

EL CENTRO DE ESTUDIOS HIDROGRÁFICOS Y EL DESARROLLO DE LA HIDRÁULICA EN ESPAÑA

Cristóbal Mateos Iguácel (1938-2022)

En mayo de 2022 falleció en Madrid Cristóbal Mateos. Nacido en Jaca en 1938, fue director del Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos durante casi 20 años. Participó en más de 300 estudios de obras hidráulicas y actuaciones fluviales y dirigió los trabajos de experimentación hidráulica de algunas de las más importantes presas construidas en España durante la segunda mitad del siglo XX, destacando sus avances en el diseño de aliviaderos escalonados. Participó como perito en algunas de las principales catástrofes sufridas en España, como la rotura de la presa de Tous. Dirigió estudios de modelos fluviales complejos y de gran tamaño y numerosos estudios singulares, como los referidos a diques secos, estaciones de bombeo, puertos fluviales, centrales hidroeléctricas o centrales nucleares. Cristóbal Mateos fue, sin duda, una de las figuras más relevantes del CEDEX.

En 2013 Cristóbal Mateos pronunció una conferencia sobre el Centro de Estudios Hidrográficos y el desarrollo de la hidráulica en España. La conferencia tuvo lugar en el salón de actos del Centro y formaba parte de un ciclo conmemorativo programado para celebrar el 80º aniversario de su creación. En la conferencia Cristóbal hizo un recorrido a través de la historia del Laboratorio de Hidráulica del Centro, en el que se refirió a los proyectos más relevantes y a las personas que colaboraron con él durante todos esos años. Aunque la conferencia ya fue publicada en un libro conmemorativo, su interés histórico y el carácter personal que Cristóbal le imprimió han hecho que el CEDEX haya decidido su reproducción íntegra en la revista Ingeniería Civil como recuerdo y homenaje a la figura de Cristóbal Mateos.

Introducción

Me solicitó Federico Estrada que hablase del Centro de Estudios Hidrográficos y del desarrollo de la Hidráulica en España. Yo escribí unas cuartillas de las cuales no ha quedado nada, o sea que aquí sale una presentación que tiene poco que ver con lo que yo quería decir, pero sí con lo que tenía obligación de decir.

Cuando me hizo esa sugerencia, yo lo percibí como un encargo para bucear en mis recuerdos. Entonces lo primero que me vino a la mente fue este libro, que me había regalado mi familia hace dos o tres años, de título *Memorias de ultratumba*, porque todas las memorias de 50 años son de ultratumba. Pero en este caso, con lo que han cambiado las cosas, que van un poco más deprisa que en tiempos de Chateaubriand, son realmente unos recuerdos complicados, menos mal que he encontrado papeles que han ayudado un poco. Bien, pues las razones que me han llevado a traer aquí este libro, aparte de su título que puede ser el subtítulo de la conferencia, son las virtudes que tenía Chateaubriand. Las virtudes que Chateaubriand se reconocía a sí mismo, y

que él ya anticipaba que eran unas virtudes que no todo el mundo las estima como tales, las traigo a colación porque yo también creo tenerlas en mucha menor medida, pero también. Las dos virtudes eran: muy buena memoria, la mía es buena solo y ahora ya ni eso, y la segunda era una afición a las matemáticas. Cumplidas esas virtudes en el caso de Chateaubriand daban en el citado título para 2.500 páginas de texto denso, en mi caso dan para este otro subtítulo: "recuerdo casi todos mis errores". Claro está que recuerdo casi todos mis errores por eso, por una cierta capacidad analítica para saber que son errores, y luego porque la memoria ayuda a mantenerlos presentes. Ya que he mencionado esto, algunos dirán que estoy tirando piedras contra mi tejado. No es así, los errores son muy negativos en las fases teóricas pero suelen ser muy positivos en las experimentales. Digo esto porque me viene a la memoria lo que dijo el restaurador de la teoría de los vórtices, Clifford Truesdell, que haciendo una crítica de un artículo señala: "este artículo tiene 34 errores ninguno de los cuales es original". Ciertamente para él esto último era lo peor, pues los errores teóricos ya tiene uno que saber que los ha cometido otro y no hay que repetirlos, pero sin embargo en la vía experimental estamos más en lo que sucedía con



Figura 1. *Memorias de ultratumba*.



Figura 2. Presa de El Villar (izda.) y presa de Gohonmatsu (dcha.).

Edison, cuando le decía su adjunto “llevamos 80 intentos para inventar una cosa que dé luz y no sabemos nada, estamos como el primer día”; y le repuso Edison “No, ya sabemos 80 cosas que no funcionan”. Son ambos puntos de vista con los que se deben de valorar los errores.

Para hacer una historia de esta Casa en los aspectos hidráulicos, me voy a remontar un poco al siglo XIX que es cuando se crea el cuerpo de Ingenieros de Caminos. Aquí, a la izquierda, tenemos la presa de El Villar que es una de las muchas presas construidas en el siglo XIX siguiendo la tradición de que las presas más altas del mundo estaban en España, ésta por unos años no llegó a serlo, pero podía haberlo sido; y como prueba de su mérito aquí tengo la presa de Gohonmatsu en Japón que es una copia unos dirían hábil yo diría fiel de la del Villar. Esta fotografía se la tengo que agradecer a Fernando Sáenz hoy aquí presente.

También quería hablar de los investigadores hidráulicos en los siglos XVIII y XIX, escindidos en dos ramas. Aunque hay muchos más, yo he querido poner aquí a Lagrange, que impulsó la visión material –él fue el que la trabajó más a fondo- de los movimientos de los fluidos; a Chezy y Manning, que fueron los que introdujeron los conceptos monodimensionales como puede ser la fricción; a Fourier y Froude, que aportaron una visión más profunda que la de Newton a la teoría de la dimensión y

orientaron el camino de lo que venía; a Navier y Stokes, que crearon su ecuación, eso sí dejándonos un problema envenenado (todavía hay un premio de un millón de dólares para el que sepa decidir si en ciertos supuestos un flujo inicialmente laminar se mantiene así todo el tiempo). Ligado a ellos quiero citar aquí a Reynolds, que fue el primero que trató de hincarle el diente, haciendo medias, a la ecuación de Navier y Stokes; Saint-Venant, que la redujo a una ecuación simplificada más sencilla y pudo dar alguna solución; y luego Kelvin y Helmholtz, que fueron los que trataron los remolinos. En el caso de Kelvin los trató con tanto amor que elaboró una teoría atómica en la cual los átomos eran remolinos. Remolinos entrelazados de maneras muy complicadas, con tres lazos (supuestamente el hidrógeno), con cuatro lazos (el helio), etc.

James Lighthill, gran teórico en Mecánica de Fluidos (sucesor de Newton en la cátedra lucasiana y que dimitió para dar paso a Stephen Hawking), hizo una crítica de estos autores: “En el siglo XIX los dedicados a los fluidos se dividían en dos especies: ingenieros hidráulicos que observaban lo que no se podía explicar, y matemáticos que explicaban lo que nadie podía observar”. Esa crítica, siendo severa era verdad. Aunque tal vez fuese un poco injusta (ellos eran conscientes de su situación), era especialmente injusta con Froude, porque él era hidráulico



Figura 3. Presa de las Tres Gargantas.

ingenieril y matemático, y se llevaba las bofetadas en los dos carrillos al no poder unir las dos vías; bien es verdad que tenía un temple evangélico, porque su padre era obispo, anglicano, y sus dos hermanos también eran obispos, o sea que tenía una vena familiar que le habría preparado para esa situación.

De aquí procede pasar al comienzo del siglo XX con tres autores destacados. Justo a su inicio se produjeron los primeros modelos de obras hidráulicas con criterio científico. Los modelos realmente vienen existiendo, con mayor o menor acierto, desde los primeros imperios agrarios. Desde China a los mayas, pasando por todos los demás, todos tenían modelos, pues en ellos las obras hidráulicas eran el fundamento del Estado. Unos modelos que servían para tener una idea de cómo se comportaba el agua. Y el hablar de esos modelos me da pie para hacer una salida del curso de esta exposición.

Decía que iba a hacer una salida de curso, o sea una excursión, volveré al curso enseguida, y en esta excursión voy a citar al que Fernando Sáenz también llamaría un ingeniero extravagante (que se sale de su curso previsible). Aquí tenemos la presa de las Tres Gargantas, que está en uno de esos que fueron imperios agrícolas primitivos. El presidente de la república en el momento de la terminación de la presa era Hu Jintao, que era y sigue siendo un ingeniero hidráulico; un ingeniero extravagante en la terminología de Fernando. Y además nos da dos lemas, la ingeniería hidráulica permite llegar a destinos más altos (hay otros casos similares), sobre todo si se tiene afición política, y luego que realmente algunas cosas en cinco mil años no han cambiado tanto.

La hidráulica al comienzo del siglo XX

Vamos a ver aquí al autor de los primeros modelos físicos de obras hidráulicas. En la foto vemos en Madrid al propio Rehbock en primer plano, con Enrique Becerril, situado éste a la derecha de la foto y del cual hablaré más extensamente.

La idea de Rehbock era pasar de la analogía, que era lo que se hacía en tiempos antiguos (incluso modernos), a la semejanza, es decir que haya una proporción exacta (con margen de error conocido) entre lo que se mide y se observa en el modelo y lo que se podría observar en la realidad. Para eso se apoyó en los trabajos de Fourier y Froude y luego recibió una consolidación con los trabajos de Buckingham.

Quería yo hablar también aquí de causas y consecuencias. La causa de que tuviese éxito Rehbock, aparte por supuesto de su talento, es una causa técnica. Los modelos que tenía que realizar él para sus problemas eran modelos de lo que se llama escala de Froude. La escala de Froude tiene una virtud; si, por ejemplo, hace el modelista un modelo a escala geométrica 100, los caudales van a escala 100.000. Eso quiere decir que incluso caudales altos, vamos a decir, de 20.000 metros cúbicos por segundo en prototipo se pueden resolver con 200 litros por segundo en modelo (además la altura de bombeo se reduce 100 veces) y la modelización es factible. Si no hubiese sido así, si por ejemplo hubiese sido necesario aplicar la semejanza de Reynolds la escala de caudales sería 100 y los ensayos serían inviables en la mayoría



Figura 4. Theodor Rehbock.

de los casos. La otra causa de que los modelos hidráulicos puedan funcionar es que el agua tiene muy poca viscosidad; si el agua fuese un fluido más viscoso, tampoco habría sido posible aplicar con escalas prácticas la semejanza de Froude. Esas son las causas. La consecuencia fue que los modelos de Rehbock fueron un éxito. Tardaron un poco en ser aceptados por la resistencia o desconfianza en torno al rigor de la semejanza, pero en cuanto fueron aceptados había legiones de ingenieros de distintos países, sobre todo americanos, formándose en el laboratorio de Rehbock en los años 20.

Ahora vamos a hablar de otra de las figuras de los primeros momentos, esto es, de los años 4 y 5 del siglo. Con Ludwig Prandtl aparecen dos ideas revolucionarias. La primera es la idea de la capa límite, que rompía el modelo de las ecuaciones de Navier y Stokes. La concepción de la capa límite es que la ecuación de Navier y Stokes se acepta para una zona - la que está cercana a la superficie que está en contacto con el fluido y lo delimita - y para el resto se aplican las ecuaciones del fluido perfecto, no solo mucho más sencillas, sino además de menor orden y por tanto de soluciones mucho más fáciles. Esa propuesta fue una revolución con tantísimo éxito que la idea de capa límite se ha aplicado ya a partir de Prandtl a varios tipos de ecuaciones en derivadas parciales. Con este planteamiento se fragmenta el problema, la solución más fácil queda para la parte lejana al contorno y la zona difícil es la que se trabaja con la segunda idea revolucionaria: la longitud de mezcla. No voy a entrar mucho en detalles, pero realmente la simplificación que había hecho Reynolds no era viable (tal cual) porque pedía más ecuaciones de las que tenía. Las ecuaciones que faltaban se sustituían con esta idea de Prandtl de masas fluidas que se entrecruzaban (con cierta similaridad al movimiento molecular).

