

SOBRE LA ENSEÑANZA Y LA PRÁCTICA DE LA TEORÍA DE ESTRUCTURAS

(ON TEACHING AND PRACTICE OF STRUCTURAL THEORY)

Mariano Vázquez Espí

Dpto. de Estructuras de Edificación. Univ. Politécnica de Madrid

ESPAÑA

Fecha de recepción: 23 -V-97

400-31

RESUMEN

Algunas anomalías detectadas en la enseñanza y la práctica de la ingeniería y la arquitectura, sirven de excusa para realizar un examen epistemológico de la técnica en la cultura industrial, utilizando como ejemplo la teoría de estructuras. De ese examen se concluye la necesidad de una consideración más atenta al diseño de estructuras, en detrimento del hoy omnipresente análisis. Además, se formula una propuesta concreta para la reforma, tanto de la enseñanza como de la práctica profesional.

SUMMARY

Some anomalies detected in teaching and practice of engineering and architecture, are used as a starting point for an epistemologic research on the industrial culture technics, using structural theory as an example. The conclusion of this research is that it is necessary to pay more attention to structural design, rather than to structural analysis, today omnipresent. A definite proposal to reform both teaching and professional practice is also formulated.

A la memoria de Ove Arup

1. Dos anomalías

Durante quince años, Brohn (1996) examinó el grado de comprensión de los graduados de varias facultades británicas mediante la sencilla estructura de la Fig. 1(a). Los encuestados tenían que proponer un diagrama cualitativo de momentos flectores, sin recurrir al análisis numérico de un ejemplo concreto. Los resultados pueden resumirse así: sólo el 10 % de los encuestados *intuyó* el diagrama correcto, mientras que la gran mayoría conjeturó el diagrama de la Fig. 1(b), obviamente incorrecto pues no hay equilibrio estático. Este detallado estudio viene a confirmar algo ya advertido por muchos: la necesidad de cambiar de punto de apoyo en la enseñanza de la teoría de estructuras, pasando, del acento en el análisis, al acento en el diseño; un cambio necesario en muchas otras disciplinas técnicas (Addis, 1990; Brohn, 1990; Cervera, 1993; Hilson, 1993; Cairns *et* Chrisp, 1996). Sin embargo, la siempre creciente

confianza en el análisis automático, el continuo incremento en la velocidad de los ordenadores, etc., propicia que la enseñanza (y, por tanto, la práctica) de la disciplina profundice -cada vez más- en torno al análisis, ofrecido como una panacea, como el camino recto hacia la solución de nuestros problemas. La intensidad de este proceso ha

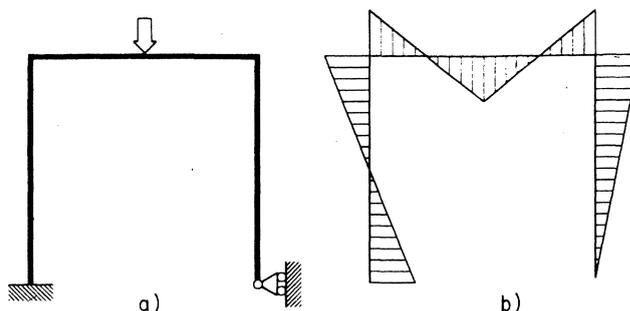


Fig. 1.- El test de Brohn.

llevado a Brohn (1996) a señalar que sólo “el primer y espectacular CAD (*Computer Aided Disaster*)” forzará el imprescindible cambio de acento.

Con poco error puede afirmarse que más de las dos terceras partes de las emisiones contaminantes que inquietan la estabilidad de la vida en el planeta provienen de la construcción y del transporte (cf. Estevan y Sanz, 1994; Gordon, 1976; Vázquez, 1996), actividades lideradas por la ingeniería y la arquitectura. La anomalía que me interesa subrayar aquí es que los instrumentos técnicos al uso son incapaces de advertir esa disfunción, a pesar de que esas actividades tienen como objetivo explícito mejorar la calidad de vida de los seres humanos. Un ejemplo más científico que técnico servirá para evitar herir sensibilidades. En 1920 Thomas Midgley, a la sazón en los laboratorios de investigación de la General Motors, descubrió que el plomo añadido a las gasolinas de bajo octanaje mejoraba su rendimiento tanto como el funcionamiento de los motores. En 1930, trabajando ahora en la división de frigoríficos, recibió el encargo de encontrar una alternativa al amoníaco usado como refrigerante. Demostrando su reconocida competencia, encontró un grupo de sustancias baratas, estables, no tóxicas y no inflamables que podían realizar el mismo trabajo: los compuestos clorofluorcarbonados (Vale y Vale, 1991). Todavía hoy estamos intentando deshacernos de ambas sustancias y resolver los agudos problemas que han generado. La cuestión aquí es: ¿era Thomas Midgley un científico incompetente? Desafortunadamente creo que no, en absoluto; el problema reside en que sus métodos e instrumentos le impidieron siquiera *intuir* que sus dos inventos podrían ocasionar problemas de tal envergadura.

Podría parecer que las dos anomalías señaladas no tienen relación entre sí. Mi conjetura, sin embargo, es que ambas son efectos de problemas epistemológicos básicos de la técnica nacida con la revolución industrial. Aunque tales problemas son comunes a muchas disciplinas, limitaré su examen a la teoría de estructuras. Pero tengo la convicción de que mis conclusiones serán valiosas en otras.

Debe quedar claro desde un principio que las dos anomalías mencionadas requieren una solución urgente: la transformación de nuestras culturas industriales hacia modos de vida sostenibles parece difícil si una gran parte de los agentes encargados de llevarla a cabo (ingenieros y arquitectos) no cuentan con una comprensión profunda de los modelos físicos y matemáticos que emplean y de sus límites. Mucho más si esos modelos no les permiten percibir las causas y los orígenes de los problemas a los que ahora nos enfrentamos. No basta sólo con personas de reconocida destreza intelectual (el 10% del test de Brohn); esas personas necesitan también un método apropiado.

2. Teoría y práctica

Tanto las anomalías señaladas como los programas de estudio politécnicos, divididos sistemáticamente en teoría

y práctica, ponen sobre la mesa la cuestión de cómo deben relacionarse ambos términos. Una solución clásica se resume con la frase “la teoría es el general; la práctica son los soldados” (Addis, 1990:3; Dorn, 1970). Esa visión jerárquica proviene de un racionalismo exacerbado que entiende la práctica como una simple y lineal aplicación de la teoría¹. En este esquema, lo que importa es el desarrollo y transmisión de teorías del modo más claro e inmaculado posible. En la versión más popular dentro del racionalismo (cf. Popper, 1976), el progreso de la teoría sigue, más o menos, el siguiente proceso:

1. Existe un problema no resuelto (generalmente ignorado por la teoría en uso).
2. Se propone una solución en forma de una nueva teoría.
3. Se deducen afirmaciones verificables de la nueva teoría.
4. Se intenta refutarla mediante experimentos u observaciones.
5. Se establece cual de las teorías en competencia ‘vence’.

Con este esquema surge, inevitablemente, un ‘progreso’ mantenido y permanente de la ciencia, ya que para ‘sobrevivir’, la nueva teoría no sólo tiene que resolver el problema crítico, tiene que seguir explicando lo ya explicado por la antigua (técnicamente, su ‘campo de verdad’). De lo contrario será refutada. En ese paisaje, a las teorías supervivientes se les puede otorgar una certeza ‘científica’, a salvo de coyunturas externas (sociales, políticas, ideológicas, etc.), al menos mientras que una refutación no aparezca en escena.

Muchos autores refutaron, a su vez, esa visión estrechamente racionalista de la historia de la ciencia (cf. Feyerabend, 1979 y 1989; Kuhn, 1962; Solís, 1990), mostrando que la ciencia no es impermeable a las influencias del entorno y que, en cualquier caso, no puede entenderse como una disciplina puramente racional. La historia de la teoría de estructuras ha sido un terreno fecundo para esa refutación; y resultará muy esclarecedor examinar un ejemplo de cómo evolucionan teoría y práctica en ella.

