caudal que pone en carga la sección de salida en cada uno de los modelos.

$$F = F' \Rightarrow \frac{Q}{S\sqrt{y}} = \frac{Q'}{S'\sqrt{y'}}$$

Tabla 1 Comparación del N° de Froude

Modelo	Calanda	Taibilla	Yesa	Tirajana	Barbate
Caudal (m3/s)	2.477	510	2360	450	100
Superficie(m2)	87,05	28,19	63	20,9	1,76
Calado (m)	7,80	4,64	3,92	4,63	1,5
N° de Froude	10,18	8,35	18,32	10	46

Comparando el nº de Froude de Calanda con los otros cuatro vemos que los dos que podrían encajar son Tirajana y Taibilla.

Si consideramos Calanda como el prototipo y Tirajana el modelo reducido, el factor de escala que relaciona ambos modelos, tomando como base el caudal es:

$$Q_{\text{Prototipo}} = \lambda^{5/2} \cdot Q_{\text{Modelo}}$$

Como,

$$Q_{\text{Prototipo}} = 2.477 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$Q_{\text{Modelo}} = 450 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Obtenemos $\lambda = 1,98$.

Aplicamos este factor de escala a la sección del codo del modelo de Tirajana para comprobar si se podía encajar en la geometría de Calanda. Con las dos secciones en Autocad se tantearon distintas curvas y rectas que permitieran pasar del aliviadero circular con perfil Creager a la sección de Tirajana sin embargo no fueron del todo satisfactorias y se descartó el modelo de Tirajana.

Siguiendo el mismo proceso obtuvimos el factor de semejanza de Taibilla. Este modelo, ya desde los primeros tanteos parecía que podría encajar. Se realizaron también algunos tanteos con el modelo de Barbate y Yesa pero rápidamente se descartaron.

Una vez comprobados todos los modelos nos decantamos por el modelo de Taibilla para utilizarlo de base para el diseño del nuevo Morning Glory de Calanda.

2.2 Encaje de la sección de Taibilla en el diseño de Calanda

Antes de buscar el ajuste entre la sección de Taibilla y la de Calanda realizamos dos comprobaciones. En primer lugar que el calado (P) fuera mayor o igual a dos veces la altura de agua (H) para la avenida extrema. Con el fin de garantizar la correcta entrada de agua a la embocadura.

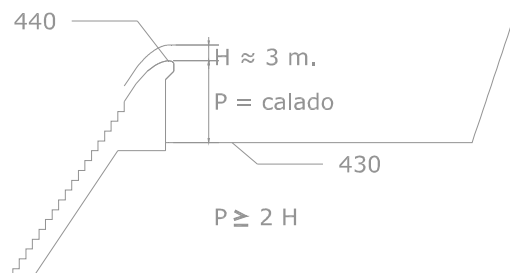


Figura 2 Esquema condiciones de aproximación

Y por otro lado que el perfil adoptado en proyecto era capaz de dirigir la lámina de agua al codo sin provocar despegues de la lámina y por lo tanto depresiones.

Para esto calculamos la cara inferior de la lámina vertiente para las siguientes curvas:

- Lámina inferior perfil Creager
- Lámina inferior según Small Dams para aliviaderos en pozo
 - Para Altura lámina vertiente (H_s) / radio del vertedero (R_s) = 0.3 y Calado (P) / radio del vertedero (R_s) = 0.3
 - Para Altura lámina vertiente (H_s) / radio del vertedero (R_s) = 0.1 y Calado (P) / radio del vertedero (R_s) = 2