Vamos a hablar del tercero de esos momentos, ya un poco más tarde: Theodore von Karman, discípulo de Prandtl, del cual hablaba con un cariño mixto. Lo traigo aquí por tres aportaciones: la primera es la solución matemática a las ondas de choque y difusivas, una solución matemática que era realmente difícil de pensar que podía existir, pero que existía y es la que realmente me ha incitado como seguidor de esa corriente. Luego tenemos la teoría de la emisión y estabilidad de remolinos,

que es un análisis del comportamiento de los fluidos y su interacción con ciertos obstáculos, y por último la teoría de la fricción - resumida en la constante de von Karman, que forma parte de una fórmula universal - para la ley de velocidades cerca del contorno.

Los inicios de la hidráulica experimental en España

Y ya puedo pasar a hablar un poco de lo nuestro. En la Escuela de Caminos, en los años 20, estaba como catedrático de hidráulica aplicada D. José Luis Gómez Navarro, y dentro de su responsabilidad estaba la construcción hidráulica, de la cual Gómez Navarro era un gran tratadista, conocido por todos los que saben algo de obras hidráulicas. Con él estaba D. Antonio del Águila, también muy conocido en aquel tiempo, que era un proyectista y constructor de mucho éxito. Éste encomendó a Enrique Colás la ejecución del Laboratorio de Hidráulica con fines didácticos, claro está. Poco después entró como catedrático de hidráulica Pedro González Quijano y a su estela entró Enrique Becerril. Éste en seguida, a los dos o tres años, propuso hacer, siguiendo las ideas de Rehbock, un primer modelo físico en España y así, en 1927, hicieron el modelo de la presa del Charco del Cura que es la que se ve en la imagen. El modelo lo realizó Enrique Becerril con la colaboración de Rafael Spottorno, partiendo de un proyecto que era de Becerril y del Sr. Peralta.

Decir que tanto Antonio del Águila como Enrique Becerril y Rafael Spottorno, casi cuarenta años después, fueron profesores míos, y de otras personas que están en esta sala, y todavía recuerdo la voz ronca del primero cuando nos hablaba del bordillo triangular en la salida de los cuencos de presa y las virtudes que tenía.



Figura 5. Presa de Charco del Cura (Foto SEPREM).

La ampliación y reorientación del Laboratorio de Hidráulica

En el año 1941 Enrique Becerril sucede a Pedro González Quijano. Con esa sucesión y con el hecho de que había dejado de ser secretario de la Escuela, con lo cual tenía un poco más de libertad de movimientos, y que había un espacio disponible en la casita que se ha

mencionado, empezó a hacer ya un laboratorio de hidráulica genuino, aunque ciertamente con muy poco espacio, y aquí vemos algunos ensayos.

El primero de esa etapa es la presa de Alloz. Estaba situada en un cauce con la sección que vemos aquí y a Enrique Becerril se le ocurrió que si lo partía por la mitad podía meter esa mitad en un canal de vidrio, que era una herramienta del laboratorio y podía además duplicar el tamaño, quiero decir sacar el doble de partido del caudal de trabajo, y además visualizar muy bien (por el lateral) el flujo. En la imagen se percibe que se ve lo que sucede mucho mejor que si hubiese colocado en el canal un modelo que no hubiera usado esa simetría. Éste fue el primer ensayo documentado del Laboratorio. En él se ve el bordillo de D. Antonio del Águila y luego están marcados unos crestones de roca que tenía el terreno, los cuales se reprodujeron fielmente.

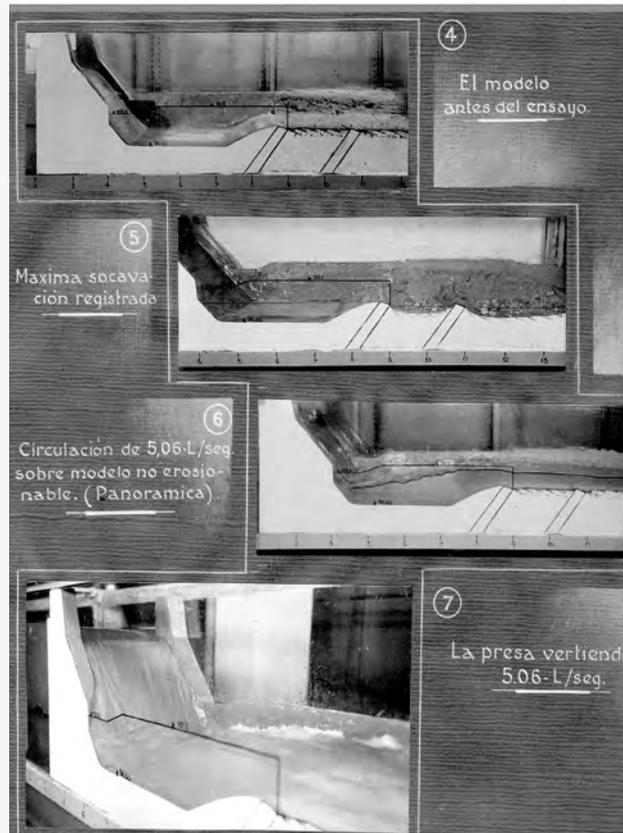
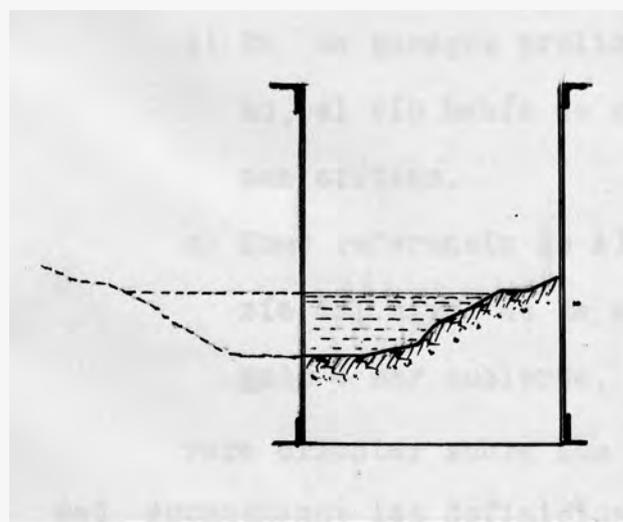


Figura 6. Sección del cauce y modelo de la presa de Alloz.



Figura 7. Encauzamiento de los ríos Besaya y Saja.

Vamos a ver otro ensayo, éste es un encauzamiento. Vemos primero que en la situación natural con $1.850 \text{ m}^3/\text{s}$ la fábrica de Sniace estaba inundada por el desbordamiento del río, y luego cómo con un dique en la margen izquierda se podía proteger la fábrica y por último con dos diques se protegían las dos márgenes. Aquí solo llegamos a $1.500 \text{ m}^3/\text{s}$, no porque no lo ensayasen con $1.850 \text{ m}^3/\text{s}$ sino porque la fotografía correspondiente ha desaparecido, pues han pasado 70 años.

Vamos a ver otro caso: la presa de Venda Nova. Éste es el primer trabajo encargado desde el extranjero (Portugal). El proyectista es el famosísimo André Coyne, que era especialista en trazar bóvedas. El modelo fue a una escala muy pequeña y Becerril advierte en sus conclusiones que el alcance del chorro podría ser un poco distinto del que salía en el modelo, pero que había margen para cubrir ese error.

Aquí tenemos otro modelo: la presa de Yesa. Yo con esta tengo una especial vinculación, no solo porque está en mi tierra, sus aguas inundan unas parcelitas de mis hermanos -casi una anécdota a la cual aludir-, sino sobre todo porque el autor del proyecto, René Petit, era muy amigo de mi padre. El proyecto se hizo con dos modelos, uno a escala 100 en Madrid, cuyo modelo estudiaba variantes que se iban mejorando, y luego un modelo a escala 1:20 en el cual se recogía lo que el otro modelo había mostrado que era acertado, que se hizo en obra. En él se puede ver la embocadura que era muy parecida a la de una fracción de morning-glory pero con un trazado inclinado del pozo. La razón era que Becerril había estado en el laboratorio de Denver, había visto el experimento del



Figura 8. Presa de Venda Nova.

pozo vertical de otro morning-glory y no le había acabado de convencer y pensó este tipo de solución. Tenemos también el cuenco de salida al que por la mucha fricción que había en el modelo tuvieron que bascarlo. Vemos asimismo que el flujo va en régimen rápido, lo que se traduce en unas condiciones singulares del flujo que va con ondas transversales a lo largo del canal y eso se ve reforzado también por la curva en planta del canal.

Vamos al siguiente trabajo que he querido distinguir, un dique seco que se estudió para el Puerto de Barcelona. Por un lado, vemos el molde de la pieza clave, el dissipador de energía, y, por otro, el modelo que yo llegue a ver en funcionamiento. El agua entraba por gravedad



Figura 9. Presa de Yesa.





Figura 10. Dique seco del puerto de Barcelona.

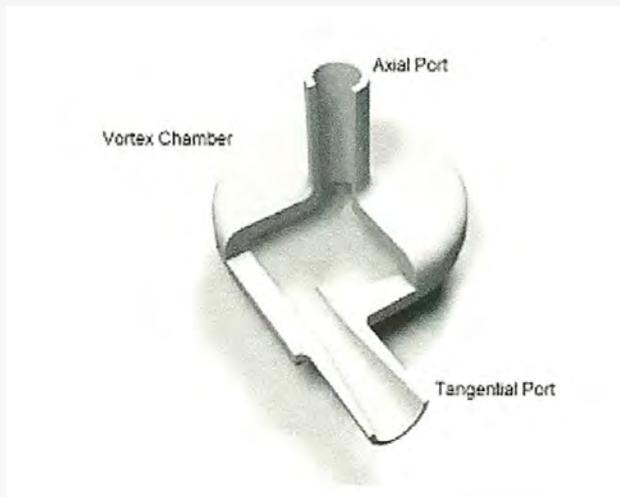
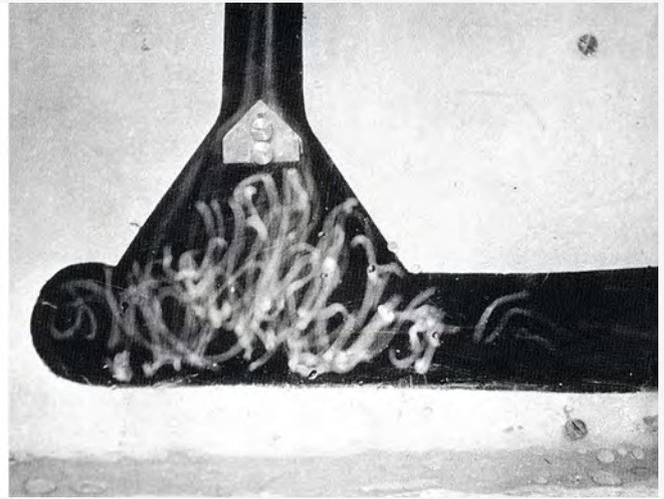


Figura 11. Diodo de vórtice.

en su boca superior y de ahí pasaba al dique seco por el ramal inferior. La entrada en el dique seco era de una manera un poco singular – por tongadas - que, si hubiese habido una foto para verlo, sí que me habría gustado presentarlo, porque era muy ilustrativo de las peculiaridades de la hidráulica y de cómo un proceso continuo

puede tener una imagen discontinua, pero no es el caso pues no se ha podido encontrar esa imagen.

