

Los criterios de diseño de estructuras entre los siglos XIX y XX. Herramientas lógicas y analógicas

José Luis Fernández Cabo

El texto presentado ofrece algunas de las conclusiones obtenidas de la tesis doctoral realizada por el autor titulada: *Estructura: Tamaño, Forma, y Proporción*;... leída en julio de 1998 en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, y dirigida por Ricardo Aroca Hernández-Ros.¹

El artículo realiza una revisión de las herramientas de diseño de estructuras existentes a lo largo de los siglos XIX y XX, período en el cual las realizaciones alcanzan tamaños e incrementos de luz sin precedentes. Esa rápida evolución hace que las herramientas de diseño sean imprescindibles en mucho mayor grado que hasta entonces, y que, por tanto, las investigaciones en este campo sean también más relevantes.

Para proceder a la revisión planteada es imprescindible acotar el significado de la palabra *diseño*, marcando con ello un entorno medianamente claro que lo separe del *cálculo*.

El proceso usual de diseño de una estructura pasa por establecer inicialmente unas trazas generales. El siguiente paso sería la elección del material. Si el proceso es bueno, la tarea siguiente sería establecer unas trazas generales «locales» adecuadas. Es decir, si hacemos un pórtico, las trazas generales se definen a través de simples líneas que marcan los ejes de vigas y soportes, y las trazas locales vendrían definidas por el canto y configuración interna de vigas y soportes (alma llena, celosía, viereandel,...). En algunas estructuras, este paso se puede solapar con el criterio de dimensionado, pero en principio son pasos que se pueden diferenciar. Es decir, retomando el caso del

pórtico, para determinadas comprobaciones podríamos establecer criterios de proporciones de vigas y soportes antes de fijar el dimensionado de dichos elementos. A continuación, si la estructura es hiperestática, el diseño debería incluir un algoritmo para el predimensionado de los elementos. No es extraño que el proyectista predimensione los distintos elementos sin ese algoritmo. Lo más habitual es que se realice en base a la experiencia del proyectista. La experiencia puede cortocircuitar el proceso, lo cual no significa en modo alguno que no existiera.

La definición de la palabra *diseño* deja claro el ámbito del *cálculo*.

El proceso es por lo general iterativo. Para ello no tenemos más que tener en cuenta las acciones derivadas del peso de la propia estructura, que en algunos casos puede ser determinante.

Hay dos apartados claros en el diseño: por una parte la elección del material, y por otra la de la geometría. A su vez la geometría tiene varias *escalas*, que van de la traza general a la local a nivel de elemento o de sección.

Realmente, el proceso general de diseño descrito no puede ser desarrollado en su totalidad más que para algunos casos. Como es sabido, tenemos algoritmos de cálculo para resolver cualquier estructura previamente dimensionada. Por el contrario, y como veremos, los criterios o algoritmos de diseño son más reducidos.

Los dos modos básicos de adquisición del conocimiento son el lógico y el analógico. Si el criterio de

diseño se puede traducir claramente a un algoritmo diremos que el proceso es lógico. En este proceso los datos de partida son claros, y el algoritmo definido permite llegar a un resultado de forma unívoca. Si por el contrario la herramienta fundamental es de tipo comparativo diremos que el proceso es analógico. En algunas ocasiones, los dos métodos se entrelazan.

Procedamos a revisar los datos. ¿Qué herramientas de diseño encontramos en el período histórico comprendido entre los siglos XIX y XX? Analicemos la cuestión por períodos más cortos representativos.

PRIMERA MITAD DEL XIX

Galileo, en 1638, había probado la existencia de un tamaño máximo para toda estructura. Al variar de tamaño una estructura de forma semejante, la resistencia crece con el cuadrado de la longitud mientras su peso crece con el cubo. Las tensiones debidas al peso propio crecen con ello linealmente. Las reglas proporcionales no son correctas desde un punto de vista estricto. La cuestión pasó inicialmente desapercibida en la práctica, y con razón. Mientras el rango de luces de cada tipología no variaba de forma significativa, los procesos analógicos funcionaban perfectamente.