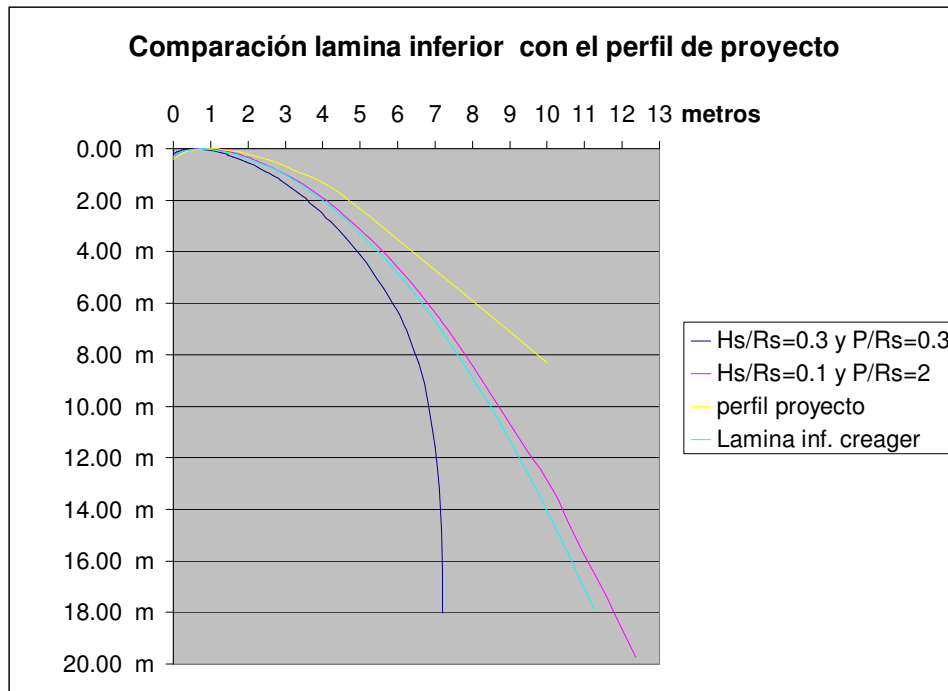


Figura 3 Comparación de la lamina vertiente con el perfil de proyecto

Como se puede observar en el gráfico anterior el perfil de proyecto envuelve a las otras curvas por tanto nuestra capacidad de vertido será menor pero nos aseguramos no tener depresiones por despegue de la lamina.

En los primeros pasos para encajar el codo de Taibilla en la sección de Calanda se intentó buscar un ajuste que tocara lo mínimo el diseño actual, para no modificar en exceso las excavaciones ni la ubicación del aliviadero.

Sin embargo este ajuste provocaba un cambio de dirección muy brusco en la clave del codo que podría dar lugar a que la lámina de agua se despegara de la pared provocando depresiones. Para ampliar esta curva desplazamos la sección de salida del codo de Taibilla hacia aguas abajo en el túnel proyectado. Así obtenemos una mayor curvatura consiguiendo unas transiciones más suaves y previsiblemente un mejor comportamiento del flujo.

Como se puede observar en la figura 4, al desplazar la sección de salida obtenemos una mayor curvatura (curvas de radio 5 m en las secciones roja y azul oscuro a curva de radio 15 m en la sección azul clara).

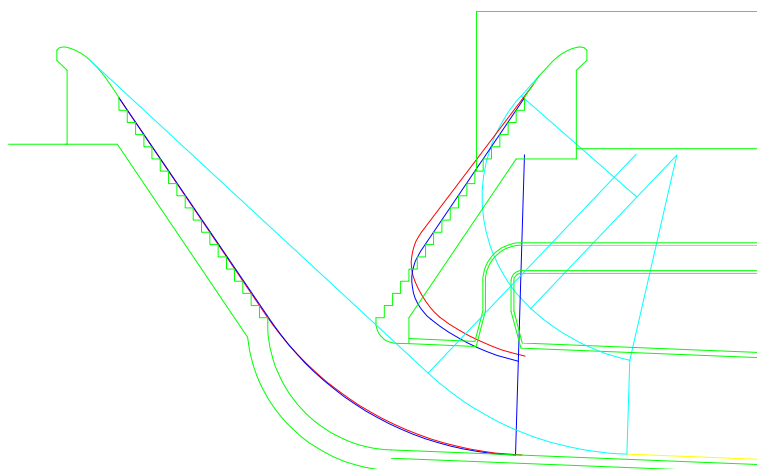


Figura 4 Secciones tanteadas

Una vez definida la sección comprobamos la capacidad de desagüe que tendría este codo, para diferentes coeficientes de desagüe, y verificar si los niveles alcanzados son aceptables.