Quiero decir otra cosa de este instrumento, Enrique Becerril lo patentó para el Laboratorio. Las patentes en hidráulica sirven sobre todo para dejar la prioridad establecida, pero luego para protegerte de las copias más bien valen poco, y como ejemplo de eso aquí tenemos el instrumento que aparece en la imagen siguiente. En los años setenta y tantos, quince años después a lo mejor de estar esto patentado, los estrategas de la Destrucción Mutua Asegurada (en inglés, MAD) pensaron que sus dispositivos electrónicos en los cohetes intercontinentales tenían el peligro de que un pulso electromagnético nuclear los podía estropear. Entendieron que había que dar otra solución y concibieron una disciplina que ya a partir de aquel momento recibe el nombre de fluidica, es decir, reproducir, no con electrones, sino con otras partículas -por ejemplo, partículas de agua-, los artilugios típicos de la electrónica: los diodos, los triodos y los biestables (aquí construimos un biestable, por supuesto, por otros motivos). Vemos en la imagen que el diodo de vórtice es un calco del invento de Becerril y que aprovecha la misma idea, provocar una considerable pérdida de energía en un sentido y permitir paso al contrario.

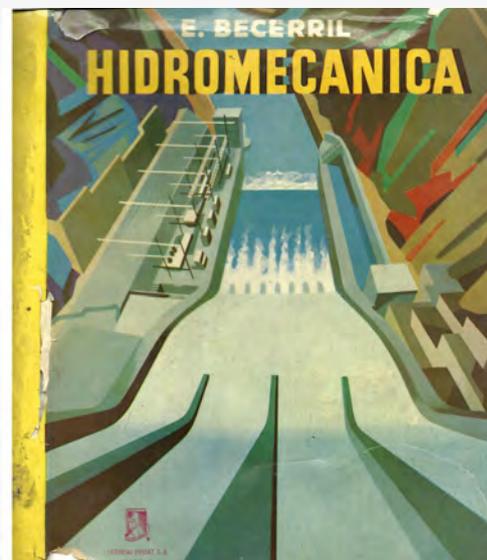


Figura 12. Enrique Becerril. *Tratado de Hidromecánica.*



Figura 13. Presas de Salime (izda.) y Hatanagi (dcha.).

Seguimos y ahora, ya que he hablado de Enrique Becerril y Antón Miralles, vamos a presentar su imagen. Aquí tenemos la presa de Salime, de la que fue proyectista y también estudió el modelo. Presa de la cual estaba tan satisfecho como para que fuese la portada de su tratado de *Hidromecánica*. El tratado tuvo una gran difusión no solo en España sino en toda Iberoamérica; han pasado muchos años ya, pero es una obra completa. A don Enrique le pasó lo mismo que les había pasado a Boix y Morer con la presa del Villar: durante la construcción de la presa tenía unas amables legiones de japoneses muy interesados por visitar la obra y aquí está el resultado, la Presa de Hatanagi, que tiene el detalle de colocar el equipo de transformación a la izquierda en vez de a la derecha, pero por todo lo demás sigue exactamente la idea de Becerril de recolocar dentro del cuerpo de la presa los alternadores, turbinas, etc.

Nacimiento y evolución de otros laboratorios españoles

Becerril ya en aquellos momentos sentía que su laboratorio era muy pequeño, por lo que tenían que hacer muchos ensayos en otros lados y, efectivamente, al lado de muchas presas se construían sus modelos. Por éste y otros motivos fueron surgiendo en España nuevos laboratorios. De una forma especialmente sistemática está el caso de Iberduero. Iberduero había construido la presa de Ricobayo, y se encontró con que el vertido hacía un hoyo, no sé si de 80 o 100 metros –terrorífico-. Para ver cómo controlar ese hoyo, decidieron que tenían que estudiarlo ellos personalmente y montaron un laboratorio que fue iniciado en 1943 por Javier Rodríguez y fue llevado después por Pedro Lucas Palazuelo y José Luis Blanco Seoane, que es el que me ha facilitado los datos y que lo llevó desde los años 70 hasta su jubilación. Se realizaron más de 100 estudios y actualmente está convertido en un museo no de la hidráulica sino de la electricidad; tiene cosas de hidráulica, pero como una parte.

Pasamos a otro laboratorio, esto es, al laboratorio de Bornos. Hecho inicialmente para la presa de Bornos y concebido por Jaime Arráez, ese laboratorio estuvo durante un tiempo incorporado al CEDEX. Luego, ya no sé cómo, se desincorporó y está adscrito a la Confederación

del Guadalquivir. Lo llevó, después de Arráez, Enrique Grosso Casalini, que se había formado con nosotros.

Y vamos al siguiente, que es el de Mariano Fernández Bollo. Este laboratorio, que además de la hidráulica tenía otras facetas, se hizo en Madrid. Casualmente un familiar mío lo construyó. Fue absorbido por el Centro de Estudios Hidrográficos y tras la absorción lo llevo Jaime Riera para culminar los ensayos en curso. Ya está cerrado.

El siguiente es el laboratorio de ENHER, en Ribarroja, que fue creado por una decisión de Genaro Millet. Lo llevó desde los primeros momentos Miguel San Vicente, que es un ingeniero hidráulico español trasladado de niño a la Unión Soviética, en la que se formó, y que cuando fue posible vino a España y se incorporó a ENHER. También como los anteriores hizo una labor importante, llevó unas cuantas presas para ENHER e incluso colaboró en temas de las centrales nucleares de Asco y Vandellós. El primer estudio que hicieron fue el de la presa de Mequinenza, por eso la he traído aquí. A la jubilación de San Vicente el material del laboratorio fue donado a la ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la UPC.

De estos cuatro laboratorios prácticamente todavía queda el de Bornos, pero con poca acción, porque hay pocas presas nuevas allí. Han desaparecido, pero han sido sustituidos por los laboratorios de las escuelas de ingenieros de caminos, e incluso por escuelas de ingenieros de montes y escuelas de ingenieros agrónomos, pues algunas de ellas también tienen laboratorios (por no hablar de las de navales, industriales y aeronáuticos, que tienen orientaciones más alejadas).



Figura 14. Presa de Mequinenza (Foto MAGRAMA).

El nuevo Laboratorio de Hidráulica en el Centro de Estudios Hidrográficos

La voluntad de Becerril de disponer de un nuevo laboratorio alcanzó su objetivo en 1963. En las fotografías se ven la antigua y la nueva sede del Laboratorio de Hidráulica. La nueva superficie es cuarenta veces mayor, una diferencia abismal, por ello hay que agradecerles a Enrique Becerril y a su subdirector Manuel Díaz de Rábago, que fue su sucesor, la visión de futuro suficiente para no hacer un laboratorio que fuese solo cinco o diez veces más grande que el anterior. Habían estudiado mucho el tema, habían visitado muchos laboratorios, y habían pensado mucho en las necesidades futuras, y pensando en esas necesidades hicieron este laboratorio estructurado en 3 naves y una sala. Una pequeña sala dedicada a estudios bidimensionales en canales de vidrio y que es solo algo mayor, como el doble, que la del laboratorio antiguo. Una primera nave, de 80 por 22 m., que es la de la foto, dedicada a ensayos de presas. Al fondo de ésta está la segunda nave, que es más grande que la primera y está dedicada a modelos de ríos. Al costado de la primera, detrás de la pared que se ve en la foto, está la tercera nave, que es más estrecha y más alta pues tiene colocado allí el tanque de nivel constante (que tiene que

estar en alto). Esta nave estaba pensada para ensayos especiales, concretamente se pensaba en ensayos de maquinaria hidráulica, bombas, etc.

Pues bien, esas eran las previsiones y en el cuadro siguiente puede verse lo que se ha hecho en el tiempo transcurrido desde el inicio de los ensayos exteriores. Se aprecia que efectivamente en presas acertaron plenamente, pues se han estudiado 272 presas. Para ríos y canales, 141 trabajos confirman que también se acertó con la nave 2. Sin embargo, la prevista dedicación preferente de la tercera nave a ensayos de bombas no cuajó. Salvo en contadas excepciones, los fabricantes de bombas, aunque reciben en el Laboratorio mejor servicio, prefieren probarlas ellos en unas condiciones más precarias y no han traído nada más que un par, prácticamente nada. Pero sí que han venido algunos problemas (cuyos ensayos aprovechan las condiciones singulares de esta nave) englobables en el concepto de mecanismos que se ha puesto en la tabla, y sobre todo en la línea de trabajos genéricos que luego se comentará un poco más.

He dividido en el cuadro la historia del Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos en distintos grupos de actividades que se recorrerán después. Un desglose más pormenorizado, por ejemplo de las presas, permitiría ver cómo ha ido variando su tipología



Figura 15. Antigua y nueva sede del Laboratorio de Hidráulica.

Años	Presas	Ríos y canales	Genéricos	Centrales nucleares	Mecanismos	Centrales	Estudios en prototipo	Modelos analógicos	Modelos matemáticos	Preparación y análisis de normativas
1941	55	5	3	0	3	0	0	0	0	0
1963	66	35	0	0	5	2	1	2	0	0
1976	31	9	0	14	4	3	2	0	0	0
1984	38	31	4	4	4	5	2	1	10	0
1993	51	45	11	1	3	1	2	0	4	0
2004	31	16	16	0	2	0	1	0	11	6
2013										
Total	272	141	34	19	21	11	8	3	25	6
Suma	540									

Figura 16. Tipos de trabajos realizados en el Laboratorio de Hidráulica.

y cómo con ella van variando los problemas hidráulicos consiguientes, pero nos alargaría demasiado. Comentar también una cosa del final de la tabla: allí están los modelos analógicos y los modelos matemáticos y aunque parece que hay pocos de ambos, en realidad los modelos analógicos y los modelos matemáticos están incorporados a la mayoría de los estudios como elementos auxiliares. En la tabla solo están reflejados los que tienen un informe autónomo de una acción específica.

Vamos a ver ahora otras actividades, antes de dar un repaso con algunos ejemplos de esos estudios. Vamos a poner más o menos uno de cada una, salvo en presas y ríos, que pondré un poco más para que el peso que tengan también esté relacionado con su trascendencia en la labor del Centro.

De la intervención en la pericia de catástrofes ya ha hablado antes un poco Felipe Martínez. Completar diciendo que la primera pericia que se hizo fue la de Ribadela. La hizo Enrique Becerril. En tiempos más modernos, además de la de Tous, se ha intervenido en Lorca, Arás y Badajoz.

Se han organizado muchos congresos, cursos, simposios. Cabe destacar el XXIV Congreso de la Asociación Internacional de Investigaciones Hidráulicas (IAHR), a iniciativa de Manuel Díaz de Rábago con el apoyo de Felipe Martínez. Quiero destacar, pues es de justicia, que Antonio Nieto fue el que llevó de la mano el Congreso con un equipo muy competente. La participación del Laboratorio de Hidráulica fue más en los temas técnicos y en presentar alguna ponencia que en la propia organización. El éxito fue lo suficientemente grande como para que los organizadores del Congreso siguiente, que fue en Japón, dijeran que ellos ni de lejos podían igualar nuestro nivel. Desde luego pusieron el suyo muy alto pero realmente no llegaron a igualar.

Gracias al empuje y persistencia de Felipe Martínez y los muchos apoyos que consiguió, se consiguió que cuando Delft Hydraulics renunció a mantener la sede de la IAHR (que mantenía desde su fundación en 1935), esta sede se trasladase al Centro, siendo yo el primer Secretario General de la nueva etapa, me ha sucedido hasta la actualidad Ramón Gutiérrez Serret.

También hay que incluir el apoyo y sede que se ha dado a varios cursos, congresos, simposios y talleres. Pero quiero señalar que todos ellos, aun los que se han reiterado varias veces, han sido celebrados de una manera intermitente, según las necesidades se han ido dando. Por ello quiero destacar las Jornadas de Ingeniería del Agua, con un calendario bienal, que han tenido hace una semana en Valencia su tercera edición, estando ya programada la cuarta en Córdoba. Quiero decir que su creación ha sido una labor de mi sucesor en la dirección del Laboratorio de Hidráulica, que es Luis Balairón (que también está por aquí), propiciando el patrocinio de la Fundación para el Fomento de la Ingeniería del Agua y del Capítulo Español de la IAHR. También quiero hablar de las redes de laboratorios, la europea, a la que estamos incorporados como CEDEX, es decir, tanto el Centro de Estudios Hidrográficos como el Centro de Estudios de Puertos y Costas, y luego la red española, que también ha sido una creación reciente, agrupando a todos esos laboratorios de escuelas y otros centros de que he hablado. También

es obra de Luis Balairón en su etapa como responsable del Laboratorio de Hidráulica.