En el XVIII las cosas comienzan a cambiar, pues las luces comienzan a crecer. Pero las estructuras de gran luz son muy puntuales. Además, el aparato científico tampoco podía ofrecer más.

En torno a mediados del siglo XIX, ya se disponía de un notable aparato científico de cálculo. Una clara manifestación son los tratados de Rankine de 1863 y 1864. También se tenían datos representativos del comportamiento mecánico de los materiales usados en construcción. Es decir, a mediados del XIX se puede calcular gran número de estructuras (en muchas estructuras con simplificaciones también notables). El gran número de realizaciones de gran luz así lo demuestran. En esa época, la técnica y la experiencia van por delante del aparato teórico. Muchas estructuras se construyen sin tener un conocimiento cierto de su verdadero funcionamiento, y ello dando saltos de tamaño respecto a luces anteriores que no tienen precedente histórico.

En esa época, por tanto, se conjugan dos factores: un aparato científico relevante y el comienzo de las

estructuras de grandes luces (el ferrocarril es la causa principal). Ya existen varios puentes colgantes de acero que superan los 300m, el *Britania* (en cajón) es de 142m. Si bajamos el rango de luces las estructuras de acero y madera se multiplican (el puente peatonal *Coloso* construido en madera en 1812 es de 103m). Respecto a épocas pasadas, el tamaño se ha multiplicado casi por diez. La estación de *St.Pancras*, iniciada en 1863, es de 74,1m. Las luces de en torno a 30 comienzan a ser algo habitual en lugar de excepcional.

Si revisamos los procesos lógicos, es sin duda Rankine el exponente más importante. Realmente, constituye un caso excepcional en todo el XIX y de parte del XX. Enuncia los tres tipos de comprobaciones que existen: resistencia, rigidez y estabilidad.

En el caso de la viga, estable criterios para su proporción (relación canto-luz) —*proportion*— que controlen la rigidez requerida.

Enuncia el teorema de las proyecciones paralelas, de gran utilidad en el diseño de las trazas iniciales de una estructura obtenida como transformación afín de otra estructura en equilibrio.

Rankine retoma el planteamiento de Galileo del tamaño máximo. Para el caso de la viga establece el método para calcular el tamaño máximo. Para ello lleva la estructura al límite, momento en el cual toda la carga es peso propio. A partir de ahí, y mediante una regla proporcional, puede establecer cuanto consumo de material se produce en un tamaño menor. Para el caso de otros tipos más complejos, el tamaño máximo es deducido a partir de los datos conocidos de su tamaño real y su peso, partiendo de la relación proporcional general que obtuvo a partir del caso de la viga (con ello considera aspectos constructivos como las uniones, etc., de tanta importancia el peso de la estructura). Así, para arcos de acero de proporción 1-9 el tamaño máximo es de unos 200m; para puentes en cajón biapoyados de acero de proporción 1-16 el tamaño máximo es también del orden de 200m. Para la cercha de acero de tipo *Warren*, si es de —*cast iron*— la proporción la fija en 1-15 y el tamaño máximo en torno a 200 m. etc. Seguramente es la primera vez que un rango de luces se establece por un proceso lógico (a pesar de haber utilizado datos empíricos para la extrapolación). Además, la consideración de lo que llama proporción es algo muy significativo. Cuando estudia la viga se da cuenta de la gran importancia de dicho parámetro. Ahora bien, en los tipos complejos la proporción planteada se toma

a partir de las estructuras construidas. En la tabla en la que recoge los mayores puentes colgantes del momento se ve que la proporción de todos ellos es siempre de en torno a 1-14. De hecho, esta proporción se variará en épocas posteriores tendiendo más al 1-10 y al 1-8.

El tipo queda entonces definido por la magnitud unitaria de las cargas exteriores, el material, las trazas generales y su proporción. Con ello se reconoce implícitamente que estos elementos geométricos tan elementales, junto al material, son una herramienta muy útil en el diseño general de la estructura. De hecho, sabemos que la bondad de lo general manda sobre la bondad de lo local. Es decir, las trazas generales mandan sobre el dimensionado en cuestiones de optimización.

