

Estudios en honor de  
Francisco Javier Domínguez  
AUCH, 5ª Serie, N° 8 (1985): 509-523

## MODELOS HIDRAULICOS: REALIDAD Y FANTASIA

ARTURO ROCHA  
Lima, Perú

### INTRODUCCIÓN

El prestigio de la difusión que han adquirido la ciencia y la tecnología de nuestra época pueden hacer pensar, a quienes no estén suficientemente informados, que cualquier problema de ingeniería se resuelve de inmediato con la aplicación de una o varias fórmulas y con la ayuda de una computadora. Nada más lejos de la verdad. Los problemas que plantean las necesidades actuales son sumamente difíciles y, para su solución, se requiere toda la capacidad, ingenio y experiencia que los científicos pueden dar. Viene muy a propósito un comentario de Bertrand Russell: "ahora que el hombre de la calle confía cada vez más firmemente en la validez de la ciencia, el hombre de laboratorio empieza a perder esa confianza".

Durante siglos la ciencia se interesó en conocer el por qué de los fenómenos. Dentro de una perspectiva aristotélica es válida, por ejemplo, la pregunta ¿por qué caen los cuerpos? La respuesta del Estagirita, porque tienden a ocupar su lugar natural, no nos da, desde un punto de vista moderno, mayores luces sobre el problema. A partir del siglo xvii la ciencia se interesa por responder a la pregunta del cómo ocurren los fenómenos. El punto de vista newtoniano sobre la caída de los cuerpos es una ley descriptiva. Se introduce así en la ciencia el concepto de modelo.

La ciencia contemporánea ataca sus problemas aceptando un cierto número de hipótesis y desarrollando un modelo matemático del fenómeno que desea estudiar. Este modelo es necesariamente restringido. Su

confiabilidad y grado de aproximación son variables y deben determinarse en cada caso particular.

Se recurre a los modelos físicos como un apoyo y complemento a los modelos matemáticos o para su reemplazo parcial cuando no es posible estructurarlos con suficiente amplitud. Presentamos acá, de la diversidad de modelos que usa la ingeniería contemporánea, algunas consideraciones sobre la teoría y posibilidades de los modelos hidráulicos, poniendo énfasis en su vinculación con la realidad.

#### EL MODELO COMO ESQUEMATIZACIÓN DE LA REALIDAD

Uno de los problemas más importantes que se presenta en los proyectos de ingeniería hidráulica es el diseño de las estructuras. Hay a menudo un compromiso para resolver armoniosamente los aspectos de eficiencia, seguridad y costo. El ingeniero dispone de los conocimientos fundamentales provenientes de la Mecánica de Fluidos, Hidráulica y otras disciplinas, que le permiten enfrentarse a estos diseños con una cierta posibilidad de éxito.

Hasta hace algunos años estos problemas eran resueltos con la sola aplicación de la teoría y/o de la experiencia proveniente de casos similares. Sin embargo, los resultados no fueron siempre completamente satisfactorios. Ha habido diseños que han sido un completo fracaso. Lo que ocurre es que los fenómenos hidráulicos son tan complejos que la ciencia pura, llámese Hidrodinámica o Mecánica de Fluidos, es incapaz de analizarlos y describirlos en su totalidad. En estos casos se recurre a la investigación en modelos hidráulicos, partiendo del modelo matemático imperfecto previamente establecido. Si el modelo matemático fuera perfecto no necesitaríamos de la ayuda de un modelo físico.

Un modelo representa de una manera simplificada la complejidad de la naturaleza, de la realidad. Esta simplificación, o mejor, esquematización, es completamente lícita, puesto que para el planteamiento y solución de un problema se requiere, dentro de nuestra concepción actual de la ciencia, "construir un modelo".

La palabra "modelo" no debe entenderse únicamente con el significado restringido que tiene en la Hidráulica. Modelo es toda esquematización de la realidad hecha con fines de estudio.

De hecho, todas las ciencias de los objetos reales trabajan con situaciones más o menos idealizadas que constituyen simplificaciones (¿deformaciones?) de la realidad. Hacer ciencia es organizar nuestro conocimiento del mundo natural mediante una esquematización del mismo. Esta esque-

matización conlleva la introducción de una serie de términos y palabras que acaban por incorporarse a nuestro lenguaje y que consideramos, erróneamente, como pertenecientes al mundo natural: “fuerza”, “masa”, “partícula fluida”, etc. Este afán simplificador es el que nos lleva a hablar, por ejemplo, del “diámetro de las partículas en suspensión”, lo que formalmente es falso, pues mal pueden tener diámetro partículas que no son esféricas.

