

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
LABORATORIO NACIONAL DE HIDRÁULICA

CICLO DE CONFERENCIAS

**INVESTIGACIÓN EN MODELOS FÍSICOS
Y MATEMÁTICOS DE OBRAS HIDRÁULICAS**

FEBRERO 2003

**LOS MODELOS COMO HERRAMIENTA
VALIOSA PARA EL DISEÑO HIDRÁULICO**

Dr.- Ing. Arturo Rocha Felices

Consultor. Profesor Emérito de la
Universidad Nacional de Ingeniería

CONTENIDO

Resumen, 1
Antecedentes, 2
El concepto de modelo hidráulico, 2
Principios de similitud. Escalas, 4
El modelo como parte del diseño, 8
 i. *Necesidad de un modelo*
 ii. *El costo de un modelo*
 iii. *Justificación técnica de un modelo*
 iv. *Oportunidad de un modelo*
 v. *Secuencia Modelo-Diseño-Construcción-Funcionamiento*
Trabajo conjunto con el diseñador, 13
Confiabilidad de un modelo, 15
Conclusión, 16
Referencias, 17

RESUMEN

En el presente trabajo se expone las ventajas y limitaciones de los modelos hidráulicos, considerándolos como una herramienta valiosa para el diseño. Luego de la presentación de los antecedentes de esta exposición se analiza el concepto de modelo, así como los principios y criterios de similitud y de selección de escalas. Luego se examina el modelo como una parte del diseño hidráulico y se establece las características que debe tener el trabajo conjunto con el diseñador. Finalmente, se discute la confiabilidad de la investigación en modelo y se presenta conclusiones generales sobre el tema tratado.

Antecedentes

Esta exposición ha sido desarrollada para su presentación en el ***Ciclo de Conferencias sobre investigación en modelos físicos y matemáticos de obras hidráulicas***, organizado por el Laboratorio Nacional de Hidráulica de la Universidad Nacional de Ingeniería. El tema presentado en esta exposición está dirigido a los investigadores, jefes de proyecto, ingenieros diseñadores, ingenieros hidráulicos en general y estudiantes de la especialidad.

El desarrollo de este trabajo se basa tanto en la experiencia profesional del autor en el tema de los modelos hidráulicos, como en algunas de sus publicaciones anteriores sobre el asunto que nos convoca, y de las que se hace amplio uso en esta exposición. Entre ellas se encuentran las siguientes: ***“Consideraciones generales sobre los modelos hidráulicos”***, Laboratorio Nacional de Hidráulica; ***“Modelos Hidráulicos: Realidad y Fantasía”***, Anales de la Universidad de Chile, con motivo del homenaje al profesor Francisco Javier Domínguez; ***“Los Modelos y su importancia para el diseño de estructuras hidráulicas”***, Revista “El Ingeniero Civil” y ***“Modelos Fluviales”***, Capítulo 12, del libro “Introducción a la Hidráulica Fluvial”, editado por la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería.

El concepto de modelo hidráulico

Cada vez que el ingeniero se enfrenta al problema de diseñar una estructura tiene que resolver armoniosamente un compromiso entre los aspectos de eficiencia, seguridad y costo, lo que implica establecer con un razonable grado de confianza la relación entre la estructura proyectada y el medio circundante.

Los fenómenos hidráulicos, como expresión del mundo natural, son tan complejos que no es posible analizarlos y describirlos totalmente. Sólo

podemos hacerlo parcialmente. Uno de los instrumentos más poderosos de que se dispone para tratar de conocer y comprender el comportamiento del agua en la Naturaleza y su interacción con las estructuras se encuentra en la investigación mediante los modelos matemáticos y los modelos físicos. Ambos se complementan.

Un modelo, físico o matemático, es una representación simplificada de un aspecto de la Naturaleza y, en muchos casos, de las obras construidas en ella. La construcción de modelos no sólo es un método admitido, sino que es el que ha permitido el progreso de la ciencia. Hacer ciencia es construir modelos.

Todo esto resulta muy claro a partir del siglo XVII con la introducción del método científico. Galileo creó un modelo para describir la caída de los cuerpos. Newton creó un modelo para describir la atracción de los cuerpos. Kepler creó un modelo para describir las órbitas planetarias. Bohr creó un modelo para describir la estructura atómica. Las fórmulas de la Hidráulica son modelos creados para una realidad muy simplificada y esquematizada.