Para ello se realizaron tres gráficos con distintos coeficientes de desagüe, para la situación de control en el codo. Los coeficientes utilizados fueron 0,58 mínimo teórico, 0.73 máximo de Taibilla y un valor intermedio de 0.65.

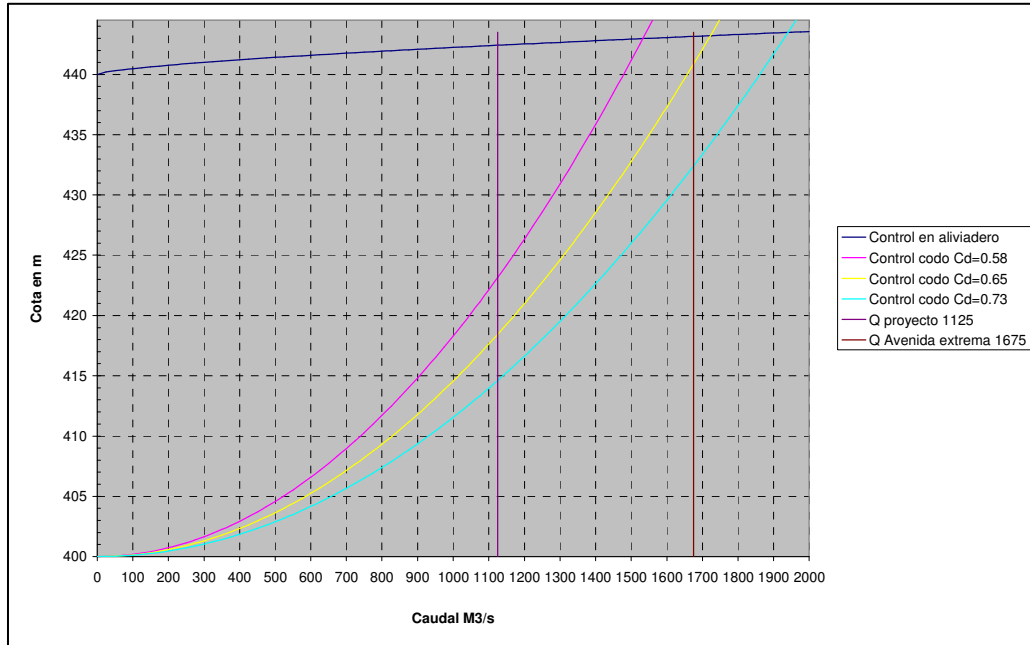


Figura 5 Comparación de la capacidad de desagüe para distintos coeficientes

Para un área de salida de 91 m^2 , y estos tres coeficientes de desagüe, se puede comprobar que el caudal de proyecto es desaguado teniendo la sección de control en el aliviadero.

Para el caudal de la avenida extrema la sección de control seguiría estando en el aliviadero para las curvas con coeficiente de desagüe de 0.65 y 0.73, sin embargo para 0.58, mínimo teórico el control estaría en el codo y se superaría la cota de coronación de la presa.

Teniendo en cuenta que 0.58 es el mínimo teórico y que en un principio el funcionamiento será mejor consideramos que el funcionamiento estará más cerca del coeficiente de 0.65 y por tanto la sección de salida de 91 m^2 será suficiente para desaguar todos los caudales teniendo siempre la sección de control en el aliviadero.

2.3 Generación del sólido 3D en Autocad y obtención de plantillas

Para poder ver la forma que tendría el codo y poder comenzar con la construcción de éste es necesario obtener el sólido en 3d en Autocad. De este sólido obtendremos las secciones transversales necesarias para elaborar las plantillas de chapa con las que se construirán los moldes para realizar el codo en PVC transparente.