Un ejemplo típico y muy simple de esquematización lo tenemos al estudiar un río. Sea que este estudio lo realicemos en modelo hidráulico o no, es necesario que nos fabriquemos un río ideal, bastante diferente del que está en la naturaleza. Sabemos que todo río presenta, casi minuto a minuto, una variación en su caudal. Hay impermanencia natural. Todas las características hidráulicas están cambiando. El agua no es el fluido ideal de nuestras fórmulas, la sección transversal es cambiante e indefinida. El movimiento no es uniforme. Sin embargo, para poder estudiar el río y obtener conclusiones útiles, hacemos una serie de suposiciones y simplificaciones. Nuestras fórmulas no son para *el* río, sino para *un* río, construido en nuestra mente. Estamos, en realidad, construyendo un modelo, idealizando la naturaleza.

Por cierto que la esquematización dependerá del tipo de problema en estudio. Al investigar un estuario resulta indispensable la observación de las mareas y, si se presenta un problema de intrusión salina, no podrá ignorarse la diferencia de densidad entre el agua salada y dulce.

La habilidad del investigador científico consiste en establecer cuáles son las variables determinantes de un fenómeno y que por lo tanto no pueden ser ignoradas. A esto se llama realizar un proceso de abstracción. Podemos recordar acá la distinción galileana entre cualidades primarias y secundarias.

Es dentro del concepto de modelo matemático que decimos, por ejemplo que la distribución vertical de velocidades en un conducto hidráulico viene dada por la ecuación de Karman-Prandtl.

Son numerosas las simplificaciones que ha debido hacerse para llegar a esa fórmula: flujo permanente y uniforme en un mundo bidimensional de un fluido no newtoniano, de peso específico y viscosidad constantes, en un contorno físico definido sobre la base a abstracciones adicionales como las de “liso” y “áspero”.

A pesar de este conjunto de simplificaciones, que debemos perdonar, pero no olvidar, se obtiene una fórmula útil que permite predecir velocidades con un cierto grado de aproximación.

Ahora la ciencia es utilitaria. Ya no busca comprender el mundo ni

hallar las causas últimas. Esta actitud positivista hace que los resultados de una teoría científica sean aceptables en la medida en la que se logra describir los hechos observados. Aquí juega un papel importante la tecnología a través de la precisión con la que se hacen las observaciones.

Si a un conjunto de hipótesis se le agrega consideraciones lógicas y matemáticas obtenemos ecuaciones, que son buenas o malas en la medida en la que logren "salvar los fenómenos"; es decir, soportar la verificación experimental.

Cuando el modelo matemático disponible no es satisfactorio, y tampoco podemos reemplazarlo por otro, se recurre en Hidráulica a la investigación en modelos físicos.

Un modelo hidráulico es una representación esquemática, a escala, de una porción de la naturaleza, y de las obras proyectadas en ella. Tanto el modelo matemático como el modelo físico son, dentro de la terminología que estamos utilizando, simplificaciones o esquematizaciones de la realidad, pero de diferente tipo. El modelo físico debe entenderse como un complemento, no como un elemento sustitutorio. Debemos proporcionar al modelo la mayor cantidad de datos, de la mejor calidad posible, para que a su vez nos devuelva información valiosa. El estudio en modelo reducido representa no sólo la garantía de un diseño eficiente, sino que, además, significa en muchos casos, una apreciable disminución de los costos al poderse reducir racionalmente los márgenes de seguridad e incertidumbre.

#### OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN

El problema de la investigación en modelos hidráulicos consiste básicamente en establecer, con un cierto grado de aproximación, la forma en la que la naturaleza va a reaccionar frente a una obra hecha por el hombre.

Partamos, a manera de ejemplo, de un problema específico: construcción de una estructura hidráulica. Hay una serie de razones que permiten cierta flexibilidad en la elección del lugar en el que se va a construir. Esta fase del estudio no puede, por lo general, someterse a un tratamiento matemático, quedando a cargo de la intuición o la experiencia del ingeniero. Constituye esto un ejemplo típico de una de las preguntas que un modelo hidráulico responde con mayor ventaja: ¿Cuál es el lugar más conveniente para ubicar la estructura?