2.1 La ‘revolución’ del diseño plástico en Gran Bretaña

Cuando el pórtico metálico comenzó a usarse, allá en la década de 1850, los métodos de la teoría de la elasticidad no permitían establecer de forma unívoca reglas de diseño para sus elementos. Al principio se usaban dos conjuntos independientes de reglas rudimentarias que podemos describir brevemente como ‘resistencia de vigas’ y ‘comportamiento elástico de barras prismáticas’. Para finales del siglo se introdujo el momento de inercia y la tensión admisible del material. Para principios de este siglo, se acabaron por incorporar las reglas del análisis elástico, aunque, a la vez, no hubo más remedio que

incorporar un juego de simplificaciones e idealizaciones, dado que el análisis elástico general resultaba inmanejable para los medios de la época (cf. Timoshenko, 1953). Para carga vertical, el pórtico se modelaba como un conjunto de vigas continuas articuladas con puntales verticales. Para carga horizontal, sin embargo, la unión viga/soposte se consideraba completamente indeformable, incluyéndose una articulación virtual a media altura del soporte. Aunque cada simplificación, considerada aisladamente, resulta razonable, es obvia la inconsistencia general del modelo conjunto. A pesar de todo, las cosas fueron satisfactorias hasta 1930.

Fue entonces cuando una cierta sensación de malestar se extendió entre los calculistas. No se trataba de que las estructuras colapsaran ni nada semejante. La inquietud era mucho menos dramática: el modelo elástico al uso, a pesar de su tedioso formulismo matemático, no permitía hacer uso de las propiedades del acero estándar, ni tenerla en cuenta para mejorar los diseños, ni diseñar pórticos en que la seguridad fuera homogénea para cada sección o pieza. Se constituyó el *Steel Structures Research Committee* (SSRC) con el propósito doble de revisar las normas imperantes en Gran Bretaña (de 1909) e investigar cómo aplicar las más modernas teorías al diseño. Las conclusiones de la comisión confirmaron la “irracionalidad” de los métodos de diseño vigentes y subrayaron la importancia que tendría para la futura mejora en las estructuras entender el comportamiento de pórticos reales.

La solución dada por la comisión fue prescribir el análisis elástico. Dada la complejidad de los cálculos con el nuevo método (incluso con la ventaja del método de Cross), la comisión se vio obligada a incluir una adenda con un método simplificado y más abarcable. La recepción fue fría: el nuevo método era más laborioso que el antiguo y, además, no resolvía la inquietud inicial de los calculistas: mejorar la economía de los diseños. En muchos gabinetes de proyectos se pusieron en práctica métodos aún más simplificados, más en línea con las normas de 1909. Una cierta sensación de crisis se extendió tanto entre los diseñadores como entre los miembros de la comisión, al comprobar que caían en un enojoso círculo vicioso:

1. El método propuesto era coherente y racional con la teoría elástica.
2. El ‘límite de economía’ no podía ser alcanzado con ese método (los diseños estarían sobredimensionados respecto a la resistencia del material y, además, más sobredimensionados en unos puntos que en otros).
3. El método no proporciona guía alguna para el diseño: la estructura tiene que ser propuesta (¿cómo!) antes de ser comprobada.
4. El comportamiento en las cercanías de las uniones no es predicho correctamente por el modelo (¿principio de Saint Venant, 1864!).

De esta ‘crisis’, y tras dos largas décadas de debates, surgieron los métodos de la ‘carga última’ (Baker, Horne *et* Heyman, 1956; Baker, 1956). Que se trata de una ‘revolución’ en el sentido de Kuhn (1962), es decir, en la manera de pensar y de modelar la estructura, puede verse notando la radical diferencia de significado entre el colapso ‘prerrevolucionario’ y el ‘postrevolucionario’. Aunque el colapso era bien conocido como fenómeno desde mucho antes, el diseñador ‘elástico’ no quería hablar de él ni siquiera en broma: sus estructuras no colapsaban ni colapsarían. Para el diseñador ‘plástico’, el colapso era la vívida imagen del diseño, aquélla que le permitiría conocer las debilidades del pórtico y diseñarlo, en consecuencia, del modo más apropiado. Un nuevo vocabulario y una nueva forma de pensar habían aparecido (cf. Addis, 1990).

Desde luego, lo mejor de ambos mundos debiera dar lugar al diseñador ‘elastoplástico’, según el esquema ideal de Popper, pero esto no ocurre espontáneamente. Todavía hoy existen diseñadores ‘elásticos’ o ‘plásticos’ y lo cierto es que no faltan buenas razones para ello (lo mismo ocurre con la coexistencia pacífica entre los métodos de las tensiones admisibles y de los estados límite, cf. Seward, 1994). En el bando elástico, los programas de ordenador permiten hoy un manejo muy cómodo de los métodos elásticos, de manera que, incluso los pórticos de hormigón armado, se diseñan mediante distribuciones elásticas de solicitaciones y la evaluación plástica de resistencias (¡al amparo inconsciente del teorema estático del cálculo plástico!). En el lado plástico, el diseñador confía en unas proporciones sensatas de los miembros, para que la deformación en servicio permanezca dentro de límites tolerables; de otro modo, toda la simplicidad y certidumbre ganada con el diseño plástico se perdería si todavía hay que acometer el análisis elástico.

Una última anécdota es pertinente para mostrar las influencias subjetivas que subyacen tras una teoría. El factor de seguridad adicional en el cálculo plástico de vigas de acero (el 1,12 de la norma española), fue elegido por Baker, Horne *et* Heyman (1956:352 y ss.) para que el perfil en I necesario para resistir un momento flector resultara el mismo, con independencia de que se usara la capacidad plástica o la elástica: creían así poder *convencer* mejor a los diseñadores ‘elásticos’, que no habrían de notar ninguna diferencia si cambiaban de método. Ninguna otra razón había para esa elección. En el caso del hormigón armado no hubo necesidad de componenda semejante, pues el armado necesario en una sección variaba entre amplios márgenes y no había valores ‘mágicos’ que retener.

3. Las formas del conocimiento

Tras la discusión precedente cabe concluir (de modo provisional) que no parece haber una forma racional y objetiva de dirimir la calidad de una teoría. Mis simpatías están por la máxima de Feyerabend (1970:22): “*anything goes*”, es decir, “todo vale”. Por supuesto, se trata de un

enunciado negativo a pesar de su rotundidad (en palabras de Feyerabend, literalmente es una broma, que los racionalistas siempre toman en serio). Lo que se sugiere es que quien desee una epistemología con un principio *único, racional, objetivo y estable* sólo encontrará ése.

En el caso de la 'revolución del diseño plástico' y en muchos otros, la lectura sin prejuicios de los hechos históricos muestra que las teorías y las prácticas evolucionan, al igual que otras formas de la cultura. Se escogen nuevas formas y otras se abandonan, sin que quepa descartarlas para el futuro. La cara positiva de una epistemología no racional como la de Kuhn o la de Feyerabend reside en valorar la diversidad de las formas de conocimiento. Desde luego esto no tiene porque abrir las puertas a la arbitrariedad (aunque, desafortunadamente, mucha arbitrariedad se ampara detrás de ésta u otras formulaciones): pues hay una exigencia que podemos pedir a cualquier teoría, y es que nos dé una descripción correcta del mundo, es decir, de los hechos que *la teoría observa a través de sus propios conceptos*. Las dos anomalías mencionadas sugieren que nuestros actuales métodos, considerados globalmente, no pasarían sin problemas esta prueba.

En la controversia diseño elástico/plástico vemos que pueden plantearse varios métodos que cumplen con esa exigencia y, que tras pequeñas operaciones de limpieza, pueden ser útiles. Por limpieza entiendo la eliminación de algunas creencias o supersticiones adheridas a lo largo de la evolución histórica. Por ejemplo, no hay nada en contra de determinar las solicitaciones de un pórtico de hormigón armado mediante métodos elásticos, *siempre* que se reconozca que en realidad se está usando el teorema estático del cálculo plástico (lo que implica que el diseño resultante debe poseer suficiente ductilidad, es decir, falta aún una comprobación adicional o una regla de diseño que la sustituya). Del mismo modo, el énfasis en el teorema de unicidad en cálculo plástico es tiempo perdido: después de todo, la ductilidad de los materiales no es infinita y, en realidad, siempre puede ocurrir que la carga última de él derivada siga siendo un límite superior de la carga de colapso de la estructura real.

Más importante aún es reconocer que el método 'elástico' y el 'plástico' responden a *propósitos muy diferentes* y que esa diferencia arroja más luz sobre la distinción entre las dos comunidades de pensamiento que cualquier otra consideración: el método 'elástico' sirve para comprobar un diseño (y sus practicantes son propiamente 'analistas'), mientras que el cálculo plástico sirve para proponer reglas de diseño (y es practicado por 'diseñadores'). De este modo no parece exagerado distinguir entre dos disciplinas o formas de conocimiento diferentes: el análisis de estructuras (el conocimiento de cómo se comporta una estructura bajo carga) y el diseño de estructuras (el conocimiento de qué estructura se requiere para sostener un conjunto de

cargas). El analista intenta 'ver' cómo tiene que deformarse la estructura ('mínima energía potencial'), allí donde el diseñador intenta 'ver' cómo deben conducirse las cargas hacia el suelo ('mínima cantidad de estructura'). Desde luego, nada impide la existencia de un diseñador/analista, pero desempeñar ese doble papel parece esencialmente más difícil.