Ha habido varios convenios internacionales de cooperación, algunos muy intensos con Estados Unidos, con Japón, con algunos países de Sudamérica (Argentina, Chile, Cuba, Ecuador, República Dominicana), y también una serie larga de artículos y ponencias, más de un centenar. Se han realizado cinco patentes; no entraré en detalles por falta de tiempo, pues debo de dedicarlo a los ensayos realizados, aunque al menos citaré que además de la de Becerril hay otra de Díaz de Rábago.

La dirección de Manuel Díaz de Rábago

Enrique Becerril pudo disfrutar poco de su gran logro, pero sí lo suficiente para que nos pudiese transmitir, a las entonces nuevas generaciones, el legado de su experiencia y unos pocos pero sabios consejos para la nueva etapa. En efecto una grave enfermedad, que ya venía padeciendo, le forzó a presentar su renuncia en cuanto consideró el Laboratorio suficientemente consolidado. Le sucedió Manuel Díaz de Rábago Casanova, que además de aportar (como Becerril) una gran experiencia como proyectista, había colaborado con él en el primitivo Laboratorio de Hidráulica y en el diseño del nuevo.

En la etapa de Díaz de Rábago se fueron abordando paulatinamente nuevos temas y enfoques. Voy a empezar por un ensayo fluvial. Esta obra, que es el estudio del plan sur del río Turia, la hizo José Ramón Témez con la ayuda de Ángel Seco. Los modelos de ríos que se hacían en España tenían todavía una técnica insatisfactoria para modelar el movimiento de los arrastres. Nos encomendó Díaz de Rábago, y él mismo lo hizo también, que estudiásemos las técnicas de otros laboratorios. Hicimos visitas y el primer ensayo, que fue en el año 1966, tuvo una doble vertiente, una en Grenoble y otra en España, y luego ya en sucesivas etapas se hicieron trabajos complementarios. En la figura pongo el modelo del 74, pero como



Figura 17. Río Turia. Plan Sur.



Figura 18. Presa de Guadarranque.



Figura 19. Presa de Guadarranque. Detalle del cuenco.

digo ha habido otras etapas intermedias. Estos modelos fueron los primeros que en España incorporaron ya plenamente la semejanza de aspectos sedimentológicos añadida a la meramente hidráulica.

Aquí está la presa de Guadarranque. Inició su estudio Antonio García de la Fuente y viene bien para hablar de esas cosas, de esas sorpresas que da la hidráulica. Para conseguir una carrera de embalse muy baja había un umbral amplio y como consecuencia una convergencia muy fuerte en la embocadura del aliviadero y, claro, esa convergencia daba un crestón muy sobresaliente. Como había dedicado algún tiempo a los flujos en régimen rápido y a suavizar sus crestas, ondas, etc., me pidieron que viese si podía hacer algo. Efectivamente, lo estudié con todo mimo. En dos días di una solución, en tres días se construyó (los tiempos eran otros, había más medios) y funcionó muy bien y muy mal. Muy bien porque efectivamente el crestón desapareció (y las ondas consiguientes). Muy mal porque la teoría que yo había aplicado era para el régimen rápido y aquello funcionaba muy bien pero había pasado a régimen lento. Éste es uno de esos errores que te enseñan un poco qué es lo que hay que hacer la vez

siguiente. Bueno, cuando hablaba Felipe Martínez de modestia hay que recordar que el agua te da lecciones todos los días y el que no es un poco modesto no las puede aprender.

En la parte de abajo de esa estructura vemos el cuenco, que tiene una solución original, porque es un cuenco curvo. Muy pocos son curvos, veremos luego otro, pero normalmente se trata de hacerlos rectos (pero pueden ser inevitables si la geología impone situar la presa ante una curva del río). Antonio García de la Fuente le dio la original solución de escalonarlo, y vemos aquí cómo esta curva, que debería haber dado una sobre elevación fortísima por el lado derecho que habría desbordado (aparte de suponer un pésimo reparto a lo ancho del cauce), gracias al artificio escalonado que dispuso García de la Fuente funcionó muy bien. José Ramón Témez fue el que, al causar baja Antonio García de la Fuente por una enfermedad muy grave, se hizo cargo. Redondeó, completó y mejoró las cosas que había dejado incompletas su predecesor.

Aquí tenemos la presa de Bayano. Como ha venido hoy aquí Juan Ramón Domínguez pues casi tendría que invitarle a que viniese a explicarla él, porque

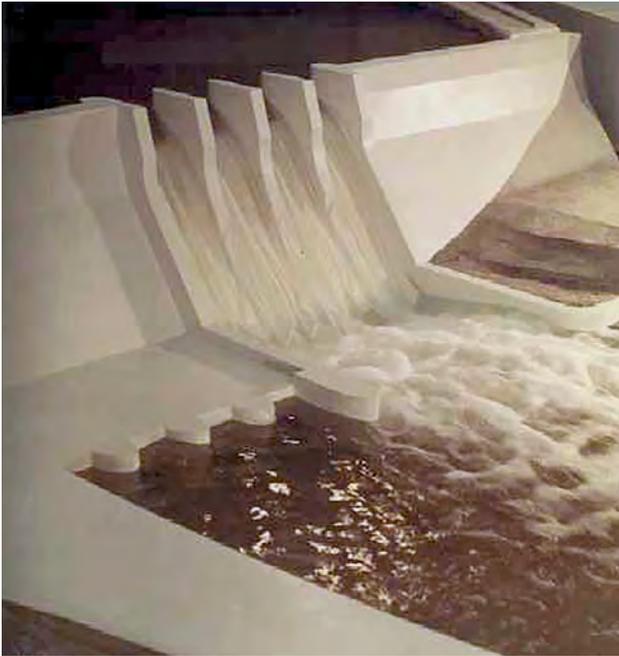


Figura 20. Presa de Bayano (Panamá).

era el proyectista. Esta presa tiene algunas características: la primera es que (fue también una presa extranjera), a diferencia de los cauces de otros sitios, la punta de avenida, que es de $19.000 \text{ m}^3/\text{s}$, es laminada con una tremenda superficie de embalse y se queda en $4.300 \text{ m}^3/\text{s}$ como punta de salida. En el ensayo inicial, que no tenía esos dientes que se destacan en la figura, pudo observarse que en la hipótesis de que se averiase una compuerta el efecto en el cuenco era que el agua saliente de los vanos contiguos retornaba al averiado con un gran remolino. Por ello se situaron los citados dientes que, al repartir el agua de cada vano con los contiguos, atenúan el efecto de una avería.

Éste es el dique seco de Astano. El estudio lo dirigió Francisco González de Posada, con el auxilio o el apoyo de Joaquín Estrades. Es a escala 25. Tenemos por tanto

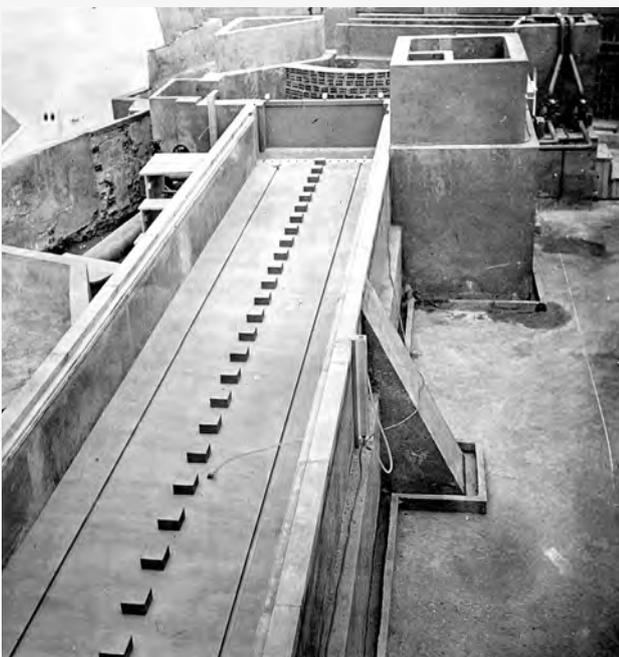


Figura 21. Dique seco de Astano.

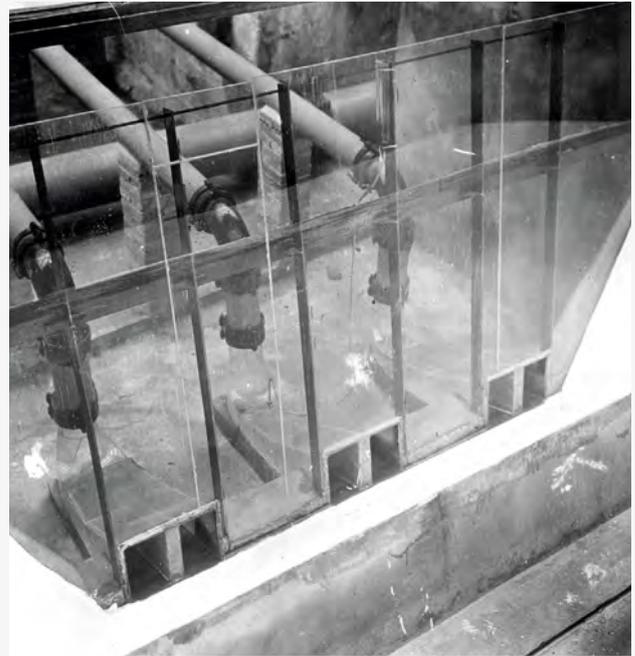


Figura 22. Central reversible de Guillena.

otro dique seco, lo que pasa es que la entrada es muy distinta a la de Becerril. Aquí la entrada es por una serie de orificios de alimentación y el efecto es que, si se quiere llenarlo en el tiempo previsto, se producen unos crestones en las fases iniciales del llenado que perduran más o menos en las fases intermedias. Se disponía además de una serie de conexiones para generar distintas condiciones de alimentación. Los ensayos incluían la presencia de barcos y en el diseño final se consiguió atenuar los fuertes impactos del llenado.

Aquí tenemos en seco el modelo de la central reversible de Guillena. Es una central que puede tanto turbinar como bombear y cuya toma (y restitución) ocupa la mitad del cauce. La boca de entrada en turbinado es un pozo de unos 20 metros de profundidad. En el modelo una pared lateral es transparente (como la cuarta pared del teatro) y por ella se puede ver el flujo. Claro está que además se puede observar desde arriba, como en todos los modelos.

Los problemas que tenía funcionando con turbina son curiosos. Se originaban unos remolinos muy fuertes porque el flujo de alimentación era muy excéntrico con relación a la boca de toma. La forma y posición del remolino se aprecia mejor en la foto de superficie, pero en la foto lateral vemos cómo ese remolino se introduce en la masa de agua y cómo desciende desde la superficie 20 metros y entra dentro de las turbinas, lo cual supone un funcionamiento inaceptable.