Supongamos que se trata de construir una bocatoma. Razones topográficas, hidrológicas o de cualquier tipo, nos indican una zona en la que puede ubicarse la estructura, mas, no su ubicación exacta. Queda pen-

diente un problema de microlocalización. El ingeniero deberá resolverlo. Sin embargo ¿cómo saber si un emplazamiento ubicado 100 m. aguas abajo de uno escogido preliminarmente no resultará más conveniente? la entrada de sedimentos a una obra de toma varía fuertemente con la ubicación de dicha obra en el río. Un modelo hidráulico, a un costo muy bajo, nos ayudará a determinar el lugar más conveniente para construir la bocatoma.

Si se trata de construir una entrada de puertos y se ha determinado ya la zona de la costa en la que es conveniente el establecimiento del puerto, nos queda todavía la definición del lugar exacto en el que debe construirse la obra. Sabemos que los problemas principales que se presentan en el estudio de un puerto se originan en la necesidad de formar una poza lo suficientemente tranquila como para permitir las operaciones portuarias y evitar la formación de bancos que dificulten o impidan la navegación. Un estudio en modelo hidráulico nos indicaría el lugar más conveniente para la ubicación del puerto.

Si se tiene un embalse en el que se proyecta un aliviadero tipo campanilla ("morning glory"), la cantidad de agua que este aliviadero es capaz de evacuar así como la disposición de las líneas de corriente dependerá del lugar en el que ubiquemos el vertedero. La teoría (situación ideal) es la de un flujo radial infinito y simétrico. En la realidad hay una enorme influencia de la forma del embalse y de la proximidad del contorno. Sólo un modelo hidráulico podrá indicar el lugar más apropiado para construir el aliviadero.

Al estudio del lugar sigue el de la forma más conveniente. Una estructura puede tener diversas formas o geometrías que determinarán su comportamiento hidráulico. En el diseño de una bocatoma es posible adoptar diferentes arreglos para sus varios elementos: presa derivadora, canal de limpia, vertederos, pantallas, muros guías, etc. La disposición de estas partes determinará la eficiencia de la estructura. Es muy difícil y venturoso, si no imposible prever el funcionamiento de una obra de toma, en lo que a ingreso de material sólido se refiere, sólo con cálculos teóricos. Independientemente de todo el cálculo podemos intentar, por ejemplo, la ubicación del canal de limpia en un lugar particular. Esto puede tener una gran influencia en el ingreso de sólidos a la toma. Estas u otras disposiciones sólo podrán estudiarse en un modelo hidráulico.

Situación similar se presenta en el estudio y diseño de una entrada de puertos. La forma o geometría que se le dé mediante los rompeolas constituirá un factor determinante para su correcto funcionamiento.

Este problema de la forma se presenta también en el diseño de un

vertedero "morning glory". Sabemos que el gasto que es capaz de descargar depende de la forma o perfil del vertedero y de la curvatura del conducto de descarga.

Otro aspecto importante lo constituye la parte cuantitativa. Se refiere a la posibilidad de obtener del modelo información expresable en números, de hallar valores que, transformados a escala natural, constituyan elementos informativos para el diseño. Podría tratarse de determinar coeficientes de descarga, tirantes, sobreelevación de niveles, velocidades, socavaciones, etc.

Los tres aspectos mencionados, ubicación, forma y cuantificación, no constituyen siempre una secuencia necesaria en un modelo hidráulico, pero están o deben estar siempre presentes en la mente del investigador. Son una especie de *leitmotiv*.

Decíamos que el problema de la investigación en modelos, consiste en establecer con un cierto grado de aproximación a la forma en la que la naturaleza va a reaccionar frente a una obra hecha por el hombre. De acá que en todo modelo tengan que mirarse las siguientes partes: a) el fenómeno natural (por ejemplo, un río o una costa marina), b) la obra proyectada y su influencia sobre el fenómeno natural (por ejemplo, una presa derivadora), c) la extensión espacial y temporal de los efectos producidos por la obra.

La condición fundamental que debería cumplir un modelo hidráulico es la de reproducir adecuadamente las condiciones naturales. Si se trata de estudiar una bocatoma, primero debe reproducirse el río en un modelo hidráulico. El modelo es también un río y, como tal, debe cumplir las leyes de la hidráulica fluvial. Es más, debe reproducir correctamente el río que estamos estudiando. Lo mismo sería para un problema de costas o cualquier otro.