La palabra “modelo” no es exclusiva de la hidráulica. Por lo tanto, no debe entenderse únicamente con el significado restringido que en ella tiene. Modelo es toda esquematización de la realidad hecha con fines de estudio. Todas las ciencias de los objetos reales trabajan con situaciones más o menos idealizadas que constituyen inevitablemente simplificaciones, en verdad deformaciones, de la realidad. Tanto los modelos matemáticos como los modelos físicos representan esquematizaciones del mundo natural.

Esquematizar es simplificar. Esta concepción teórica es la que nos lleva, por ejemplo, a considerar que en un escurrimiento el coeficiente de resistencia es sólo un coeficiente de rugosidad. Aún más, nos lleva también, por ejemplo, a considerar, erróneamente, que dicho coeficiente es independiente de la concentración de sólidos en suspensión.

Una de las estructuras que se ha estudiado más en modelo en nuestro Laboratorio es la bocatoma. El primer paso en el análisis es necesariamente el estudio del río. El río que está en la naturaleza es demasiado complejo para poderlo reproducir en un modelo matemático o físico. Tenemos que imaginar un río mucho más simplificado que el que existe realmente. En ningún modelo podríamos reproducir las variaciones instantáneas del caudal líquido y del caudal sólido, de la sección transversal, de la pendiente y de todas las características hidráulicas de un río. En consecuencia, nos fabricamos un río ideal, que es el que se estudia en un modelo, físico o matemático. Nuestras fórmulas no son para el río que existe en la naturaleza, sino para el río construido en nuestra mente. Para el segundo paso es necesario simplificar y esquematizar la obra proyectada. En el modelo no se considera, por ejemplo, los problemas de estabilidad estructural y de abrasión. Si bien es cierto que las simplificaciones son inevitables, debemos ser plenamente conscientes de ellas para poder interpretar los resultados obtenidos en cualquier modelo.

En un interesante artículo de Ramón Fuentes titulado *Escurrimientos reales e imaginarios en canales: paradojas y falacias en el cálculo de la curva de remanso*, se cuenta lo siguiente: “Un fanático de la hípica lleva a un físico matemático a presenciar una carrera de caballos y luego le pregunta si le es posible determinar una martingala para ganar. Después de reflexionar un momento, el físico le responde: “*si puedo, siempre que sea posible suponer que los caballos son esféricos y sin roce.*” La Hidráulica está llena de intentos de introducir caballos esféricos, dice Ramón Fuentes.

Principios de similitud. Escalas

Cuando se planifica una investigación en modelo hidráulico se busca reproducir del mejor y más completo modo posible las condiciones que

se encuentran en la naturaleza. Pero, esto no siempre es posible. El mundo natural es demasiado complejo y nunca puede lograrse la reproducción total y perfecta de un fenómeno que ocurra en ella.

Por lo tanto, el camino que se debe seguir es el de la simplificación. Al no poder reproducir en su totalidad la complejidad del mundo natural, debemos buscar, por lo menos, la reproducción de una parte o aspecto de cada fenómeno y tratar de lograr en esa parte la mayor semejanza posible que sea compatible con los fines prácticos que buscamos. Un ejemplo puede aclarar esta idea. Un río transporta agua, sólidos en suspensión, sólidos de fondo y cuerpos extraños. Ante las dificultades que se encontrarían para tratar de reproducir todo esto en un modelo se opta por la simplificación. Usualmente se reproduce junto con el flujo el transporte sólido de fondo o de suspensión. La elección depende del problema que estemos estudiando. En consecuencia no nos queda otro camino que simplificar, que esquematizar, tal como se comentó en el punto anterior. Es decir, debemos fabricar modelos.

La Hidráulica tiene la gran ventaja de poder representar físicamente, a escala, la mayor parte de sus modelos. Para lo cual se ha desarrollado una disciplina específica que es la Teoría de Modelos, la que consiste básicamente en aceptar el principio de similitud, llamado también de semejanza. El principio de similitud consiste en aceptar que las conclusiones obtenidas del análisis de un fenómeno son aplicables a otro fenómeno. Por ejemplo, del estudio del salto hidráulico que ocurre en un modelo se pueden obtener conclusiones aplicables al salto hidráulico que ocurre en la naturaleza. Cuando esto es cierto se dice que entre ambos fenómenos hay similitud.