Para generar el sólido partimos de la sección transversal del codo definida anteriormente. Estas dos líneas, que definen la sección, junto con la sección circular de la embocadura y la sección de salida, definida según el modelo de Taibilla, nos permiten generar superficies o sólidos para observar la forma del codo y poder modificarlo antes de construir.

En primer lugar generamos una superficie reglada que se apoyara en las cuatro curvas definidas anteriormente. La superficie resultante tenía unos abultamientos laterales que no eran nada favorables al flujo ya que provocaban un estrechamiento que podría hacer que se despegara la lamina de agua de las paredes del codo. Para eliminar esto se introdujo una sección intermedia.

Para determinar la forma y posición de la sección intermedia volvimos a tomar como referencia el modelo de Taibilla. Este parte de una sección circular que se mantiene hasta la mitad del codo donde se va modificando progresivamente hasta la sección de salida. Por tanto nuestra sección intermedia, para mantener la semejanza con Taibilla debería ser una sección circular. El diámetro de la nueva sección intermedia viene determinado por la posición de la nueva sección, ya que tiene que encajar en la sección transversal.

La posición de la sección intermedia se colocó en el punto de tangencia entre la recta que viene del aliviadero con la curva inferior del codo. De esta manera desde esta sección hasta el final del codo se reproduce la parte inferior del codo de Taibilla que estamos utilizando como base.

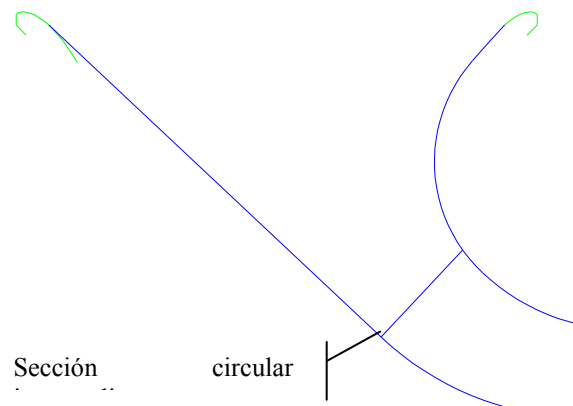


Figura 6 Posición de la sección intermedia

Con esta sección intermedia, la circular de entrada y la de salida del codo generamos en Autocad el sólido en 3D. De este sólido se obtuvieron 20 secciones, 7 paralelas a la sección de entrada, 6 perpendiculares a la curva inferior del codo y 7 perpendiculares a la curva que define la clave del codo (figura 7).