Se podrá investigar, en el modelo, el comportamiento de la estructura, reproducidas las condiciones naturales y habiéndose asegurado que hay similitud, para llegar a este estado se requiere a veces un largo proceso de calibración. La construcción por el hombre de una estructura en un río o en la costa representa una alteración de las condiciones naturales y debe preverse la reacción de la naturaleza.

El modelo puede ayudarnos en la determinación de la extensión espacial y temporal de los efectos producidos por la obra proyectada. Por ejemplo, la extensión de una curva de remanso o de la erosión y sedimentación que como consecuencia de la ruptura del equilibrio pueden presentarse. Estas tres partes constituyen una secuencia en un estudio en modelo hidráulico. Su adecuado tratamiento nos llevará al principio

fundamental que debe estar presente en la mente de todo diseñador e investigador hidráulico: un modelo no resuelve los problemas, es el ingeniero quien debe resolverlos con la ayuda de un modelo.

#### MODELOS MATEMÁTICOS Y MODELOS FÍSICOS

La investigación en modelos físicos es una de las más valiosas herramientas con que cuenta la ingeniería contemporánea y su aplicación se extiende a múltiples campos de la técnica.

Frente a un problema de diseño hay dos posibilidades. Una, es hacer un modelo matemático, la otra, un modelo físico. Ambos son en principio complementarios. El modelo matemático se basa en que a partir de determinadas hipótesis es posible elaborar y desarrollar un conjunto de fórmulas que describen el fenómeno en estudio.

Así por ejemplo, hay una ecuación que para un canal rectangular nos da la relación entre los tirantes, antes y después de un salto hidráulico, en función del número de Froude incidente de la corriente. Para llegar a esta fórmula tan empleada, ha sido necesario aceptar un gran número de simplificaciones e hipótesis. En el modelo matemático, el flujo es bidimensional, se desprecia el peso del fluido y la fricción del fluido con el contorno.

Para estudiar un problema en un modelo físico se determina un criterio de similitud. En el caso del salto hidráulico mencionado antes, el criterio de similitud debe ser el número de Froude. Para que haya similitud entre el modelo y el prototipo, ambos deben tener el mismo número de Froude. Esta es una condición necesaria, pero no suficiente. Se requiere, además, que en el modelo haya suficiente turbulencia. El modelo no puede ser, pues, simplemente una imitación de la naturaleza. Tampoco, la representación física de un modelo matemático. No basta que en el modelo veamos un salto hidráulico para que haya similitud. El modelo debe participar de algunas de las cualidades del prototipo que trata de reproducir. En el modelo de un salto hidráulico la participación está en el número de Froude y en la turbulencia; además, por cierto, de la participación geométrica.

La existencia de un criterio de similitud es lo que nos permite obtener resultados extrapolables al prototipo. Si no se cumple el criterio de similitud adecuado, no hay participación en el modelo de las cualidades del prototipo que nos interesan. El modelo sería entonces inútil.

En la teoría de los modelos físicos hablamos frecuentemente del "prototipo". Esta palabra merece una aclaración o comentario. En el dicciona-

rio castellano se señala que su significado es el de "original ejemplar o primer molde en que se fabrica una figura u otra cosa" y "el más perfecto ejemplar y modelo de una virtud, vicio o cualidad". Este significado difiere del que usualmente se asigna a la palabra prototipo en la Hidráulica. La palabra prototipo alude siempre a aquello de lo que se construye un modelo; un río, por ejemplo.

El término "prototipo" se aplica cuando se está diseñando algo que luego va a ser construido en gran cantidad. Por ejemplo, un tipo de avión o de turbina. Se estudia un prototipo, y luego de resolver los problemas que se presenten se llega a un diseño satisfactorio, lo que permite entonces construir, por ejemplo, muchos aviones o turbinas iguales a su prototipo. Como parte del estudio del prototipo puede requerirse un modelo del mismo, de acá la terminología modelo-prototipo.

Pero en otros problemas de ingeniería no es exactamente igual. Se puede estudiar el diseño de un puente, presa o bocatoma que, en general, son únicos. No constituyen en realidad un prototipo, porque no se va a construir cien presas iguales. Debería acá usarse la terminología modelo-naturaleza, que a veces empleamos.

