



**Escola de Camins**

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

## PROJECTE O TESINA D'ESPECIALITAT

### Títol

**DISEÑO FORMAL DE PUENTES Y DE SUS PILAS**

**Un reto filosófico, artístico e ingenieril**

### Autor/a

**David Soria Marco**

### Tutor/a

**Ángel Carlos Aparicio Bengoechea**

### Departament

**Enginyeria Civil i Ambiental**

**Secció de Tecnologia de les Estructures i de Materials**

### Intensificació

**Anàlisi i Projectes d'Estructures**

### Data

**24/07/17**

**DISEÑO FORMAL**  
**DE PUENTES Y DE SUS PILAS**

*Un Reto Filos3fico, Artístico e Ingenieril*

## RESUMEN

Se trata de analizar, a partir de documentación escrita y gráfica diversa, este problema específico de la concepción y el proyecto del puente, focalizado de forma más intensa en el estudio de la pila de puente.

La exposición comienza con aspectos generales del puente, continúa con un análisis exhaustivo del concepto de diseño del puente, continúa no de forma tan exhaustiva pero sí rigurosa con un estudio de las relaciones de la pila con los diferentes elementos del puente y su tipología. Posteriormente se realizan sendos análisis ingenieril y artístico que concluyen con una serie de criterios básicos de diseño para todo puente. Finalmente se aportan una serie de reflexiones finales que acaban cristalizándose en breves y sintéticas conclusiones finales acerca del porvenir de las ideas aquí plasmadas y del universo al cual pertenecen.

## *Índice*

### **1. EL UNIVERSO DEL PUENTE**

- 1.1. MITOLOGÍA DEL PUENTE
- 1.2. EL CONCEPTO DE PUENTE
- 1.3. ANTECEDENTES DEL PUENTE

### **2. EL DISEÑO DEL PUENTE**

- 2.1. LA CONCEPCIÓN DEL PUENTE: EL DISEÑO
- 2.2. EL DISEÑO Y EL LUGAR
- 2.3. EL DISEÑO Y EL TIPO
  - 2.3.1. El diseño en la solución
  - 2.3.2. Tipología vs clasificación
  - 2.3.3. El proceso de diseño
- 2.4. EL DISEÑO Y LA FORMA
  - 2.4.1. La autonomía de la forma
  - 2.4.2. Voluntad de expresión formal
  - 2.4.3. Soluciones de diseño

### **3. EL TIPO DE PILA Y EL TIPO DE PUENTE**

- 3.1. LA ABSTRACCIÓN
  - 3.1.1. Metafísica y epistemología del puente: el grado de oquedad de un puente
  - 3.1.2. El plano geométrico y el plano mecánico de un puente
  - 3.1.3. El ideal de puente: la viguería
  - 3.1.4. Alternativa al incremento de luz: la arquería
- 3.2. LA PILA Y SU PROPIO TIPO
  - 3.2.1. Los elementos de una pila
  - 3.2.2. Metodología: el alzado longitudinal
  - 3.2.3. El elemento individual
    - 3.2.3.1. Articulado en la base
    - 3.2.3.2. Empotrado en la base

### **4. ANÁLISIS CRÍTICO INGENIERIL**

- 4.1. INGENIERÍA, CIENCIA Y TÉCNICA
- 4.2. TÉCNICA, ESTRUCTURA Y MÁQUINA
- 4.3. INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

## **5. ANÁLISIS CRÍTICO ARTÍSTICO**

### **5.1. EL DISEÑADOR DEL PUENTE**

5.1.1. El escultor

5.1.2. El arquitecto alejado de la ingeniería

5.1.3. El arquitecto cercano a la ingeniería

5.1.4. El ingeniero clásico

5.1.5. El ingeniero innovador

### **5.2. EL PUENTE: OBRA DE ARTE**

## **6. CRITERIOS DE DISEÑO**

6.1. IDEA FELIZ Y ¿POR QUÉ?

6.2. LA UNIDAD FORMAL

6.3. LA SINGULARIDAD DE SITUACIÓN

6.4. EL FORMALISMO ESTRUCTURAL

## **7. CONCLUSIONES**

## **8. REFERENCIAS**

8.1. BIBLIOGRAFÍA

8.2. INTERNET

# 1. EL UNIVERSO DEL PUENTE

## 1.1. MITOLOGÍA DEL PUENTE

En el presente apartado se realizará una sucinta exposición a modo de reflexión y con ello ilustrar lo importante que ha sido el concepto de puente para la humanidad pues lo ha incluido en su imaginario propio, entremezclándolo con la realidad, la ficción y el sueño. Tal y como suele ser costumbre en el campo de la existencia mitológica. El tema es extenso y su estudio podría configurar un nuevo texto paralelo a este.

— “**EL PROFETA MOISÉS**”, ruega a Dios que le ayude y éste abre los mares para que su pueblo pueda cruzarlos. Se trata de una configuración muy particular de puente: el **puente inverso**. Si en el puente tradicional es el camino el que ha de adaptarse al cauce (en este caso una lengua de mar) para poder solventar el obstáculo, en este caso es el propio cauce el que se adapta al trazado del camino abriéndose y permitiendo así el paso del pueblo de Israel.

— “**EL PAPA DE LA RELIGIÓN CRISTIANA CATÓLICA (MÁXIMO PONTÍFICE)**”, en este caso el profeta ya no ruega a Dios la realización del puente, sino que es él mismo el hacedor de la obra. Aquí se presenta, no obstante, otra tipología curiosa de puente, en un estribo tenemos a la humanidad y en el otro se tiene a Dios. La idea es interesante y muy evocadora puesto que significa crear un puente de lo tangible, finito, presente y determinado, a lo intangible, infinito, omnipresente e indeterminado, un **puente al infinito** y más allá, de lo determinado a lo indeterminado (quien sabe, quizá sea éste el eslabón perdido que busca la física para poder realizar la tan ansiada unificación entre la relatividad y la mecánica cuántica), de la forma a lo informe. La multiplicidad de imágenes que sugiere puede ser muy fecunda. Además, no es en absoluto una forma de proceder ajena a la ingeniería en la resolución de problemas, acostumbrada a solucionarlos en el espacio imaginario para proyectarlos después en el espacio real.

— “**LA DIVINIDAD: EL DIOS PUENTE**”, en este caso es el propio puente el que ha sido dotado de existencia, y no de cualquier rango sino de dios. Seguramente se podrán encontrar casos en muchas culturas, aquí se expondrá el de la mitología nórdica que es quizá el de más proximidad.

«En la mitología nórdica, el Bifröst (también Bilröst) es un puente de arco iris ardiente que une Midgard (el mundo de los hombres) y Asgard (el reino de los dioses). El puente aparece mencionado como Bilröst en la Edda poética, como Bifröst en la Edda prosaica de Snorri Sturluson y en diversos poemas de la poesía escáldica. Ambas Eddas también se refieren al puente como Asbrú (nórdico antiguo "el puente de los Æsir"). Según la Edda prosaica, el puente finaliza en la bóveda celestial donde el dios Heimdal, el vigilante, tiene su residencia llamada Himinbjörg. Desde allí vigila a los gigantes. La destrucción del puente durante el Ragnarök por los ejércitos de Muspell está profetizada. Existen paralelismos entre Bifröst y otro puente presente en la mitología nórdica, Gjallarbrú.» [W:Bifröst (24/07/17)].

«En la mitología escandinava, Gjallarbrú es un puente que permite atravesar el río Gjöll en el infierno y que debe ser cruzado para llegar a Hel, de acuerdo a Gylfaginning. Se describe como un puente "cubierto de oro reluciente", al cual se menciona principalmente en la historia de Baldr, cuando Hermód es enviado a recuperar al dios de la tierra de los muertos. Cuando Hermód llegó al puente fue desafiado por la gigante Modgud que le exigió que dijera su nombre y que hacía allí, antes de dejarlo pasar. John Lindow resalta el paralelismo entre Bifröst, "un puente entre la tierra y el cielo, o la tierra y el mundo de los dioses", y el puente Gjallarbrú, "un puente entre la tierra y el inframundo, o la tierra y el mundo de los muertos".» [W:Gjallarbrú (24/07/17)].

## **1.2. EL CONCEPTO DE PUENTE**

El concepto de superación de un obstáculo cualquiera que sea éste es una constante en el pensamiento humano y en su propia voluntad de superación personal e individual, y el puente es la idea que mejor representa ese concepto en general que, además y, dicho sea de paso, también representa como ningún otro la presencia humana en el mundo y su grado de comprensión y adaptación a la realidad: el puente como concepto en sí.

«El tipo de obstáculo a salvar es indiferente. Puede tratarse de un barranco o de una situación de tesorería que precisa un crédito puente. Un plan de pensiones es un puente para la vejez, y se alivia a los sitiados con un puente aéreo. Se puede arrancar un coche sin la llave, o saltarse el trabajo entre dos fiestas, haciendo un puente.» [10:22].

Esta incomunicación, esta situación comprometida no requiere siquiera corporeidad: materia, para mantener su fuerza y energía. Ni siquiera requiere un tamaño determinado, pues el concepto de puente no es sensible a la escala, quizás esta falta de escala en el concepto permite soñar al ingeniero y producir obras cada vez mayores, consciente como es de que el límite no existe más que en la materialización y ésta evoluciona con el devenir de la sociedad. Su belleza emana del propio concepto cuyo atractivo basta para su aprecio.

La realización material, no obstante, requiere principio y fin, apoyo-obstáculo-apoyo, o mejor dicho, estribo-espacio-estribo, y sí importa el modo de salvar el obstáculo: por encima, que es consustancial al concepto (un túnel también supera un obstáculo pero atravesándolo)

«Ese aprecio está firmemente soldado a su carácter de obra pública y a las dificultades de su construcción. Para la tradición, el logro de construir un puente se conseguía luchando con los espíritus del mal y colmaba de orgullo a toda la colectividad. Siempre fueron lugares de honda significación, muchas veces convertidos en símbolos. Y si el propósito inicial decae, su valor como símbolo se acrecienta y los hace más resistentes y duraderos que una mera construcción.» [10:25].

El puente es a fin de cuentas la más alta representación de la forma resistente construida.



### 1.3. ANTECEDENTES DEL PUENTE

Se va a proceder a continuación a comentar diversos ejemplos de antecedentes al puente artificial, es decir construido por el hombre, en contraposición al puente natural o puente que podría hallarse en el territorio de forma natural sin ninguna intervención del ser humano, pero pudiendo ser totalmente utilizado por él.

- “**PIEDRAS EN CAUCE**”, se trata de unas piedras de tamaño apropiado que se encuentran en medio del cauce y que han coincidido con una disposición aleatoria apta para que el ser humano bien por el paso, la zancada o el salto permite su recorrido. Esto sucede porque la escala a la que se encuentra todo el conjunto es afín al tamaño de una persona. Su configuración es única entre los puentes al no existir tablero, podría ser denominado: **puente pila** (cuando se trata de vano doble) o **puente de pilas** (cuando se trate de vano múltiple).
  
- “**TRONCO SOBRE CAUCE**”, se trata de un tronco o un conjunto de troncos dispuestos de orilla a orilla que permiten cruzar el cauce de una sola vez. Su configuración es la de **puente viga simplemente apoyada de vano único**.
  
- “**TRONCO SOBRE PIEDRAS**”, se trata un troco o conjunto de troncos que no permiten cruzar de orilla a orilla de una sola vez, sino que han de apoyarse en piedras dispuestas en medio del cauce, se trata de una tipología híbrida de los dos casos anteriores. Su configuración es de **puente de vigas simplemente apoyadas de vano múltiple**.
  
- “**LIANA PARA BALANCEARSE SOBRE EL CAUCE**”, se trata de un tirante pendular o liana que permite el cruce sobre el cauce al balancearse agarrado a ella. Su configuración no equivale a ninguna dentro del mundo de los puentes de vehículos, pero podría hacerse una abstracción aproximada y considerarlo una determinada tipología de **puente transbordador**.

- “**LIANAS ENREDADAS SOBRE EL CAUCE**”, se trata de una situación en que la maraña de lianas se encuentra enredada y permite que se dé una propiedad importante: la continuidad, de esta forma una persona agarrada a ellas de manos, o mejor, de pies y manos podría ir deslizándose y de esta forma conseguir atravesar el cauce. Su configuración es la de **punto colgante** con la particularidad de tener tablero discreto, que no es otra cosa más que el cuerpo del propio usuario.

## **2. EL DISEÑO DEL PUENTE**

### **2.1. LA CONCEPCIÓN DEL PUENTE: EL DISEÑO**

Realizando una interpretación libre de las palabras de Kenneth Frampton [22:265], en un esfuerzo de extrema abstracción primero y de gran síntesis después se puede considerar el concepto de diseño de aquello construido y que en el caso que nos ocupa, es el puente, como una confluencia entre tres componentes esenciales altamente interrelacionados entre sí.

- **EL LUGAR**, previamente fue sitio, pero se tornó en lugar al conseguir una simbiosis adecuada entre el territorio, representado por el propio sitio, y el hombre representado por el puente y los flujos que incorpora.