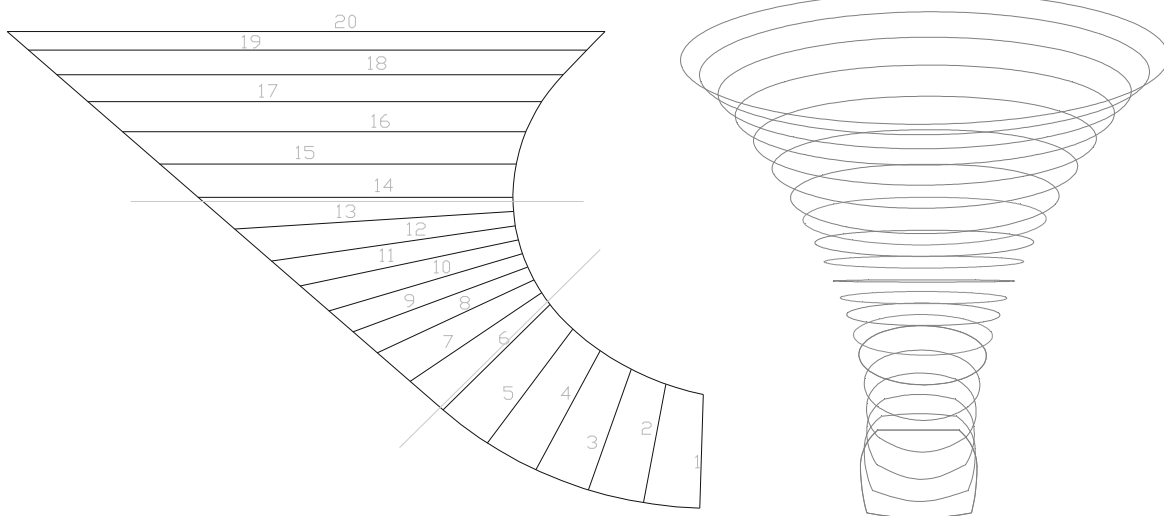


Figura 7 Secciones para la realización de las plantillas

En este sólido se han eliminado los abultamientos laterales, sin embargo el programa generó un estrechamiento en la parte central del tramo final del codo, en la plantilla 3 (figura 7). Esto no se detectó en las secciones generadas por Autocad sino en taller cuando se estaba colocando las chapas para construir el molde. Conviene, por tanto, cuando se trabaja con Autocad, comprobar que todas las secciones generadas sean menores que la situada inmediatamente aguas arriba y sobre todo definir el mayor número posible de secciones intermedias de forma que el resultado final se ajuste en mayor medida a la idea original. Para corregir el error desplazamos la sección 4 y cambiamos las secciones 1, 2 y 3 para que, el tramo comprendido entre la sección 4 y la salida del codo (sección 1), fueran exactamente iguales a las de Taibilla.

2.4 Secciones en chapa y fabricación del molde

Para poder construir el codo en plástico es necesario previamente realizar molde y contramolde de mortero de cemento. Para que las dimensiones de estos moldes, y de la lámina de plástico a colocar entre ellos, fueran manejables se decidió dividir el codo en cuatro partes. Primero por la mitad siguiendo la sección transversal del codo, que es el plano de simetría, y después por la sección 14. De esta forma las dimensiones de los moldes aunque grandes, eran suficientemente manejables. Además la lámina de plástico necesaria tendría un tamaño adecuado para su utilización ya que cuando sale del horno a 185° es muy blando y difícil de manejar.

Para poder realizar los moldes y contramoldes se realizaron un total de 92 plantillas, estas plantillas se obtuvieron del sólido generado en Autocad

Las plantillas de moldes y contramoldes, obtenidas anteriormente en papel, se calcan en chapas de aluminio de 1 mm y se recortan, en el taller mecánico, utilizando una sierra de cinta, después se repasan con la lima hasta que quedan exactamente iguales que la plantilla de papel.

Una vez fabricadas las plantillas se coloca la plantilla guía en una mesa horizontal y se le fijan en su posición cada una de las plantillas transversales. Una vez armado se rellena con mortero y después con cemento blanco repasando con una chapa entre plantillas, para eliminar el exceso de cemento y conseguir la forma correcta.