Todo modelo tiene escalas que dependen del criterio de similitud aceptado. El concepto más simple de similitud en los modelos físicos es la similitud geométrica. Se denomina escala a la relación entre un valor del prototipo y su correspondiente del modelo. Cada una de las variables involucradas tiene su propia escala. Así por ejemplo, para el salto hidráulico mencionado anteriormente, si la escala de longitudes es 25, entonces la escala de velocidades es 5 y la de gastos 3 125. Las escalas están relacionadas entre sí por las leyes que rigen los fenómenos físicos. Habría muchos modos de clasificar los modelos hidráulicos. Un criterio es hacerlo por el tipo de estructura que representan: modelos fluviales, modelos marítimos, modelos de bocatomas, desarenadores, etc. Para los fines de nuestro estudio esta clasificación no es útil. Creemos que desde el punto de vista teórico los modelos deben clasificarse en función del mayor o menor grado de información confiable que puede obtenerse de ellos. Hay, pues, modelos de alto grado de información y modelos de bajo grado de información. Esta distinción debe estar claramente planteada cuando se piense en recurrir a un modelo. Aún más, un modelo no siempre es homogéneo en cuanto a la calidad de información que nos proporciona.

Los fenómenos hidráulicos son esencialmente tridimensionales. Cualquier estructura hidráulica (bocatoma, desarenador, diques de defensa, aliviaderos, disipadores de energía, etc.) tienen que enfrentarse a un flujo



en el que sus principales características (velocidad, presión, etc.) tienen componentes en tres direcciones. El flujo es esencialmente turbulento. Los valores instantáneos de la presión o de la velocidad en un punto dado pueden ser bastante mayores que la media temporal correspondiente. Las condiciones que llevan al establecimiento de un modelo matemático del fenómeno real tienen generalmente que restringirse a dos dimensiones. Las fórmulas obtenidas son más o menos confiables en la medida en que el flujo real sea cuasibidimensional.

El flujo en una curva, eminentemente tridimensional, es pobremente descrito en la teoría. El problema se agrava si en lugar de contornos rígidos tenemos fondos móviles. Los modelos matemáticos ya casi no pueden plantearse, o por lo menos, sólo tienen un carácter referencial.

El modelo hidráulico tiene la enorme ventaja de introducir en el estudio los efectos tridimensionales: del flujo, en los contornos rígidos y del flujo y del contorno en los lechos móviles. Hay, pues, una mayor aproximación a la realidad.

El modelo matemático representa, con un bajo grado de aproximación, no sólo la tridimensionalidad del escurrimiento, sino lo que es una de las características más notables de todo lo real: el continuo cambio. El modelo hidráulico permite reproducir un flujo tridimensional, el transporte sólido y una variación temporal, una impermanencia en su comportamiento. Se puede reproducir no sólo un caudal, sino también un hidrograma. El modelo físico permite la reproducción de diferentes condiciones sedimentológicas y constituye así un eficaz, y, a veces, insustituible elemento auxiliar para el diseñador. Para que esto sea así debemos asegurarnos del grado de confiabilidad del modelo mediante su contrastación con el prototipo.

Hay modelos en cuyos resultados podemos tener un alto grado de confianza; otros, en los que sólo podemos confiar en la validez parcial y restringida de los resultados; y, finalmente, aquéllos que sólo pueden considerarse ilustrativos. En todos los casos juega un gran papel la imaginación y la experiencia del investigador.

En los problemas sedimentológicos se ve muy claramente la dificultad de plantear un modelo matemático y se intuye la enorme distancia que puede establecerse con la realidad al hacer un estudio en modelo reducido. Yalin ha señalado que el número total de parámetros para describir el transporte sólido de fondo es de diecisiete: densidad del agua, viscosidad, densidad de los sólidos, diámetro de las partículas, calado, pendiente, aceleración de la gravedad, velocidad media de la corriente, caudal, ancho del conducto, factor de forma para la sección transversal, velocidad

de caída de las partículas sólidas, factor de forma para el lecho, factor descriptivo de la distribución granulométrica del material sólido, factor de forma de las partículas constituyentes del lecho, concentración del material en suspensión, parte efectiva de la concentración del material en suspensión.

Se requeriría, pues, conocer todos estos factores a fin de establecer una ecuación para el cálculo del gasto sólido de fondo. Pero para aspirar a esto debemos aceptar un flujo permanente, uniforme, bidimensional y en el que todas las características del fluido, de los sólidos y del contorno sean claramente definidas. En un canal de laboratorio se puede buscar todas estas condiciones.