Es aquí más que nunca cuando la transformación sucede del dónde al cuyo, pues al transformarse el sitio en lugar el puente pasa de una relación de situación con el entorno a una relación de pertenencia al mismo.

- **EL TIPO**, resume y esquematiza toda la experiencia acumulada de forma propia, por el autor en cuestión, y ajena por el conjunto de la comunidad del conocimiento en todas aquellas cuestiones que le son propicias para el buen diseño del puente; organizada en tipos que son utilizables de forma directa por el diseñador.

Dado un sitio, el tipo sitúa al diseñador raudamente en todo aquello que puede necesitar para convertirlo en lugar mediante la adecuada consecución del puente, y por supuesto de la configuración del propio puente mismo, pues lo sitúa en un contexto de soluciones donde puede percibir de una manera rápida y clara las soluciones formales de aquellos que le precedieron y, claro está, puede personalmente evaluar su acierto o su bondad.

— LA FORMA, es el resultado de, tras el análisis de lo típico de la tipología o si se prefiere de lo relativo a otros, hallar lo propio y personal de la solución expresada.

Expresa la creatividad del diseñador envuelta de todo el ideario y preconcepciones individuales, personales e intransferibles. Es la que dota de personalidad al tipo y a la vez lo renueva, pues será incorporada al catálogo de tipos posterior, cualquiera que sea su destino, tanto para bien como para mal.

Citando a Miguel Aguiló Alonso parafrasear a Kenneth Frampton:

«En su propuesta, Frampton establecía los vectores de *topos*, *tipos* y tectónica. «El *topos* en el sentido aquí propuesto, el tipo más ligado al destino funcional o institucional del edificio a construir –como nexos a las categorías más arcaicas de hogar, templo, ágora, etc.– que aquí se resume en lo estructural-constructivo-formal, y la tectónica como expresión propia del material y técnica empleados» [22:265]. Aquí se prefiere incluir forma como acción externa del diseñador (y no como resultado del diseño) en lugar de tectónica, que es un concepto más restringido.» [10:26].

Quizá de forma más sintética pero quizá también más clarificadora podríamos decir que en la resolución del problema uno está solo ante el peligro, aunque uno sea él y sus circunstancias.

Así el peligro se correspondería con el sitio es decir la porción de territorio, forma es el resultado de lo que uno finalmente realice y las circunstancias son todo aquellos que nos asiste.

Por tanto, el problema de proyectar un determinado puente, se podría formular también como: construya usted un puente en determinado sitio del territorio de tal manera que éste se convierta en un lugar (territorio, puente y hombre), por supuesto con toda la serie de condicionantes adicionales (eficiencia, economía, elegancia, etc.) que dicho sea de paso serán estrictamente necesarios, aunque nunca suficientes para que tal fin pueda llevarse a buen puerto.

Enunciado:

SITIO (territorio) + PUENTE = LUGAR (territorio)

Solución:

¿PUENTE = EL TERRITORIO, MIS AMIGOS Y YO?

De análoga forma se podría caracterizar el proceso de diseño a través de la línea temporal como el transcurrir asociando conjuntamente a los conceptos de presente, de pasado y de futuro.

Efectivamente el concepto de sitio correspondería al aquí y ahora, al territorio en su estado actual y a los condicionantes que impone: datos, sugerencias, particularidades, todo aquello, en definitiva, que configura el escenario allí dónde se va a ubicar la obra y que nos es presente.

El concepto de pasado vendría asociado al tipo, a las soluciones anteriormente probadas y que nos sirven de referencia, a los avances proporcionados por nuestros antepasados que resultaron adecuadas y que paulatinamente y en un proceso continuo fueron esculpiendo las maravillosas soluciones que ahora posemos. Como una estalactita que se ha estado formando en el transcurso del tiempo, por tanto sí, el tipo es un concepto del pasado pero no confundir con un pasado estático pues no lo es, es dinámico, jamás absolutamente determinado, en tanto en cuanto que su naturaleza de síntesis transgrede el universo de la realidad pues es pura abstracción, pura imaginación de un cierto colectivo altamente formado.

El puente que se ha de construir es absolutamente algo perteneciente a lo no sucedido aún, al futuro. Es concebido mediante el sitio, la gestación se realiza a través de los tipos y lo pare el diseñador

Ello nos lleva indefectiblemente a otra analogía interesante que podría ser configurada por los conceptos de mujer, como territorio fértil al que el diseñador, el hombre, ha de procurar fecundar para convertir en madre y el genio, personalidad, creatividad o carácter del diseñador estaría siempre acompañado de aquello que de ancestral posee en forma de herencia genética, su ADN.

Llegados a este punto se puede reflexionar que el territorio también poseerá su propia herencia ancestral, su propio ADN, el territorio que el autor ha de trabajar es efectivamente el aquí y ahora: el presente, anteriormente referenciado, pero no puede pasarse por alto que el territorio también ha sido configurado, bien por la madre naturaleza bien por la mano del ser humano, y ello es precisamente lo que le otorga su carácter y personalidad propias, es decir el sitio tiene también su ADN personal, el sitio es, pero también fue y ha sido, y lo que es más importante el sitio quiere seguir siendo a pesar de la intervención de un nuevo agente exterior a él, como es la instauración de un nuevo orden surgido de la incorporación de grandes flujos (tanto de personas como de mercancías) incorporados en el proceso, siempre conflictivo, de asimilación de una nueva infraestructura de carácter global en un ámbito local.

Este hecho diferencial podrá considerarse o podrá obviarse, surge de nuevo el concepto de condición necesaria o suficiente, pero de su consideración depende en gran medida la consecución de los objetivos finales.

Hemos hallado pues un digno punto de encuentro en el medio rural entre las labores del hacedor de puentes: el pontífice, y las labores de aquel que trabaja la tierra para obtener sus frutos: el campesino, y cuyo esfuerzo, sabe perfectamente, no hallará sus frutos si no tiene en cuenta el devenir y sus ciclos.

También hemos hallado otro digno punto de encuentro, esta vez en el medio urbano, entre las labores del pontífice y las labores del urbanista; y también en este caso, o quizá

seguramente más en este caso, la carga histórica del territorio es aún si cabe de mayor importancia para que el proyectista consiga su objetivo, pero ante todo es más importante para la población que vaya a disfrutar o a sufrir la intervención.

Pudiera parecer que a priori estos tres conceptos de: el lugar, el tipo y la forma; son independientes, o que simplemente describen mundos que no están interconectados, esto no solo no es así, sino que contrariamente a lo que pueda parecer el diseño del puente es el resultado de las estrechas interacciones que intrínsecamente existen entre ellos y de la manera en que los relacionan y. Tal y como se describirá en los siguientes apartados.

## **2.2. EL DISEÑO Y EL LUGAR**

Sirvan unas palabras de Miguel Aguiló Alonso para poder de alguna forma vislumbrar de que manera el entorno-contexto-sitio-lugar puede ayudar a configurar la forma, bien directamente, bien previo paso a través del concepto de tipo:

«En el proceso de determinación de la forma construida el entorno puede aportar numerosas sugerencias y restricciones. Puede restringir la ocupación o los usos en función del valor natural de lo existente, o condicionar la ubicación de lo construido y sus vínculos con el entorno. Hay también sugerencias morfológicas y de procesos naturales para la ordenación espacial de la obra: si la naturaleza sugiere una dirección, la obra puede abrir un recorrido; si se presenta centralizada, construye un centro.» [10:28].

«El lugar también proporciona sugerencias morfológicas para la configuración formal de la obra. Un entorno movido o variado siempre ha sido bienvenido por el creador de la forma, pues proporciona motivos y pautas por las que guiarse, elimina el horror del papel en blanco, crea condiciones que fructifican en asociaciones u oposiciones.» [10:28].

«El contexto también muestra las tradiciones locales en cuanto a usos de materiales y disposiciones formales. Sin necesidad de recurrir a lo vernáculo, lo construido anteriormente en el entorno es de obligado reconocimiento, como muestra del carácter del lugar que está ligado a su uso histórico. El impacto más difícil de reducir es el

producido por la diferencia de carácter entre lo que se pretende construir y el carácter del lugar.» [10:28-29].

El ajuste de la obra al entorno de construcción es un proceso extremadamente complejo, como ya se ha sugerido, en el que cabrá la consideración del territorio y de sus circunstancias, del autor y de sus circunstancias, así como de la sociedad y de sus circunstancias.

Pero no solo eso, sino que una vez identificado aquellos componentes a considerar ha de establecerse cierta relación satisfactoria entre ello. Por tanto, podemos decir que se está ante un problema de relación, que no está determinado a priori y que condiciona de forma inexorable su convivencia en el resultado final.

Y como en todo problema de relación existen dos polos opuestos, la relación que se establezca vendrá definida respecto a la atracción o repulsión de dichos polos, o si se lo prefiere mediante: afinidad y contraste.

Tal vez sea la filosofía del camuflaje, de la asimilación, del no llamar la atención, del no destacar, sea la más adecuada para establecer dicha relación pero de lo que podemos estar seguros es de que es la más habitual desde tiempos inmemoriales, es lo que el hombre ha hecho siempre; y podemos encontrar indicaciones escritas desde antes de la primera guerra mundial.

De esta forma Paul Séjourné al describir el diseño de su puente: *El Pont des Amidonniers* (1911) conocido como El Puente de los Catalanes que es un puente sobre el río Garonne en Toulouse, explica cómo el puente:

«Debe estar adaptado no sólo al lugar, sino al clima, a los monumentos vecinos, a la luz, al calor local: debe dejar entrever el terruño, empujar naturalmente sobre el terreno, no presentar un aire importado o trasplantado: Toulouse necesita un puente tolosano.» [28:98].

Otras veces se opta por el contraste, que, si bien pudiese asemejarse aparentemente sencillo, pues cabría pensar que la simple contraposición con lo establecido

proporcionaría como forma resultante y automática la solución. En la práctica no lo es en absoluto y suele dibujarse como una compleja amalgama de simbolismos y abstracciones mucho más complicadas de tratar que la simple adaptación.

Observamos, no obstante, con estupor cómo quizás en la mayoría de los casos el contraste no forma parte de una actitud deliberada de inconformidad con lo establecido, sino como un acto de irresponsabilidad al dejar de considerar en lo construido factores importantes que fueron omitidos.

Por supuesto los matices de esta relación de encaje o ajuste entre el territorio y lo construido son infinitos, no obstante Miguel Aguiló Alonso propone una más elaborada pauta o actitud general de trabajo basada en una gradación cuaternaria de conceptos y no en la binaria: afinidad-contraste, próximo-lejano; así establece:

«(...) Se podría hablar de **IMITACIÓN** cuando lo construido adquiere algunos modelos de identidad ambiental del emplazamiento natural, como la textura, los materiales, la forma, y sobre las transposiciones de éstos en formas artificiales. Los mejores ejemplos se encuentran en las arquitecturas primitivas, en las construcciones de tierra, y en las construcciones vernáculas poco evolucionadas.» [10:30].

«Si la forma se fundamenta en la adquisición del modelo geométrico de lo natural, pero construido funciona como contraste racionalizador, cabría hablar de **FUSIÓN**. Los teatros griegos excavados en las laderas, donde el espectador se prolonga en la naturaleza, son un buen ejemplo. O los asentamientos enrocados en altura cuyo perímetro de muros geometriza el relieve, como proyección de la necesidad de defensa. En muchos casos, también las presas responden a esta pauta de relación.» [10:30].

«La **INTEGRACIÓN** precisa un concepto de síntesis que hace depender lo construido sea del mundo natural, sea del mundo artificial. Los modelos de identidad de uno se modifican y modifican los del otro, en un proceso continuo de integración recíproca. Ejemplos modernos de integración son la arquitectura orgánica de Frank Lloyd Wright o las *parkways* norteamericanas, construidas en los años treinta para que el conductor pudiera disfrutar del paisaje en condiciones seguras.» [10:30].



«Por el contrario, cuando la obra se basa en parámetros propios del mundo artificial, configurando la tipología de lo construido de modo autónomo del soporte natural, tanto para afirmarlo como para negarlo, se podría hablar de **CONTRAPOSICIÓN**. Ejemplos clásicos son el templo griego, la pirámide egipcia, el palacio o la villa renacentista, que por su aislamiento y en su majestuosidad han desarrollado un papel de exaltación en las confrontaciones de valores del lugar natural en el cual están insertos.» [10:30-31].

Ya para finalizar, y en cierta manera resumir la idea principal de este apartado, que no es otra sino cómo el sitio configura la forma del puente adivinándole el lugar podemos recordar la afirmación de Javier Manterola Armisén:

«Terreno y puente se interaccionan en la forma, y la experiencia de ver puentes encajados en terrenos va configurando la manera en que se deben relacionar, y de paso crea la disciplina de lo que está bien o mal.» [25:34].

## **2.3. EL DISEÑO Y EL TIPO**

### **2.3.1. EL DISEÑO EN LA SOLUCIÓN**

En la práctica profesional del diseñador el tipo desarrolla el papel de síntesis entre la tradición que le precede, es decir una abstracción, y la realidad material de aquello que se pretende construir; es un valioso instrumento de análisis de consulta previamente obligada, pues individualiza el proceso creativo del autor a partir de la expresión estructurada y largamente asentada de las referencias.