Vamos a ver la solución. Se colocaron cuatro pantallas que facilitaban el flujo longitudinal y dificultaban el flujo transversal impidiendo la formación del gran remolino. Esas cuatro pantallas así se colocaron y así se probaron. Pero la verdad es que para cortar el remolino se había pensado que lo eficaz sería poner las cuatro pantallas perpendiculares a la dirección local del remolino. Pero el operario que retocó el modelo tuvo más acierto que los técnicos encargados (en este caso el técnico era Tomas Pérez-Andújar, que actuó con mi anuencia) y faltando a lo ordenado lo colocó así. Funcionó tan bien que

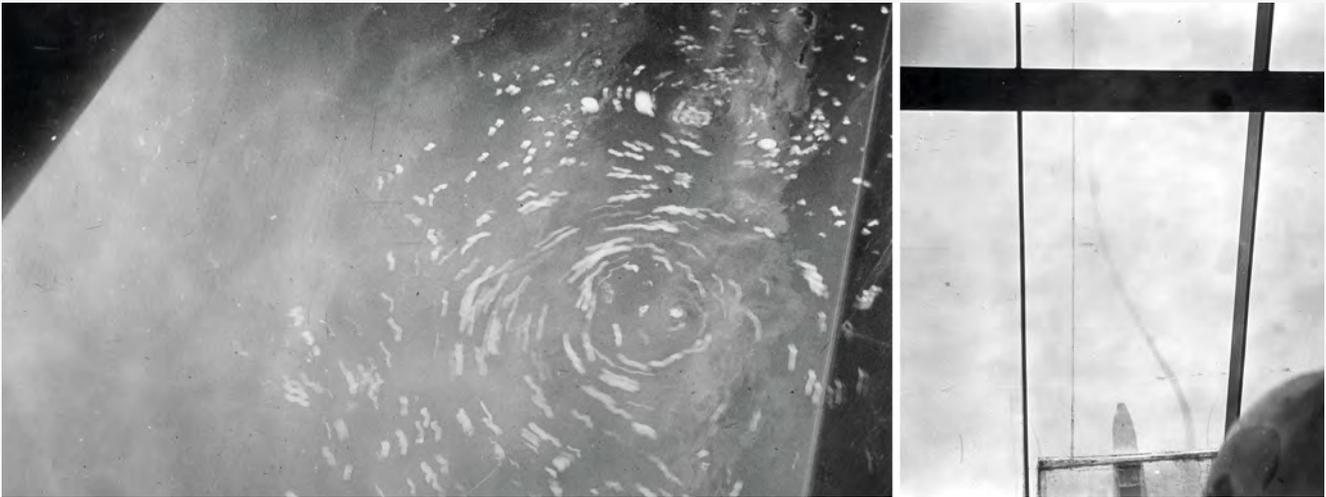


Figura 23. Central reversible de Guillena. Detalle del remolino entrando por la aspiración.

ahí se quedó sin siquiera probar el planteamiento original. Esto no solo pasó esta vez, esto ha pasado muchas veces. Una vez de cada 15 o 20, alguien se equivoca y acierta (son las ventajas de experimentar con gaseosa, es decir a escala reducida). Con esta solución sobrevenida nos encontramos con que desaparece el núcleo penetrante de los remolinos y en la clasificación de tipos de remolinos (que en aquella época no conocíamos porque surgió después) sería un remolino de tipo uno en vez del de tipo seis que se había eliminado.

Los primeros modelos analógicos

En la imagen tenemos el Barranco de Guiniguada. Éste lo estudió el propio Manuel Díaz de Rábago con la ayuda de Patricio Casado. Manuel Díaz de Rábago, en los años que estuvo -que fueron bastantes, el que más tiempo ha estado- llevando la dirección del Laboratorio, le gustaba de vez en cuando tomar un modelo para hacer mano y este fue uno de los que cogió. Yo no copié esa decisión, solo asumí los que no me quedó más remedio porque alguna cuestión matemática o lo que fuese me obligase a ello, pero en principio ya estaba el equipo de laboratorio para ir luchando con los problemas concretos.

Durante la fase de estudio del modelo hubo una avenida. Esta avenida, con punta de $45 \text{ m}^3/\text{s}$, era muy pequeña en comparación con lo que habría que ser capaces de pasar. Aun siendo pequeña provocó el depósito de acarreos. Además, se apreciaron otros fenómenos como la formación de ondas, etc. Estos fenómenos se reprodujeron en los ensayos y se tuvo que cambiar de solución. Se pensó en poner un pequeño azud aguas arriba para crear velocidad y que así pasase el agua con más velocidad y fuerza, de forma que pudiese llevar los arrastres que llegasen a pasar por el azud, ya que por otra parte el objetivo era que una buena porción de ellos fuesen retenidos por el azud. Esa solución es la que aquí abajo aparece plasmada.

La imagen de la izquierda corresponde a la zona aguas arriba del túnel (en realidad varios túneles). La de la derecha es la de la salida del tramo con varios túneles a la zona en que al poder poner una placa de cobertura con mayor espesor se unen los túneles parciales en un túnel único, lo que favorece bastante el flujo. La losa de cubrimiento se omite en el modelo, para poder visualizar, toda vez que el túnel no se pone en carga para los caudales previstos.

Un aspecto a considerar es el tapón fluvio-marítimo. En efecto, si el Guiniguada fuese un río convencional no

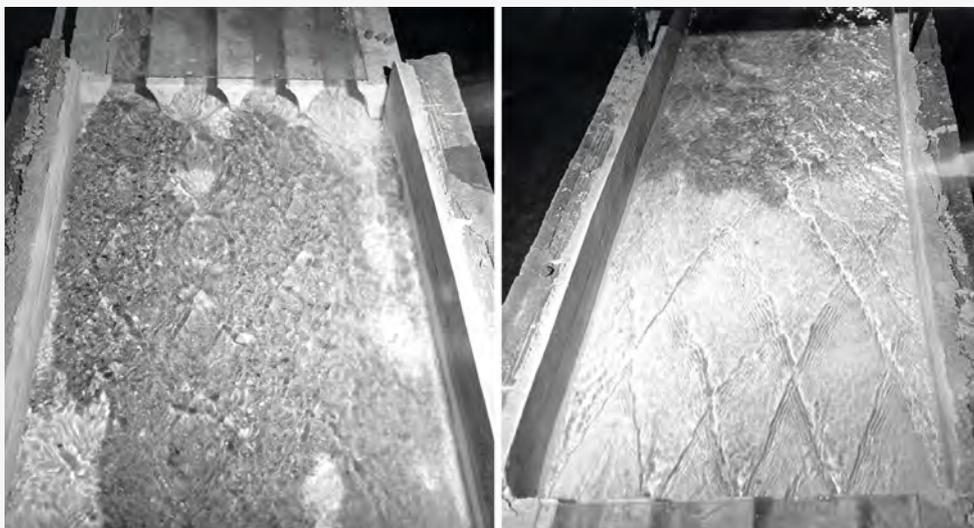


Figura 24. Cubrición del Guiniguada.



Figura 25. Modelos analógicos para ajustar la alimentación de modelos físicos. Presas de Calanda (izda.) y Guadalmellato (dcha.).

habría tapón. Habría, si acaso, una barra (o tal vez dos), pues los acarreo en mar la habrían formado en la interacción con el río. Pero aquí lo que sucede es que normalmente el Guiguada está seco y en la boca de salida el oleaje va reconstruyendo la playa, taponando el desagüe. Además, en avenidas llegan nuevos acarreo que va trayendo el río y, si se estabiliza un tapón total, se tiene una situación grave. Es muy comprensible que la ciudad de las Palmas quiera cubrir el barranco pero tiene el costo de que hay que vigilar mucho la paulatina consolidación de ese tapón para poderlo eliminar cuando alcanza un cierto tamaño, de manera que no suceda una desgracia si no está expedito el paso.

Decía que en su tramo final la tapa de cubrimiento no iba a tener tabiques intermedios, con lo que la losa inferior era muy ancha y las subpresiones que creaba el propio azud tenían el riesgo de que pudiesen reventar la losa. Una solución podía ser hacerla más gruesa (como en la losa de cubrimiento) para darle peso, pero se pensó que además de darle suficiente peso podía ser oportuno colocar unos drenes que redujeran la presión. Para decidir la posición más conveniente de dichos drenes se hizo un modelo de analogía reoeléctrica.

Y quiero dedicar aquí un recuerdo a quien nos trajo a España la tecnología de este tipo de estudios, Ceferino Álvarez Fernández, otro exiliado. Éste, nacido en la guerra española y exiliado con su padre (líder en la revolución del 34) en Francia. Díaz de Rábago, no sé cómo, lo localizó, lo hizo venir y su experiencia, que era en pozos de petróleo (yo estuve después en su antiguo laboratorio con él y su maestro Pierre Prudhome), nos la aportó en los temas de infiltraciones y flujos potenciales. Tenemos aquí algunas imágenes de uso de modelos analógicos aplicados a la delimitación de las condiciones de contorno en los modelos físicos. En efecto, por un lado el flujo de aproximación en el embalse condiciona el comportamiento del aliviadero; por otro, el modelo físico no puede incluir todo el embalse, pues ello llevaría a escalas inviables. Pero afortunadamente el flujo de aproximación es, en casi todo su trayecto, de carácter potencial, salvo en la inmediación del propio aliviadero, por lo que el flujo de aproximación se puede estudiar con poco error en la zona de flujo potencial por medio de un modelo analógico. Bien es verdad que el modelo es bidimensional y el flujo real tridimensional pero el ensayista puede decidir si considerar suficiente la aproximación conseguible (que es lo habitual) o perfeccionar con un modelo en dos o tres capas que pueda obtener

una mejor calidad topográfica. En cualquier caso, el modelo analógico nos da las equipotenciales de la aproximación (dibujadas en las imágenes) y el experimentador puede seleccionar una lo suficientemente alejada para que el flujo sea realmente potencial y lo suficientemente próxima para que el modelo pueda tener una escala aceptable. Por último, en el modelo físico se materializa la equipotencial como una barrera semipermeable que provoque unas condiciones de aproximación similares en todo este contorno. Este análisis se ve aplicado en las figuras a dos casos muy distintos: Calanda y Guadalmellato.

En ambos casos -señaladamente en el segundo- se aprecia que la porción de embalse que es necesario reproducir puede con estos procedimientos ser muy pequeña. Pues bien, como digo, muchos de los estudios que se han hecho en esta Casa contienen un modelo analógico si bien en la mayoría de los informes no es comentado especialmente.

Estudios en prototipo

Aquí tenemos un caso de estudio *in situ*. Los estudios *in situ* son muy interesantes; a veces los más interesantes, pero tienen un condicionante muy grave: solo podemos estudiar *in situ* yendo allí. Eso, ciertamente, no es



Figura 26. Bombeo en el Algar a la presa de Guadalest.

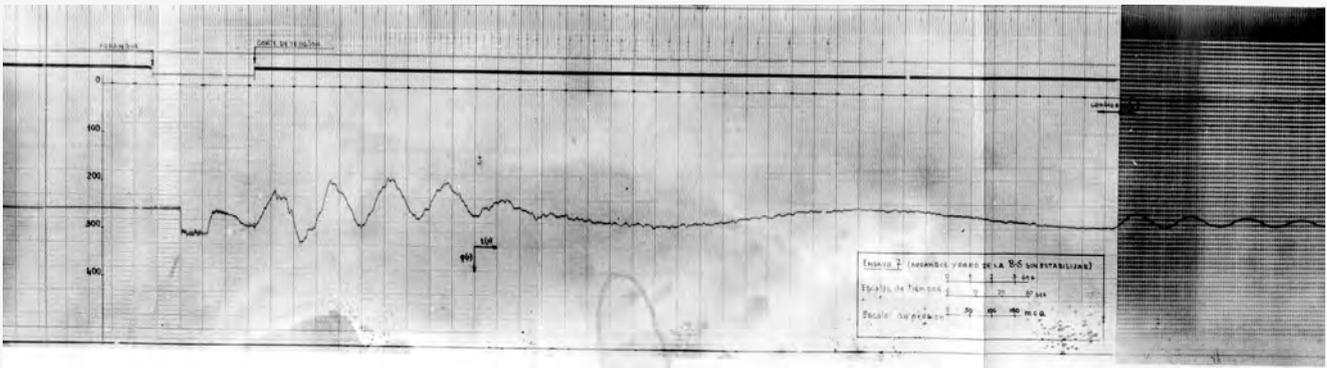


Figura 27. Bombeo del Algar. Registro de variables.

lo peor. Además, aun yendo allí, si queremos considerar un aliviadero de superficie o un río resulta que la avenida ni está ni la podemos imponer, y así solo se pueden estudiar cosas como ésta, un bombeo, u otras como un desagüe de fondo (hemos visto en Guinguada cómo aun teniendo la fortuna de disponer de datos reales son de una magnitud muy inferior a la que se ha de considerar). En definitiva, que sean estructuras que pueden operar a pleno rendimiento a plena prueba, sin que haya necesidad de tener que esperar a que la naturaleza aporte una situación que valga la pena estudiar.