El actual optimismo acerca de la posibilidad de alcanzar un análisis omnicomprendido que pueda ser, de hecho, utilizado para el diseño (con la imprescindible ayuda de máquinas de cálculo) quizá esté justificado. Sin embargo, se trata del optimismo de los analistas, pues los diseñadores *no pueden esperar* y tienen que llevar a cabo su tarea con las herramientas disponibles en cada momento (cf. Vázquez, 1995:68). Que los seres humanos hayan sido capaces de diseñar y construir edificios aun antes de que hiciera su aparición el análisis elástico, sugiere que el diseño tiene sus propios principios y que su *estructura disciplinar* permanece esencialmente constante a lo largo del tiempo (a pesar de los radicales cambios en las teorías y formas de conocimiento disponibles).

4. Más problemas con la dicotomía teoría/práctica

El reconocimiento del carácter subjetivo de las teorías científicas y técnicas no elimina todos los conflictos acerca de la pareja teoría/práctica. Entre los aspectos más problemáticos se encuentran los siguientes (cf. Addis, 1990:3-10,30-34):

1. Si, como ocurre tan a menudo en la teoría de estructuras, la aplicación práctica de una teoría debe previamente enmendarla, ¿debemos seguir manteniendo la preponderancia epistemológica de la teoría sobre la práctica?

2. ¿Cómo puede una teoría o una práctica contener las intuiciones y apuestas que, *precisamente*, usan los analistas y diseñadores para salvar la brecha entre teoría y práctica? ¿Puede enseñarse la intuición estructural?

3. ¿Cómo deben clasificarse los siguientes fenómenos?: a) teorías usadas por los diseñadores, b) investigaciones teóricas realizadas por científicos, c) comportamientos de estructuras construidas, y d) resultados de experimentos de laboratorio. En otras palabras, ¿cuáles de esos cuatro elementos son la 'teoría' y cuáles son la 'práctica'?

Lo más que se puede decir, sin levantar controversia, es que la respuesta a estas preguntas depende enteramente de la posición del *sujeto*. Un investigador científico, probablemente, considerará como parte de su trabajo 'práctico' los experimentos controlados que intentan refutar sus resultados 'teóricos'. Pero esos mismos resultados experimentales podrán ser considerados muy teóricos por el diseñador que lee una revista y poco útiles para

llevarlos a la práctica de construir un edificio real. Este tipo de conflictos es central para entender (y comprender) la posición de Midgley en la segunda anomalía mencionada.

Lo cierto es que desde tiempos de Vitruvio (1970:5) no pocos autores advirtieron la indisoluble unión entre teoría y práctica. A este respecto, merece la pena resumir esquemáticamente cómo surge la ingeniería civil y qué papel jugaron en ella ambos términos.

4.1 Rankine y el nacimiento de la teoría de estructuras en Gran Bretaña

Como tal ciencia, la Resistencia de Materiales fue creada por Galileo en el XVII. Sin embargo, hubo de transcurrir dos siglos para que surgiera una disciplina capaz de aprovecharla a la hora de diseñar artefactos. En ese camino, la importancia de la teoría fue menor de lo que generalmente se piensa. Por el contrario, lo más común fue que la 'ciencia aplicada' fuera a la zaga del 'arte de construir', y no al revés.

Es bien sabido que, en 1638, Galileo dedujo correctamente las proporciones *relativas* entre la resistencia de una viga prismática y sus tres dimensiones, aunque cometió un famoso error al intentar deducir su valor absoluto; la errónea fórmula daba como capacidad resistente a la flexión el valor $\sigma bh^2/2$. El error surge al considerar como condición de equilibrio sólo la de momentos, olvidando que las fuerzas horizontales de la sección de la viga también tendrían que estar en equilibrio. Ambas ecuaciones eran conocidas *por separado* desde, al menos, los tiempos

de la Grecia clásica (cf. Dugas, 1955; Gille, 1980). Hasta Newton y Varignon no existió una *teoría* que conectara de un modo coherente ambos principios. Y quizá hay que esperar hasta Lagrange (1788), para contar con una *teoría* que explicara *claramente* que *ambas* condiciones (junto a la de equilibrio vertical) deben cumplirse *simultáneamente*.

¿Basta con una teoría semejante para producir predicciones y aplicaciones correctas? La simple enumeración de los autores que reprodujeron, corrigieron o aumentaron el error de Galileo, no conduce a una respuesta nítida (véase Tabla 1). Tomando como referencia la publicación de la estática de Varignon, resulta notable que la fórmula correcta ($\sigma bh^2/6$) aparezca tanto antes como después, del mismo modo que las fórmulas incorrectas. La fórmula correcta, además, tiene una notable tendencia a aparecer en aquellos contextos, en los que conocimientos físicos y matemáticos se entremezclan, con el *propósito* de construir artefactos. Y en ocasiones surge con independencia de la corrección de la teoría (esto mismo ocurre con las fórmulas incorrectas: obtenidas en ocasiones aplicando mal, teorías explicativas coherentes en sí mismas). La Tabla 1 sugiere una conjetura plausible: la resistencia a flexión de las vigas no se explicó mediante una teoría, pero no se entendió sin ella; del mismo modo, cómo debía aplicarse el concepto físico del equilibrio en forma matemática, no se comprendió cabalmente sin la ayuda del diseño y construcción de artefactos que debían permanecer en equilibrio (aunque muchos de éstos se construyeron sin *nuestra* teoría del equilibrio). La Tabla muestra también cuán distinta es la realidad de la imagen popperiana de una acumulación

TABLA 1
Teorías sobre la capacidad resistente de vigas

AUTOR Y FECHA	TEORÍA	ACTIVIDAD	REFERENCIA
Royal Society, 1664	$\propto bh$	experimentos científicos controlados	DORN (1970:81)
Petty, 1674	$\propto bh^2$	aplicación práctica de proporciones, reglas de diseño	DORN (1970:94)
Mariotte, 1686	$= \sigma bh^2/3$	teoría científica	TIMOSHENKO (1953:I,23)
Varignon, 1702	$= \sigma bh^2/3$	teoría científica	TIMOSHENKO (1953:I,45)
Parent, 1713	$= \sigma bh^2/6$	investigación científica	TIMOSHENKO (1953:I,45)
ESTÁTICA DE VARIGNON, 1725			
Coulomb, 1773	$= \sigma bh^2/6$	ingeniería militar, reglas empíricas, cálculos matemáticos	TIMOSHENKO (1953:I,50)
MECÁNICA DE LAGRANGE, 1788			
Emerson, 1794	$= \sigma bh^2/2$	matemática aplicada a la mecánica	DORN (1970:134)
Robison, 1797	$= \sigma bh^2/6$	<i>Encyclopaedia Britannica, structural arts</i> , reglas de diseño	DORN (1970:147)
Girard, 1798	$= \sigma bh^2/3$	resistencia de sólidos	TIMOSHENKO (1953:I,43)
Bage, 1803	$\propto bh^2$	diseño de vigas de fundición	DORN (1970:163-165)
Navier, 1809-1813	$= \sigma bh^2/3$	ingeniería de puentes	TIMOSHENKO (1953:I,71)
Hodkinson, 1822	$= \sigma bh^2/6$	resistencia de materiales, teoría de estructuras	DORN (1970:233)
Navier, 1826	$= \sigma bh^2/6$	resistencia de cuerpos sólidos	TIMOSHENKO (1953:I,72)

armoniosa de investigaciones matemáticas y experimentos, a partir del problema propuesto por Galileo (cf. Dugas, 1955; Dorn, 1970:40; Addis, 1990).

El período desde 1638 hasta 1850 es el que media entre la aparición de las modernas teorías explicativas y la aparición de disciplinas que, como la ingeniería civil, pretenden la construcción de artefactos haciendo uso ventajoso de aquéllas; en definitiva, mezclando teoría y práctica de un modo provechoso. La utilidad de mezcla semejante fue entrevista por Galileo², William Petty o John Robison³. Rankine (1858) fue más allá de una simple advertencia, distinguiendo no entre ellas, sino entre dos formas de progreso: el empírico y el científico. Cada disciplina de diseño tendría su propia autonomía epistemológica (dedicada a la aplicación de *principios* científicos a *propósitos* prácticos: la 'Armonía' entre teoría y práctica). Cuando Rankine sustituye el par teoría/práctica por el de ciencia/empiría no está haciendo una propuesta epistemológica novedosa, más bien acomete la síntesis de lo que habían sido los dos últimos siglos de estudios teóricos y resultados prácticos, intentando construir un todo coherente que pueda ser *aprehendido* por estudiosos y artesanos (cf. Dorn, 1970:234; Addis, 1990).