De la multitud de campos en el que el tipo puede sernos de ayuda cabe destacar a dos por su gran importancia en el resultado de lo obtenido, la primera: la facilitación inicial simplemente a partir de los condicionantes, de un camino rápido y seguro hacia el diseño concreto que se anda buscando; la segunda: el gran valor que ofrece una clasificación estructurada de conocimientos y experiencias, tanto ajenas como propias, pues el diseñador puede ir incorporando información al tipo procedente de su acervo personal.

La comparación entre soluciones es un procedimiento indispensable en la ordenación de los distintos casos que se nos presentan, en este sentido el establecimiento de un tipo se asemeja al trabajo del coleccionista, recopilando, sintetizando y abstrayendo, e incorporando de nuevo.

Cada objeto es recopilación de toda una época pues no solamente recogen los aspectos estructurales, tecnológicos, de materiales, configuración de los distintos componentes en el espacio y determinando la forma, etc. Sino que también se ve reflejado el patrimonio cultural en aspectos que pueden ser analizados, clasificados tipológicamente y finalmente incorporados.

La utilización de tipos no implica necesariamente el diseño de propuestas anacrónicas, dado que éste es una ayuda como una plantilla o esquema formal en el que el autor se apoya, pero no calca, sino que recrea las ideas, conceptos, valores, etc., que son emanados desde el tipo y que cada autor abstrae de forma particular e interpreta, en un ejercicio de libertad individual creativa.

De acuerdo con esto y citando a Miguel Aguiló Alonso parafrasear a Alan Colquhoun:

«No hay arquitectura si no se acepta una cierta dependencia con respecto a las formas inteligibles del pasado, es decir, no hay arquitectura si no se acepta la noción de tipo. La conciencia de la convención permite u obliga a que el creador dote de significado a la obra, y acepte o rechace voluntariamente los tipos, explicando su posición ideológica.» [10:58].

Y de una forma más directa el Propio Alan Colquhoun, afirma que:

«La obra de arquitectura necesita el tipo para evitar el vacío existente entre el pasado, el instante en que la creación tiene lugar, y el mundo en que se inscribe, pues los tipos y formas culturales persisten y estructuran las direcciones del desarrollo tecnológico.» [16:sp].

En la práctica profesional el tiempo es un factor apremiante y dificulta la consecución de los detalles, disposiciones particulares de armaduras, anclajes, apoyos, etc. Es en esta fase

del proyecto donde el recurso al tipo facilita enormemente la tarea más ardua de definición de los elementos más detallados en tiempo breve, permitiendo de esta manera la consecución de la solución con mayor premura.

En definitiva, el tipo se nos muestra como una potente herramienta de trabajo capaz de aportar una ayuda inestimable a la hora de producir una síntesis creativa que permita la definición de una nueva forma para la solución buscada. Además, por sus característicos mecanismos de configuración permite que, quizás, la nueva solución hallada pueda sucederse a sí misma y constituirse en nuevo tipo, pasando a engrosar el catálogo de soluciones disponibles para un nuevo potencial diseñador en el futuro o bien para uno mismo.

### **2.3.2. TIPOLOGÍA VS CLASIFICACIÓN**

Existen marcadas diferencias entre lo que podríamos denominar la tipología estructural o tipología ingenieril y la clasificación científica, ambas poseen elementos comunes de análisis como son algunos aspectos culturales representados por la filosofía, el arte, historia, etc., pero su naturaleza esencial se nos presenta con una multiplicidad de diferencias que no pueden ser obviadas, y que no permiten en ningún caso identificar a una con la otra.

El método científico exige un procedimiento de investigación reproducible, es decir que en las mismas condiciones se obtengan de forma directa los mismos resultados. Nunca sucede esto en la investigación tipológica, y es lo que da sentido a la solución basada en el tipo, pues, aunque el archivo de tipologías sea el mismo para dos sujetos, nunca encontrarán idénticas soluciones a idénticas problemáticas.

Otra diferencia constatable es el carácter de generalidad que posee la clasificación científica, la tipología ingenieril no solo no aspira a la generalización de su universo, sino que no puede por definición por ser una abstracción de éste, una síntesis.

Se recoge seguidamente una excelentemente clarificadora diferenciación entre ambos conceptos realizada por Miguel Aguiló Alonso:

«En la **CLASIFICACIÓN**, la sistematización se obtiene por discriminación de los individuos según su respuesta a un criterio ordenador, afecta a todos ellos y los define como pertenecientes o ajenos a una clase. Para establecer una clasificación es necesario fijar unos criterios. De manera general, los criterios se van adecuando a las cambiantes condiciones del universo que se pretende clasificar.» [10:60].

«En el mundo antiguo, los puentes construidos se muestran como una solución indiferenciada a un problema de paso: no cabe discriminar, porque todos los puentes son iguales. Para su clasificación acaso pueden utilizarse “las medidas”, con puentes estrechos o anchos, de mucha o poca luz; “la forma”, como los puentes planos o en lomo de asno; la distinción entre puentes fijos y provisionales, de madera, con pilotes o sobre barcas. Pero no se habla de puentes en arco, porque todos lo son, ni de puentes de fábrica porque todos los fijos son de piedra.» [10:60].

«Más adelante, el “comportamiento estructural” surge como criterio de fijación del género. El desarrollo de los puentes colgantes produce el efecto reflejo de reforzar la idea de arco, dado por supuesto hasta entonces como solución habitual de los puentes. Hay entonces un tipo y su inverso, y se distinguen porque uno trabaja a tracción y otro a compresión, lo que se extiende a la flexión de la viga.» [10:61].

«Posteriormente, se utiliza la “disposición” de los elementos para organizar la multiplicidad de vigas en celosía, y el uso del hierro fundido en el puente de Coalbrookdale supone la introducción del “material” como criterio diferenciador, lo que es potenciado con la reaparición del hormigón. Por último, surge el “proceso constructivo” como criterio clasificador. En cualquier caso, cada época pone su acento en uno u otro criterio diferenciador, y son los propios puentes quienes, en definitiva, marcan la pauta para su estudio y producen las diferencias que estimulan su percepción, comprensión y disfrute.» [10:61].

«Por otra parte, una **TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL** es una ordenación de las soluciones estructurales que se han consagrado como tipos. En los tipos se deposita la esencia de lo ingenieril, aquello que permite la asimilación de nuestro quehacer a las actuaciones anteriores y lo incorpora a los conocimientos existentes de manera utilizable en el futuro.» [10:62].

«El tipo no se presenta como resultado de una operación de clasificación, según la aplicación de un criterio o ley superior. No se deriva de una idea, sino que “surge” de la apreciación intuitiva de las similitudes observadas en muchas obras particulares. La construcción de una tipología responde a la discriminación perceptiva de las diferencias similares y similitudes diferentes. Cada diseñador entiende su disciplina de una manera peculiar y organiza sus conocimientos con diferentes criterios.» [10:62].

### **2.3.3. EL PROCESO DE DISEÑO**

A grandes rasgos podríamos establecer cinco etapas en el proceso de diseño en cuyas determinaciones y consecuencias el recurso al tipo desarrolla un papel fundamental y altamente necesario.

- En una etapa inicial, la primera aproximación que conjuga el sitio con el acervo de conocimientos del diseñador tanto ajenos como propios, se realiza a través del tipo, mediante una idea feliz. El tipo forma parte del “momento creativo”.

Visión, sentimiento y razón van encontrando un compromiso alrededor del que va gravitando la pléyade de ideas producto del resumen de conocimientos inyectado por el tipo, que mediante un proceso de filtrado lento y minucioso determinará la criba de soluciones que pueden y deben ser analizadas, dando lugar a una etapa de mayor sistematización y contraste.

— La siguiente etapa, una vez reducido el número de tipologías candidatas o soluciones alternativas a un número determinado y pequeño, consiste en fijar el número de vanos asociados a ellos y sus luces respectivas. De acuerdo con el ingeniero francés Nicolas Esquillan:

«La primera y esencial tarea es la determinación de los puntos de apoyo más juiciosos, tanto verticales como horizontales, y organizar la estructura para conducir las fuerzas de la forma más racional posible y en todo caso la más económica.» [26:166].

— Posteriormente, cabe preguntarse acerca de los materiales y procedimientos de construcción, incorporando totalmente el tipo, mejor dicho: los subtipos, a la experiencia personal. Continúa Esquillan:

«Tras haber bosquejado sumariamente algunas posibles estructuras y sus dimensiones aproximadas, bien recurriendo a obras anteriores o por medio de métodos de cálculo simples, la cuestión que debe plantearse el ingeniero-constructor, antes de seguir sus investigaciones sobre formas y disposiciones es: ¿cómo realizar estas estructuras?, ¿por qué procedimientos?, ¿con qué material?» [26:166].

— Finalmente hay una etapa de efervescencia en la que los arrebatos emocionales, la experiencia y los resultados numéricos que se vayan obteniendo permitan avanzar en pro de la unicidad de la solución. Se va, se viene se mezcla todo de lo general a lo particular y viceversa, constantemente. Esquillan concluye:

«Me parece imposible dissociar los dos estadios principales de la elaboración de cualquier obra: la concepción y la realización. Desde el estudio inicial es indispensable pensar en su modo de ejecución y adaptar la concepción a las condiciones probables de la construcción, en sus fases, sucesión y ritmo.» [26:175].

## **2.4. EL DISEÑO Y LA FORMA**

### **2.4.1. LA AUTÓNOMÍA DE LA FORMA**

Siempre fue determinante el papel que la forma adquiere en la valoración de la obra, tal y como Joseph Husband reconocía en 1901:

«La forma expresa directa e instantáneamente la respuesta creativa del diseñador a una necesidad, función o entorno particular, y demuestra la magnitud de su talento en el uso de los materiales.» [23:sp].

Por supuesto que la forma es consecuencia directa del genio del artista y no de ningún tipo de determinismo funcionalista, como en tantas ocasiones se ha querido, y quizás no tan desinteresadamente, admitir. Producto de este hecho es la consecuencia de que no existen dos puentes iguales. Ha este hecho se le ha dado en venir llamando “la autonomía de la forma”

Materializada por fin la solución y llevada a su forma constructiva como obra, ésta ha de ser sometida al escrutinio de la crítica, ha de superar la evaluación y la aceptación o rechazo de la comunidad profesional.

Tras esa primera aceptación se suceden toda una serie de pruebas que hacen que las características y valores intrínsecos de la obra para la profesión permitan que se transforme en tipo.

### **2.4.2. VOLUNTAD DE EXPRESIÓN FORMAL**

Se va a analizar ahora la voluntad de expresión formal del artista que se ve relegada en el diseño creativo de la obra. Léanse algunos comentarios de diversos ingenieros:

«El diseño creativo es la misión esencial del ingeniero y su más completa gratificación es trasladarla a la solución», dice Samuel C. Florman.» [21:142].

«Esa creatividad se basa en una percepción sensible a lo que es nuevo y diferente de lo anterior. No es exclusiva de unos pocos artistas, pero puede estar bloqueada, entre otras cosas por una excesiva cultura.», David Bohm [15:33 y ss].

Javier Manterola Armisén afirmaba recientemente en una mesa redonda sobre diseño en la ETSICCPM (2006) que: «para crear hay que ser un poco bruto y olvidarse de lo aprendido».

Sirvan dos conceptos teóricos para su análisis, vayamos pues con el primero que sería lo que podríamos llamar el archivo de tipos personal del diseñador y el segundo, que presentamos ahora, bajo la denominación de estilo, y que representa el potencial creativo que está ligado a una la singular forma de expresión del autor, y que está subyace siempre bajo cualquier otra consideración por constrictora que ésta sea. Los grandes artistas “siempre” consiguen trasladar su sello personal a la obra, por encima de la técnica del material, de la técnica estructural, técnica constructiva, etc., y son grandes por ello y, gracias a ello son los más grandes.

Como bien recuerda Eugène Freyssinet: «Nuestro subconsciente es lo más fijo y permanente que tenemos. Por eso, como toda forma surge de él, hay algo de constante e invariable en toda obra de ese mismo creador. Es lo que constituye su estilo, expresión de su personalidad.» [18:28].

Importante también el concepto que resalta Peter Rice acerca de la cualidad tangible de la obra, del tacto, no únicamente visual, pues si algo nos llama a que lo toquemos, es una expresión clarísima de cómo percibimos con fuerza algún sentimiento misterioso de “atracción” hacia él, y por supuesto si nos movemos en el campo de los sentimientos estamos de lleno en al campo del arte, como ya se expondrá en apartados posteriores:

«los ingenieros muestran su competencia al utilizar ese conocimiento de la estructura y los materiales para expresar la presencia de estos últimos de manera que uno se sienta



atraído y le entren ganas de tocarlo, que se perciba la presencia del material y la de quienes lo han concebido y puesto en obra.»», Peter Rice [27:83].

