

# **ANEJO 3. TIPOLOGÍA Y GRADO DE ESQUEMATIZACIÓN DEL MODELO REDUCIDO**



## **ÍNDICE DE CONTENIDOS**

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>2. CRITERIOS BÁSICOS DE SEMEJANZA .....</b>	<b>1</b>
<b>3. CONDICIONES ESPECÍFICAS .....</b>	<b>2</b>
3.1. Fluido de ensayo .....	2
3.2. Límite de espacio disponible en el Laboratorio .....	3
3.3. Capacidad máxima de suministro de caudales al modelo.....	4
3.4. Tolerancia máxima permitida en las dimensiones geométricas del modelo, incluyendo los calados .....	4
3.5. Mantenimiento del régimen de flujo turbulento rugoso.....	5
3.6. Condición límite rugosidad relativa.....	7
3.7. Condición límite de elección de materiales de construcción del modelo, por semejanza de rugosidades .....	7
<b>4. CONCLUSIÓN .....</b>	<b>8</b>



## 1. INTRODUCCIÓN

Las características de los fenómenos de flujo que se pretende investigar, no solo dependen de los contornos y conductos que impone la estructura de la presa, sino también de las características y condiciones de contorno que impone el terreno circundante, tanto aguas arriba como aguas abajo de la ubicación del azud.

Por lo que respecta a la influencia de aguas arriba, a pesar de que no hay ningún otro cauce cuya entrada se produzca cerca del azud –lo que se traduciría en una simple reproducción de los niveles en el vaso–, se debe reproducir gran parte de la geomorfología del vaso del embalse por ser el tramo de aproximación curvo y por tanto también las líneas de corriente, tal y como se justifica en el apartado **2. Delimitación de la extensión del modelo** del **Anejo 4. Construcción del modelo físico reducido**, al seleccionar el área a reproducir en el modelo.

De este modo, se conseguirá en las secciones de entrada al modelo una distribución de velocidades semejante a la que se presenta en el prototipo.

Por lo que a la influencia del cauce de reintegro de caudales vertientes se refiere, deberá reproducirse la longitud suficiente para estudiar los efectos de disipación de energía (resalto hidráulico o lanzamiento) y modelo de erosión-sedimentación a pie de presa, en su caso. Todo ello, exigirá una sección de control no influenciada por dichos efectos, pero que a su vez, imponga los niveles líquidos correspondientes a la circulación por dicho cauce de los caudales punta de las avenidas a estudiar.

## 2. CRITERIOS BÁSICOS DE SEMEJANZA

La modelación física de los fenómenos de flujo a través de estructuras y de reinserción a cauces naturales de contorno móvil, envuelven componentes de la velocidad significativas en las tres direcciones principales, por lo que resulta obligada la reproducción del prototipo mediante un modelo a escala geométrica no distorsionada.

Como además el flujo está dominado por los efectos gravitacionales, la relación adimensional entre las fuerzas inerciales y gravitacionales (criterio de Froude), deberá ser la misma en modelo y prototipo, es decir:

$$\lambda_F = \frac{F_{\text{modelo}}}{F_{\text{prototipo}}} = 1$$

donde  $F_{\text{modelo}}$  y  $F_{\text{prototipo}}$  son respectivamente los números de Froude semejantes en modelo y prototipo.

Esta relación conduce a:

$$\left( \frac{v^2}{g \cdot y} \right)_m = \left( \frac{v^2}{g \cdot y} \right)_p ; \lambda_v^2 = \lambda_y$$

Donde  $\lambda_v$  es el factor de escala de velocidades y  $\lambda_y$  el de calados.

La no distorsión de las magnitudes geométricas implica que todas las relaciones de escala entre cualesquiera variables longitudinales sean idénticas. Así, deberá cumplirse:

$$\lambda_y = \lambda_b = \lambda_L = \lambda_{R_H} = \lambda_Z = \lambda_K = \lambda$$

Donde:

$y$  es el calado,

$b$  es el ancho (de la presa, del cauce,...),

$L$  es la longitud,

$R_H$  es el radio hidráulico,

$Z$  es la cota geométrica,

$K$  es la rugosidad absoluta de las superficies.