Es lo que hicieron Meyer-Peter y Müller y todos los investigadores sobre el tema. Mediante un largo proceso de aproximaciones sucesivas, experiencias, simplificaciones e hipótesis se llega finalmente a una fórmula para el gasto sólido de fondo. En general esta fórmula es excelente en la medida en la cual la apliquemos a otro canal de laboratorio, con el mismo o idéntico material sólido e iguales características de los diecisiete parámetros. Esto puede simplificarse por medio del análisis dimensional y, entonces, basta con reproducir los parámetros adimensionales característicos de la información. Pero, ¿qué ocurrirá si pretendemos aplicar esta fórmula a la realidad? En un río no hay movimiento permanente ni uniforme, especialmente en las épocas de mayor caudal que es cuando nos interesa la determinación del gasto sólido. El agua no es la de laboratorio, las concentraciones son variables, las partículas tienen diversidad de formas y tamaños, la temperatura del agua no es constante y el flujo es tridimensional. La riqueza y exhuberancia del mundo natural sólo obtiene, en los diecisiete parámetros y su fórmula, un modelo que se parece al original, pero que no logra aprehender su magnificencia.

#### EL CONCEPTO DE SIMILITUD

Debe ser aspiración del investigador que el modelo hidráulico reproduzca lo más fielmente posible las condiciones de la naturaleza. Sin embargo, nunca puede lograrse la reproducción total y perfecta de un fenómeno hidráulico. La complejidad del mundo natural es tal, que modelo alguno puede reproducirla con absoluta fidelidad.

Admitida la imperfección del modelo no nos queda otro camino que la simplificación. Si no podemos reproducir en su totalidad la complejidad del mundo natural, busquemos, por lo menos, la reproducción parcial y tratemos de lograr en ésta la mayor semejanza posible, que sea compatible con los fines prácticos que buscamos.

De acá la importancia de la selección adecuada de las escalas del modelo. El criterio de similitud, y como consecuencia las escalas del modelo, debe escogerse de tal manera que el fenómeno particular investigado quede correctamente representado. En principio no hay investigación en modelo para resolverlo todo. La investigación debe ser específica.

La esencia de la teoría de los modelos consiste en aceptar el principio de similitud, llamado también de semejanza.

El principio de similitud se basa en que las conclusiones obtenidas del análisis de un fenómeno son aplicables a otro fenómeno. Cuando esto es cierto se dice que entre ambos hay similitud.

Cuando Galileo comprendió que las leyes de la caída de los cuerpos podían estudiarse por medio de su deslizamiento sobre un plano inclinado estaba introduciendo el concepto de similitud en la física experimental.

Examinemos un caso concreto: dos ríos, uno grande y otro pequeño. No existe, en principio, ningún fundamento que nos permita suponer que entre los escurrimientos de ambos haya similitud hidráulica. Aún más, la experiencia nos dice que no la hay. Pero, si en un laboratorio de hidráulica se construye un modelo, cuyas escalas han sido convenientemente escogidas, si puede razonablemente decirse que entre el río de la naturaleza y el modelo hay similitud hidráulica. Por lo menos en determinados aspectos del escurrimiento.

Sin embargo, la similitud entre un río y su modelo no es total ni absoluta. Por el contrario, es parcial y relativa.

La similitud total no existe. Los fenómenos tendrían que ser absolutamente idénticos en el tiempo y en el espacio.

En un determinado fenómeno hidráulico, como podría ser el conocido caso de la rápida seguida de una poza disipadora de energía, decimos que es posible construir y estudiar un modelo hidráulico en la medida en la que de él se puede obtener información extrapolable a las condiciones naturales. Podría ser el caso de la longitud del salto. El valor obtenido en el modelo puede transformarse por medio de las escalas a valores naturales. El resultado es por lo general razonablemente correcto.

La selección de escalas lleva implícito el concepto de similitud. Si lo que deseo es reproducir y estudiar un salto hidráulico, entonces, no puedo ignorar el hecho teórico que nos dice que la relación entre los calados antes y después del salto es una función del número de Froude incidente. En consecuencia, la condición de similitud es que el número de Froude sea igual en el modelo y en la Naturaleza. El número de Froude se constituye así en el Parámetro Característico de Información (*PCI*).

Pero, si lo que debo estudiar es la pérdida de carga en un conducto hidráulicamente liso, no puedo ignorar el hecho teórico de que este fenómeno está escrito esencialmente por el número de Reynolds. Por lo tanto, para estudiarlo en un modelo hidráulico debo escoger las escalas de modo que se cumpla el criterio de similitud basado en aceptar que el número de Reynolds del modelo sea igual al número de Reynolds de la naturaleza (o del prototipo). El número de Reynolds se constituye así en el Parámetro Característico de Información.