El modelo no puede ser simplemente una imitación de la naturaleza. Tampoco puede ser la representación física de un modelo matemático. El modelo debe participar de alguna de las cualidades del prototipo que trata de representar. Así por ejemplo, en el modelo antes mencionado de un salto hidráulico, la participación está en la igualdad del Número de

Froude, en la existencia en el modelo de un grado aceptable de turbulencia, y además, por cierto, en la similitud geométrica.

Una de las grandes ventajas, y a la vez dificultad, de la investigación en modelos reside en el hecho de que, por ejemplo, el modelo de un vertedero es un vertedero, el modelo de un río es a su vez un río. Es decir, que el modelo tiene existencia hidráulica propia, independientemente de lo que representa. Un modelo no es una maqueta.

La aplicación de un criterio de similitud es lo que nos permite obtener resultados que puedan ser extrapolados al prototipo. Si no se cumple el criterio de similitud adecuado, el modelo no participará de las cualidades del prototipo cuya reproducción nos interesa. En este caso el modelo no sólo sería inútil, sino, además, engañoso.

En la teoría de los modelos físicos hablamos frecuentemente del “prototipo” para referirnos a aquello que se va a estudiar en modelo. Estrictamente hablando, el término prototipo sólo debería referirse a aquello de lo que se va a construir muchos ejemplares iguales, como podría ser una máquina, un motor, una turbina o un tipo de compuerta. Es por eso que se habla usualmente de la relación modelo-prototipo. Pero, usualmente cuando estudiamos un desarenador, una bocatoma u otra estructura hidráulica se trata de elementos singulares, de los que no se van a construir muchos ejemplares iguales. Generalmente, sólo uno. Es por eso que puede resultar más ilustrativo hablar de la relación modelo-naturaleza.

El punto de partida en el diseño y concepción de un modelo es la selección adecuada del criterio de similitud. Así por ejemplo, si se desea reproducir y estudiar un flujo a pelo libre en el que las fuerzas gravitacionales predominan sobre las inerciales entonces el Número de Froude debe ser igual en el modelo y en la naturaleza. El Número de Froude se constituye así en el Parámetro Característico de la Información (PCI).

Escogido un criterio de similitud se debe proceder a la determinación de las escalas del modelo. En la selección de las escalas intervienen numerosos factores. De un lado están las exigencias teóricas originadas en el Parámetro Característico de la Información, y, de otro, las circunstancias de tipo práctico vinculadas al Laboratorio y a los objetivos de la investigación. El desarrollo de este tema escapa a los alcances de esta exposición, pero bastaría con recordar que una cierta escala, satisfactoria desde el punto de vista teórico, podría no ser compatible con las instalaciones de un determinado laboratorio.

Por lo tanto, para la selección de escalas se requiere no sólo el conocimiento profundo de las circunstancias teóricas aplicables, sino también las vinculadas al laboratorio en el que se va a realizar la investigación, tales como espacio disponible, capacidad de bombas instaladas, precisión de los instrumentos existentes y muchos otros factores más. Como consecuencia de lo anteriormente expuesto resulta que un modelo podría estudiarse en un laboratorio con una determinada escala y en otro laboratorio con una escala diferente.

Un tema vinculado indirectamente a la selección de escalas es el correspondiente a la determinación de los límites del modelo. El establecimiento de las condiciones de frontera es sumamente importante y requiere de gran experiencia.

Como consecuencia de las escalas escogidas, y ciertamente del tamaño y otras características del modelo, suele ocurrir que en el modelo aparezcan determinados fenómenos que no corresponden a los que se presentan en la naturaleza. Estos fenómenos propios del modelo y de la escala escogida reciben el nombre de efectos de escala. Al respecto hay que tener cuidado, por ejemplo, con los fenómenos originados en la tensión superficial, propia del modelo y no del prototipo.

El criterio de similitud escogido, la selección de escalas, la determinación de los límites del modelo y la consideración de los efectos de escala son de primerísima importancia para interpretar adecuadamente los resultados del modelo.