$\lambda$  es la escala geométrica del modelo físico reducido.

De acuerdo con las expresiones anteriores, la relación de caudales máximos entre modelo y prototipo será:

$$\lambda_Q = \lambda_v \cdot \lambda_s = \lambda^{1/2} \cdot \lambda^2 = \lambda^{5/2}$$

Estos son los criterios básicos de semejanza, a los que hay que añadir las condiciones límites físicas, técnicas y económicas de aplicación de aquellos, que se referencian a continuación.

### **3. CONDICIONES ESPECÍFICAS**

#### **3.1. Fluido de ensayo**

Debido a razones evidentes tanto técnicas como económicas, los modelos físicos convencionales operan con el mismo fluido que el prototipo (agua). Además, ambos están en el mismo campo gravitatorio (terrestre). Ello significa que la reproducción de la

turbulencia en un modelo reducido froudiano geoméricamente similar, es imposible en principio.

Efectivamente, de la utilización del mismo fluido en el mismo campo gravitatorio se tiene:

$$\lambda_\rho = \lambda_\nu = \lambda_g = 1$$

Donde:

$\rho$  es la densidad,

$\nu$  es la viscosidad cinemática,

$g$  es la aceleración de la gravedad.

La aplicación de estos condicionantes conjuntamente con:

$$\lambda_F = 1$$

impone que en el modelo, los valores de cualquier número de Reynolds referido al flujo en lámina libre que aquí se investiga, serán más pequeños que los del prototipo, es decir:

$$\lambda_{R_e} < 1$$

Sin embargo, los fenómenos que se pretenden estudiar, tales como el tamaño de los remolinos macroturbulentos, la localización de la separación del flujo y su posterior readaptación, la distancia media del choque del chorro sumergido contra el lecho erosionable... y, en general, cualquier característica lineal L asociada con la estructura interna a gran escala del flujo, está relacionada con la dimensión del flujo externa (calado) por una constante de proporcionalidad, y por tanto, independientemente del valor del número de Reynolds.

En resumen, que la reproducción de los fenómenos mencionados es adecuada en un modelo froudiano no distorsionado y “no demasiado pequeño” (que mantenga la escala de turbulencia).

### **3.2. Límite de espacio disponible en el Laboratorio**

El modelo ha de ubicarse en la zona exterior del Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia.

Así pues, debido al espacio disponible en dicha zona, no parece que vaya a ser éste un condicionante en cuanto a la limitación de la escala geométrica, ya que, la mayor dimensión interior del polígono que deja inscrita la superficie a modelar es de unos 750

m, sería suficiente con disponer de 15 m para que con un factor de escala 1/50 encajase todo el modelo, hecho éste que se cumple sobradamente. No obstante, y sabiendo que se dispone de una zona con unos 20 m de anchura, la escala máxima sería:

$$\lambda_{MAX} = \frac{\text{Ancho\_de\_zona\_disponible}}{\text{Ancho\_mayor\_del\_prototipo}} = \frac{20}{750} = \frac{1}{37,5}$$

$$\lambda_1 \leq 1/37,5$$

### 3.3. Capacidad máxima de suministro de caudales al modelo

El circuito hidráulico cerrado del Laboratorio está abastecido por una electrobomba centrífuga con capacidad máxima de 150 l/s y que, calculadas las pérdidas de carga en codos, válvula compuerta y tubería, se restringe a 140 l/s en cabecera de modelo.