Si el proceso lógico de Rankine no deja casi hue-lla, el planteamiento presentado de los tipos sí lo hace; de hecho, se mantiene a lo largo de este siglo, aunque en muchos casos desaparece de forma inexplicable el parámetro proporción. Esta clasificación tipológica, aunque aquí ayudada de métodos lógicos, posteriormente entrará totalmente en el campo de los analógicos.

Medio siglo más tarde, cuando Steinman recopile una clasificación actualizada para puentes, además de no ofrecer el dato de la proporción general de la estructura, nos dice que no hay referencia del origen de estos datos (lo cual hace suponer que son estrictamente empíricos).

Los trabajos de Rankine se meten de lleno en el terreno del proceso lógico del diseño. Sus aportaciones conceptuales son algo único, a pesar de lo cual pasan desapercibidas y se pierden rápidamente en la literatura científica. Hay que esperar al siglo XX, con el trabajo de Ricardo Aroca, a que estos temas reaparezcan. ¿Por qué? Seguramente en ello ha influido el gran salto conceptual que suponen. El técnico ha tendido más a centrarse en los procesos numéricos de cálculo que a pensar en las variables del problema; y ésto si es un hecho que se puede contrastar a lo largo de los dos siglos analizados.

En este período, Wipple intenta obtener proporciones óptimas para puentes cerchas, aunque lo hacer para una carga puntual y llega a resultado que luego nunca usará en sus puentes.

En el terreno de la arquitectura, las luces estaban creciendo de forma más modesta, sin duda, porque las necesidades eran y son bien distintas.

En el caso de las fábricas, Rankine recoge numerosas formulaciones empíricas para su dimensionado dependiendo del tipo de trazado general, y plantea las suyas propias basadas en estructuras que consideraba bien diseñadas. Es decir, el enfoque aquí es analógico. Rankine no tiene pudor alguno en mezclar procesos lógicos y analógicos. Lo importante es resolver el problema, el método es secundario.

Ni que decir tiene que los procesos analógicos, existan o no clasificaciones tipológicas, siempre han existido y siempre existirán. La única forma de que no existan es andar con una venda en los ojos, y eso no siempre sucede. En estos momentos, trabajos como el de E. Ferguson han mostrado con claridad la gran repercusión de la información no verbal en los procesos de diseño. Esto es un hecho, que siempre sea bueno es otra cosa. Si la referencia era buena el resultado es bueno. En el caso antes mencionado de Rankine, en el que establece la proporción para los puentes colgantes, el proceso analógico conduce a un error. Como es lógico, el paso del tiempo hace confluir aspecto de cálculo y de diseño, y sólo cuando el conocimiento está afianzado en un terreno es cuando el proceso analógico es verdaderamente útil.

SEGUNDA MITAD DEL XIX

En la segunda mitad del XIX se producen importantes avances teóricos, y a finales del XIX el aparato de cálculo es ya muy compacto. Realmente podríamos decir que es en esta segunda mitad de siglo cuando la teoría de estructuras se asienta.

En el caso del hormigón la situación está algo más retrasada. Las publicaciones sobre dicho material comienzan a finales de este siglo, pero su afianzamiento en construcción pertenece al XX.

La práctica va aún por delante de la teoría, y estructuras como, por ejemplo, la del puente de Brooklyn son ejecutadas avanzando por delante de esa teoría. Es importante constatar este hecho, pues es muestra de la convivencia de los procesos lógicos con los analógicos.

Los conocimientos en el material también avanzan. El 1856, los hornos *Bessemer* permiten producir acero de calidad en grandes cantidades.

Las necesidades siguen en aumento. Habría que diferenciar el caso Europeo del Norteamericano. En el primer caso, se construyó con vistas a más largo

plazo. En el segundo, las estructuras más provisionales, con abundante empleo de la madera, fueron una respuesta masiva muy económica y acorde a las necesidades, aunque conviven con puentes de acero.