La propia obra de Rankine muestra que esa tarea no es cosa sencilla: su propio estilo de examinar el caso general para descender a los casos particulares de interés práctico, no hace especialmente fácil su lectura (lo que no empequeñe su popularidad como libro de texto: ahí están las 44 ediciones de su *Applied Mechanics*, cf. Dorn, 1970; Timoshenko, 1953:198). De hecho, a partir de manuales como el de Rankine, el acento volvió a recaer sobre la teoría y su *aplicación* a la resolución de problemas prácticos. Como se ve, ninguno de los autores que han advertido del peligro de dividir la disciplina en teoría y práctica han tenido un éxito duradero, y la imagen de un corte entre teoría y práctica es una noción popular y de amplio uso (aunque, de hecho, no cuenta con respaldo epistemológico comparable al de la noción contraria). Debe quedar claro que una vez se alcanza una unidad coherente entre teoría y práctica, o ciencia y experiencia, no queda asegurado que esa unidad se conserve. Por el contrario, para que no se diluya y pierda vigor, es necesaria una *búsqueda permanente* de armonía.

5. Diseño de estructuras

La propuesta de Addis (1990:38) para resolver los conflictos que ocasiona la pareja teoría/práctica es, simplemente, ignorarla. Para ello construye una definición del diseño de estructuras centrada completamente en el *sujeto*⁴ y en la que se puede apreciar la autonomía disciplinar señalada por Rankine. Centrarse en el sujeto significa, simplemente, explorar su *propósito*. Y en el diseño de estructuras el propósito es ser capaz de *describir* el proyecto de un diseño y argumentar a su favor ante otros, *justificarlo*. Los

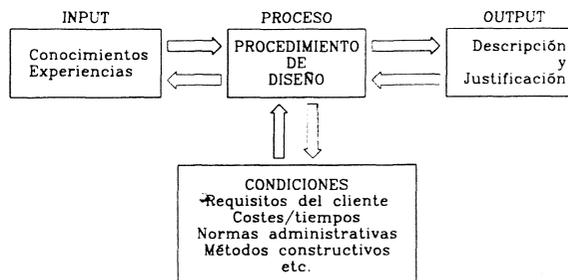


Fig. 2.- Definición del diseño de estructuras.

distintos elementos de la definición se muestran en la Figura 2. Las dobles flechas indican posibilidad de retroalimentación, aunque el flujo normal será de izquierda a derecha y de abajo a arriba. El diseñador cuenta con su experiencia y conocimiento anteriores para ofrecer un resultado que debe tener en cuenta las condiciones del encargo, incluso para criticarlas (cf. Arup, 1984).

Para situar el diseño en un marco más general, simplemente hay que seguir la 'regla del sujeto' y considerar sus propósitos. De este modo, Addis (1990:35-36) propone cortes entre la ciencia de las estructuras (*engineering science*) y el diseño de estructuras (*engineering design*), pero también entre el diseño de estructuras y su construcción. La ciencia de las estructuras tiene, como propósito final, comprender y explicar los fenómenos observados y está emparentada con ciencias como la física (compartiendo métodos y teorías). El diseño de estructuras, por su parte, tiene que ver principalmente con el proyecto de artefactos en condiciones de poco control e información reducida (conocimiento *incompleto*). Por supuesto que el diseñador hace uso de la 'ciencia', pero en la medida en que los propósitos difieren, el juicio acerca de la calidad de ese uso diferirá (y difiere, véase la discusión en 2.1). La distinción entre análisis y diseño no es nueva, ya Cross (1936) la discutió en detalle. Como en el caso de la armonía de Rankine, la 'armonía' entre análisis y diseño es, también, de las que tienden a olvidarse: y debe ser restaurada cada cierto tiempo.

Con esta definición pueden ordenarse los conocimientos, herramientas y destrezas necesarios, es decir, el compendio de lo que debería constituir la disciplina.

5.1 El resultado del diseño

El diseñador debe describir y justificar el proyecto de un artefacto. La descripción consiste en la especificación de una forma geométrica y los materiales que la dan cuerpo. En este contexto, casi todo el acento recae sobre la geometría, que resulta ser un conocimiento muy básico para el diseñador. Pero también un criterio de calidad para otros instrumentos: una regla de diseño capaz de producir la

descripción geométrica del proyecto será preferida a otras que carezcan de esta ventaja.⁵ Más aún, la facilidad en la descripción (que sostiene la facilidad de comunicación entre el diseñador y el resto de agentes) es un primer rasero en la elección de los diseños: los diseños difíciles de describir son generalmente ignorados como posibles soluciones.

La justificación de los diseños requiere la capacidad de argumentar en su favor. No sólo ante terceros: el primer convencido acerca de la fiabilidad de un diseño tiene que ser el propio diseñador. Los argumentos son, en general, de dos tipos, deductivos e inductivos. En el primer caso, partiendo de una serie de axiomas o hipótesis, se deduce de un modo lógico 'infalibles' consecuencias (tan infalibles como sean las hipótesis). En el segundo, la inducción, basada en la experiencia anterior, permite argumentar que si un diseño tuvo éxito en el pasado y las condiciones se repiten, volverá a tener éxito. Aquí tampoco hay nada infalible, debido al uso de la cláusula *ceteris paribus*. Ambos métodos, descritos por separado por pura comodidad, dan lugar a formulismos matemáticos. La distinción, a pesar de todo, debe mantenerse cuidadosamente: la deducción llama a las teorías de explicación del mundo, al porqué de las cosas, mientras la inducción invoca en su favor, el cómo han venido siendo hasta ahora. La justificación de un diseño combina *necesariamente* ambos extremos.⁶ Es razonable pensar que el diseñador no se aventure con soluciones que *a priori* no sabe cómo justificar. De ahí que el estudio de los tipos estructurales convencionales sea fundamental en la disciplina del diseño (Torroja, 1991), mientras que una teoría de análisis puede simplemente ignorarlos, sustituyéndolos por tipos de problemas que pueden ser resueltos.

Aunque descripción y justificación se han separado por conveniencia, su mezcla sugiere las características del procedimiento *ideal* de diseño: un argumento geométrico capaz de justificar la solución al mismo tiempo que la describe. Tal fue el papel de las reglas de proporción en arquitectura (cf. Addis, 1990:115-122; Cervera, 1993; Vitruvio, 1970:5), con una ciencia muy distinta a la nuestra. Hemos de reconocer, sin tapujos, que estamos bastante lejos de haber alcanzado algo semejante o comparable.

5.2 Fuentes del conocimiento

Esencialmente, el diseñador se enfrenta a cada nuevo problema pertrechado con dos tipos de conocimiento: uno, que puede hacerse 'público' y transmitirse y que pertenece a la cultura, pero también otro, personal, adquirido mediante la experiencia y el entrenamiento y que resulta ser mucho más difícil de comunicar.

Por su propia naturaleza, el conocimiento personal poco papel puede jugar en el objetivo del diseñador (describir y

justificar un diseño, es decir, comunicar algo sobre él) y, sin embargo, quizá es una parte esencial del proceso que lleva desde el planteamiento de un problema a una solución, cuando ésta no sólo es correcta, sino que puede ser admirada por el *público* (Arup, 1984). El papel del conocimiento personal es un tema escurridizo que no por ello debe escapar a examen, aunque para el orden de la discusión prefiero posponerlo hasta después.

El conocimiento público es una amalgama de muy diversas teorías y datos, aplicables a cortes muy distintos de la percepción de la realidad y en la que, a menudo, compiten o colaboran distintos modelos.

Conocimientos empíricos. En los que cabe incluir desde *datos* en estado bruto (almacenados quizás en 'constantes empíricas'), *leyes* cualitativas (una barra poco esbelta no patea, pero una barra esbelta puede hacerlo) y cuantitativas (relaciones entre carga de colapso y esbeltez de columnas), que empaquetan conjuntos de datos y *reglas*, que generalmente revierten el flujo de información de una ley cuantitativa, quizás incluso extrapolando valores más allá de los datos, de manera que pueda ser usada para el diseño (tensiones de trabajo en columnas según su esbeltez). En ningún caso se trata de respuestas al porqué de las cosas (no hay teoría explicativa), más bien son las respuestas respecto al cómo y al cuánto que obtenemos tras interrogar a la naturaleza.