El diseñador con su archivo de tipos y su estilo particular afronta el acto creativo con una determinada “voluntad de expresión formal”, inmerso además, en un determinado “momento creativo” en el cual el tipo mediante el proceso de transformación que supone la formalización, el hacerse forma, va a difuminarse y va ya perder todo el protagonismo, que a partir de este instante será asumido por la forma, desde este primer momento de particularización de la generalidad, y que se extenderá más allá de una vez concluida la construcción de la obra, adquiriendo en el transcurso de su vida cada vez más significación de todo tipo.

### **2.4.3. SOLUCIONES DE DISEÑO**

Se van a introducir ahora una serie de definiciones de distintas “soluciones de diseño” que, sin pretender ser una clasificación rigurosa, se entiende que ordenarán el universo de los casos sugeridos por el concepto en los apartados anteriores. Además, ayudarán también a saber ver los puentes, y a saber situar y valorar la bondad de cada solución en un marco general de la disciplina del diseño de la forma o formal.

Se recogerán en la siguiente exposición las principales ideas acerca del tema en cuestión realizando una paráfrasis del texto de Miguel Aguiló Alonso [10:79-83]:

- Una solución de diseño es una “**SOLUCIÓN VÁLIDA**” si cumple dos requisitos: si es potencialmente materializable y si efectivamente se ha demostrado su materialización, es decir si se ha construido con éxito.

En el caso de que así sea dicha solución formal es ya de facto una obra construida, con todo lo que implica de positividad en criterios adoptados, materiales, estructura, ejecución; y también criterios no técnicos, a saber, economía, plazos, política, etc.

Por todo ello, podrá ser considerada a candidata de tipificación por la comunidad, y sometida rápidamente a su crítica para ver que hay de “novedoso” o de “aprovechable” en ella, que no hubiera.

- Una solución de diseño es una **“SOLUCIÓN DE ÉXITO”** o **“SOLUCIÓN VÁLIDA DERIVADA”** cuando es al mismo tiempo solución válida y resuelve problemas o aspectos que quedaron pendientes en la, o las, soluciones válidas de la cual, o de las cuales, deriva.

El conjunto de soluciones válidas derivadas de una misma problemática particular es convergente y tiene un límite que es otra solución válida derivada y que se denominará solución de referencia.

- Una solución de diseño es la **“SOLUCIÓN DE REFERENCIA”** o **“SOLUCIÓN VÁLIDA DE REFERENCIA”** es la solución válida que resuelve la inmensa mayoría de problemas de la tipología y que es adoptada por otros autores en innumerables localizaciones, convirtiéndose en la solución por antonomasia. Se trata por tanto de soluciones de éxito que son imitadas primero y perfeccionadas después, por quienes se enfrentan a similares problemas de diseño.

- Una solución de diseño es una **“SOLUCIÓN FORMALISTA”** o **“SOLUCIÓN MANIERISTA”** cuando el problema básico ha sido ya resuelto por la solución de referencia, la atención del diseñador suele dirigirse hacia la introducción de nuevas formas, cuya justificación no radica en sus aportaciones para resolver problemas conocidos, sino en sus posibilidades de expresar ideas externas o ajenas a ese problema.

Se prueba con formas o disposiciones que han tenido éxito o han sido aceptadas en soluciones a otros problemas, y son incorporadas como novedades formales a la solución de referencia.

Su concurrencia suele coincidir con los períodos finales de validez de la solución de referencia. Puede que este período de decadencia de la

solución de referencia sea consecuencia de ese manierismo, o puede que sea esa proliferación de soluciones formalistas la que esté promovida por la presunción de un inminente final del valor de referencia apuntado o sugerido por los atisbos de nuevas soluciones tecnológicas potenciales.

— Una solución de diseño es una **“SOLUCIÓN TERMINAL”** cuando representan vías muertas o fondos de saco en el camino evolutivo. Como bien define M. C. Duffy:

«Se trata de realizaciones cuyo desarrollo hacia un tipo más avanzado genera más problemas de los que pretende resolver, o bien que son, simplemente arrinconadas por otras soluciones contemporáneas de mayor éxito sin que se repitan suficiente número de veces para ser consideradas soluciones generales.» [19:23].

— Son especialmente interesantes las **“SOLUCIONES INNOVADORAS”**, tanto si son fruto de una novedad puramente formal, en cuanto no aportan nada a los conocimientos, disposiciones y esquemas estructurales ya conocidos, o de aportaciones tecnológicas en alguno de esos campos.

— Las **“SOLUCIONES INNOVADORAS FORMALES”** deben ser apreciadas con la observación directa de las obras particulares, sin que tenga especial interés delimitar categorías dentro de ellas.

— Las **“SOLUCIONES INNOVADORAS TECNOLÓGICAS”** pueden considerarse **“estratégicas”** si suponen una gran apertura hacia nuevas soluciones y trascienden su propio campo, o **“tácticas”** cuando sus aportaciones no trascienden su propio ámbito, no son transcendentales. Las soluciones de diseño **“revolucionarias”** trascienden su propia disciplina.

### **3. EL TIPO DE PILA Y EL TIPO DE PUENTE**

## **3.1. LA ABSTRACCIÓN**

### **3.1.1. METAFÍSICA Y EPISTEMOLOGÍA DEL PUENTE: EL GRADO DE OQUEDAD DE UN PUENTE**

Contrariamente a lo que se pudiera suponer, fruto de un primer acercamiento somero, el puente no es un elemento lineal, sino que es una construcción volumétrica que necesita ocupar un espacio tridimensional para definirse, y que curiosamente se diferencia conceptualmente de la presa en que éste presenta gran cantidad de oquedades mientras que la finalidad última de aquella es precisamente “no dejar hueco” para así cumplir con su primordial función que es la de contención.

Esta idea sugerida por la presa de “minimización de la oquedad” lleva por contraposición armónica, a descubrir de forma natural un nuevo concepto: el de “maximización de la oquedad” en la que “el hueco” ha de buscarse y no evitarse; cuyo planteamiento general se pasa a describir en las siguientes líneas.

Del acercamiento anterior al concepto subyacente de presa se puede vislumbrar una relación tipológica importante en el universo funcional y técnico del puente: puestos a presentar oquedades por qué no imaginar que todo es una oquedad, y a pesar de todo se pueden conseguir unos ciertos “caminos en el aire”, como Juan José Arenas de Pablo sugiere en su libro de título homónimo [13:4], un camino que levita en el espacio, en definitiva, estaríamos hablando de un ignoto nuevo tipo de puente: “El Puente Levitante” un puente construido de puro aire, a la vez flotante (en el fluido aire), a la vez transparente, a la vez traspasable. Qué bello resulta imaginarlo, aunque quizás, sea a la postre de imposible materialización.

Ciertamente sería interesante un puente de dichas características, presentaría entre otras, el mínimo impacto ambiental. Quizá una pseudo-levitación pudiera conseguirse mediante alguna nueva aplicación del magnetismo. Pero todo ello no serían más que aproximaciones, pues como se sabe por la física actual incluso partículas como los fotones, que presentan un alto grado de energía, presentan también cantidades de materia, aunque sea mínima; es decir ni siquiera un puente de luz sería inmaterial. Pero todo ello

sucede en el campo de la física, cuyo objeto de estudio es la realidad, pero no en la matemática en donde se pueden disponer de cantidades imaginarias.

Recapitulando, podemos abstraer en el espacio imaginario la idea de un puente como una estructura construida exclusivamente con números imaginarios y en el espacio imaginario, pues bien, esa es la esencia cuantitativa que puede abstraerse del concepto de tipo de un determinado puente.

Más interesante aún sería, definir un instrumento de análisis al que denominaremos **“GRADO DE OQUEDAD DE UN PUENTE”**: como el inverso del **“GRADO DE OCUPACIÓN”**: cociente entre la superficie de las partes macizas y la superficie de ocupación que el puente hace de la cerrada, definida como la superficie encerrada por la poligonal imaginaria entre apoyos y fibra superior del tablero.

De tal manera la solución de “puente imaginario” simplemente correspondería al caso asintótico de una familia de soluciones que se iniciarían con la presa: que se podría considerar, para lo que aquí concierne, un “puente macizo”, con un grado máximo de oquedad, pasando por casos estándar cada vez más esbeltos, hasta llegar al hipotético puente de aire, o puente levitante, que flota en el fluido aire, aunque esto hoy día no se haya conseguido, ni se sepa cómo realizar.

Otro caso sugerido por la abstracción del análisis y que podría representar una aproximación al puente aire, aunque más precisamente podríamos denominar caso complementario, sería considerar el túnel. Si se cambia el medio de la cerrada de aire a roca, automáticamente surge el “puente aire”. Se podría asegurar que se está delante de un tipo límite de verdadero “puente macizo”, puesto que a fin de cuentas la presa siempre presenta algún tipo de oquedad a modo de orificios por donde desaguar en última instancia el agua.

Es el simple resultado del análisis abstracto lo que nos ha llevado a ello, es un caso a resolver, igual que la famosa tabla de los elementos en que está constituida la materia de Dmitri Mendeléyev, que también es una abstracción, y también descubría la existencia de “huecos” o elementos que no habían sido contemplados pero que el conocimiento habría de ir desarrollando y llenando progresivamente.

Todo ello en cuanto al “ser”, el puente es así: su metafísica. En lo que respecta al “parecer”, o cómo se nos muestra fenomenológicamente a los “sentidos” el ser del puente, cómo lo conocemos: su epistemología. La vista, el oído, el olfato el gusto, el tacto, el equilibrio, etc.

El caso del sentido del gusto queda automáticamente anulado, pues nadie en su sano juicio se va a dedicar a chupar o ingerir trozos de puente, en este último caso, además, de una indigestión, podría acusársele de daños y perjuicios al bien común.

El caso del olfato, es muy importante, lo que pasa que está extraordinariamente bien resuelto. Pero ¿Qué comunidad humana aceptaría en su seno un puente que desprendiese un hedor nauseabundo? Seguramente ninguna, o muy pocas.

El sentido del equilibrio, es condición indispensable (*conditio sine qua non*), pues estamos tratando de un puente que al fin y al cabo es una estructura. Pero aunque pueda parecer obvio en la mayoría de puentes de carretera y de ferrocarril, en los casos de ciertos puentes peatonales no es tan claro, por lo menos *a priori* y, dependiendo de su esquema estructural, ni *a priori*, ni *a posteriori*: por ejemplo el caso singular de las pasarelas colgantes, y sobre todo las antiguas: de fibras vegetales o de cadenas, en las que el movimiento estaba asegurado.

Como decimos, no solo en puentes antiguos el caso del Puente del Milenio fue especialmente notable por su repercusión mediática, se trata de un puente colgante peatonal, fabricado con acero y que cruza el río Támesis a su paso por Londres en Inglaterra uniendo la zona de Bankside con la City de Londres. Fue abierto el 10 de junio de 2000, y unas inesperadas vibraciones y fallos estructurales, hicieron que éste tuviera que ser cerrado el 12 de junio, dos días después de su apertura, para realizar modificaciones. Tras unas obras que duraron desde mayo de 2001 hasta enero de 2002 y que costaron 5 millones de libras, el problema se arregló, y tras un periodo de prueba, se reabrió el 22 de febrero de 2002. Desde entonces no se han vuelto a tener noticias de movimientos extraños en el puente. Estos balanceos hicieron que el puente se ganase el apodo de Wobbly Bridge.

Quizá, y puesto que el presente apartado se denomina abstracciones, podamos también jugar a la “tecnología ficción” e imaginar que en el futuro son posibles realizaciones que alteren ciertos sentidos para pasar inadvertidos, este sería el caso de la vista e incluso, ¿por qué no?, del tacto. Pudiéndose definir grados análogos al de opacidad: **“GRADO DE VISIBILIDAD”** como cociente entre las partes visibles y las partes totales (considerando como totales la visibles e invisibles), quizá una aproximación pudiera ser: transparentes; ¿quién nos asegura que en no demasiado tiempo podamos tener materiales estructurales de construcción transparentes a coste competitivo? Y digo materiales estructurales pues materiales de construcción no estructurales transparentes ya existen.

En un alarde de imaginación podríamos considerar también el “grado de tangibilidad” de forma análoga al grado de visibilidad. Pudiéndose establecer relaciones entre grados, por ejemplo: al aumentar el grado de opacidad disminuyen el grado de visibilidad y el grado de tangibilidad, pero quien sabe, tal vez en un futuro sean posibles puentes con bajo grado de opacidad y bajo grado de visibilidad.

Nótese también que el inverso del grado de visibilidad es el “grado de invisibilidad” y a su vez el inverso del grado de tangibilidad es el “grado de intangibilidad”, todo ello nos conduce a reflexionar en el siguiente sentido: ¿qué pasaría si fuese posible diseñar un puente con un altísimo grado de invisibilidad y de intangibilidad?, ¿sería algo muy parecido al “puente levitante”, o “quizás al puente aire”?, ¿realmente los autores querrían crear obras no vistas?, ¿qué papel desarrollaría el diseño en todo esto si no puede verse la forma?

### **3.1.2. EL PLANO GEOMÉTRICO Y EL PLANO MECÁNICO DEL PUENTE**

Con el fin de establecer un instrumento útil de análisis de las diferentes tipologías de puentes que pueda dotar al estudio de un potencial clarificador incontestablemente evidente y, que permitirá, a su vez, sintetizar de igual modo la tan ansiada unidad formal en la exposición final de los tipos, pasamos a definir dos tipos de planos en el espacio puente-cerrada.