De hecho, la madera en ese momento presenta en EE.UU. cotas de desarrollo muy superiores a Europa, y el repertorio tipológico de puentes de madera es amplísimo. En muchos casos, la estructura se dimensiona empíricamente. Ello es debido a que algunos tipos son de un grado de hiperestaticidad muy fuerte, combinado formas de un modo similar al de la tradición precedente en madera. En estos últimos casos, si la estructura no iba a ser calculada, que más daba aumentar el grado de hiperestaticidad. Ese concepto ni siquiera existía. De hecho, el diseño en madera de este período se apoya en gran medida en el proceso analógico, siguiendo una tradición centenaria en este material. Es interesante ver como el aparato de cálculo disponible condiciona en ocasiones la forma propuesta y la deriva hacia terrenos asequibles al proyectista.

Si analizamos las aportaciones al proceso lógico, en España se debe mencionar el caso de Joaquín Pano Ruata, con trabajos sobre el tamaño máximo que van casi en paralelo a los de Rankine, aunque ignora si parten de él pues explícitamente no se menciona. Si es notable la ausencia de la proporción a la hora de establecer el rango tipológico de los tamaños máximos.

Uno de los trabajos más repetidos es el de intentar determinar las proporciones óptimas de cerchas tipo *Prat* y *Warren*. Si es importante destacar que el problema es considerado de importancia de un modo bastante general, y aunque la dispersión es alta, las propuestas son numerosas.

En esta época empiezan a aparecer gran número de estudios en torno a la relación entre semejanza mecánicas *versus* geométrica, siguiendo la línea que arranca en Galileo. Los resultados no informa de que, por ejemplo, para el caso del prisma rígido sometido a viento, el aumento de tamaño mejora la estabilidad. Sin enumerar otras consecuencias, lo que me parece más interesante es que estos trabajos entran de lleno en el terreno del diseño. J. Thomson y A. Barr son quizás los casos más interesantes. Las consecuencias de estos estudios son mínimas y acaban en este siglo casi en el folklore.

Maxwell, en 1890, define el parámetro —*quantity of material*— (producto de fuerza que recorre esa

fuerza), y que R. Aroca ha llamado como *Cantidad de Estructura*. Enuncia lo que ahora conocemos como *Teorema de Maxwell* (de la cantidad de estructura). El paso era fundamental para los procesos de diseño. La realidad es que el teorema pasó bastante desapercibido en su momento.

Waddell, un ingeniero americano, publica varios trabajos realmente interesantes sobre formulas empíricas para la determinación del peso propio de puentes de acero de carretera y ferrocarril, tradición que se prolonga hasta la segunda mitad del XX. Se insiste en la clasificación tipológica que ya vimos en Rankine; pero su aportación teórica se pierde. Se trabaja casi como biólogos. Dado el gran número de especímenes existentes, saquemos datos empíricos de peso propio. Las fórmulas funcionaban, pero los problemas eran evidentes. ¿Qué sucede cuando se cambia, por ejemplo, el material, la proporción o el tipo de cargas exteriores?

En cada tipo analizado, y sobre todo en cerchas, se definen las *proporciones económicas* que sirven de base a las curvas tipo. De hecho, en ese momento, el valor aproximado de proporción óptima en los tipos existentes ya está cazada, aunque más por experiencia que por vía empírica. Si analizamos los grandes puentes colgantes, arcos o cerchas desde esa época hasta la actualidad, vemos que esas proporciones se ha mantenido.

Una de las cosas más interesantes de Waddell es que intenta desarrollar un proceso lógico que le permita, a través de un caso concreto empírico, obtener datos de estructuras en las que se modifique alguno de los parámetros básicos del tipo de referencia. Sus resultados no trascienden, y no son siempre generalizables.

Ahora bien; el trabajo de Waddell es único en relación a propuestas de diseño teórico-empíricas. El dato empírico es sólo tomado como herramienta, como hará Rankine, y a partir de él se intenta avanzar de modo lógico. No obstante, el planteamiento no tienen la limpieza necesaria para trascender. Por su naturaleza, su trabajo lo encuadraríamos más en el carácter lógico que en el analógico, pero el resultado final acaba siendo una herramienta claramente analógica.

De esa misma época encontramos numerosos trabajos similares al de Waddell, aunque no de tanta extensión ni calidad.