El modelo como parte del diseño

Hay varios temas que preocupan los ingenieros diseñadores y a los jefes de proyecto con relación a los modelos hidráulicos. Entre ellos están los siguientes: a) saber si como parte de un determinado diseño es necesario o no hacer una investigación en modelo, b) cual sería el costo de dicha investigación, c) su justificación técnica y d) su oportunidad. A continuación se examina cada uno de estos temas y se complementa con un análisis de la secuencia modelo-diseño-construcción-funcionamiento de la estructura.

a) Necesidad de un modelo

Evidentemente que son múltiples las ventajas que ofrece una investigación en modelo, pero ¿en qué casos es realmente necesario realizar una investigación en modelo?

Un punto a tenerse en cuenta para tomar una decisión es la importancia de la estructura que se está estudiando. Si se trata de una estructura de gran costo y complejidad, cuya falla acarrearía graves consecuencias debemos pensar necesariamente en una investigación en modelo. Pero, si se tratase de una estructura pequeña, fácilmente reparable y cuya destrucción o colapso no tuviese consecuencias graves, podría no requerirse un estudio en modelo hidráulico.

Otra circunstancia en la que debe recurrirse a una investigación en modelo se presenta cuando la teoría requerida para el diseño es incompleta, inaplicable o inexistente. Este es un caso muy frecuente.

Como se ha señalado anteriormente las fórmulas de la Hidráulica corresponden en su mayor parte a situaciones idealizadas en un mundo bidimensional.

Pero, hay también consideraciones de otro tipo como la posibilidad de introducir un ahorro importante en el costo de las obras. La experiencia demuestra que determinadas estructuras pueden ser igualmente eficientes y seguras, a un menor costo. El modelo permite la comprobación, o, a veces, el descubrimiento de este hecho.

La última, pero no por eso menos importante, razón para hacer una investigación en modelo, es la de elevar el grado de seguridad de la estructura. La investigación en modelo físico, es decir, la visualización del comportamiento de la estructura en tres dimensiones permite observar y, a veces, intuir problemas que no habían sido imaginados durante el diseño en el gabinete.

Estas cuatro razones son independientes entre sí, y cualquiera de ellas pudiera justificar la realización de una investigación en modelo.

b) El costo de un modelo

Otro tema que preocupa a los jefes de proyecto es saber cuanto cuesta un modelo. La respuesta es sencilla: muy poco si lo comparamos con el costo del diseño, casi nada si se le compara con el costo total de la obra, algo interesante si se piensa en el ahorro probable y prácticamente nada si se le compara con la seguridad adicional obtenida.

A veces se presentan problemas cuando se trata de determinar el costo de un modelo. La investigación en modelo se encarga a un laboratorio de hidráulica mediante un contrato. Generalmente se ha venido tratando de asimilar el contrato de una investigación en modelo a la modalidad de los contratos de estudios o de obras. La dificultad se presenta cuando el desarrollo de los trabajos en el modelo abre la posibilidad de mayor estudio o profundización de determinados aspectos del diseño, o aun, la

investigación de alternativas no previstas. Una investigación por su propia naturaleza consiste en descubrir posibilidades no conocidas de antemano. Por lo tanto, en sentido estricto no debería ser posible fijar de antemano el costo y el plazo de una investigación. Esta forma de contrato que se viene usando en nuestro medio es sumamente perjudicial e inconveniente para ambas partes. Es por eso que en otros países los laboratorios tienen modalidades contractuales diferentes. Se pacta la construcción del modelo, la instalación de los equipos de medición y control y la puesta en marcha. Luego se cobra una determinada cantidad por cada semana de investigación. De esta manera se cuenta con la gran ventaja de poder realizar el número de pruebas que el comportamiento de lo observado en el modelo vaya aconsejando con miras a obtener el diseño más eficiente y más económico.

c) Justificación técnica de un modelo

¿Cómo se justifica técnicamente la investigación en un modelo hidráulico? Son varias las razones. Una de las más importantes es la tridimensionalidad. En un modelo el flujo es tridimensional. Esta es una gran diferencia con respecto a la mayor parte de las fórmulas que se emplea en la Hidráulica, las que corresponden a modelos bidimensionales. Adicionalmente, el modelo permite apreciar el funcionamiento de la estructura en tres dimensiones.