Éste es un buen ejemplo, el bombeo en el Algar, del que se hicieron cargo Manuel Alonso Martínez y Jaime Planas, este último ingeniero de telecomunicación (aprovecho para resaltar que Díaz de Rábago tenía fe en la especialización y quería personal exclusivamente dedicado a la instrumentación). En la imagen está la cámara de bombas. Está equipada con cinco bombas (se prevé poder instalar una sexta) que impulsan hacia un mismo tubo que luego se bifurca para ascender por dos ramales para ir a la presa de Guadalest, que está a dos mil trescientos metros de distancia (longitud de tuberías) y hay 300 m de elevación, una altura de gran importancia.

En el momento del ensayo la estación estaba recién construida y había que certificar que podía cumplir con las especificaciones, comprobando su funcionamiento en varias hipótesis. Una de ellas, la más grave, era que se parasen de golpe las cinco bombas por un corte de tensión y había que averiguar en vivo si todo se comportaba de la forma prevista. Como consecuencia del propio estudio teórico el proyecto ya había previsto para cada bomba unas clapetas que a un ritmo lento iban a cerrar las válvulas y así reducir el golpe de ariete. Se colocó

un dispositivo para medir las presiones en un punto y así evaluar el golpe de ariete en ese punto; queríamos haberlo medido en más puntos (nos habría ilustrado, aunque no fuera estrictamente necesario a los fines pretendidos) pero no nos autorizaron. Se colocó otro dispositivo para averiguar a qué ritmo iban parándose las bombas y el resto de dispositivos se ocupaban de cómo se movían las clapetas. Todo ello se registraba (no había almacenamiento electrónico de datos) en tiempo real en tiras de papel fotosensible con varias líneas simultáneas, una para cada variable, tal y como se ve en la tira de la imagen. En ella puede observarse el cierre, cómo va evolucionando la clapeta, y en la línea de las presiones, vemos cómo la presión tiene un descenso brusco, luego cómo la onda del golpe que es casi cuadrada se acaba regularizando y por último es sustituida por la onda de oscilación en masa que tiene un periodo mucho mayor. La comparación con el estudio teórico mostró que el periodo estaba bien y que los picos se parecían bastante. La central quedó aprobada. Por cierto, la interrupción es un proceso tan severo que la central no puede ponerse en marcha hasta dos horas después de haber montado semejante desbarajuste en los dispositivos eléctricos.

Aquí vemos la presa de Sidi Yacoub. La ensayó Felipe Martínez con Cristina de Miguel. Esta también es en el extranjero, en este caso en Sidi Yacoub, en Argelia. Tiene un aliviadero en abanico para concentrar el flujo. La concentración está bien ajustada y solamente se marcan las pequeñas ondas que provocan las pilas y el efecto de curvatura de los cajeros. Está también el túnel de desvío que posteriormente iba a servir de desagüe de fondo. La disipación de energía es muy buena y el agua sale con absoluta tranquilidad.



Figura 28. Presa Sidi Yacoub (Argelia).

Los ensayos para centrales nucleares

Vamos a otro tipo de ensayos: centrales nucleares. Hasta el parón nuclear se hicieron 14 estudios (cinco se hicieron después); seis de ellos fueron para Ascó en distintos aspectos. Tanto para ésta como para otras centrales (Almaraz, Valdecaballeros y Lemóniz) se estudió el último y por tanto principal componente de la seguridad de la central. Las centrales nucleares tienen un reactor que genera calor, ese calor se retira para que mueva unas turbinas de vapor. Si por la avería que sea ese calor no puede ser retirado, la vía de intervención ordinaria es mover las barras de uranio para que se interrumpa la reacción nuclear y se acaba el problema. Pero en el caso

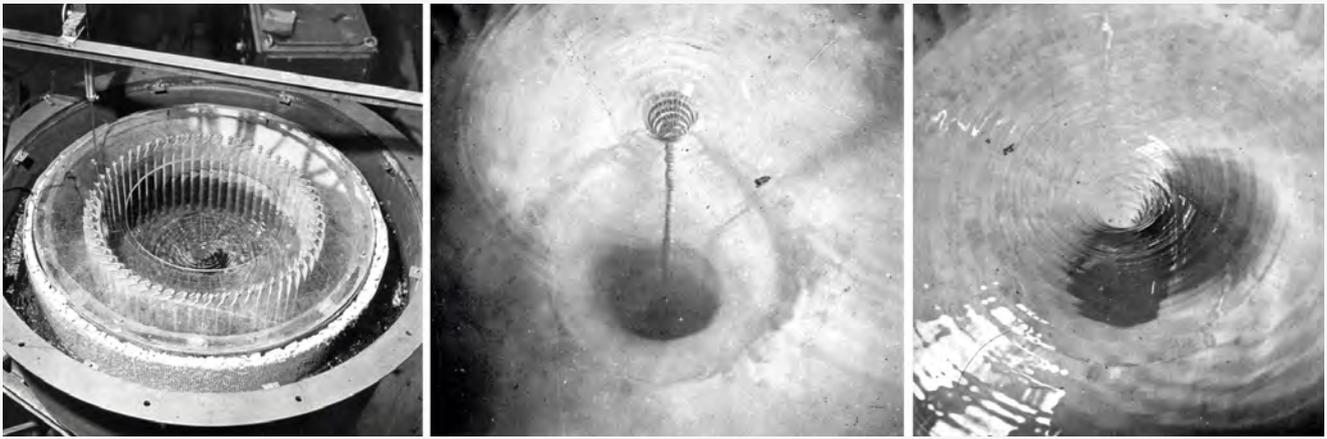


Figura 29. Central nuclear de Almaraz. Tarado de vortímetro para sumidero.

muy improbable, pero que siempre cabe, de que no se puedan movilizar las barras (me parece que la probabilidad de este suceso en un año de un reactor es uno entre cien millones o algo así), hay una posibilidad más o menos calculable (al menos acotable) de que prosiga la reacción nuclear y siga el reactor generando calor. Ante esa emergencia se ponen en funcionamiento unos aspersores en lo alto de la central que sueltan unos chorros de agua cuya misión final es retirar el calor que va generando el reactor. Esos aspersores lo riegan todo, provocan movimientos de todo, papeles, mesas, herramientas, flotantes diversos, etc. y esos objetos van a ser movidos por el flujo más o menos en su dirección. El calor transferido al agua tiene que ser sacado de la central, lo cual se hace llevando el agua a unos sumideros desde los que se bombea al exterior. Estos sumideros están apantallados para que no entren los flotantes en las bombas. La retención de los flotantes en las pantallas las obstruye parcialmente de una forma imprevisible, por lo que han de tomarse las medidas adecuadas para garantizar que eso no afecte a la función de las bombas. El agua es aspirada y se manda a un estanque especial fuera; ahí se enfría y cuando ya está fría vuelve a entrar en la central por los aspersores. En definitiva, es un circuito cerrado en proceso continuo. En Almaraz hay dos pozos, exactamente iguales, en disposición simétrica por lo que se ensayó solo uno. Este ensayo lo hizo Cesáreo Clavero con la ayuda de Enrique Mendiluce, a escala 1:3 (hemos llegado a escala 1:1 en este tipo de ensayos), porque hay un miedo muy especial a la vorticidad, pues si ya hemos visto lo que podía pasar en una central convencional, aquí que el agua está a 80 grados (en el modelo la llegamos a poner 70), es todavía más fácil la cavitación y el problema para las bombas puede ser muy alto. Había que estudiar los remolinos que se producían y efectivamente en Almaraz se produjo un remolino que por su desarrollo era de lo que se llamaba tipo 2. El tipo 1 es una ligera circulación del agua, el tipo 2 muestra en su centro una depresión, el tipo 3 va arrastrando flotantes hacia abajo, el tipo 4 ya es un tubo de aire visible dentro del agua pero que termina, en el 5 y el 6 ya van creciendo las intensidades con núcleos tubulares huecos sin final. Esta idea de clasificar en tipos venía de los estudios de otras centrales nucleares, y pensamos que de cara a los fines prácticos estaban bien concebidos, pues los remolinos de tipo 1 y 2 eran inocuos, los 3 y 4 podían no serlo en función

de las circunstancias y los 5 y 6 eran rotundamente desaconsejables. Sin embargo, también pensamos que además nos gustaría tener un criterio más exacto de forma que pudiésemos calibrar con finura el grado de seguridad que se alcanzaba, pues en algún caso como en Lemóniz (que luego es bien sabido que no se construyó) al tantear diversas alternativas de obstrucción en las rejillas se producían situaciones dudosas que aconsejaron la adopción de medidas correctoras.

Aquí tenemos lo que se nos ocurrió para medir la vorticidad, que era este dispositivo que tenía en su contorno unas palas orientables que hacían el flujo más o menos radial. Concretamente poco radial cuando se quería generar una gran vorticidad en el remolino. Esa mayor o menor intensidad del remolino daba un vórtice más pequeño o más grande según fuese el giro de las palas. Así, según se aprecia en la figura, podíamos llegar a valores altísimos de la vorticidad. El remolino así generado se hacía pasar por un molinete de cuatro paletas planas axiales que gira con tanta mayor velocidad cuanto mayor sea la vorticidad (giro nulo si la alimentación es con flujo radial puro). Se medía esa velocidad de giro y se estaba en condiciones de asociarla tanto a la intensidad del remolino (calculable con caudal, calado y oblicuidad de las palas) como a la tipología de los remolinos. Estábamos así en condiciones de decir cuánto debía aumentar la vorticidad para pasar de un tipo de remolino a otro. No lo patentamos, aunque sí que nos lo compraron algunos otros laboratorios que estaban investigando temas de vorticidad. Como las centrales nucleares tuvieron su parón -creo recordar en el año 82- se acabó el tema de la vorticidad para centrales nucleares, pero pasó el tema de la vorticidad a centrales térmicas. No he traído aquí ninguna de las varias centrales térmicas que se han estudiado para no extendernos más.

Los ensayos para aliviaderos escalonados

En la imagen tenemos algunos aliviaderos escalonados, que es uno de los tipos de aliviadero cuyo estudio empezó como genérico, pero pronto pasó a una serie de casos concretos que se han estudiado. No se va a comentar cada uno de ellos, sino que voy a hablar de los estudios genéricos. Aunque los aliviaderos escalonados existen desde hace varios siglos, eran una estructura muy poco frecuente hasta que nuevas capacidades



Figura 30. Aliviaderos escalonados. Puebla de Cazalla (izda.), Sierra Brava (centro) y Val (dcha.).

técnicas impulsaron las presas de hormigón compactado con rodillo, pues en ellas los aliviaderos escalonados encajan perfectamente.

Hubo que plantearse el realizar estudios sistemáticos por varios motivos, pero señaladamente porque los aliviaderos escalonados tienen una circunstancia especial: al pasar el agua por tantos escalones se emulsiona tremendamente con el aire. Esa emulsión no está a escala, o dicho de otra forma, no es fácil decir si se va a mantener en un modelo la proporción aire/agua que haya en el prototipo. Por ello se hicieron tres modelos de una misma estructura hipotética, a tres escalas distintas. En uno de los modelos los escalones (después de la transición de la embocadura) eran de 15 cm, en otro de 10 cm y en

el tercero de 6 cm. Cada modelo era automáticamente una representación a escala de los otros dos. Así, comparando unos modelos con otros se llegaba a conclusiones sobre cuál era la calidad de la semejanza, a saber qué escalas eran fiables, y aun en caso de una escala que no fuera fiable, se podía llegar a estimar las correcciones que había que hacer en las mediciones. Se midieron velocidades (especialmente difícil en mezclas), grado de emulsión y riesgo de cavitación en los escalones no aireados.