Teorías explicativas. Se trata de teorías y no de 'teoría'. Teorías que intentan explicar y dar respuesta al porqué de los fenómenos y que caen dentro de lo que usualmente se entiende por 'teoría científica' y en teoría de estructuras se trata casi siempre de física y termodinámica. Una teoría sobre estructuras no está obligada a suministrar reglas para diseñarlas, tan sólo a explicar por qué se comportan como lo hacen y, en último extremo, a predecir cómo lo harán. El uso de una teoría científica como instrumento de diseño siempre es posible en un proceso de prueba y error. Pero destilar a partir de ella una teoría de diseño requiere todavía mucho trabajo adicional de 'reversión' del flujo (del mismo tipo que el que convierte una ley empírica en una regla). Esta operación debería formar el núcleo de la investigación en diseño (desde luego un área distinta de la investigación en análisis, cf. Vázquez, 1995:68).

Matemáticas. A ellas conduce, inevitablemente, la cuantificación de reglas, leyes y teorías. El formulismo matemático es un instrumento valioso como medio de comunicación. Una vez que las teorías y el conocimiento empírico sugieren un conjunto de axiomas y reglas de inferencia, puede comenzar la construcción de un modelo matemático, demostrando teoremas con las reglas a partir de los axiomas. Sin embargo, lo así construido es un *modelo matemático* y nada más⁷.

El paso de un modelo físico a uno matemático es quizá un área específica que requiere mucha atención. La utilidad de los modelos matemáticos depende totalmente de que el paso inverso sea posible, es decir, reinterpretar los resultados matemáticos en términos de su *significado* físico. (Este es el problema que no supo resolver el 90% de los que se enfrentaron al test de Brohn.) Mientras que las teorías físicas se refutan o validan por contraste de los resultados con experimentos controlados, los diseños sobreviven en condiciones inciertas e irreproducibles. Y, en consecuencia, un mejor acuerdo del modelo con el experimento, no tiene porqué significar un mejor acuerdo del modelo con los diseños reales (éste es el tipo de conflicto que Midgley ni siquiera intuyó). Así, el refinamiento de incluir el acortamiento de barras en programas de análisis de pórticos de hormigón armado puede resultar en un peor acuerdo entre modelo y diseño (cf. Miguel, 1984:66).⁸

Conocimiento dialéctico. Las fuentes de conocimiento examinadas con anterioridad podrían ser descritas y quizá aplicadas de un modo formal (algorítmico o computacional): pueden ser objeto de cálculo lógico. Sin embargo, hay toda una suerte de conocimientos en los diseñadores experimentados que no pueden formalizarse, aunque todavía admiten una cierta expresión 'pública'. Se trata, en general, de la destreza de anticipar los resultados de los cálculos (de análisis o diseño) sin haberlos realizado, lo que habitualmente se conoce como *intuición estructural* (cf. Cross et Newlin, 1932; Torroja, 1991). Entre ellos figuran toda suerte de operaciones y manipulaciones *mentales* durante el proceso de diseño que requieren imaginar la estructura en construcción o construida, su deformación o movimientos, su destrucción o el uso variable del edificio y sus consecuencias en términos de acciones.

En todos estos 'experimentos mentales' juegan un papel fundamental los mismos conceptos de los modelos matemáticos. Sin embargo ahora se trata de conceptos dialécticos en un sentido preciso: entre una estructura 'rígida' y otra 'flexible' no existe la frontera nítida que dibuja el requisito de rigidez en su forma aritmética (deformación tolerable). Si en la versión aritmética (o lógica) se aplica la cláusula *tertium non datur*, en la versión dialéctica existe la tercera situación representada por la propia frontera borrosa, sin que la mente se sienta perturbada por ninguna contradicción, y sin que se vea impedida para llevar a término la manipulación de la imagen. De hecho, podemos pasar de la realidad a la física y, de aquí, al modelo matemático y regresar, porque mentalmente mantenemos esas fronteras borrosas que caracterizan el pensamiento dialéctico y que la cuantificación aritmética no puede representar. No cabe esperar que el diseño de estructuras adopte una *estructura* de axiomas y reglas de inferencia, puesto que muchas variables de una estructura material (dureza, deformación, flexión) son a lo más *cuantificadas* en las que el carácter de la cualidad acaba por prevalecer⁹.

Tales modelos mentales guían la elección de los modelos físicos y matemáticos que se emplearán posteriormente, permitiendo la interpretación de los resultados de estos últimos. A su vez, esa destreza se obtienen de la experiencia mediante el manejo de modelos matemáticos o físicos, es decir, del entrenamiento. Aquí no puede enseñarse la destreza en sí aunque sí incitar a adquirirla, es decir, incitar a 'aprender a aprender'. Técnicamente se trata de *deuteroaprendizaje*. Aquí surge un conflicto de importancia: el paradigma racional y el mecanicismo que surgió de él no permiten reconocer ni contar con el deuteroaprendizaje. Tal y como lo expresó Bateson (1972:304 y 274):

“Superponiendo e interconectando muchos circuitos de retroalimentación, nosotros (y todos los otros sistemas biológicos) no sólo resolvemos problemas particulares, sino que también formamos *hábitos*, que aplicamos a la solución de *clases* de problemas.

Actuamos como si toda una clase de problemas pudiera resolverse en términos de suposiciones o premisas, cuyo número es menor que el de los miembros de la clase. En otras palabras, nosotros (los organismos) *aprendemos a aprender*, o, para emplear una frase más *técnica*, deuteroaprendemos.”

pero:

“Hemos aprendido del cuerpo en caída libre (y de muchos paradigmas similares) a enfocar los problemas [...] de una manera peculiar: los problemas tienen que simplificarse ignorando la posibilidad (o posponiendo la consideración) de que el contexto más amplio pueda influir sobre el más restringido. Nuestra hipótesis va en contra de esa regla y se centra, precisamente, sobre las relaciones determinantes que se dan entre los contextos mayores y menores.”

Los procedimientos de diseño se apoyan en muchas ocasiones, si no en todas, en la *regla de Bateson*: examinando las propiedades que deben tener los diseños correctos (el contexto mayor) pueden deducirse métodos de análisis aproximados (el contexto menor), groseros en general, pero extraordinariamente exactos en el caso de aquéllos (cf. nota 8). Por el contrario, la destreza analítica, aislada, conduce al hábito de ignorar el contexto más amplio en el que se desarrolla la labor del proyectista, un hábito protagonista en las dos anomalías mencionadas. Este hábito erróneo se propaga con intensidad al amparo de la hiperespecialización técnica, a modo de anteojeras que impiden al técnico ver fuera del estricto marco de su 'teoría', incluso ignorando evidencias experimentales.

5.3 Diseño como arte

La idea de que el diseño es un arte, es recurrente entre muchos de los más prestigiosos diseñadores (cf. Addis, 1990; Brohn, 1996). La afirmación, sin embargo, podría

resultar vacía de contenido porque, después de todo, ¿qué es el arte? Tal y como brevemente lo expresó Isadora Duncan al ser interrogada acerca del *significado* de su baile: "Si yo pudiera explicarle a usted de qué se trata, no tendría sentido que lo bailara." Es decir, "si el mensaje fuera de esos que se pueden comunicar mediante palabras, sería ocioso bailarlo, pero no es un mensaje de esa clase." (Bateson, 1972:165) Los mensajes de la *destreza*, ya sea técnica, artística o científica, son siempre mensajes inexpresables. Y es la *destreza* una de las borrosas fronteras entre el diseño como disciplina autónoma y el análisis en tanto que ciencia o 'teoría' aplicada.

Lejos de tratarse de una cuestión 'metafísica', el carácter estético del diseño es clave para entender el significado de las anomalías señaladas. Aunque varios diseñadores prestigiosos se han ocupado en detalle del asunto (Candela, 1985:11; Torroja, 1991), hay un breve texto de Ove Arup (1984) que lo explora con una claridad poco común:

"Una fuerza no es sólo una línea recta con una punta de flecha en un extremo. Eso es sólo un abstracción conveniente o una abreviatura para lo que, en realidad, resulta ser una masa de partículas bajo tensiones y deformaciones, en perpetuo cambio y movimiento bajo la menor provocación de circunstancias cambiantes. La teoría de estructuras y, de hecho, todo nuestro aparato científico se apoya en tales abstracciones. Con ellas podemos imponer cierto orden sobre el caos al que nos enfrentamos cuando observamos las inagotables y apabullantes maravillas de la naturaleza, que exceden, con mucho, nuestra capacidad de comprensión. Hemos descubierto incluso que, suponiendo que el mundo imaginario de la ciencia es una representación realista y actuando en consecuencia, podemos influir y cambiar el mundo que habitamos, hasta el extremo de poder abolir la escasez y las tareas penosas y, de hecho, realizar casi cualquiera de nuestros deseos, incluyendo la destrucción del planeta del que dependemos, junto a su fauna y flora, en unas pocas semanas (sólo necesitaríamos ponernos de acuerdo acerca de por dónde empezar).