Un modelo permite también el estudio de diversas condiciones de diseño y operación. Se puede variar los caudales, la cantidad de sólidos y otras características del escurrimiento con gran facilidad. Por ejemplo, si se trata de un desarenador es posible estudiar el comportamiento de la transición, la distribución del flujo en las naves y la eficiencia de decantación para diferentes caudales, diferentes granulometrías y diversas formas de operación. Sobre este tema es conveniente recordar que muchos de los fenómenos que ocurren en un desarenador son esencialmente tridimensionales y que ninguna fórmula matemática de la

hidráulica los describe totalmente. El modelo permite también el estudio y análisis de varias alternativas de diseño.

El modelo es también muy útil para ensayar las Reglas de Operación. Sabemos que la determinación de la mejor forma de operación de una estructura es un proceso de aproximaciones sucesivas. La primera versión la ofrece el proyectista. La investigación en modelo debe permitir la obtención de una segunda versión que recoja lo observado en el modelo y es la que se usará al ponerse en funcionamiento la obra. La experiencia y la observación de la estructura permitirán mejorar continuamente las reglas de operación.

Cualquiera de estas cinco razones podría ser suficiente para justificar técnicamente un modelo hidráulico.

d) Oportunidad de un modelo

Otra pregunta que debe ser respondida es la siguiente, ¿en qué momento del Estudio debe realizarse la investigación en modelo? A veces se piensa erróneamente que la investigación en modelo es un ensayo adicional, complementario, para perfeccionar algunos detalles y que puede hacerse a la finalización del diseño definitivo. Sin embargo, nuestra opinión es diferente. Cuando la investigación en modelo es necesaria debe formar parte del estudio definitivo y realizarse simultáneamente con él.

En algunos casos el estudio en modelo debe formar parte del estudio de alternativas. Los diseños definitivos de estructuras que requieran de una investigación en modelo hidráulico deberían considerar el estudio en modelo dentro del contrato del estudio definitivo. Sin una verificación en modelo no es posible presentar el diseño definitivo de una estructura con las características antes señaladas.

Por último, la necesidad de un modelo hidráulico, su costo, su justificación y su oportunidad como parte del diseño, pueden surgir de la consideración de dos criterios diferentes. Uno de ellos es el de buscar, con la ayuda del modelo, un diseño que sea lo más seguro posible. Otro aspecto es el de buscar, con la ayuda del modelo, un diseño que con un grado satisfactorio de seguridad sea lo más económico posible. El modelo puede ayudar a disminuir márgenes y coeficientes de seguridad excesivos. Muchas veces ha ocurrido que el costo del modelo se paga ampliamente con la economía que se pueda hacer en el costo la obra y, por supuesto, por el mayor grado de seguridad obtenido.

e) Secuencia Modelo-Diseño-Construcción-Funcionamiento

Es interesante observar lo que ha ocurrido con diversas estructuras hidráulicas cuyo diseño estuvo, o podría haber estado, vinculado a la necesidad de un modelo hidráulico. Tenemos así, que se podría hacer la siguiente clasificación de la secuencia señalada:

- I. Estructuras hidráulicas que fueron estudiadas en modelo en su oportunidad, como parte del diseño definitivo, pero la estructura no se ha construido porque el Proyecto Integral no se ha realizado todavía.
- II. Estructuras hidráulicas que fueron estudiadas en modelo en su oportunidad, pero luego, al ejecutarse el Proyecto Integral del que formaban parte, se cambió de opinión con respecto a la concepción, ubicación, o diseño de la estructura particular que había sido estudiada en modelo.
- III. Estructuras hidráulicas que se construyeron sin haberse realizado un estudio en modelo y al ponerse en funcionamiento no dieron resultados satisfactorios. Posteriormente se realizó una investigación en modelo para estudiar las mejoras necesarias.

- IV. Estructuras que se construyeron sin haberse realizado un estudio en modelo y al ponerse en funcionamiento no dieron resultados satisfactorios. El problema no se ha corregido y siguen funcionando mal.**

- V. Estructuras que se construyeron luego de un estudio en modelo hidráulico y funcionan razonablemente bien.**

Trabajo conjunto con el diseñador

La investigación en modelo de una obra hidráulica es un intento de conocer anticipadamente la interacción estructura-naturaleza. Así por ejemplo, cuando se construye una obra en un río hay un impacto de la obra sobre el río y otro impacto del río sobre la obra. El conocimiento de las características de esa interacción es fundamental para el éxito del proyecto.