A la bomba anterior, se le puede sumar otra más pequeña para el refinamiento de caudales, con una capacidad máxima útil en cabecera de modelo de unos 3,5 l/s, así como el caudal suministrado por la red de abastecimiento, cifrado en unos 4,5 l/s. Es decir:

$$Q_m = 140 + 3,5 + 4,5 = 148 \text{ l/s} = 0,148 \text{ m}^3/\text{s}$$

Por tanto, para un caudal máximo en el prototipo de 1448 m<sup>3</sup>/s, correspondiente al caudal punta de la Avenida Extrema, resulta:

$$\lambda_Q = \frac{Q_m}{Q_p} = \frac{0,148}{1448} = \lambda^{5/2}$$

$$\lambda = \left( \frac{0,148}{1448} \right)^{2/5} = \frac{1}{39,46}$$

$$\lambda_2 \leq \frac{1}{39,46}$$

### 3.4. Tolerancia máxima permitida en las dimensiones geométricas del modelo, incluyendo los calados

Los aparatos de medida utilizados tienen una tolerancia de  $\pm 0,1$  mm. Si consideramos válido este error en cualquier dimensión geométrica, debe suponer como máximo, un 1% del valor de esa dimensión. Ello va a repercutir fundamentalmente en los calados, y por tanto, el calado mínimo a considerar será tal que:

$$0,01 \cdot (y_{\min})_m = 0,0001 m$$

$$(y_{\min})_m = \frac{0,0001}{0,01} = 0,01 m$$

Si tomamos como límite inferior de calados a comprobar el mínimo de la curva de remanso en régimen rápido a lo largo del cuerpo del aliviadero:

$$y_{\min}(T = 500 \text{ años}) \approx 0,77 m (\text{perpendicular a la solera})$$

Correspondiente al caudal máximo de la avenida de 500 años de periodo de retorno, tendremos:

$$y_{\min} = 0,77 \cdot 1,662 = 1,280 m (\text{en sentido vertical})$$

$$\lambda = \frac{(y_{\min})_m}{(y_{\min})_p} = \frac{0,01}{1,280} = \frac{1}{128}$$

$$\lambda_3 \geq \frac{1}{128}$$

### 3.5. Mantenimiento del régimen de flujo turbulento rugoso

Ya hemos comentado en A) que la turbulencia está asociada con el número de Reynolds del flujo, cuyo valor viene dado por la expresión:

$$R_e = \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\mu}$$

Por tanto:

$$\frac{(R_e)_m}{(R_e)_p} = \left( \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\mu} \right)_m \bigg/ \left( \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\mu} \right)_p$$

Y como  $\rho_m = \rho_p$ ;  $\mu_m = \mu_p$  resulta:

$$(R_e)_m = \lambda_v \cdot \lambda_L \cdot (R_e)_p$$

$$(R_e)_m = \lambda_L^{3/2} \cdot (R_e)_p < (R_e)_p$$

El caudal en el modelo debe ser tal que el coeficiente de fricción sea independiente de  $R_e$ , y ello ocurre cuando  $(R_e)_m$  es mayor que el que comienza a caracterizar la región donde la resistencia es proporcional al cuadrado de la velocidad, es decir:

$$(R_e)_m \geq (R_e)_{v^2}$$

Para el prototipo (presa a escala real), esta condición se cumplirá siempre. Para el modelo debe, por tanto, cumplirse.

Ello se conseguirá para las escalas que queden comprendidas en el criterio de Russell y Chow, para el caso de flujo en lámina libre:

$$\lambda > \left[ \frac{1000}{\left( \frac{V \cdot R_H}{\nu} \right)} \right]^{2/3}$$

En el caso más desfavorable de los caudales a ensayar (correspondiente al caudal laminado para T=500 años) tendremos (para el prototipo):

$$Q_p = 672,76 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$y_{cauce} = 4,73 \text{ m}$$

$$V_{cauce} = Q / S = 672,76 / 318,25 = 2,11 \text{ m/s}$$

$$R_H (cauce) = \frac{S}{P_m} = 3,84 \text{ m}$$

$$\nu (agua) = 2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$\lambda > \left[ \frac{1000}{\left( \frac{2,11 \cdot 3,84}{2 \cdot 10^{-6}} \right)} \right]^{2/3} ; \lambda > \frac{1}{254,13}$$

Si recopilamos, obtenemos como intervalo más estricto:

$$\frac{1}{254,13} \leq \frac{1}{128} \leq \lambda \leq \frac{1}{39,46} \leq \frac{1}{37,5}$$

$$\frac{1}{128} \leq \lambda \leq \frac{1}{39,46}$$

En base a este intervalo, se elegirá la mayor escala posible del intervalo. Redondeando:

$$\lambda = 1/50$$

Para sancionar definitivamente esta escala como válida, hemos de realizar dos nuevas comprobaciones.