Se considerarán para ello simplemente puentes de directriz en planta lineal, ya sean éstos, puentes rectos o puentes oblicuos. Esto es así puesto que debido a problemas de índole resistente las directrices curvas presentan ciertas particularidades que entran en conflicto con la exposición que sigue, pero que rápidamente se comprenderán las razones que llevan a prescindir de este complejo caso.

- **“PLANO GEOMÉTRICO DE UN PUENTE”**, se define como el plano vertical que pasa por la directriz del puente, su intersección con el terreno proporciona la sección de la cerrada. Si dibujásemos un puente: sería el plano del papel.
- **“PLANO MECÁNICO DE UN PUENTE”**, se define como el plano geométrico anterior al cual se le ha añadido el campo gravitacional en forma de acción gravitatoria vertical y descendente.
- **“EL EJE DEL PUENTE”**, se define como la directriz del mismo y se constituye en eje horizontal de abscisas. Es un eje constante.
- **“EJE GRAVITATORIO”**, se definen como cualesquiera ejes verticales y, por consiguiente, perpendicular al eje del puente.

Bien, con estos dos instrumentos tan simples se pasará a la identificación de la diversa tipología de puentes existentes, no pretende ser exhaustiva, pero sí clarificadora y eficaz.

En estas circunstancias se está en condiciones de afirmar las siguientes proposiciones, a los que se ha denominado como **“TEOREMAS DEL PLANO DEL PUENTE”**:

- **“PRIMER TEOREMA”**: La tipología de puentes adopta una configuración simétrica respecto al eje del puente, en el plano geométrico del puente.



- **“SEGUNDO TEOREMA”**: La tipología de puentes adopta una configuración antisimétrica en el plano mecánico del puente. Por “antisimetría” se entiende la existencia de simetría en el plano geométrico pero con cambio de signo en la ley de esfuerzos principal de cada elemento en el plano mecánico.

En los siguientes apartados se procederá a demostrar estos teoremas a partir del desarrollo del tipo tal y como se ha venido definiendo hasta ahora, conjugándolo con los conceptos aquí expuestos de planos y ejes del puente.

### **3.1.3. EL IDEAL DE PUENTE: LA VIGUERÍA**

Efectivamente, podemos sintetizar toda la tipología de puentes a la constituida por una única categoría: el puente viga, puente tablero o mejor expresado: **“LA VIGUERÍA”** (dado que un tablero puede estar constituido por multitud de vigas).

Todos los sistemas estructurales que se le incorporan y que están constituidos por elementos estructurales como pilas, arcos, pilares, catenarias, péndolas, torres, tirantes, pilonos, velas de hormigón, etc., no son más que artificios que le son ajenos y extraños que se le incorporan por añadidura con la única finalidad de incrementar la luz, pero sin aportar a cambio ninguna solución adicional al problema principal, que no es otro que conseguir cada vez salvar luces de vanos mayores con elementos de dimensiones geométricas menores.

Y que, de ninguna manera, estos sistemas estructurales exógenos, se verían adicionados al sistema endógeno o principal, si con un incremento de las propiedades mecánicas de la viga, fruto de innovaciones de la tecnología resistente, se pudiesen conseguir tales objetivos.

¿Por qué se ha dicho que estos sistemas estructurales foráneos son artificios que le son extraños? Porque no hablan su “lengua”, la viga trabaja esencialmente a flexión y cada uno de los elementos nombrados trabaja esencialmente o bien a compresión o bien a

tracción (siempre hablando de forma genérica pues los comportamientos de éstos elementos no son puros en su totalidad, sino que más bien presentan tendencias dominantes) de tal manera que simplemente son elementos que funcionan diferente porque son existencialmente diferentes, viven realidades distintas, algo así como pasa en el hormigón armado: juntos pero no revueltos.

los puentes constituidos por vigas, ocuparían tanto en el plano geométrico como en el plano mecánico el eje del puente, por tanto, se podría convenir que son “el tipo neutro” y por consecuencia siempre deseables, y tanto más neutro serán cuanto menor sean las dimensiones geométricas (el canto) pues más cerca se estará del eje del puente recto ideal imaginario.

Que son el tipo neutro puede verse también en que son condición necesaria de puente, pues cualquier otra tipología siempre incorpora un puente viga en forma de tablero que además generalmente aporta un grado de resistencia al esquema global de la estructura, en absoluto despreciable.

El puente viga es el puente entre los puentes pues une a las distintas tipologías de puentes, une el mundo de las tracciones con el de las compresiones, son mundos a los que ya están demasiado acostumbrados los técnicos, pero que si uno se para a filosofar encuentra: un mundo en el que a sus individuos se les intenta separar y en extremo fracturar o desgarrar, con el mundo en que se les intenta unir y en extremo aplastar o machacar, a la fuerza, es decir en contra de su voluntad. Aquí se deja esta inquietante reflexión.

### **3.1.4. ALTERNATIVA AL INCREMENTO DE LA LUZ: LA ARQUERÍA**

Una vez mostrada la supremacía de la viguería como tipo óptimo deseable, y cómo la luz que le corresponde a cada tipo es un límite de lo posible que constituye un hito cultural de cada civilización y de cada época o momento histórico, se pasará a analizar cómo puede ese límite ser incrementado por otros medios científicos y tecnológicos, configurados en este caso en tipos de sistemas estructurales.

Este es el apartado del puente arco y el puente colgante, a los que se denominará en general: **“LA ARQUERÍA”** y que son simétricos en el plano geométrico del puente, cumpliéndose de esta manera el primer teorema del puente, y son antisimétricos en el plano mecánico del puente, cumpliendo así el segundo teorema.

En primer lugar, se considerará el semiplano geométrico inferior del puente, es decir desde el eje del puente hacia la cerrada del valle, al que podemos denominar “semiplano de compresiones”, pues es éste el esfuerzo preponderante en la manera de trabajar de la mayor parte de sus elementos en puentes.

En él se puede definir un sistema estructural que, de la forma más general posible y enumerando elementos desde el tablero en sentido descendiente, introduciría como elemento nuevo el ARCO, aunque estaría compuesto también por PILARES (que no son otra cosa más que fustes de pilas con base en arco y cabeza en tablero, y por tanto no pueden considerarse elementos enteramente nuevos, son un tipo particular de pilas) y PILAS en los casos producto de la hibridación de tipos.

A este sistema estructural basado en los esfuerzos de compresión como forma de trabajo principal se la denominará: **“LA ARQUERÍA APOYADA”** por ser el arco el elemento principal del sistema y de mayor complejidad en todos los aspectos, tanto estructural pero también conceptual y formal, y presentarse éste apoyado en sus extremos inferiores.

El arco apoyado es un elemento antinatural, o mejor dicho, artificial introducido en el terreno no se ven jamás en la naturaleza. Siempre ha sido un reto en el diseño de estructuras, y no es hasta hace relativamente poco (siglo XIX) que se conoce su funcionamiento científico. Grandes sabios como Leonardo da Vinci y Galileo fallecieron sin haber desvelado sus entresijos resistentes, como puede derivarse de sus escritos.

Por último y considerando el semiplano geométrico superior encontramos aquellos sistemas estructurales a los que se denominará **“LA ARQUERÍA COLGADA”**, y cuyo principal elemento es el CORDÓN, entendido éste en sentido general (cuerdas, fibras, cadenas, cables, etc.) que en la actualidad suele ser de acero, aunque no de forma

exclusiva; y que se encuentra colgado en sus extremos. Otros elementos del sistema son la PÉNDOLA y la PILA.

Los conceptos contrapuestos de acción e inacción también suelen ser útiles a la hora que diferenciar estos dos tipos principales, pues aportan de novedoso al debate una manera distinta de focalizar la forma: la pasividad y la actividad. Una vez más se demostrará cómo la pasividad está relacionada con la neutralidad mencionada en el apartado anterior para las viguerías y la actividad para las arquerías.

Una excelente interrelación entre ambos conceptos de forma y acción la proporciona Miguel Aguiló Alonso:

«Otra posibilidad para explicar los tipos primarios es asociarlos a la dirección de las acciones sobre los apoyos. Bajo cargas verticales, un puente es una viga si traslada acciones también verticales a los apoyos. Si con las mismas cargas las acciones son oblicuas y empujan de los apoyos hacia afuera, se tratará de puentes arco, y cuando tiran de ellos hacia adentro dan lugar a los puentes colgantes.» [10:32].

«Estas acciones oblicuas sobre los apoyos se producen como resultado de la forma de la estructura, o por la disposición de sus elementos y de los apoyos. Cuando el diseño da lugar a acciones sobre el terreno de componente horizontal, esas formas adquieren un papel activo en el comportamiento resistente de la estructura, como ocurre en los puentes en arco y en los colgantes. La viga, en cambio, sigue siendo viga en tanto su forma mantiene un papel estructural pasivo, y deja de serlo para convertirse en un arco o en un puente colgante cuando se altera esa cualidad.» [10:32].

«Ese papel activo subvierte el tradicional enunciado de que la forma sigue a la función. Cuando una forma es activa, lo es porque modifica su manera de resistir y por tanto condiciona su función resistente. « *Function follows form* es entonces la sentencia adecuada» [7:87], pues la función (de resistir) sigue la forma (diseñada) y no al revés. Con ello, la posición del diseñador en el proceso de diseño adquiere su verdadera dimensión. No se trata de un papel pasivo, orientado a dimensionar la estructura para

resistir esfuerzos inexorables dictados por leyes naturales, sino de un agente activo, capaz de conformar la materia para adecuar esos esfuerzos a sus intenciones de diseño.» [10:32].

«Hoy en día, ese papel de la forma para fijar la función se contempla como un paso previo al papel del material para fijar la forma, en lo que se ha dado en llamar “materiales inteligentes”. «Se trata de materiales sensibles, capaces de detectar las sollicitaciones cambiantes, y activos para modificar la forma, y por tanto su respuesta, en función de los estímulos recibidos. Las clásicas formas estables serán superadas por formas variables, materializadas por medio de sensores y actuadores incorporados» [20:67].» [10:32].

«En general, las formas activas producen estructuras más eficientes en términos de utilización de la capacidad resistente del material empleado. A partir de la experiencia histórica condensada en la tipología, el diseñador de cada puente debe buscar esa eficiencia con la mayor simplicidad posible. En cierto modo, ambas cualidades son contradictorias, pues la optimización de lo resistente puede complicar innecesariamente la forma estructural y desvirtuar su eficiencia. Conciliarlas no resulta fácil y puede ser imperativo cuando aumenta la luz, de lo que deriva la importancia de la escala en la obra de ingeniería.» [10:32].

Se adiciona a continuación una clasificación de los tipos habitual de puentes, entre paréntesis se destaca el elemento estructural que incorporan como novedad al vocabulario resistente existente, siempre considerándose de mayor a menor grado de complejidad:

## 1. LA VIGUERÍA

### 1.1. Vano único

1.1.1. SIMPLE (recta e inclinada)

1.1.2. ARTICULADA O GERBER (recta) (la articulación interior)

1.1.3. PORTICADA (recta e inclinada) (la pila empotrada)

1.1.4. ATIRANTADA (recta) (el tirante)

### 1.2. Vano múltiple

1.2.1. SIMPLE (recta e inclinada) (la pila, la péndola)

1.2.2. CONTINUA (recta e inclinada) (continuidad estructural)

1.2.3. ARTICULADA (recta)

- 1.2.4. PORTICADA (recta e inclinada)
- 1.2.5. ATIRANTADA (recta) (vano de compensación)
- 2. LA ARQUERÍA
  - 2.1.1. APOYADA (arco)
    - 2.1.1.1. tablero soportado
    - 2.1.1.2. tablero atirantado
  - 2.1.2. COLGADA (cordón)
- 3. LA HIBRIDACIÓN (entre tipos y subtipos)
- 4. LA SINGULARIDAD
  - 4.1. LA FLOTABILIDAD (pilas flotantes)
  - 4.2. LA MOVILIDAD (elementos móviles)
    - 4.2.1. La basculación
    - 4.2.2. El giro
    - 4.2.3. El desplazamiento (vertical y horizontal)

Por tanto, y puesto que es la acción gravitatoria la que se presenta de forma antisimétrica respecto al eje del puente, se puede finalmente concluir que efectivamente tal y como anunciaba el segundo teorema del plano del puente, los comportamientos mecánicos de arquerías apoyadas y arquerías colgadas son antisimétricos, pues geoméricamente son simétricos y mecánicamente presentan signo contrario: arquerías compresiones y cablerías tracciones. Son simplemente el propio reflejo de la antisimetría gravitacional focalizada en los elementos estructurales de este semiplano.

De la clasificación tipológica se quieren resaltar dos aspectos, el primero es que se puede observar como efectivamente la antisimetría de los puentes pòrtico son los puentes de tirantes, y en segundo lugar y puesto que éste texto concierne al tema de las pilas, se puede observar cómo las pilas sostienen lo soportado y cómo las pilas sostienen también lo suspendido.