Toda esta representación mecánica del mundo, el mundo cartesiano o newtoniano de la ciencia, tiene ahora intensos problemas; en todas las disciplinas descubrimos que no funciona, la naturaleza simplemente no colabora, no funciona así. No tengo tiempo ahora para discutir sobre ello y, en cualquier caso, hay miles de libros y panfletos sobre el tema. Pero, ¿cómo afecta todo esto a la teoría de estructuras y a toda la tarea de la ingeniería de estructuras? Nuestras estructuras continuamente van siendo mejores, más grandes, ligeras y seguras; nuestras máquinas son más eficaces, más suaves y consumen menos energía. Continuamente aprendemos a hacer más con menos, de manera que ¿qué está mal en todo esto?

[...] antes de que podamos aplicar nuestro análisis numérico a una estructura, tenemos que llegar a una situación crítica e importante; a saber, tenemos que tener una estructura que analizar. Sólo entonces nuestro análisis nos dirá si la estructura es capaz de hacer lo que se supone que hace. Además, las destrezas necesarias para elegir esa estructura preliminar son de una naturaleza completamente diferente de aquellas otras que desarrollamos gradualmente cuando hemos dominado las técnicas estructurales.

Brohn [1990] se limita a sugerir que la base de esas destrezas es el reconocimiento de la relación entre la carga y el comportamiento resultante de la estructura, en otras palabras, que obtenemos una comprensión intuitiva de cómo una estructura se comportará bajo carga. Así, una vez que hemos obtenido la experiencia necesaria, podremos elegir, al menos aproximadamente, la estructura para una tarea dada, simplemente observando su forma y proporciones en un dibujo. Esto es, desde luego, muy importante, pues el creciente uso de ordenadores está eliminando en gran parte esta comprensión que es tan esencial para salvar el arte de diseñar estructuras.

[...]

Comprender el comportamiento de las estructuras es muy necesario, pero ¿no hay muchas otras cosas que son igual o incluso más necesarias?

Cualquier prestigioso diseñador de estructuras declarará que el diseño de estructuras es un arte tanto como es la aplicación de la ciencia y la técnica a un problema dado. Podría darse la vuelta al argumento diciendo que sólo si, además, se trata de una obra de arte será admirada y añadirá prestigio a su diseñador. Desafortunadamente, es imposible definir lo que implica arte, pero en cualquier caso nada tiene que ver con el análisis numérico. Hay muchos otros problemas que tienen que considerarse. *Todo el propósito* del diseño de estructuras es ayudarnos a fabricar las cosas que necesitamos, o que imaginamos necesitar, o que simplemente imaginamos. Así que tenemos que tener muy claro qué queremos alcanzar con nuestro diseño, lo que, obviamente, afectará a su forma, los materiales que usamos y a toda suerte de otras cosas. Si queremos construir algo, ¿se trata del lugar correcto? ¿no podríamos alcanzar mejor nuestro objetivo de otra manera totalmente diferente después de todo? Sólo cuando hayamos contestado todas esas cuestiones a entera satisfacción nuestra y de nuestros clientes, el análisis de estructuras comenzará a ser relevante. Obviamente, lo que yo llamaría *diseño* es mucho más importante que el análisis de estructuras, puesto que determina lo que vamos a obtener por nuestros esfuerzos. Y, por otra parte, *lo que decidimos hacer* es mucho más importante que cómo hacerlo, y esto

abre la llave de paso para toda una caterva de asuntos sociales, políticos, éticos, que nos amenazan con la confusión, o algo peor, porque podemos ser incapaces de llegar a un acuerdo sobre qué hacer.

Cómo vivir en paz con nuestros semejantes sobre este planeta sin destruirlo es la final y ahora urgente pregunta y ojalá supiera la respuesta."

6. Conclusiones provisionales

6.1 La enseñanza del diseño de estructuras

Si hay acuerdo, al menos dialéctico, con lo anterior, creo que será fácil entresacar conclusiones para la enseñanza del diseño de estructuras (y de otras disciplinas de la ingeniería y la arquitectura). La principal es la última de las conclusiones del análisis precedente: todo el período de entrenamiento del estudiante, en relación con las estructuras mecánicas, debe centrarse en el diseño, que es el *propósito* que habrá de guiarle en el ejercicio de su profesión. El diseño debe ser ofrecido como disciplina autónoma, como una destreza distinguible que debe ser aprendida de manera específica. Como mencioné al principio, ésta no es una propuesta novedosa. Sin embargo, ese cambio de acento no puede consistir simplemente en un cambio de enfoque hacia los aspectos prácticos de la ingeniería, o hacia la interpretación de normativas sobre diseño de estructuras. A fin de cuentas, la enseñanza universitaria tiene que seguir basculando alrededor del aprendizaje de destrezas intelectuales y, en particular, del *deuteroaprendizaje*. Del mismo modo que ha sido posible desarrollar programas académicos para el análisis de estructuras o el proyecto de arquitectura, debe ser posible un programa semejante centrado en el diseño de estructuras. Esquemáticamente, tal programa debiera incluir:

1. La estructura disciplinar del diseño de estructuras.
2. La posibilidad de describir y justificar un diseño de diferentes maneras.
3. El papel relativo que, dentro de esa estructura disciplinar, juegan las ciencias de las estructuras y otros tipos de conocimiento.
4. El papel de una aproximación sensible al comportamiento estructural y el aprendizaje de destrezas mentales en relación con él.
5. La utilidad del análisis de estructuras y de los modelos físicos para el entrenamiento y aprendizaje de esas destrezas mentales.
6. La importancia relativa del análisis matemático, las reglas empíricas, las estructuras construidas y las normas técnicas.

7. Los diversos factores que afectan la selección de modelos matemáticos para representar estructuras, los materiales con que se construyen o las acciones que las afectan.

8. La importancia de los diversos criterios (tales como las diferentes magnitudes que miden fallos o *economías físicas*) que deben ser considerados durante el diseño y su dependencia de los propósitos sociales o culturales.

9. Las diferentes nociones de seguridad y satisfacción de requisitos incorporados en los distintos procedimientos de diseño.

10. Los distintos criterios mediante los cuales distintos diseños pueden ser comparados entre sí y con su función en el edificio, considerado como un todo.

11. La evaluación crítica de las estructuras, de los procedimientos de diseño y de los propios diseñadores.

12. Las enseñanzas de la historia de las estructuras.

El aprendizaje de destrezas tiene que ver con situaciones abiertas, en las que hay que *decidir* entre posibilidades. La creencia de que la teoría de estructuras, los cálculos y el análisis llevan inevitablemente a una única y correcta solución debe ser definitivamente desterrada. Muchos procedimientos pedagógicos habituales en la enseñanza de otras técnicas pueden ser usados para sustituir a la habitual 'resolución de problemas'. En particular, el estudiante debería enfrentarse tan pronto como sea posible a la realización de ejercicios de diseño en los que pueden existir múltiples soluciones que deben ser descritas y justificadas; pero en los que sus resultados pueden ser sometidos a evaluación crítica por compañeros y profesores (cf. Cairns *et* Chrisp, 1996).

Honestamente, creo que nuestros actuales programas de enseñanza de ingeniería y arquitectura recogen muy poco de estas propuestas, limitándose a clases teóricas y resolución de problemas. Pero su adopción resulta urgente si es que "se desea que más ingenieros [y arquitectos] sean capaces de vérselas con las incertidumbres de la gente y del mundo real, y no sólo con certeras soluciones a problemas matemáticos." (Addis, 1990:204).

6.2 La práctica de la ingeniería y la arquitectura

Los doce puntos anteriores representan una situación ideal. Pero para la actual coyuntura hay que subrayar la urgencia de que el punto 8 sea debidamente considerado. Todas las anomalías, como la segunda de las mencionadas, se deben a la ignorancia de los propósitos implícitos o explícitos de cualquier actividad de diseño. Y, desde luego, no puede valorarse o criticarse aquello que se ignora.