En este estudio, que llevó Víctor Elviro, también se dedicó mucha atención, probando distintas alternativas, a optimizar el diseño de la transición entre la cresta lisa y el escalonado regular de la parte inferior. Para ello se intentó y consiguió el aumentar paulatinamente la altura de los escalones de forma que el agua pasase creando remolinos dentro de cada escalón (sin saltarse ninguno) pero pasando suavemente hasta el final y además con mucha disipación de energía, que era el objetivo. No se patentó y también fue debidamente imitado en muchos países, con algunas menciones, eso sí.

Algunos modelos fluviales de gran tamaño

Comentaré ahora el encauzamiento del río Guadalhorce en Málaga. Fue el modelo más grande que se ha hecho en el Laboratorio. Lo llevó Ángel Lara con la colaboración de Ángel Seco. El estudio se orientó a diseñar un encauzamiento que permitiese evacuar sin desbordamientos al menos 4.000 m³/s. Para que los diques de protección no aislaran el río de su ciudad se limitó su altura y además se dividió la zona inundable en dos: la de avenidas menores (desbordable con una recurrencia media de diez años) y la de avenidas mayores en la que se pueden practicar actividades recreativas con tal de que tengan nula incidencia en el posible flujo posterior.

Aquí tenemos otro encauzamiento, el del río Franco-lí. El río Franco-lí lo hemos estudiado en esta Casa varias veces, porque afectaba a RENFE, que tiene un puente por encima que ha de tomarse como inamovible; afecta a REPSOL, que tiene la refinería al lado y la tiene anexa al cauce con sus tuberías pasando por el río; afecta al puerto, porque desemboca en él; afecta, por supuesto, a la población de Tarragona porque la inunda; afecta a la Confederación, porque tiene que cuidar de cómo se mueve el agua arriba del tramo, etc. En cada nuevo



Figura 31. Aliviaderos escalonados.



Figura 32. Encauzamiento del río Guadalhorce.

planteamiento con todos ellos se llega a una solución, se acepta por todos y luego surgen “pequeños” inconvenientes que hacen que no se realice. Poco o mucho después llega otra avenida de una cierta importancia y hay que volver a resolver el problema del Francolí y se buscan nuevas soluciones para contentar a los que tenían sus motivos de discrepancia.

En esta ocasión se había previsto un azud de escollera a la entrada del puerto y se fueron estudiando sucesivas soluciones, pues nos encontramos con que, aunque por la dimensión del puerto cuando entraban los 1.600 m³/s se podía, teóricamente, conseguir que el agua fuese a unas velocidades moderadas de un metro por segundo o menos, la realidad es que no lo conseguíamos. Llevábamos un ensayo y otro y otro, de vez en cuando venían los técnicos de la Generalitat de Cataluña, que eran los que se habían hecho cargo del tema (el estudio lo financiaba la Dirección General pero los que tenían que dar el visto bueno a la solución y aceptarla, eran los técnicos de la Generalitat). Vinieron. “¿Cómo está?” Pues está de solución en solución, pero ninguna aceptable. “Qué le vamos a hacer, ya volveremos cuando toque”; volvieron a Cataluña, lo contaron, la prensa se encrespó un poco y a la semana me llama el Gobernador Civil y me dice: “por lo que cuenta la prensa y por lo que he preguntado entiendo que están ustedes con dificultades en este modelo y a mí me gustaría saber cuánto tardaran en resolverlo”, y yo dije: no se preocupe, ya está resuelto, “¿cómo?” Esta semana ya hemos dado con la solución, -por cierto, gracias por ello, Víctor-, “¿podemos ir a verlo?”, pues hable usted con Felipe Martínez que es el director del CEDEX, que él será lógicamente el que le autorizará. El caso es que vinieron con las fuerzas vivas y



Figura 33. Encauzamiento del río Francolí en Tarragona.

con bastante población, lo vieron funcionando y yo ese día tuve tres satisfacciones: una, haber resuelto el problema, otra, que la gente se fuera contenta, y la tercera, más singular, que por fin tenía una referencia de prototipo pues el público que había visto la última avenida me decía: exactamente así fue, ahí se montaba esa cresta, la vi, yo la vi. Por eso se fueron muy contentos de ver que en el modelo pasaba todo lo que había pasado en el río, bien es verdad que con los cajeros más altos para que no hubiese problema. Este fue el agradable final de nuestro último estudio del Francolí que, por supuesto, supongo que todavía no se habrá construido.

La comparación del prototipo con los modelos físico y matemático

Vemos ahora otro caso real, o sea de experiencia en prototipo. Es la presa de la Viñuela. La presa de la Viñuela tiene un desagüe de fondo, como todas, y ese desagüe de fondo tiene, también como todas, doble compuerta, porque lo exige la normativa. Esa doble compuerta cuando está a plena presión, en este caso son 80 mca., no se puede mover (como muchas otras). En este tipo de situación la manera de poder mover las compuertas es abrir un baipás que pasa agua de un lado al otro, y naturalmente cuando al cabo de un rato se igualan las presiones a ambos lados ya se pueden abrir las compuertas. Por presas de todo el mundo hay desagües de fondo con diseños semejantes. Bueno, pues aquí se encontraron, y nos llamaron, con que la chimenea (muy alta, sube hasta coronación de la presa) que se dispone para que aporte aire al tramo final del desagüe cuando se cierre la compuerta con el fin de evitar un colapso del conducto por golpe de ariete negativo, tenía un comportamiento inexplicable. Esa chimenea tenía 80 m de altura y aunque estaban probando el baipás con la presa con solo 40 o 50 m de embalse resultaba que lanzaba un surtidor similar al de la fotografía y no había una explicación fácil. A los amigos del Laboratorio de Puertos y Costas que están por aquí también hoy, les pedimos prestado un minisubmarino, lo metimos dentro del conducto y vimos ya lo que pasaba. Con esa información pudimos hacer un modelo que reprodujera el problema y en el que se pudieran estudiar soluciones.

Lo hicimos y efectivamente en el modelo podemos ver reproducido cómo se emulsiona terriblemente el aire en el agua que sale del baipás, cómo el chorro que este emite va la mitad para un lado (aguas abajo) y la mitad para el otro, el que va por éste último lado trepa por la compuerta y obstruye con una mezcla agua-aire la chimenea de ventilación y esa mezcla agua-aire con la presión de aire que ya está habiendo dentro del recinto va subiendo por la chimenea, y encima cuanto más sube con menor presión se encuentra y más se dilata el aire, con lo que la columna agua-aire tiene una densidad media muy baja y efectivamente resultaba que con una presión de 40 mca la mezcla subiera más de 80 m y saliera a raciones. Ya sabiendo cuál era la causa había dos soluciones: la mala y la buena. La mala (útil provisionalmente) era decir abra usted despacio, abra poco y que el flujo por el baipás salga más que despacio y ya no tiene problemas. La buena, desviar el

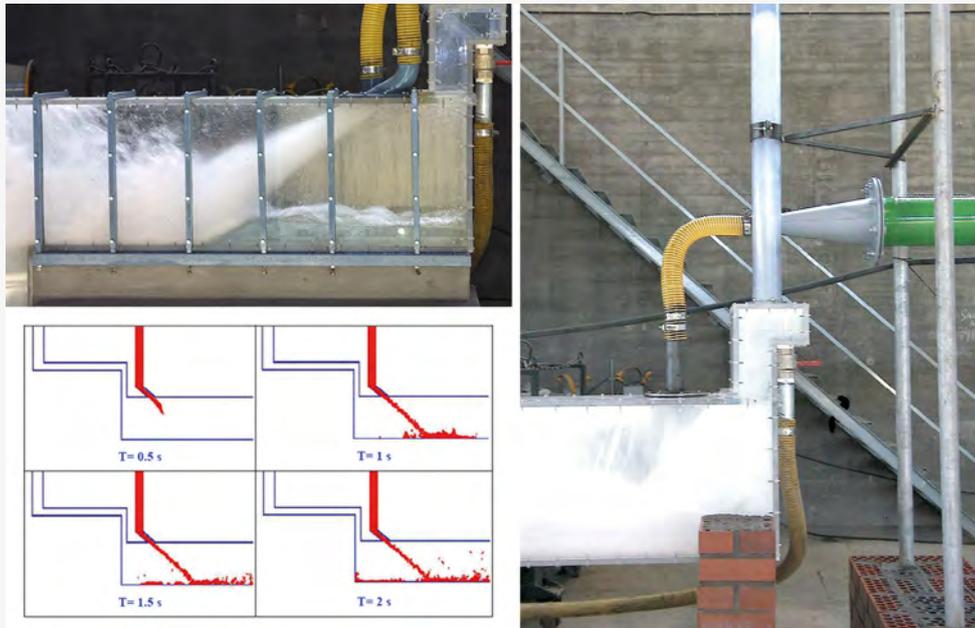


Figura 34. Presa de La Viñuela. Desagüe de fondo.

lanzamiento del baipás para que en vez de bajar vertical vaya inclinado. Con eso se resuelve totalmente el problema (ver imagen), porque ya el agua que viene hacia aguas arriba es retenida en un resalto y no llega a trepar por la compuerta eliminándose la causa del problema. Por último, en la imagen vemos un modelo matemático de apoyo (de esos que antes comentaba que están en el trabajo pero no son citados) que realizó el propio responsable de la experimentación, que era David López con la ayuda de José Algarra.

Ensayos sistemáticos. Azudes filtrantes para proteger cauces y vertidos sobre presas de escollera

Aquí vemos otra idea de lo que son trabajos sistemáticos para el diseño de nuevas estructuras, trabajos para mejorar soluciones anteriores. Hemos visto ya el de aliviaderos escalonados, este va también en esa misma línea, pero ahora en cauces. Nos pidió la Confederación del Tajo que estudiásemos algún dispositivo que se pudiese disponer con facilidad en obra, tanto al transportar como luego al colocar con la finalidad de regularizar

cauces de fuerte pendiente. Se nos ocurrió este dispositivo que consta de unos marcos muy ligeros, y sobre estos marcos a su vez se colocaba para darles rigidez y fijarlos unos tubos, sobre esos tubos se colocaba escollera, como luego el material acarreado por el propio río iba a rellenar los huecos, se estudiaba de manera que efectivamente el agua que vertía y colaba no fuese capaz de arrastrar ninguna de las escolleras ni las sifonase.

Otra solución al mismo problema fue diseñar unas piezas prefabricadas, las que vemos en la imagen, una vez colocadas tienen estabilidad suficiente para que admitan un trasdós de relleno de materiales del río y a partir de ahí funciona perfectamente. Se patentaron las dos estructuras, el efecto de la patente tal vez fue que en un viaje a Japón vi una cosa muy parecida, pero no me consta que nos mencionaran.

Aquí tenemos otro estudio sistemático. Éste para el problema del vertido sobre presas de escollera. Se estudian varias magnitudes, se van cambiando los tipos de pantalla, se ensayan varios taludes, se prueban distintos tamaños medios de las partículas y al verter el agua se ve con qué caudal efectivamente se desmorona, y hay que



Figura 35. Regulación de cauces, arroyos y ríos de fuerte pendiente.



Figura 36. Vertido sobre presas de escollera.

ver qué tipo de protecciones se pueden pensar para que ese desmoronamiento se reduzca o se pueda evitar protegiendo con placas, etc. Este trabajo, que está en curso, tiene un apoyo de financiación del organismo de Educación y Ciencia responsable de investigación.

Recuerdo a los que han colaborado en el Laboratorio

Quiero finalizar con un recuerdo a las muchas personas que han dedicado su talento y esfuerzo a este Laboratorio, he mencionado a algunas, pero no a todas, y creo que por su dedicación y entrega los puede representar muy bien Cesáreo Clavero.



Figura 37. Presa de Cortes.

Por ello traigo como último botón de muestra la presa de Cortes, la cual ensayó Cesáreo Clavero con Enrique Mendiluce. Esta presa tiene una solución para hacer que funcione el cuenco de resalto que concibió el propio Cesáreo, para el cual, como también es curvo, inventó los dientes de desvío que se aprecian en la imagen y que se complementan con unas plataformas especiales. Un diseño muy nuevo, que consiguió para todos los caudales un desvío preciso y uniforme.