Se es plenamente consciente de haber eliminado la palabra puente de la tipología de puentes, cosa que tanto gusta repetirse en la literatura pontificia, pero que resulta ser del todo innecesaria y superabundante para la ingeniería de puentes. Cuando se está tratando de campos exteriores, por supuesto que hay que hacer mención al puente pero cuando no se sale de él, resulta mucho más ventajoso el entender que el puente pertenece a una

categoría mayor como es la estructura, el puente es un tipo de estructura, es obvio, y por tanto mejora la inteligibilidad utilizar el lenguaje estructural propio de la materia en la comunicación, pues además dota al estudio de un grado mayor de generalidad que quizás permita encontrar algún tipo de relación, por analogía, fuera del universo de los puentes.

## **3.2. LA PILA Y SU PROPIO TIPO**

### **3.2.1. LOS ELEMENTOS DE UNA PILA**

En un sentido clásico del término, se podría entender una pila como un puente cuyos estribos son, por una parte el propio tablero y por otra el macizo rocoso de soporte, y el obstáculo a salvar sería el suelo (que es un fluido) que aquí haría las veces del aire en el puente convencional.

Dicho esto, también se podría aducir que en el caso de cimentaciones por pilotes flotantes los pilotes no llegan a contactar con la roca y se quedan, pues eso, flotando en el fluido suelo.

Esto no ha de causarnos ninguna contradicción interna, pues las pilas de los puentes flotantes (que trataremos con más detalle el próximo capítulo) son de hecho barcas, barriles, o cualquier otro elemento que flote, y cuya definición de pila no se ve alterada pues, simplemente cambia de fluido, en este caso el agua. No tiene necesidad de cimentar en roca, ni en suelo, pues ya puede hacerlo en el agua del cauce, y por lo visto para sus usuarios esto ya proporciona la estabilidad requerida.

Se procede a continuación a describir los elementos más característicos de una pila, entendida ésta en el sentido más general posible, pues todo sea dicho de paso, el concepto de pila ha ido evolucionando con el transcurso del tiempo, con el devenir de los acontecimientos culturales y con la aparición de sucesivas tecnologías que han permitido la configurar las nuevas tipologías de puentes, como los colgantes y los atirantados, y que han introducido innovaciones en su composición que las pilas clásicas no poseían.

Se realizará la exposición de manera ascendente, es decir, desde el terreno y la parte inferior del tablero hasta la parte superior del mismo. Se advierte, no obstante, que no la totalidad de las pilas presentan todos los elementos que aquí se exponen, y que es seguro que el lector encuentre casos en los que la correspondencia con lo aquí expuesta sea muy vaga, pues la imaginación de los artistas es muy fecunda y caprichosa:

- **“EL TERRENO AFECTADO”**, como acabamos de ver, conceptualmente se podría cimentar en roca, en suelo y en agua, aunque quizás considerándose éste último caso en un sentido muy general (no se considerará en el siguiente análisis). es por también se incluirá como una cierta parte perteneciente a la cimentación
- **“LA CIMENTACIÓN”**, constituida por los pilotes, el tapón de fondo y el encepado. Es la parte afectada por cualquier tipo de movimiento del suelo y principalmente en la dirección transversal a los pilotes, si éste está saturado o parcialmente saturado de agua (se pueden generar, succiones, subpresiones, fricción, fricción negativa, existe toda una casuística de situaciones).
- **“EL ALZADO”**, Es un elemento compuesto por otros tres que son los que siguen debajo, y que no son independientes entre sí, pues están relacionados bajo el concepto de columna de la antigüedad clásica.

Efectivamente, la columna clásica está formada por tres elementos: basa, fuste y capitel. Se puede ver en estos componentes una analogía con el árbol:

«la basa correspondería con la cepa del árbol, el fuste con el tronco y el capitel con el nacimiento de sus ramas más gruesas. Según esta analogía, autores como Vitruvio piensan que las primitivas columnas imitaban a los árboles, pues en realidad terminaron por sustituir los troncos por columnas de piedra más duraderas, llegando además, y siguiendo con la analogía, a



ver en la corteza del árbol las acanaladuras de los fustes.» [W:Columna (24/07/17)].

- **“LA BASA O BASE”**, es un elemento de transición de dimensiones menores que el encepado pero mayores que el fuste, que es el elemento al cual precede. En la basa se presentan los **“TAJAMARES”**, que son elementos de forma angulosa situados aguas arriba y cuya función es disminuir el impacto del agua sobre la pila desplazándola hacia los lados.
- **“EL FUSTE”**, es el elemento preponderante del alzado y también el de mayor visibilidad de la parte inferior de la pila.
- **“EL CAPITEL”**, constituye el ensanchamiento del fuste, sobre él se disponen los diferentes aparatos de apoyo. Tiene multitud de razones que justifican su disposición a nivel estructural.
- **“EL APOYO”**, es el lugar donde efectivamente apoya el tablero, es decir existe contacto entre tablero y apoyo, y está constituido por diversos aparatos de apoyo. No es un elemento que visualmente destaque demasiado debido a su reducido tamaño en comparación con la envergadura de la totalidad de la pila, pero sí que es un elemento conceptualmente muy importante y estructuralmente determinante y por ello se ha incluido.
- **“EL PILONO”**, está relacionado siempre con los cables, en particular con los puentes atirantados y extradados, son los elementos verticales o inclinados individuales que permiten dotar de componente vertical a los tirantes.
- **“LA TORRE”**, es el elemento más complejo de la parte superior de la pila. Está formado por multiplicidad de pilonos unidos entre sí y por una caterva de elementos individuales y particulares de cada construcción. Aparece con mayor frecuencia en puentes colgantes, atirantados.

## **3.2.2. METODOLOGÍA: EL ALZADO LONGITUDINAL**

Para realizar un análisis de los tipos geométricos inherentes en las pilas, y con la intención de simplificar previamente, se considerará el alzado longitudinal de la pila, por ser éste (respecto al alzado transversal, a la sección) el que determina la relación entre la pila y su esquema estructural base; y se considerará que presenta un eje vertical de simetría en toda su totalidad.

Esta hipótesis simplificadora es, de hecho, el caso que se presenta con mayor frecuencia. Aunque evidentemente no es el único, pero sí representa al que se va a definir como el tipo de pila; los que no presentan dicho eje de simetría constituyen miembros ciertamente poco frecuentes de la familia de pilas, y su estudio se obviará en este primer acercamiento a la materia.

El procedimiento de análisis a seguir se establecerá mediante la consideración de uno o varios elementos verticales, porciones de dicho eje de simetría, a los que se les asignarán sendas condiciones de contorno en los extremos, y se les hará girar por el centro del segmento, de tal manera que se irán describiendo sucesivamente las soluciones encontradas; relacionando a su vez estos esquemas con los tipos estructurales conocidos.

## **3.2.3. EL ELEMENTO INDIVIDUAL**

### **3.2.3.1. ARTICULADO EN LA BASE**

#### **— EXTREMO SUPERIOR LIBRE**

Considérese en un inicio cierta porción del eje vertical con una condición de contorno en su extremo inferior de articulación y el extremo superior libre, y sometida a cualquier tipo de sollicitación exterior. Procédase entonces a girar el elemento vertical (el sentido es indiferente).

Bien, se observan estructuralmente dos casos: el caso antisimétrico del inicial, en el que la articulación está en el extremo superior y el extremo inferior es libre, y todos los demás: que son casos intermedios en que el elemento está respectivamente vertical, inclinado u horizontal; éstos últimos casos no presentan interés estructural pues su configuración mecánica corresponde a la de mecanismos.

Pero el caso antisimétrico del inicial, sí presenta cierto interés estructural pues corresponde a un tipo de elemento: “**EL TIRANTE PURO**”, que no es otra cosa sino un tirante vertical (en la dirección de la gravedad). Este tipo de estructura es muy utilizado en salvamento de personas izadas desde helicóptero, por ejemplo, pero no es utilizado en el diseño de puentes.

#### — **EXTREMO SUPERIOR ARTICULADO**

Se observa la presencia de tres casos, el primero de ellos corresponde a cuando el elemento queda posicionado horizontalmente y representa el caso de “**LA VIGA BIAPOYADA**”, que es ampliamente utilizada tanto en **la viguería simple** recta como en la inclinada, de vano único o de vano múltiple.

Otro caso de interés que permite obtener el elemento auxiliar de **la viguería atirantada**, se produce cuando el elemento se encuentra en posición inclinada y traccionado, recuperamos entonces “**EL TIRANTE**”, en su sentido más general. En el caso de estar comprimido se obtendría “**LA VIGA INCLINADA SIMPLEMENTE APOYADA**”, elemento auxiliar definitoria de **la viguería inclinada**, ampliamente utilizado en tejados a un agua

Si finalmente se observase el caso vertical, se obtendría “**LA PÉNDOLA**”, elemento que configura **la arquería colgada**, que se trata de un tirante vertical sujeto en ambos extremos y articulado. Si, por el contrario, las sollicitaciones fueran de compresión estaríamos ante “**EL PILAR BIARTICULADO**”, elemento vertical a modo de biela típico de **la arquería apoyada**, que une el tablero, en su parte superior, con el arco, en su parte inferior.

## — EXTREMO SUPERIOR EMPOTRADO

El caso vertical, es decir con giro de ángulo nulo, correspondería a un elemento de **la cimentación profunda: “EL PILOTE ARTICULADO”**, que comprende aquellas situaciones en que el pilote no llega a empotrarse bien y su vinculación con la roca funciona a efectos prácticos más como una articulación que como un empotramiento. También estaría aquí representada **“LA PILA RECTA”**, uno de los elementos auxiliares de **la vigería porticada rectangular**.

En el caso de elemento inclinado se obtiene de la **“PILA INCLINADA”** elemento auxiliar frecuente en **la vigería porticada triangular y trapezoidal**, sobre todo en pasos superiores de autopista cuando la inclinación se produce hacia los estribos. Nótese que este caso no es de utilidad para **la vigería**.

El caso vertical inverso del anterior, es decir con giro de ángulo llano, correspondería a uno de los componentes más característicos de **la arquería: “EL PILAR EMPOTRADO-ARTICULADO”**. Así como a **“LA PILA RECTA”** de **la vigería**. También correspondería, este último tipo, al caso de **“PILONOS ARRIOSTRADOS”** en cabeza, de **la vigería atirantada**, en lo que se podría llamar: «rigidización de las cabezas de las pilas por atirantamiento superior. (...) es el sistema más eficaz. Se unen entre sí las cabezas de las pilas por tirantes horizontales y se compensan con tirantes inclinados que van a los puntos fijos del estribo. Se les puede introducir la carga que se quiera a esos tirantes para conseguir un modelo de elasticidad virtual elevado.» [12:Cap.18:58].

Otro caso es el de **“LA VIGA EMPOTRADA-ARTICULADA”** propia de **la vigería simple** (recta o inclinada) de vano único o doble, que corresponde al caso con elemento horizontal.

### 3.2.3.2. EMPOTRADO EN LA BASE

## — EXTREMO SUPERIOR LIBRE

Considérese en un inicio cierta porción del eje vertical con una condición de contorno en su extremo inferior de empotramiento y el extremo superior libre, y sometida a cualquier tipo de sollicitación exterior. Procédase entonces a girar el elemento vertical (el sentido es indiferente).

Se observa como en este estadio inicial en que la rotación aún no se ha producido el esquema estructural correspondería, y acorde con la nomenclatura adoptada, con el de: “**LA PILA RECTA**” que pertenece a **la arquería colgada**, el tipo abstraído es, de hecho, el de una ménsula vertical.

El caso inverso al anterior, es decir girado un ángulo llano, presentaría las vinculaciones intercambiadas de tal manera que el extremo empotrado sería el superior y el extremo libre el inferior, de tal manera que correspondería al siguiente elemento estructural: “**EL PILOTE FLOTANTE**”, elemento que pertenece a la familia de **la cimentación profunda**. Este elemento se da cuando no es necesario llegar a cimentar en la roca para obtener la resistencia requerida, o bien es imposible llegar a hacerlo, y se opta entonces por una multiplicidad de pilotes que incrementen la superficie de contacto con el terreno para así poder aumentar el rozamiento y que la cimentación literalmente “flote” en el terreno fluido, pero con consistencia.

En la línea de lo anterior tendríamos el caso correspondiente al elemento inclinado y al elemento horizontal que corresponderían respectivamente a: “**EL VOLADIZO RECTO E INCLINADO**”, son ménsulas pertenecientes a la familia de **la vigería**, el primero de ambos está incluido en **la vigería articulada**, o lo que en los países anglosajones se entiende por viga *cantiléver*, y es el caso asociado a un tipo particular de puentes cuyo ejemplo más emblemático es el puente de *Forth* en Escocia, el vano a salvar presenta sendos voladizos a cada lado que permiten articular una viga en el tramo central, la existencia de los voladizos es producto de un arriostamiento simétrico de un par de pilas solidarias. El segundo de ambos, el voladizo inclinado es ampliamente utilizado en la construcción de marquesinas o cubiertas.

## — EXTREMO SUPERIOR ARTICULADO

Este caso ha sido ya recogido en el apartado anterior.