Figura 8 Plantillas montadas

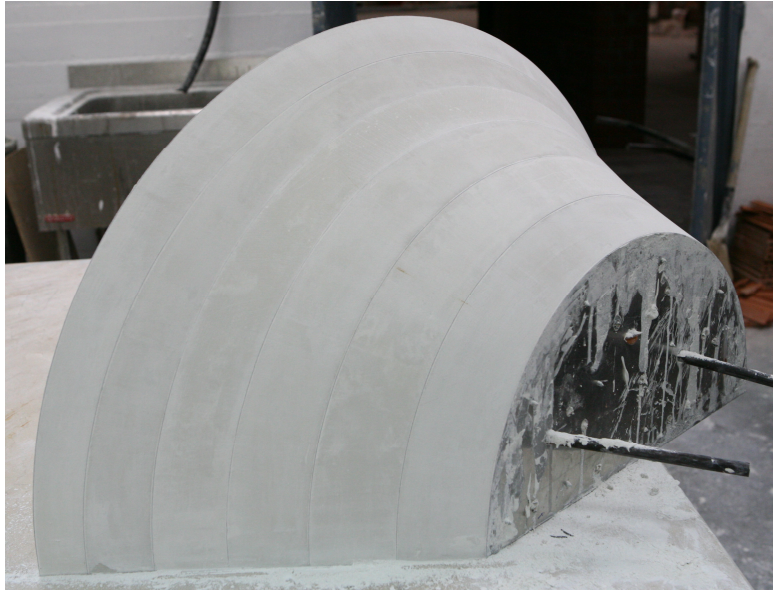


Figura 9 Aspecto final de uno de los moldes

2.5 Ejecución del codo en PVC

Se coloca el molde sobre una mesa de trabajo y se saca una plantilla del interior del codo para cortar la plancha de PVC. Esta plancha se mete en el horno y se calienta a 185° , se saca y se coloca sobre el molde y con la ayuda de una grúa se coloca el contramolde, unas guías metálicas colocadas previamente hacen que las piezas encajen en su posición. Una vez frías las piezas se recortan el exceso de plástico y se sueldan completando así el codo.



Figura 10 Aspecto final codo soldado en taller

Finalizado el montaje en taller realizamos una prueba de estanqueidad, con el fin de detectar y reparar las posibles fugas existentes antes de colocarlo en su posición definitiva.



Figura 11 Prueba de estanqueidad

En las siguientes fotografías se puede observar el aspecto final del aliviadero situado en el modelo visto tanto desde la parte superior del mismo, perfil Creager de la embocadura del Morning Glory; como desde la parte inferior donde se pueden ver el codo y la salida al túnel de descarga.

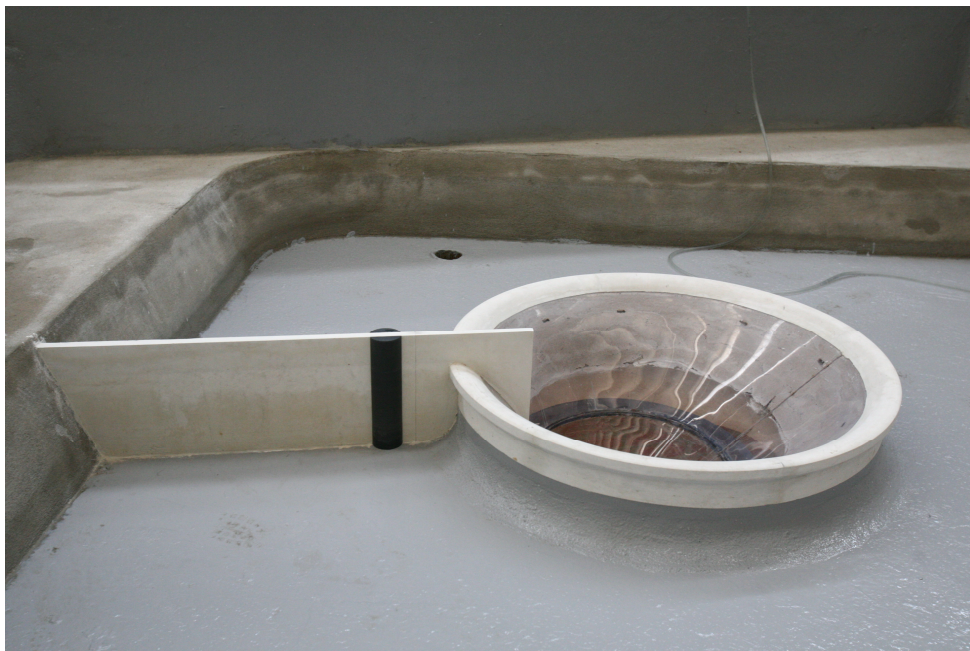


Figura 12 Vista superior perfil Creager de embocadura y pila antivórtice



Figura 13 Vista inferior codo de salida y túnel de descarga