Epílogo. El futuro de la hidráulica

La imagen de la figura siguiente no responde a que vaya a hablar del Plan Wert, sino a que, como (por las dos conferencias que me han precedido) intuyo la pregunta que me va a hacer Federico Estrada, me he preparado para responderla. Efectivamente, la pregunta ha sido: ¿Cuál es la evolución que es de esperar en la hidráulica?

Responder esa pregunta tiene sus problemas, pues según decía Mark Twain: "Predecir es difícil, sobre todo cuando se trata del futuro". Es una tarea difícil y por ello he cogido tres precedentes de predicción con un cierto grado de acierto.

En la imagen anterior vemos una primera técnica, que es predecir sin dar muchas explicaciones (es una buena regla). En ella Jean-Marc Côté se proponía ilustrar la educación del futuro. Vamos a ver los rasgos de esta explicación. En alguna cosa se seguiría igual que en 1880: el maestro se va a ocupar de qué tienen que aprender los alumnos, a los alumnos les va a tocar el esfuerzo duro (sobre todo a uno), pero otras son nuevas: el conocimiento van a poderlo transmitir por un cable y, para ello, tiene que estar muy atomizado. Eso es lo que se llama teoría de información. Su creador, Shannon, decía que había que hacer las cosas bit a bit. Esto muestra que la anticipación acierta más ayudada por una interpretación favorable.

Vamos con el segundo. Este lo he puesto sobre todo por el carácter nostálgico que tiene. Aquí tenemos a David Hilbert, el gigante de Cremona, que en el congreso de matemáticos de 1900 propuso 23 problemas, que es una manera de predecir. Predecía que eran 23 problemas (en la idea inicial fueron 24; uno desapareció) a los cuales se les iba a prestar atención en próximas décadas. Visto lo sucedido, ya podemos decir próximos siglos. De los 23 problemas que puso hay de momento 13 resueltos, 7 solventados (solventados quiere decir que la idea de Hilbert de qué es lo que había que hacer no acaba de encajar) y 3 pendientes. Si tenemos en cuenta que, entre los resueltos, hay uno que yo creo que está resuelto de una manera que Hilbert no podía ni sospechar, yo diría que Hilbert tuvo un porcentaje del 50 % de acierto más o menos, que está muy bien para predecir, ya que es más de lo que han hecho muchos meteorólogos.

Aquí esta otra predicción, otro sistema: el de Richard Feynman, que peca un poco de lo contrario. La idea de Feynman es: vamos a predecir que se hará aquello que yo he visto que hay una oportunidad de que se haga, un nicho de cosas que se puedan hacer. Al pronunciar sus propuestas en una célebre conferencia (*There's plenty of room at the bottom*, en Caltech, 29 de diciembre de 1959) el público en su comienzo pensaba que estaba

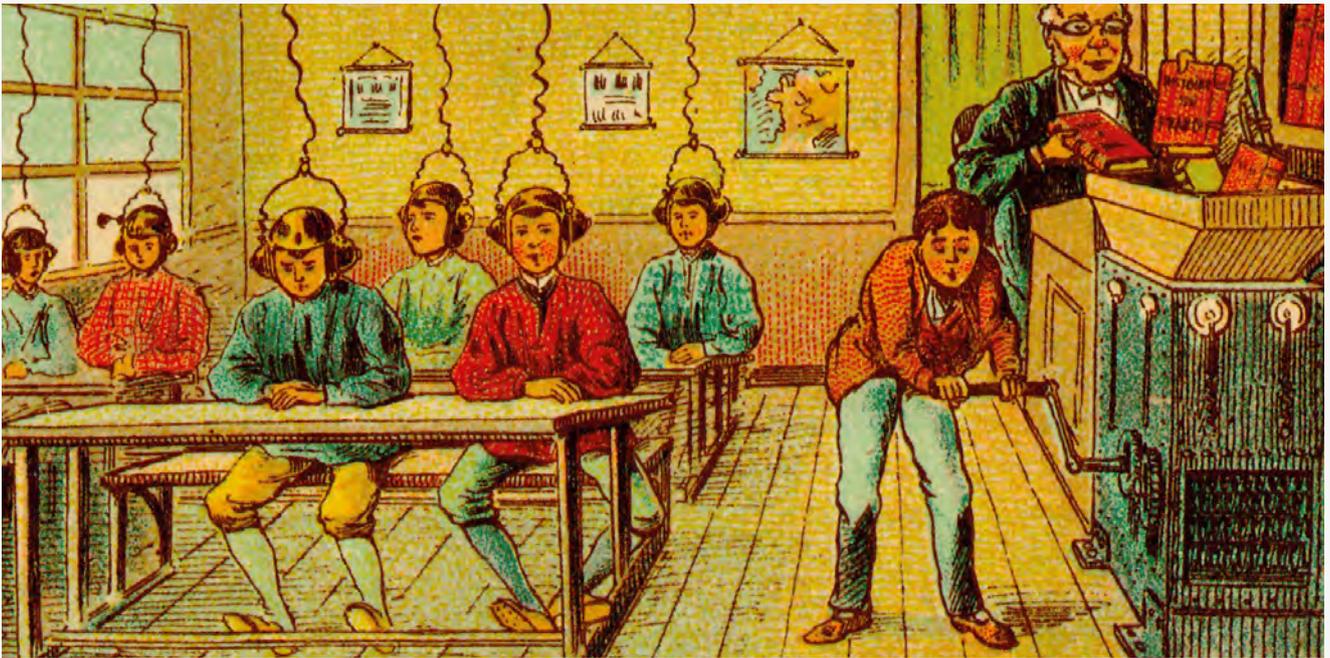


Figura 38. La educación en el año 2000 según Jean-Marc Côté (1880).

hablando en broma, en parte porque era bastante guasón y en parte por extrañeza ante la afirmación de que había mucho sitio en lo más pequeño y solo al final empezaron a aceptar que iba en serio. Total, que este discurso fue la semilla de lo que veintitantos, treinta años después, han sido las nanotecnologías. Para incitar al público a interesarse por el tema ofreció dos premios de mil dólares. El primero era para el que construyese un motor

que cupiera en un cubo de 0,4 mm. Él suponía que tardaría bastante en tener que pagarlo, pero la solución llegó en mayo de 1960 o sea, pocos meses después. Bien es verdad que le chasquearon, porque él pensaba que tendría que ser con tecnologías nuevas y todo lo que el ganador hizo fue miniaturizar lo ya existente. El otro desafío de más enjundia (los dos tenían enjundia) era escribir la enciclopedia Británica en la punta de un alfiler. Suponía una reducción lineal de 25.000. Él explicaba que eso sería muy fácil (la posibilidad se logró en pocos años) y que se podría llegar a mucho más. Resaltaba además que de la punta del alfiler solo se usaba el espesor de unos átomos y que yendo por capas cabrían todas las bibliotecas del mundo en algo así como un centímetro cúbico. También tiene un 50 % de acierto, porque el motor no fue según su línea.

Ya he señalado la diferencia entre los hidráulicos teóricos o matemáticos y los hidráulicos prácticos que tienen que echar agua. Al libro que es la biblia de los teóricos, *Hydrodynamics*, de Horace Lamb, la primera objeción que se le hizo (algo cicatera) y que luego se ha mantenido (para sus numerosas ediciones) es que leyendo este libro uno nunca se entera de que el agua moja. Por ello, y estando más en el segundo grupo, me toca mojarme y aquí está mi propuesta.

Aumentarán las demandas de seguridad, y eso va a cambiar la concepción de la seguridad, no solo la propia demanda concreta. Habrá que reforzar la capacidad de desagüe y luego, sin embargo, habrá que procurar que llegue menos agua a las zonas urbanas, etc. No es imposible pero va a ser una conciliación un poco dura.

Las presas son muy jóvenes. Entre las presas españolas algunas hay centenarias, pero la mayoría tienen 30 años de media y van a llegar problemas. Van a llegar aterramientos que reduzcan la utilidad de las más pequeñas; van a verse desagües de fondo que no se puedan abrir, ya hay muchos que tienen verdaderas dificultades; un posible cambio climático puede dar origen a



Figura 39. David Hilbert.

- La demanda de seguridad aumentará, lo que hará variar su concepción. Habrá que reforzar la capacidad de desagüe de los aliviaderos y algo contradictoriamente atenuar los efectos de las crecidas en la población.
- Aparecerán los problemas de adolescencia de las presas y embalses. Se combatirá el aterramiento de los embalses, tal vez impulsando en ellos la generación de corrientes de densidad.
- Se fomentará la observación del comportamiento de las estructuras hidráulicas.
- La mejora del contraste con prototipos y modelos físicos incrementará la confianza en los modelos matemáticos y la parcial eliminación de los modelos físicos.
- Los modelos físicos ampliarán su campo hacia problemas nuevos, nuevas interacciones y temas con insuficiente formulación matemática.
- Aparecerán los modelos híbridos.
- Los instrumentos de medida darán medidas globales y no interferirán con el objeto medido. Se medirán presiones y tensiones en el seno del fluido por ondas.
- Se avanzará en la automatización de la construcción de modelos.

Figura 40. El futuro de la hidráulica.

situaciones nuevas. Todo eso va a ocuparnos en un futuro sobre todo si se quiere ser previsor.

Hay que observar las obras hidráulicas y sus flujos; todavía no están los medios pero llegarán. Hay que poner medios para observar permanentemente las estructuras, para que cuando llegue el acontecimiento se pueda observar y medir.

Cuando se produzca esta mejora, los modelos matemáticos irán desplazando a los modelos físicos e irán reduciendo su campo de actuación.

En el cuadro se señala el campo que le quedará a los modelos físicos: van a ser los problemas nuevos, nuevas interacciones y los temas que no tengan buena formulación matemática; todos los temas de borde, de superficie, ya sea formas complicadas de arrastre, ya sea vegetaciones en cauces, ya sea problemas multifásicos. A todos esos problemas todavía les queda bastante cuerda para estudiarlos.

Habrán modelos híbridos, que por una parte serán modelos matemáticos que irán imponiendo las condiciones de contorno, corrigiéndolas en función de lo que vaya midiéndose en el modelo físico. A diferencia de lo que se puede hacer ahora, pues se imponen condiciones preprogramadas sin posible acomodación a las consecuencias.

Los instrumentos de medida en vez de tomar medidas locales tomarán medidas globales, es decir, de medida punto a punto en toda la masa de agua. Aunque he puesto que se medirán presiones y tensiones en el seno del fluido por ondas (por parecerme lo más probable), lo importante no es cómo se medirán, sino qué se medirá y ya verán cómo.

Se avanzará en la automatización de la construcción de modelos porque, tal y como van las estructuras de apoyo, está muy difícil seguir construyendo modelos con los métodos convencionales.

Con esto ya ha acabado mi comentario. Solo decir que si a los maestros les hemos valorado en un 50 % de aciertos, pues a mí se me puede exigir como mucho que tenga un 25 %, o sea, que si hay dos cosas de la lista que se cumplen me doy ya por contento. Dentro de 50 años vendré a la revisión si se me pide y hablaremos de lo que se ha cumplido y lo que no.

Aquí debería acabar, pero hay una coda que es también un augurio, pero hecho en 1803. Es el augurio de la primera estrofa de los "Augurios de Inocencia" de William Blake. El primer verso de su primera estrofa yo mantengo que habla (entre otros) de los que trabajan con modelos, los cuales miran en lo pequeño lo grande. Permitidme una traducción un poco libre pero bastante fiel al espíritu, espero.

*Para ver un mundo en un grano de arena
y un cielo en una flor silvestre,
retén el infinito en la palma de tu mano,
y la eternidad en una hora.*

Yo he procurado, no sé cuánto he retenido, condensar ochenta años de historia en poco más de una hora, y por tanto aún quedo lejos de alcanzar la eternidad.