PRIMERA MITAD DEL XX

Hasta mediados del XX la situación prácticamente no cambia: un aparato de cálculo muy desarrollado pero con carencias significativas. El primer puente de Tacoma así lo demuestra. De nuevo podemos decir que el trabajo del proyectista de grandes estructuras no estaba lo suficientemente auxiliado por el aparato de cálculo.

En este período, algunas propuestas se dirigen a obtener métodos que permitan abordar a mano el problema hiperestático complejo. Estos enfoques mueren con el nacimiento del ordenador.

El homigón armado y pretensado comienza su andadura de forma relevante, produciendo estructuras de gran tamaño y eficacia.

A principios de siglo, Fourier asienta las bases teóricas del análisis dimensional, aunque su uso era muy anterior, como ya vimos. Rayleigh va a aplicar este método para establecer la relación dimensional de las tensiones de una estructura. La formulación es correcta y de ella se desprenden consecuencias de diseño útiles, aunque tampoco podemos decir que el trabajo tenga gran repercusión en el campo de las estructuras. En realidad, el trabajo de Rayleigh tenía un interés añadido. Se podría haber usado para esclarecer variables en distintos problemas de diseño. La realidad fue otra.

La formulación empírica de peso propio es trasladada al caso de las cubiertas de edificios. Fleming recoge numerosas formulaciones, poniendo además de relieve tanto las contradicciones internas como lo innecesario del planteamiento para las luces habituales. En edificación, los trabajos más significativos son los de Ketchum y Kidder-Parker, ambos norteamericanos.

Durante este período los enfoques empíricos para la determinación del peso propio continúan y tienen gran profusión en la literatura. Los planteamientos son similares a los de Waddell. El resultado final son las gráficas de tipo-peso y la clasificación tipológica ya mencionada de rangos de tamaño máximo por tipo.

SEGUNDA MITAD DEL XX

A mediados del XX, los ordenadores han permitido que los trabajos teóricos del XIX fuesen aplicados

con facilidad a complejas estructuras, lo cual abrió una potencia de cálculo insospechada hasta entonces. Paralelamente al desarrollo de los ordenadores, el método de los elementos finitos ha sido la gran aportación en métodos numérico de cálculo en el siglo XX, y permite en este momento abordar el cálculo de cualquier estructura y material con una precisión suficiente. También es en la mitad del XX cuando se aborda de forma generalizada el problema dinámico.

Aparecen nuevos aceros, y el hormigón ya se hace un hueco incuestionable.

En el enfoque lógico, el ordenador acaba derivando trabajos dirigidos al desarrollo de algoritmos de optimización que no tienen una fácil aplicación en la práctica constructiva; de hecho, se han enfocado hacia estructuras de productos industrializados, y no a obra civil o edificación. Estos enfoques nacen con trabajos de Foulkes, Hemp, Prager, y retoman el teorema de Maxwell y el de Michell (de principios del XIX). De hecho, no conozco ni un solo programa comercializado en España que tenga subrutinas de diseño para estructuras de edificación, y el panorama internacional me temo que no es distinto.

El trabajo de Ricardo Aroca constituye una excepción en el panorama actual. Asienta sus bases en el concepto de cantidad de estructura de Maxwell, y tienen retoma cuestiones planteadas por Rankine en cuanto al tamaño máximo y a la relación de rigidez con proporción. Sin embargo, el avance es notable. R. Aroca esclarece las variables fundamentales de los problemas de diseño de estructuras. Sin entrar en detalles, lo más destacable es ver que los parámetros geométricos más elementales (y por tanto manejables en las primeras fases del diseño) son de vital importancia en todos los problemas de diseño.

Las clasificaciones tipológicas de rangos de luces que arranca a mediados del XIX ya reconocen, implícitamente, la importancia de las trazas geométricas más elementales en la eficacia de una estructura. No obstante, hasta R. Aroca, las variables del problema no fueron nunca definidas con claridad, ni se avanzó de forma seria en sus relaciones.

En esta segunda mitad de siglo los trabajos en torno a la herramienta tipológica disminuyen. En general, no se entiende que sean de gran importancia, aunque el trabajo del día a día del proyectista sí son usados. No obstante, hay casos realmente significativos, sobre todo para el caso de edificación, que hasta ahora había sido poco tratado.