### 3.6. Condición límite rugosidad relativa

Esta condición establece que la rugosidad relativa en el modelo debe ser lo suficientemente pequeña para no perturbar el tipo de flujo. De acuerdo con la experiencia, dicho límite es:

$$\left( \frac{R_H}{K} \right)_m \geq 5$$

O bien,

$$K_m \leq \frac{(R_H)_m}{5} = \frac{(R_H)_p \cdot \lambda}{5}$$

Para  $\lambda = 1/50$ , queda –para el caso más desfavorable correspondiente a la sección del cuerpo del aliviadero en la que el régimen rápido vertiente se sumerge en la zona turbulenta al pie del mismo– y para el  $Q_p = 222,37 \text{ m}^3/\text{s}$  (el laminado por un vano del aliviadero superficial A1 en la avenida de 500 años de periodo de retorno):

$$(R_H)_p = \frac{S}{P_m} \cong \frac{0,44 \cdot 25}{25 + 2 \cdot 0,44} = 0,425 \text{ m}$$

$$K_m \leq \frac{(R_H)_p \cdot \lambda}{5} = \frac{0,425 \cdot 1}{5 \cdot 50} = 0,0017 \text{ m}$$

### 3.7. Condición límite de elección de materiales de construcción del modelo, por semejanza de rugosidades

Si utilizamos las expresiones más habituales al efecto:

$$\text{Manning: } I_f = \frac{\overline{v^2} \cdot n^2}{R_H^{4/3}}$$

$$\text{Strickler: } n = 0,04117 \cdot K_s^{1/6}$$

Resulta, introduciendo los factores de escala:

$$\lambda_{I_f} = \frac{\lambda_v^2 \cdot \lambda_n^2}{\lambda_{R_H}^{4/3}}$$

$$\lambda_n = \lambda_{K_S}^{1/6}$$

Operando con la ayuda de las relaciones de escala obtenidas anteriormente:

$$\lambda_n = \lambda_{K_S}^{1/6} = \lambda_{R_H}^{1/6} = \lambda^{1/6}$$

Si analizamos las distintas situaciones de flujo correspondientes a los caudales de diseño para las hipótesis de periodo de retorno que se contemplan en el proyecto, a lo largo de las secciones más representativas del aliviadero, con la ayuda del diagrama modificado de Stanton y sabiendo que nos encontramos en la zona del régimen turbulento rugoso, obtenemos como coeficiente de resistencia por fricción de Manning representativo del prototipo, el de  $n_p=0,017$ , con lo que:

$$n_m = n_p \cdot \lambda^{1/6} = 0,017 \cdot \left(\frac{1}{50}\right)^{1/6} = 0,00886(\text{ud.MKS})$$

Valor que corresponde a una superficie muy pulida.

Para conseguir tan escasa rugosidad, se ha recurrido a la utilización de dos tipos de acabados superficiales de la estructura del modelo:

- Planchas de dimensiones variables de metacrilato de metilo.
- Construcción en mortero de cemento con árido fino, que posteriormente se pule con lija y se pinta con pintura plástica (del orden de 2 a 3 pasadas).

## 4. CONCLUSIÓN

Todo ello nos permite concluir que la escala geométrica no distorsionada  $\lambda=1/50$  es perfectamente válida para el estudio de los problemas hidráulicos planteados mediante modelación física y sin esperar efectos de escala significantes.