Allí donde Aristóteles o Vitruvio podían hablar de economía, hoy es necesario emplear la expresión 'economía física', a

fin de deslindarla nítidamente de la economía monetaria, la antigua crematística, denominada hoy economía a secas (cf. Aguilera, 1996). No por casualidad la tradición de una economía física ha llegado en parte a nosotros a través de la arquitectura y la ingeniería, gracias a aquellos estudiosos que conservaron la diferencia entre la medida física y monetaria del valor, allí donde la generalidad de los economistas quedaron atrapados en la simple y fascinante visión del agregado monetario.¹⁰ Para las personas con formación técnica, el hecho de que ninguna unidad monetaria figure en el Sistema Internacional de unidades (ni se espera que lo haga) debiera bastar para desentenderse de la economía monetaria como de una *pseudociencia* (Guerrien, 1992). Sin embargo, la inmensa mayoría de los técnicos han quedado atrapados en sus propósitos implícitos, no pudiendo mirar más allá de las anteojeas impuestas por el análisis y la especialización. El ejemplo más dramático es el propio texto de Arup citado más arriba: su afirmación de que “aprendemos a hacer más con menos” sólo se verifica *precisamente* en términos monetarios. Por el contrario, la contabilidad de magnitudes físicas (energía, concentración de sustancias, etc.) muestra que cada vez necesitamos más para obtener lo mismo (cf. Vázquez, 1996).

Se quiera o no, la gestión de los recursos agotables de nuestro planeta se realiza, en gran parte, a través de la arquitectura y la ingeniería. Que esa gestión sea racional o suicida dependerá, entre otras cosas, de la conciencia de los diseñadores (cf. Vázquez, 1997a). En nuestras manos está seguir, o no, ignorando las consecuencias de nuestra actividad, seguir, o no, resolviendo problemas con soluciones desprovistas de *propósito*.

NOTAS

1. A mediados del siglo pasado era habitual definir la función del ingeniero civil como la actividad “de empuñar los resultados descubiertos por el matemático abstracto, el químico, y el geólogo y aplicarlos prácticamente para la ventaja comercial del mundo”, (Georgy Bidder, 1859; citado por Addis, 1990:4). Sin embargo, muchos de los ‘practicantes’ se mostraron reacios a admitir la preponderancia de la teoría. Como ejemplo, bastará con comparar dos descripciones del *Forth Bridge*. Para un ‘teórico’, ese puente fue un gran triunfo de la teoría: “para su diseño y construcción no se necesitó ningún experimento, a pesar de que la forma y el modo de construcción fueron muy especiales, si es que no absolutamente novedosos; y además sus dimensiones [...] eran tan gigantescas, que los autores del diseño poca ayuda podrían haber obtenido de su experiencia previa” (Anderson, 1893; citado por Addis, 1990:4). La descripción del diseñador no puede ser más antagónica: “El mérito de este diseño, si es que tiene alguno, no se encontrará en la novedad de los principios teóricos aplicados, sino en la aplicación resuelta de resultados experimentales y de leyes mecánicas muy bien comprobadas [en otros diseños], al difícil problema de construir un puente tan grande.” (Baker, 1882; citado por Addis, 1990:12-13).
2. “Esta ciencia [la resistencia de vigas] es muy necesaria para fabricar máquinas y toda clase de edificios”, carta a Antonio de Medici, 1609; citado por Dorn (1970:84).
3. “Nuestro único propósito será deducir, de los principios y leyes de la mecánica, y del conocimiento adquirido acerca la resistencia de la madera y de su deformación desde la experiencia y de inferencias razonables a partir de ella, reglas de construcción que aunen la economía con la resistencia y la eficiencia...”, citado por Dorn (1970:189).
4. Una operación que coincide con una de las principales sugerencias de Feyerabend (1970:134): “Para empezar, a mí me parece que una empresa cuyo carácter humano puede verse por todos lados es preferible a una que se muestre ‘objetiva’ e impermeable a los deseos y acciones humanas”.
5. El éxito en España de los programas de análisis (elástico) de pórticos de hormigón armado debe atribuirse, en mi opinión, a una característica más que a cualquier otra: producen los planos de la estructura. Otro asunto, que no es cosa de tratar aquí, es la calidad de dicha descripción.
6. Los conflictos que surgen cuando falta uno de los dos tipos de argumentos producen sonrojo: hace unos meses un colega me telefoneaba acerca de la estabilidad de una torre de mampostería en Zaragoza. Un prestigioso instituto de ingeniería sostenía que la torre tenía problemas de pandeo y proponía descargar urgentemente la torre del peso de la cubierta de madera. Con sólo esos datos más la altura de la torre pude tranquilizar a mi colega. Todas las torres conocidas de ese tipo están cerca de su tamaño insuperable, lo que permite ignorar las sobrecargas (justo la operación inversa que en las estructuras convencionales, en las que el peso propio es tanto más marginal cuanto mejor es el diseño). Por supuesto no pandean, por la pura imposibilidad geométrica de combarse sin volcar antes. Tiempo después mi colega me informó de sus pesquisas acerca del informe del prestigioso instituto: cálculos basados en la teoría de la elasticidad aplicados a una rebanada de muro de ancho unitario... ¡sin ningún tipo de justificación de las hipótesis de partida! (que dieron lugar a unas cuatrocientas páginas sin ninguna utilidad, pero con un alto precio).
7. Resulta en ocasiones difícil distinguir entre un modelo físico y uno matemático, pero el paso del tiempo suele hacer el trabajo. Esquemáticamente, podemos considerar la teoría de la elasticidad como una teoría matemática, aunque en sus orígenes fue una teoría física (cf. Bisplinghoff, Mar *et* Pian, 1990:2-4). La ciencia de materiales nos enseña hoy que las tensiones en un sólido *macroscópicamente* isótropo, lineal y elástico (como el acero) están lejos de parecerse siquiera a las predichas por la teoría de la elasticidad; la razón principal es que el acero no es *microscópicamente* isótropo. Sin embargo, hay concordancia suficiente en los valores medios de la tensión y el modelo matemático sigue siendo *útil* después de todo. Resulta instructivo conocer por qué ocurre así: la tensión media coincide porque, incluso, por debajo del límite elástico medio, ya se han puesto en marcha, *microscópicamente*, los mecanismos de redistribución de tensiones (cf. Gordon, 1976). De hecho, para la explicación microscópica resulta, hoy por hoy, más inteligible la elasticidad de Navier (que era una teoría física) que la matemática de Green (cf. Timoshenko, 1953; Dugas, 1955;

Addis, 1990). En este orden conviene recordar que la geometría euclidiana fue, hasta hace poco, un modelo físico, hasta que las nuevas geometrías la redujeron a un modelo matemático más.

8. La historia del 'problema del soporte que se acertaba demasiado' no, por anecdótica, resulta menos instructiva. Al incluir el acortamiento de los soportes en el análisis de pórticos triviales (dos vanos, cinco alturas y carga vertical), aparecen tracciones en la cara inferior de las vigas a su paso sobre los soportes interiores, resultando un diseño de armaduras ajeno por completo al sentido común. Propuse el ejemplo al profesor José Luis de Miguel como un caso en el que el calculista debía corregir al programa de ordenador. ¿Por qué no había acuerdo entre ambos cálculos? Hay varias razones. Desde luego los soportes acortan, pero, en realidad, lo hacen a medida que se construye la estructura (no simultáneamente, como se supone en el programa), de manera que sólo una fracción de la diferencia de descenso puede afectar a las vigas. Además, el pórtico se analiza con sólo las dimensiones del hormigón: soportes con igual sección bruta y diferente sollicitación tendrán diferente deformación en el modelo, con la consiguiente influencia en las vigas. Pero, al final, los soportes más cargados se reforzarán con más acero, así que, después de todo, la deformación media será esencialmente la misma. Ésta es una regla de diseño que permite conocer, con exactitud razonable, el resultado sin hacer análisis ninguno. Con un corolario: en hormigón *no debe* tenerse en cuenta los acortamientos de soportes, si no se tiene en cuenta su armadura. Desafortunadamente, la identificación popular entre la bondad de un modelo y su complicación matemática presiona a los programadores a adoptar refinamientos semejantes, físicamente inadecuados (Brohn, 1996). El caso sirve también para ilustrar la distan-

cia entre análisis y diseño y la dificultad de comunicación que, a veces, surge entre especialistas de cada disciplina. Miguel comentó la regla de diseño al profesor Francisco Morán (un reputado científico de merecido prestigio) quién, en principio, no se dejó convencer. Sólo cuando acometió por sí mismo el análisis y llegó a las mismas conclusiones numéricas, comenzó a entender el *significado* del argumento: sólo entonces se convirtió en su propia regla (cf. Jiménez, García *et* Morán, 1987:II,230).