Ampliando el análisis podría examinarse el caso en que interese estudiar el transporte de sedimentos, o la propagación de olas, o cualquier otro fenómeno hidráulico. En principio cada fenómeno tiene su propio criterio de similitud. En algunos casos es más específico. No es lo mismo reproducir el transporte sólido en suspensión que el transporte sólido de fondo; así como tampoco son iguales los criterios para representar los diferentes aspectos del oleaje.

Debe, pues, necesariamente escogerse un aspecto del fenómeno. No es posible reproducir la totalidad. El modelo es útil en cuanto nos da información sobre la reproducción de un aspecto particular de un fenómeno complejo.

La selección de escalas, es decir la aceptación de un criterio de similitud, se basa esencialmente en el conocimiento de las leyes físicas que gobiernan cada fenómeno.

En algunos casos se ha debido recurrir a más de un modelo hidráulico para estudiar otros tantos aspectos de un problema. Cada modelo tiene su propio criterio de similitud, basado en su objetivo particular.

Escogido adecuadamente el criterio de similitud y las escalas logramos reproducir un fenómeno en un modelo reducido. Será inevitable, sin embargo, que aparezcan en el modelo ciertos efectos que no pueden extrapolarse a la realidad, que no constituyen reproducción de la naturaleza. Se han originado exclusivamente en el modelo. Son los llamados efectos de escala. Dado que un modelo hidráulico es en general más pequeño que su prototipo y los calados son reducidos, podrían aparecer en el modelo fenómenos debido a la tensión superficial, por ejemplo.

El estudio de los efectos de escala es sumamente importante para la correcta interpretación de los fenómenos observados en el modelo.

En los modelos distorsionados se presentan con mayor frecuencia efectos de escala y debe prestarse especial atención a su estudio e interpretación.

## LA DISTORSIÓN

Se dice que un modelo es distorsionado cuando las escalas horizontal y vertical son diferentes. Esto hace que el modelo se parezca menos a la naturaleza. La participación geométrica es restringida.

Algunos autores entienden la distorsión de una forma más amplia. Así por ejemplo, si para reproducir en modelo las arenas de un río se usa un material plástico, de menor peso específico, se podría decir que hay una distorsión de los pesos específicos. También se habla de distorsión si se cambia el fluido. Un problema de flujo en tuberías lisas puede estudiarse utilizando aire en lugar de agua, conservando el número de Reynolds.

Sin embargo, acá nos limitamos a definir la distorsión desde el punto de vista geométrico: distorsión es la relación entre las escalas horizontal y vertical.

La distorsión es un recurso frecuentemente usado en modelos fluviales y marítimos. El significado físico de la distorsión es tener, en el modelo, tirantes mayores que los que habrían, si las escalas horizontal y vertical fueran iguales.

La ventaja que ofrece la distorsión en los modelos de lecho móvil es la de aumentar la velocidad de la corriente y, por consiguiente, su capacidad de transporte de sedimentos. Un modelo distorsionado permite obtener resultados más rápidos, y por lo tanto, más económicos. Para estos efectos la escala de tiempos morfológicos es muy favorable.

Debemos, sin embargo, tener presente que un modelo distorsionado corresponde a una esquematización, en virtud de la cual, el modelo sólo ofrece resultados confiables y representativos en determinados aspectos, fuera de los cuales los resultados no son extrapolables.

Como una muestra de las reservas y limitaciones de un modelo distorsionado recordemos el ejemplo propuesto por el profesor Escande: "un vertedero de cresta viva, funcionando con una carga  $h$ , con velocidad de aproximación despreciable, puede ser considerado como su propio modelo en una transformación que afectará únicamente la escala horizontal sin modificar las medidas verticales. Esta transformación no alterará evidentemente las trayectorias. Es decir que éstas permanecen constantes a pesar de la distorsión".

Un problema que se presenta frecuentemente en la construcción de modelos es la reproducción correcta del coeficiente de resistencia. Por lo general se requiere en un modelo de superficies muy lisas. En los modelos distorsionados ocurre lo contrario. El modelo debe ser más rugoso que el prototipo.

Debe tenerse mucho cuidado antes de decidir la distorsión de un

modelo. Hay fenómenos que por su propia naturaleza no pueden estudiarse en un modelo distorsionado. Así por ejemplo, se puede estudiar la refracción en un modelo distorsionado, pero no la difracción de las olas.