## — EXTREMO SUPERIOR EMPOTRADO

El caso más obvio corresponde a “**LA VIGA BIEMPOTRADA**” cuando el elemento es horizontal y que es propio de la **viguería simple** (recta o inclinada) de vano simple.

Si se considera en este caso la inclinación del elemento, se nos presenta “**LA PILA INCLINADA**” de la **viguería porticada inclinada** (triangular o trapezoidal). La primera es ampliamente utilizada en los puentes de ferrocarril, pues «(...) tiene la ventaja de que la inclinación de las pilas convierte a esta estructura en excelente para resistir cargas de frenado, hecho, este último, que siempre constituyó una de las razones de la existencia de este tipo de estructuras.» [12:Cap.11:50]. La segunda es también ampliamente utilizada sobre todo en vano múltiple pues conforma un tipo particular de pila: “**LA PILA DE CÉLULAS TRIANGULARES**”, clásica de pasos de autopista.

Por último, se presenta el caso de elemento vertical biempotrado que indistintamente puede representar a “**EL PILAR BIEMPOTRADO**” en la **arquería apoyada**, o a “**LA PILA RECTA**” de la **viguería porticada**, tanto en vano único como en vano múltiple.

Se puede observar como el producto de este análisis de simple configuración (la rotación de un elemento vertical único y la casuística de sus posibles vinculaciones) ha permitido obtener prácticamente la totalidad de los tipos estructurales que sirven para la definición y caracterización de los elementos principales de un puente, y de paso se ha proporcionado toda la tipología del elemento pila de puente, minimizando de esta manera las posibilidades de incurrir en exclusión y por tanto garantizando un grado mayor de exhaustividad.

## **4. ANÁLISIS CRÍTICO INGENIERIL**

## 4.1. INGENIERÍA, CIENCIA Y TÉCNICA

Se procederá a reproducir a continuación una magnífica exposición sobre el tema formulada por Miguel Aguiló Alonso, acompañada de algunas aportaciones de otros autores que se consideran altamente clarificadoras para la comprensión de los conceptos que se tratan en este apartado. Pues son frecuentes las confusiones que ocurren en la utilización de éstos términos.

«Para comprender bien la asociación entre diseño y conocimiento es necesario profundizar algo en las peculiaridades del conocimiento tecnológico. Generalmente, se asume que la ingeniería no es sino ciencia aplicada: los ingenieros toman el conocimiento de los científicos y, con procedimientos generalmente poco interesantes y ocasionalmente dramáticos, lo utilizan para producir cosas. Sin embargo, la tecnología no es una derivación de la ciencia sino un cuerpo de conocimientos autónomo, diferente del conocimiento científico con el cual interactúa.» [10:42].

«Hay una diferencia fundamental entre ciencia y tecnología. La ingeniería o la tecnología se encargan de la fabricación de objetos que no existían antes, mientras que la ciencia descubre cosas que han existido durante mucho tiempo. Los resultados tecnológicos son formas que existen solo porque alguien quiere fabricarlas o construirlas, mientras que los resultados científicos son formulaciones de lo que ya existe con independencia de las intenciones humanas. La tecnología se ocupa de lo artificial, en tanto la ciencia trata de lo natural.» [7:30].

«Para los ingenieros, el tema central de su relación con el conocimiento es el diseño, orientado a la construcción y operación de cualquier artificio que transforma el mundo para solventar una necesidad, en un proceso que incluye numerosas y difíciles concesiones y equilibrios, a realizar con un conocimiento incompleto o incierto que puede requerir cálculos, ensayos o investigaciones específicas. En ese trabajo, y a diferencia de los científicos, los ingenieros están habituados a actuar con recursos muy limitados de tiempo y dinero, y no pueden cometer errores: un error en ingeniería puede tener enormes repercusiones y su trabajo debe eliminarlos.» [10:42-43].

«Esos requerimientos de economía y precisión están ligados a la necesidad de unos conocimientos claramente ordenados y disponibles, e ilustran el papel fundamental de la “manera de pensar” en ingeniería. Frente a la intención científica de producir conocimientos, el propósito del diseño ingenieril es determinativo. Esto afecta a las cuestiones a que se adapta el conocimiento, a la manera como se formula y a la profundidad de detalles que debe proveer.» [10:43].

«Las mejoras de diseño se consiguen por la selección y solución de problemas tecnológicos, seguido de la elección entre soluciones rivales» [29:135]. «Y en ese proceso el recurso al tipo como elemento ordenador de las soluciones en torno al cual se acumulan los conocimientos tecnológicos es fundamental. El tipo es muy flexible en cuanto a la asociación de formas, materiales, detalles y procesos constructivos, según criterios de similitud y diferencia, que serían de difícil clasificación científica por su enorme variedad. Pues se trata de unos conocimientos tecnológicos que incluyen muy diferentes categorías, como:

- Conceptos fundamentales de diseño (configuraciones)
- Criterios y especificaciones (cargas, requisitos)
- Herramientas teóricas y conceptos intelectuales (modelos y teorías, desde fórmulas a sistemas complejos)
- Teorías generales ingenieriles (elasticidad, mecánica de fluidos)
- Teorías restringidas a casos concretos (cálculo de arcos)
- Precisiones fenomenológicas específicas (máxima flecha vinculada a la luz a salvar)
- Conceptos sobre “cómo deben ser” las obras (relación canto luz)
- Datos cuantitativos empíricos (desarrollados y contenidos en la normativa)
- Consideraciones prácticas derivadas de la experiencia e imposibles de sistematizar.» [10:43].

«Estos casos ilustran cómo esta nueva perspectiva del diseño en ingeniería, en tanto actividad independiente de la ciencia básica, sugiere un nuevo tipo de investigación, fundamental en toda profesión relacionada con el diseño, en la que el estudio histórico y humanístico es tan importante como el desarrollo de análisis científicos.» [10:32].



Habiéndose llegado a este punto se podría decir que en esencia:

- **LA CIENCIA** se basa en el **conocimiento**: averiguar por el ejercicio de las facultades intelectuales la naturaleza, cualidades y relaciones de las cosas.
- **LA TÉCNICA** se basa en la **ejecución**: poner por obra algo.
- **LA TECNOLOGÍA** constituiría el estudio del **conocimiento técnico**.
- **LA INGENIERÍA** se basa en el **ingenio**: facultad del ser humano para discurrir o inventar con prontitud y facilidad. Es decir, crear algo que antes no existía mediante cualquier tipo de conocimiento (propio o ajeno) y la propia habilidad.

Por otra parte, la ingeniería no es ni ciencia ni técnica, sino que es una **profesión** que trata con determinadas obras (como en este caso el puente) y que requerirá de cualquier disciplina que se vea asociada en mayor o en menor medida con aquello que se esté tratando de llevar a cabo, la formación del ingeniero de puentes suele ser multidisciplinar y presenta componentes tanto científico-técnicas, como filosófico-humanísticas, artísticas, etc.

## 4.2. TÉCNICA, ESTRUCTURA Y MÁQUINA

Se centrará ahora la focalización del estudio en los objetos que la técnica produce y que se pueden agrupar básicamente como en dos grandes tipos:

- El artefacto estático al que se denominará: “**LA ESTRUCTURA**”.
- El artefacto dinámico al que se denominará: “**LA MÁQUINA**”

No dejan de ser frecuentes opiniones como las de David P. Billington en las que afirma: «Las estructuras representan la continuidad, la tradición y la protección de la sociedad, mientras que las máquinas personifican el cambio, la movilidad y el riesgo» [7:33-34].

No obstante, no se está desacuerdo con sus palabras pues las estructuras han significado, a lo largo de la historia, grandes momentos de ruptura con lo establecido, (como por ejemplo en el siglo XIX con el desarrollo de los puentes de hierro, o el descubrimiento del hormigón pretensado a principios del siglo XX), momentos de revolución y de cambio, y que no han causado, en absoluto, sosiego en la tradición. Y que decir tiene el riesgo, que siempre ha sido determinante en la historia del puente, del ir más allá, la consecución de las grandes luces siempre ha sido y siempre será un acto cargado de incertidumbre y las personas que logran llevarlas a buen puerto demuestran poseer cualidades excepcionales, entre ellas las de asunción del riesgo y la templanza de la nervadura.

Sin embargo, si se está de acuerdo cuando el mismo Billington afirma:

«Sin embargo, las estructuras deben construirse con máquinas y la mayoría de máquinas sólo son posibles gracias a las estructuras. Los modernos edificios de las ciudades serían prácticamente inútiles sin los ascensores y muy pocos puentes se habrían construido de no ser por la presión de los ferrocarriles y los automóviles. De manera análoga, las máquinas requieren una estructura que les proporcione soporte y apenas tendrían utilidad sin las estructuras en cuyo interior o sobre las cuales funcionan.» [7:34].

Nótese, sin embargo, una crucial diferencia entre ambas: las estructuras constituyen una construcción particular en un sitio concreto, como un traje a medida; mientras que las máquinas, excepciones a parte, son fabricadas en masa como producto de consumo para ser utilizadas de forma mayoritaria. La estructura sigue constituyendo un producto único e individual, mientras que las máquinas son fabricadas en serie para su consumo colectivo.

### **4.3. INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

La discusión al respecto de este tema forma parte ya de la tradición en el universo de la construcción, desde que allá a principios del siglo XVII (más concretamente en 1747 se creara la *École Nationale des Ponts et Chaussées* en París) surgiera un nuevo tipo de escuela para formar a constructores diferentes que no procedían tanto de la arquitectura ni de lo civil como del estamento científico, técnico y militar. El debate generado desde entonces, ligado también a la aparición de nuevos materiales, y azuzado por intereses oscuros con intenciones nada claras, o evidentemente claras, ha inspirado a multitud de autores que no han dudado en dejar su huella.

Es un tema complejo y extenso, poliédrico y de difícil aproximación somera, simplemente, y con el objetivo de incitar a la reflexión y así estimular la curiosidad del lector, se reproducirán a continuación las palabras de David P. Billington:

«Los ingenieros de estructuras dan forma a objetos de relativa gran escala y de un único uso y ven las formas como un medio para controlar las fuerzas de la naturaleza que la estructura debe resistir. En cambio, los arquitectos dan forma a objetos de relativa pequeña escala y complejo uso humano y ven las formas como un medio para controlar los espacios que el hombre empleará. La forma ingenieril arquetípica, el puente público, no necesita de ningún arquitecto. La forma arquetípica de la arquitectura, la vivienda privada, no requiere ingeniero alguno. Hemos visto con anterioridad cómo científicos e ingenieros desarrollan sus ideas en paralelo y, en ocasiones, con mucha discusión, y que los ingenieros estructurales dependen de los ingenieros de maquinaria para construir sus obras. De manera análoga, ingenieros estructurales y arquitectos aprenden unos de otros y, en algunos casos, colaboran con resultados fructíferos, especialmente en aquellos en los que la gran escala va acompañada de un uso complejo, como sucede en los edificios altos o rascacielos. Pero los ámbitos de actuación de arquitectos e ingenieros son generalmente diferentes» [7:35].

## **5. ANÁLISIS CRÍTICO ARTÍSTICO**

### **5.1. EL DISEÑADOR DEL PUENTE**

#### **5.1.1. EL ESCULTOR**

Los escultores generan objetos de pequeña escala y de alto contenido simbólico aplicando los recursos técnicos de las artes plásticas pero no los de la técnica ingenieril. Partiendo de esta base se observa como sus diseños son, en general, de carácter eminentemente formalista, con una despreocupación absoluta por el hecho resistente, pues en la mayoría de los casos y debido a la pequeña escala resulta innecesario.

En algunos casos, siempre excepcionales, como por ejemplo el artista Siah Armajani (nacido en Teherán en 1939 e instalado en Estados Unidos en 1960) su actividad escultórica pasa de los objetos a la realización de puentes y pasarelas reales. Dichas realizaciones presentan como características destacables la variedad de cromatismos y de ornamento que tanto ansían las artes plásticas para cumplir su verdadera función simbólica. Bajo una mentalidad positivista todo ello bien se podría aprovechar para complementar y favorecer a las realizaciones existentes, pero lamentablemente todavía hoy esto no se ha conseguido satisfactoriamente. En palabras de Javier Manterola Armisén:

«Nada sustancial que transforme los conceptos de puente y de resistir pero que, sin embargo, trivializa el hecho resistente convirtiendo la pasarela en un elemento intermedio entre un objeto y una estructura.» [5:97].

### **5.1.2. EL ARQUITECTO ALEJADO DE LA INGENIERÍA**

Este tipo de realizaciones se caracterizan por utilizar los elementos estructurales de la tecnología ingenieril, léanse arcos, vigas, tirantes, apoyos, etc., pero de una manera que en absoluto se corresponde con la del contexto propio de caracterización resistente en la que fueron formulados. Ejemplos podrían ser los deconstructivistas Rem Koolhaas y Carme Pinós.