La investigación en modelo debe ser un diálogo entre el diseñador y la naturaleza. En este diálogo el ingeniero investigador sirve como médium, cuya tarea es la de facilitar la comunicación entre aquel que tuvo que hacer un conjunto de suposiciones, y la probable reacción de la obra y de la naturaleza vistas a través del modelo.

Son varios los puntos que deben examinarse con relación al trabajo conjunto del investigador y del diseñador. Entre ellos están: los Términos de Referencia, el suministro de la información básica, el desarrollo de la investigación, la interpretación de los resultados y la conservación del modelo.

La primera línea de contacto entre el diseñador y el ingeniero investigador se encuentra en los Términos de Referencia de la investigación, los que constituyen el planteamiento del problema por resolver. Los Términos de Referencia deberían constituir un trabajo conjunto entre el diseñador y el ingeniero investigador. El primero sabe que es lo que quiere preguntarle

al modelo. El segundo sabe como hay que hacer las preguntas y como interpretar las respuestas.

Los Términos de Referencia deben señalar claramente los objetivos buscados, pero de acuerdo a su propio nombre no deben ser rígidos, puesto que tienen que alimentarse de lo que se vaya descubriendo a lo largo de la investigación. Siempre debemos tener presente que una investigación es un proceso de aproximaciones sucesivas.

Los Términos de Referencia deben tener en cuenta las limitaciones que todo laboratorio puede tener, como por ejemplo, el espacio disponible, la capacidad de bombas o el instrumental. Los Términos de Referencia deben reflejar la compatibilidad entre los objetivos de la investigación, el tiempo y los recursos disponibles.

La vinculación del modelo con el diseñador está relacionada, entre otros aspectos, al suministro de la más amplia información disponible. Los buenos resultados de un modelo dependen en gran medida de la cantidad y la calidad de la información que se suministre al modelo. Como parte de esta vinculación con el diseñador, el ingeniero investigador entrará en contacto con los cálculos en los que reposa el diseño, así como con los planos y la memoria descriptiva de la obra.

Lo deseable es que el diseñador haga un seguimiento del desarrollo de la investigación en el modelo, una apreciación de los resultados obtenidos y, en estrecha comunicación con el ingeniero investigador, estudie las soluciones alternativas que lo observado en el modelo pueda sugerir.

El trabajo coordinado es fundamental, puesto que son muchos los aspectos que intervienen en el diseño de una estructura. El modelo nos da información acerca del funcionamiento hidráulico, pero hay otros aspectos que escapan al campo de actividad del ingeniero investigador y que son manejados por el ingeniero proyectista, que es quien tiene la información completa sobre problemas tales como: cimentación,

aspectos constructivos, estructurales, operación y mantenimiento, costos y muchos otros más.

Finalizada la investigación en modelo se deben interpretar los resultados y obtener las conclusiones y recomendaciones correspondientes. Esta es una etapa muy delicada en la que es necesario tener en cuenta las limitaciones originadas en la ley de similitud adoptada y en las escalas escogidas. Se debe prestar atención a los efectos de escala que pudieran existir.

Una vez terminada la investigación quedan dos posibilidades con respecto al modelo mismo. Una de ellas, que es la más frecuente, es destruirlo. La otra, es la de conservarlo. En muchos proyectos es recomendable la conservación del modelo, de modo que puesta en funcionamiento la obra se pueda comparar y correlacionar el comportamiento modelo – estructura. Si algún aspecto de la obra no funcionase correctamente podría buscarse su perfeccionamiento con la ayuda del modelo. Dicha correlación y el estudio de variantes constituyen temas importantes de investigación. A veces el modelo sigue siendo útil para el perfeccionamiento de las Reglas de Operación.

Confiabilidad de un modelo

Otro tema que suele preocupar a los ingenieros diseñadores y a los jefes de proyecto es saber el grado de confiabilidad de un modelo hidráulico. El jefe de proyecto o el diseñador pueden preguntarse ¿es confiable un modelo?, ¿qué error puedo cometer al aplicar los resultados del modelo al diseño que estoy realizando?