La distorsión debe ser limitada, y muy bien estudiada. No se debe perder de vista que a medida que la distorsión aumenta, el modelo se aparta más de su prototipo, participa menos de sus cualidades esenciales, el criterio de similitud se vuelve menos preciso, aparecen más notablemente los efectos de escala y nos alejamos cada vez más de la realidad.

#### EFFECTOS DE ESCALA

El modelo es una reproducción parcial del prototipo. Los resultados de una investigación en modelo están siempre sujetos a interpretación. Sólo un modelo a escala 1:1 nos daría una reproducción total y perfecta.

El modelo debe reproducir correctamente las partes que corresponden al criterio de similitud escogido. Pero es inevitable que el modelo a su vez, se comporte como un fenómeno hidráulico propio. Así por ejemplo, si reproducimos en modelo un cauce móvil, de modo de lograr similitud en el arrastre de material de fondo, será inevitable que el modelo se comporte también como un río. El río-modelo tiene que comportarse de acuerdo a las leyes de la Hidráulica Fluvial. Entonces aparecerán en él ciertos fenómenos que no corresponden a la naturaleza. Son propios del modelo. Son expresiones de su comportamiento que trascienden el ámbito del parámetro característico de información escogido. A estos fenómenos se les denomina efectos de escala.

Supongamos que se construye el modelo de un vertedero, y que por razón de las escalas utilizadas la altura de agua sobre el vertedero resulta muy pequeña. En estas condiciones se producirá en el modelo una influencia de la tensión superficial mucho mayor que en el prototipo.

En muchos casos puede ocurrir que los resultados no sean fácilmente expresables a la escala del prototipo. Esto se ha resuelto en algunas situaciones, recurriendo a la construcción de varios modelos a diferentes escalas, hallándose por extrapolación el resultado correspondiente al prototipo. A esto se llama el empleo de micromodelos.

Un ejemplo muy claro de los efectos de escala aparece al reproducir un área más o menos grande. Por ejemplo la desembocadura de un río y parte de la costa vecina. Si construimos el modelo de acuerdo a la ley de Froude tendremos que éste adquirirá una pendiente transversal que es debida a la aceleración de Coriolis y que no estará a escala con la pendiente que existe en la naturaleza.

El análisis y consideración de los efectos de escala es, pues, fundamental para asegurarnos que parte del modelo es efectivamente una reproducción de la realidad.

Cuando en el laboratorio proyectamos, construimos y operamos un modelo hidráulico estamos dando existencia a una nuevo ser, que tiene su propia personalidad, su propia realidad.

El modelo de un canal es un canal. Nuestra aspiración es que represente al canal, al gran canal que estamos estudiando.

El modelo-canal adquiere existencia propia, está en el campo gravitacional terrestre, se comporta de acuerdo a sus leyes que para él son naturales y para nosotros, condiciones impuestas. De su comportamiento tenemos que obtener información que sea útil y verdadera. ¿Será esto posible? Sí, siempre que recordemos que el modelo es una hechura de laboratorio que tiene existencia propia.

#### REFLEXIÓN FINAL

A través de este trabajo se ha tratado de ubicar al modelo hidráulico en su justo medio, dentro de la investigación y la ingeniería. El modelo hidráulico no es un elemento mágico que resuelve todos los problemas. Es una ayuda, en algunos casos importantísima, para que el investigador y el diseñador encuentren la solución a su problema particular.

Los resultados de un modelo hidráulico no pueden comprenderse desligándolos del modelo matemático que se pretende representar.

Los resultados del modelo físico y del modelo matemático son los personajes de un diálogo permanente. Si la comunicación se interrumpe, los resultados se vuelven brumosos y frágiles.

A pesar de sus limitaciones, el modelo físico es una de las herramientas más valiosas con que cuenta la ingeniería contemporánea. En algunos casos nos da una solución más económica. En otros, una solución con un mayor grado de seguridad. El costo de un modelo es insignificante con respecto a las ventajas que otorga.

Todo lo anterior es válido en la medida en la que se tenga una idea muy clara y precisa sobre el concepto de similitud, de las limitaciones y posibilidades de los modelos hidráulicos y de su permanente e inevitable vinculación con la realidad, con el mundo natural. Si no tenemos firmes los conceptos fundamentales y no logramos en un modelo hidráulico la adecuada representación de lo real, estamos entrando en el peligroso terreno de la fantasía. Llamar la atención sobre este hecho ha sido el objetivo de este trabajo.