Hay que pensar que las grandes luces en el terreno de la edificación son de este período. Por una parte, las grandes cubiertas, con luces máximas en torno a 200 m. Por otra parte, el rascacielos, con luces máximas en torno a los 400 m. En ambos terrenos, el trabajo más destacable se encuentra en Chicago. Hablamos de Myron Goldsmith y Fazlur Khan.

En el caso de la cubierta, establecen gráficas de tamaño-peso para acero y hormigón en distintos tipos. El enfoque es por tanto similar al ya existente en puentes desde el XIX, pero que realmente no había sido necesario hasta el XX.

En el caso del rascacielos, el trabajo de Khan es del mismo tipo. De ello, el ASCE lo recoge, constituyendo uno de los pocos casos en los que estos enfoques perviven y son reconocidos por el colectivo profesional.

Hoy día son pocos los libros enfocados al diseño de estructuras que recojan de forma amplia herramientas analógicas de diseño, a pesar de tener una utilidad más que evidente. En definitiva, son pocos los autores que reconozcan la importancia de la geometría en el diseño de la estructura.

Partiendo de la herramienta tipológica existente, podríamos diferenciar, en un primer paso, la naturaleza del problema estructural sin más que establecer el tamaño de la estructura a realizar. El siguiente paso sería controlar la geometría local de modo que no debamos entrar en todas las comprobaciones necesarias.

Unos intervalos de luz representativos pueden ser los siguientes (progresión geométrica de razón 3, y que comienza en cuatro metros):

4 12 36 108 324 972 2916.

El entorno de los 324m establece el límite funcional en el terreno de edificación. No hay cubierta que necesite tener los apoyos a mayor distancia, y los rascacielos no son económicamente viables en cotas muy superiores. El entorno de los 2916 marca el límite de tamaño en puentes. No hay pasos a cubrir mayores, e incluso este límite no parece alcanzable por motivos no estrictamente estructurales.

En cada entorno, y con las herramientas lógicas y analógicas existentes hoy en día, el diseñador puede saber si las trazas generales (geometría y proporción) son viables para ese material y tamaño, o si el tipo

está en terrenos lejanos a su tamaño máximo (lo cual generalmente significa que otra solución constructivamente más sencilla es más barata).

La geometría local, de gran importancia, no está hoy por hoy tan documentada. Aunque en algunos tipos la situación es bastante más halagüeña.

CONCLUSIONES

Durante los siglos XIX y XX, las herramientas de cálculo han sido mucho más desarrolladas que las de diseño, siendo estas aún insuficientes en nuestros días.

Las herramientas lógicas de diseño no son en general conocidas ni utilizadas por el proyectista de estructuras. El enfoque lógico demuestra que la geometría es un instrumento clave en el diseño de la estructura.

La herramienta analógica tiene una tradición secular, y es de gran utilidad para las primeras fases de diseño de estructuras. La información existente es también poco conocida, a pesar de existir documentación actual que aún tiene vigor o puede ser fácilmente reutilizada.

Hoy en día, tenemos gran número de herramientas lógicas y analógicas que permiten avanzar con racionalidad y simplicidad en la elección del material y la geometría de la estructura.

Por una parte, la geometría es un parámetro de gran sensibilidad en la eficiencia mecánica. Por otra parte, la naturaleza del proceso de diseño de estructuras está íntimamente ligada a la geometría. Los enfoques de diseño deben haber por tanto hincapié en los parámetros geométricos. En este sentido, parece también necesario hacer convivir los enfoques lógicos con los analógicos.

NOTAS

1. Fernández Cabo, José Luis: *Estructura: Tamaño, Forma, y Proporción. Los estudios teóricos y empíricos sobre peso propio a lo largo de la historia. Esclarecimiento de las variables del problema. Hacia una revisión de las herramientas y elementos del diseño de estructuras*. ETSAM, Madrid, 1998 (dirig. por R. Aroca Hernández-Ros). A ella nos referimos para un análisis bibliográfico.