Para el tema de la confiabilidad no hay una respuesta única. No todos los modelos tienen el mismo grado de confiabilidad. En tal sentido podríamos hablar de modelos de alta confiabilidad y modelos de baja confiabilidad. Aún más, no todas las partes de una investigación en modelo tienen igual

confiabilidad. Hay algunos tipos de modelos cuyos resultados son altamente confiables. En cambio, hay otros modelos, como los sedimentológicos, en los cuales el grado de confiabilidad es menor. Por ejemplo, en hidráulica fluvial los modelos de fondo móvil tienen un grado de confiabilidad menor en lo que respecta a la predicción cuantitativa de los fenómenos de agradación y degradación. Por el contrario, en el modelo de una conducción de concreto en la que se produce un cambio de sección, se instala un vertedero o se produce un salto hidráulico, la calidad de la información obtenida es en general mucho más alta.

No siempre un modelo tiene que dar información cuantitativa. A veces, por diversas circunstancias, sólo es posible obtener información cualitativa. Esto puede ocurrir, por ejemplo, en algunos aspectos de problemas vinculados a la hidráulica fluvial o marítima. Pero, existen problemas de diseño tan complejos en los que la obtención de información, aunque sólo sea cualitativa, resulta muy valiosa.

La confiabilidad de los modelos hidráulicos es un tema que corresponde a la Teoría de Modelos. Depende de varios factores: tipo de estructura, escalas escogidas, técnicas de laboratorio y, ciertamente, de la calidad de la información básica. La interpretación de los resultados obtenidos, a la que nos hemos referido anteriormente, requiere experiencia e imaginación y es el fundamento de la confiabilidad de la investigación.

La determinación del grado de confiabilidad de un modelo debe formar parte de la etapa de planeamiento y debe quedar perfectamente establecido para facilitar así la interpretación de los resultados obtenidos.

A modo de síntesis se podría decir que el tema de la confiabilidad de los resultados de una investigación en modelo podría referirse a factores intrínsecos, como los relativos a la ley de similitud escogida o la calidad de la información básica, a factores humanos, que son los vinculados a la formación teórica y experiencia del personal participante y a factores

tecnológicos, que son los relacionados con los instrumentos y métodos de medición u observación empleados.

Conclusión

Como conclusión de esta exposición podríamos recordar que un modelo no resuelve todos los problemas que se presentan en el diseño hidráulico de una estructura. En principio, el modelo sólo responde lo que se le preguntó y para lo que fue diseñado mediante la adopción de un apropiado Parámetro Característico de la Información. Del análisis teórico de este parámetro surgen las limitaciones que todo modelo tiene.

La correcta interpretación de los resultados obtenidos en la investigación es la tarea del ingeniero. Es el ingeniero quien finalmente debe resolver los problemas con la ayuda del modelo hidráulico estudiado.

Finalmente, como una última conclusión recordemos el título de la presente exposición y pensemos en los modelos como herramienta valiosa para el diseño hidráulico.

Referencias

- FUENTES, Ramón E** **Escurremientos reales e imaginarios en canales: paradojas y falacias en el cálculo de la curva de remanso.** Anales de la Universidad de Chile. Estudios en honor de Francisco Javier Domínguez. Quinta Serie N° 8, Agosto 1985. Santiago, Chile
- ROCHA FELICES, Arturo** **Consideraciones Generales sobre los modelos hidráulicos.** Boletín Técnico Laboratorio Nacional de Hidráulica, Lima, 1965.
- **Sobre la influencia de la aceleración complementaria de Coriolis en los modelos hidráulicos.** Boletín Técnico 4-003 Laboratorio Nacional de Hidráulica, Lima, 1966.
- **Modelos Fluviales de Lecho Móvil,** Boletín Técnico 4-007 por el Laboratorio Nacional de Hidráulica, Lima, noviembre de 1966.

- **Modelos Hidráulicos: Realidad y Fantasía.** Anales de la Universidad de Chile. Estudios en honor de Francisco Javier Domínguez. Quinta Serie N° 8, Agosto 1985. Santiago, Chile.
- **Los modelos y su importancia para el diseño de estructuras hidráulicas.** Revista "El Ingeniero Civil". N° 74 Lima, 1991.
- **Introducción a la Hidráulica Fluvial. Capítulo 12 Modelos Fluviales.** Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, 1998.