9. El asunto es demasiado importante, a la vez que complejo, para que pueda ser tratado aquí con la debida profundidad. De hecho no hay acuerdo sobre qué estatuto epistemológico debe dársele al carácter dialéctico de los conceptos científicos. Análisis detallados pueden encontrarse en Georgescu-Roegen (1971) y Feyerabend (1970). Pero no hay duda de que sin ese carácter no hay forma de entender cabalmente el conocimiento. Este carácter no es sólo teórico, tiene utilidad práctica: véase el trabajo de Soh *et* Yang (1996) sobre lógica borrosa en el diseño de estructuras y mi propia crítica, Vázquez (1997 b).
10. Baste citar, como ejemplo, el trabajo fundacional de la teoría de optimización de estructuras, debido a Michell (1904). No es de extrañar, por tanto, que los economistas que hoy intentan devolver a la economía su primer sentido, recurran con naturalidad a argumentos nacidos en la teoría de estructuras; así, por ejemplo, Naredo (1987:393-394), recurre sin remilgo a autorizados argumentos de Eugène Freyssinet. Merece la pena recordar que entre los múltiples orígenes del movimiento ecologista (hoy medio sepultado por la sospechosa antinomia "desarrollo sostenible"), se encuentra un texto fundacional de un padre de la termodinámica: *Sobre las reservas de energía de la naturaleza y su valoración para uso de la humanidad* (Clausius, 1885).

REFERENCIAS

- ADDIS, WILLIAM (1990): *Structural Engineering: The Nature of Theory and Design*. Chichester: Ellis Horwood.
- AGUILERA, FEDERICO (1996): *Economía y medio ambiente: un estado de la cuestión*. Madrid: Fundación Argentaria, 1996.
- ARUP, OVE (1984): "Foreword to First Edition." en Brohn (1990:IX-X).
- BAKER, A.L.L. (1956): *The Ultimate-Load Theory Applied to the Design of Reinforced & Prestressed Concrete Frames*. London: Concrete Publications Ltd.
- BAKER, J.F, HORNE, M.R, y HEYMAN, J. (1956): *The Steel Skeleton 2: Plastic Behaviour and Design*. London: Cambridge University Press.
- BATESON, GREGORY (1972): *Steps to an Ecology of Mind*. New York: Chandler Publishing Co. (Se cita la traducción castellana *Pasos hacia una ecología de la mente*. Buenos Aires: Planeta, 1991).
- BISPLINGHOFF, RAYMOND L., MAR, JAMES W., y PIAN, THEODORE H.H. (1990): *Statics of deformable solids*. New York: Dover Publications.
- BROHN, DAVID; (1990): *Understanding Structural Analysis*. Oxford: Blackwell Scientific Publications Ltd. 2ª ed.
- BROHN, DAVID (1996): "Engineering on the right." *The Structural Engineer*, v. 74, nº 22, pp. 380-382.
- CAIRNS, J. y CHRISP, T.M. (1996): "A strategy for teaching structural engineering design." *The Structural Engineer*, v. 74, nº 22, pp. 375—379.
- CANDELA, FÉLIX (1985): *En defensa del formalismo y otros escritos*. s.l.: Xarait.
- CERVERA, JAIME (1993): *Diseño de estructuras en edificación*. Madrid: Instituto Juan de Herrera y DEE (ETSAM).
- CLAUDIUS, RUDOLF (1885): *Ueber die Energievorräthe*

- der Natur und ihre Verwerthung zum der Menschheit*. Bonn: Verlag von Max Cohen et Sohn.
- CROSS, HARDY (1936): "The relation of analysis to structural design" *Trans. Am. Soc. Civil Eng.* n° 62, pp. 1.363-1.408.
 - CROSS, HARDY y MORGAN, NEWLIN (1932): *Continuous Frames of Reinforced Concrete*. New York: John Wiley & Sons.
 - DORN, HAROLD (1970), *The art of building and the science of mechanics: a study of the union of theory and practice in the early history of structural analysis in England*. Princeton University, Ph. D.
 - DUGAS, RENÉ (1955): *A History of Mechanics*. Neuchâtel: Editions du Griffon.
 - ESTEVAN, ANTONIO y SANZ, ALFONSO (1994): *Hacia la reconversión ecológica del transporte en España*. Madrid: Centro de Investigación para la Paz.
 - FEYERABEND, PAUL K. (1970): *Against Method: Outline of an Anarchistic Theory of Knowledge*. Minneapolis: University of Minnesota.
 - FEYERABEND, PAUL K. (1989): *Dialogo sul metodo*. Roma: Gius Laterza & figli SpA.
 - GEORGESCU-ROEGEN, NICHOLAS (1971): *The Entropy Law and the Economic Process*. London: Harvard University Press.
 - GILLE, BERTRAND (1980): *Les mécanicies grecs*. Editions du Seuil.
 - GORDON, J.E. (1976): *The New Science of Strong Materials or Why You Don't Fall Through the Floor?* London: Penguin Books Ltd., 2ª ed.
 - GUERRIEN, BERNARD (1992): "Las bases de la teoría económica", *Investigación y ciencia*, n°192, pp. 64-69.
 - HILSON, BARRY (1993): *Basic structural behaviour*. London: Thomas Telford.
 - JIMÉNEZ MONTOYA, PEDRO, GARCÍA MESEGUER, ÁLVARO y MORÁN CABRÉ, FRANCISCO (1987): *Hormigón armado*. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 12ª ed., 2 tomos.
 - KUHN, THOMAS S. (1962): *The Structure of Scientific Revolutions*. S.d., se cita la traducción castellana: *La estructura de las revoluciones científicas*. México: FCE, 1962.
 - LAGRANGE, JOSPEH-LOUIS (1788): *Mécanique analytique* Paris: Desaint.
 - MICHELL, A.G.M. (1904): "The limits of Economy of Material in Frame-structures", *Philosophical Magazine*, S.6, v. 8, n° 47
 - MIGUEL, JOSÉ LUIS DE (1984): "Cálculo manual versus cálculo automático", en Vázquez (1984:60-71).
 - NAREDO, JOSE MANUEL (1987): *La economía en evolución*. Madrid: Siglo XXI.
 - POPPER, KARL P. (1976): *Conjectures and Refutation*. London: Routledge.
 - RANKINE, W.J.M. (1858): *A Manual of Applied Mechanics*. London.
 - SEWARD, DEREK (1994): *Understanding Structures. Analysis, materials, design*. Houndmills (Hampshire): The MacMillan Pres Ltd.
 - SOH, CHEE KIONG y YANG, JIAPING (1996): "Fuzzy Controlled Genetic Algorithm Search for Shape Optimization", *Journal of Computing in Civil Engineering*, v. 10, n° 2, pp. 143-150.
 - SOLÍS, CARLOS (1990): *Los caminos del agua*. s.c.: Mondadori España.
 - TIMOSHENKO, STEPHEN (1953): *History of strength of materials*. New York: McGraw-Hill Book Co.
 - TORROJA, EDUARDO; (1991): *Razón y ser de los tipos estructurales*. Madrid: CSIC, 7ª ed.
 - VALE, BRENDA y VALE, ROBERT (1991): *Green Architecture. Design for a sustainable future*. London: Thames & Hudson.
 - VÁZQUEZ ESPÍ, MARIANO (ED.) (1984): *Informática y arquitectura*. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
 - VÁZQUEZ ESPÍ, MARIANO (1995): "Un nuevo algoritmo para la optimación de estructuras: el recocido simulado" *Informes de la Construcción*, v. 46, n° 436, pp. 49-69.
 - VÁZQUEZ ESPÍ, MARIANO (1996): "Arquitectura, economía y ecología", *Noticias académicas de la ETSAM*, 17.6.96, hojas 27-30, 16 pp.
 - VÁZQUEZ ESPÍ, MARIANO (1997a): "The Role of the Inhabitants in an Ecological Approach to Architecture", en Register & Peeks (Eds) *Village Wisdom / Future Cities*. Oakland: Ecocity Builders.
 - VÁZQUEZ ESPÍ, MARIANO (1997b): "Discussion of 'Fuzzy Controlled Genetic Algorithm Search for Shape Optimization' by C.K.Soh and J.Yang", *Journal of Computing in Civil Engineering*, v. 11, n° 3.
 - VITRUVIO (1970): *Los diez libros de arquitectura*. Barcelona: Editorial Iberia.

* * *