Si se entiende el conjunto de la expresividad formal acumulada por la tradición resistente como en lenguaje capaz de expresar sentimientos pero también conocimientos, entonces estas realizaciones se muestran como descontextualizadas, producto de la metáfora

personal exógena al universo resistente; esta deslocalización las excluye del discurso troncal del sistema conceptual compuesto por el cauce de la corriente principal, y por tanto tampoco aportan gran cosa al concepto de tipo estructural aquí expuesto. En esta línea de pensamientos se pueden inscribir siguientes palabras de Javier Manterola Armisén:

«La obra de Zaha Hadid para el pabellón puente de la Expo 2008 de Zaragoza es una obra formidable de arquitectura y ajena a todo el discurrir del pensamiento constructivo de los ingenieros. Es muy frecuente que la traducción formal del pensamiento arquitectónico, cuando el problema técnico que se plantea es importante, falle en muchas direcciones y sea necesario recurrir al carenado en unas zonas y a sobrecostos exagerados en otras para que se acoplen la resistencia y la forma arquitectónica.» [5:97].

«El caso del hermoso pabellón puente es el ejemplo más adecuado de disparidad cuando el pensamiento arquitectónico no está embebido de las exigencias del problema resistente y se refugia en ese lugar común de “ya lo resolverán los ingenieros”, como efectivamente así ha sido. La ayuda que se podría haber dado al mundo de la construcción ha fracasado en este caso, donde sólo ha quedado la idea de que cualquier cosa que se piense se puede construir, y eso no es bastante.» [5:98].

### **5.1.3. EL ARQUITECTO CERCANO A LA INGENIERÍA**

Resultan obras que pueden resultar creativas, elegantes e ingeniosas, dignas y hermosas, en las que su éxito se fundamenta en la heterodoxia y el formalismo pero que instintivamente lleva a preguntarse al ingeniero a cerca de su suficiencia ¿Es suficiente la existencia de la posibilidad potencial de realización para que sea necesaria su materialización? Preguntas en la misma dirección que ésta son hoy día bastante formuladas, pues la mayor parte de autores como Santiago Calatrava Valls podrían incorporarse en esta línea de realizaciones. Han realizado también aportaciones al campo de los puentes autores como por ejemplo François Deslaugiers, I. M. Pei o Marc Mimram, entre otros.

Se podría decir que son obras que utilizan el lenguaje estructural pero que su discurso no es acerca del mundo tecnológico-estructural propio de la ingeniería sino del mundo formal de la arquitectura. En muchos de los casos sus autores poseen la doble titulación de arquitecto e ingeniero.

#### **5.1.4. EL INGENIERO CLÁSICO**

Pertenecen a esta categoría los puentes diseñados por ingenieros aferrados a los tipos clásicos, sin introducción alguna de elementos formales resistentes novedosos o cuyas realizaciones son poco, o en absoluto, rompedoras con la tradición heredada.

Suelen constituir el caso más común y son el fruto de aquella estética funcionalista trasnochada que tiende a ser anónima y restringida pues revela lo impersonal de la ciencia en su expresión tecnológica.

«La contemplación de aquellas obras de ingeniería, funcionalmente excelentes, pero sin expresión propia, tiene un mínimo contenido de disfrute pues esa celebración de la ciencia se apura de una sola mirada al haber prescindido de los contenidos simbólicos.» [17:303].

«Los cientos de viaductos de hormigón del tipo viga continua, construidos por voladizos sucesivos en todo el mundo durante las últimas décadas, se agotan en su propia perfección. Su presencia basta para aprehenderlos, y sólo el remoto eco del lugar los afirma como entidades diferenciadas. Lo típico, conscientemente despojado de cualquier adherencia local, ornamental o simbólica, sin la aportación de ninguna innovación y sin la presencia de una marca o sello de autoría, acaba siendo igual a sí mismo y se convierte en copia. Al vincular la belleza a la funcionalidad se dinamita la utilidad de la idea de belleza como criterio valorativo de la excelencia de las obras» [10:335].

#### **5.1.5. EL INGENIERO INNOVADOR**

Los máximos exponentes del diseño de puentes recorren este camino. «Se trata de desarrollar el lenguaje resistente heredado de nuestros mayores, de conjugar todos los

conceptos simples citados, llegando a establecer, si es preciso, una auténtica deconstrucción resistente, entendiendo por tal la rotura y dislocación de las asociaciones frecuentes entre forma y resistencia.» [5:104]. Como exponentes de este movimiento se podría citar a Jörg Schlaich, Jiri Strasky y toda la tradición española de insignes ingenieros de caminos, canales y puertos: Javier Manterola Armisén, Juan José Arenas de Pablo, Leonardo Fernández Troyano, José Antonio Fernández Ordoñez, Julio Martínez Calzón, etc.

Se trata de la búsqueda de nuevas formas y tipos de estructuras producto de la innovación resistente y de la altísima cualificación tecnológica de sus autores, que suelen presentar formación a nivel de doctorado, e incluso en la mayoría de los casos conjugan o han conjugado la actividad profesional con la actividad docente e investigadora de alto nivel propia de la universidad.

Debido a ello y para poder lidiar con el alto grado de incertidumbre producto de la compleja situación actual en lo que refiere al hallazgo de innovadoras soluciones formales de cariz resistente, se puede encontrar en algunos casos, como el recurso al **virtuosismo estructural** se convierte en la única vía de supervivencia de la esencia puramente ingenieril aunque sea a costa de dejar rezagada a la mayoría de la profesión, pues en la actual época de transición, son ellos los que aportan luz a las tinieblas y seguramente en un futuro no muy lejano y, con la aportación de nuevos materiales y tecnologías, el resto de la profesión avance por el camino que ellos, ahora mismo, están trazando.

Otro caso que pertenece a este apartado estaría constituido por las **colaboraciones con arquitectos**: «La superabundancia de posibilidades resistentes ha abierto también la puerta a la colaboración entre arquitectos (teóricos detentadores de proporcionar a las cosas belleza formal) e ingenieros (teóricos detentadores del rigor conceptual). Esta colaboración ha producido frutos de todo tipo, generalmente malos o muy malos, lo que ocurre cuando el arquitecto configura la belleza formal como un exterior, un carenado, dentro del cual el ingeniero tiene que meter un puente. Ahora bien, cuando existe auténtica colaboración entre arquitectos e ingenieros, y ambos tienen talento y visión resistente, los resultados suelen ser buenos.» [5:109].

Ejemplos de ello podrían constituir el puente de acceso al museo Miho, en Japón, del arquitecto I. M. Pei y el ingeniero L. Robertson, o el puente Ushibuka-Kumamoto del ingeniero Ove Arup y el arquitecto Renzo Piano.

## **5.2. EL PUENTE: OBRA DE ARTE**

Recogiendo las palabras de Javier Manterola Armisén en su libro “La obra de ingeniería como obra de arte” (2010):

«Este último punto es el más difícil de tratar, sobre todo porque las obras de los ingenieros no están incluidas oficialmente en el catálogo de las obras de arte. Sin embargo, afirmo con rotundidad que determinadas presas, determinados puentes y determinadas carreteras son auténticas obras de arte.» [5:174].

En primer lugar, se ha de manifestar una total conformidad, con lo arriba expuesto y por múltiples razones, el puente siempre ocupó un lugar preferencial dentro de la obra de construcción en la antigüedad, pues en sus orígenes fue indisoluble de la arquitectura ya que tanto aquella como la ingeniería (que no existía etimológicamente hablando) utilizaban ambas el mismo elemento estructural: el arco, que era de hecho el único que hubo para la construcción (a excepción de la viga de madera que en puentes era utilizada únicamente para puentes provisionales o en contadas ocasiones).

Por tanto, puesto que el arco era el único elemento estructural que permitía salvar luces en la construcción de fábrica y, éste mismo era amplísimamente utilizado en puentes, de ello se deduce que desde la tradición antigua hasta la edad moderna el puente se consideró una obra de arte, puesto que si se considera a la arquitectura obra de arte el puente también lo es y, con él toda la obra constructiva por ende, ya que hasta la llegada de la revolución industrial los elementos estructurales utilizados por la construcción fueron los mismos.

¿Que se puede esperar de dicha concepción como obra de arte del puente con la llegada de la edad moderna? Aquí la cosa difiere pues con la llegada de nuevos materiales que permiten el surgimiento de nuevos elementos estructurales que la ingeniería utiliza pero



que la arquitectura en un principio no demasiado, pues expresa un sentimiento de cierta reticencia hacia materiales y tecnologías (la cultura del hierro, la celosía, etc.) que desconoce, y que incluso en principio, desea no conocer. Hace que se produzca una dicotomía entre ambas disciplinas y que, como no, la denominación: arte, sea apropiada por la arquitectura y, a su vez, despojada de ella a la ingeniería de una forma desdeñosa, no exenta de interés tanto profesional como económico.

¿Y que situación se presenta en la actualidad? Hoy día las cosas han cambiado, no porque arquitectura e ingeniería hayan vuelto a converger en una única profesión como antaño, más al contrario están en su momento de máximo distanciamiento; la situación está revirtiendo porque es la arquitectura la que está acercándose a la ingeniería y, esta vez sí, está adoptando todo el vocabulario estructural completo de tecnologías. Esta situación es descrita por Javier Manterola Armisén como sigue:

«Ha transcurrido más de siglo y medio de “omnipotencia” de la técnica, con el triunfo total sobre el resto del universo formal arquitectónico, que intentó al principio, agónicamente, mantener un clasicismo que no pudo sobrevivir ante la presencia formidable del mundo formal proporcionado por la tecnología.» [5:81].

Ello ha propiciado una vuelta al concepto de arte aplicado a la ingeniería pues, a pesar de clarificarse la diferencia entre ambas profesiones, se ha vuelto a la situación inicial en la que todos los elementos estructurales disponibles son utilizados por todo el colectivo del universo de la construcción.

No sólo eso la tradición ingenieril va ligada a la premura, a la funcionalidad y a la economía, pero también a la eficiencia, a la elegancia, a la esbeltez y a la democracia. No es de extrañar que a medida que occidente se ha ido democratizando ello haya significado la aceptación del discurso estructural de la ingeniería.

Y para despejar las dudas que se pudieran cernir también sobre la relación entre el puente y la escultura, se recogen a continuación unas palabras clarificadoras de Javier Manterola Armisén:

«¿Tiene sentido pensar en un puente como una escultura? Hay cosas que los separan: el puente tiene una función que cumplir, lo que condiciona su geometría. La escultura no. Quizás debería añadir aquí una precisión complementaria. No tengo ningún interés en considerar que el hecho de asimilar los puentes a esculturas añada lo más mínimo a su valor estético.» [5:176-177].

«He querido establecer un límite sutil entre la escultura y la obra pública, y parece que a este fino velo pertenece el tamaño, que la estructura resistente sea significativa y, además, que sea algo construido, pero no podemos ir mucho más allá y acercarnos a considerar una obra pública como un objeto artístico utilizando la escultura como parámetro. Llegados a este punto, este texto debería abandonar la relación entre escultura e ingeniería y considerar la obra pública directamente como obra de arte.» [5:180].

Por último y sin querer establecer aquí una discusión filosófica (la estética estudia la belleza desde el punto de vista de la razón) sino a modo de reflexión final, simplemente se quiere constatar el hecho de que no todas las obras de arte son bellas.

Efectivamente, el mundo del arte está compuesto por toda la casuística posible de obras, y la existencia de lo bello implica necesariamente la existencia de lo feo, tal y como el filósofo presocrático Heráclito de Éfeso “El Oscuro” (535 a.n.e.), vaticinaba con su famoso lema de la “armonía de los opuestos”. ¿Acaso puede discernirse la belleza si no se ha experimentado jamás la fealdad? O como en la larga tradición de arte dramático en que el protagonista es bello y bueno y el antagonista es feo y malo. Así mismo ocurre con los puentes: los hay horriblos y hermosos, pues así sucede también en el mundo del arte, y como se ha podido ver sucede también así en la vida.

Pero el puente es una obra pública y, por tanto, tiene que resultar bello a la mayoría de la sociedad, pues ella es quien lo financia en última instancia. La cuestión no es ser o no ser obra de arte que, por supuesto se es, la cuestión es ser o no ser bello.

Dejamos aquí este interesantísimo debate, por falta de tiempo, de ¿por qué una sociedad determina que una obra de arte es bella y otra no? Es un viaje al corazón de la sociedad propia comunidad que produce la construcción del puente y de sus valores culturales más intrínsecos y definitorios.

## 6. CRITERIOS DE DISEÑO

### 6.1. IDEA FELIZ Y ¿POR QUÉ?

Siempre es conflictivo proporcionar recomendaciones en una materia tan personal como es el diseño formal de cualquier cosa y más aún el de puentes, que por constituir parte de la obra pública puede disponer de inmediato del mayor número de usuarios visuales físicos disponibles del mundo de la construcción, eso sin contar la comunicación visual de los *mass media*, y más si se trata de un puente urbano, que refleja el sentir de lo que se ha convenido en llamar el estilo individual de cada artista.

Afortunadamente el profesor Modest Batlle Girona, guía espiritual e indiscutible en la materia, a cuyas clases tuvo el honor de asistir un servidor, dejó escritos antes de jubilarse una serie de criterios en su libro “Diseño y funcionalidad visual en la obra pública”, que será parafraseado en éste apartado y en los siguientes.

«Previamente al hecho creativo hay siempre un trabajo de estructuración, de selección, de tentativas, de perfeccionamiento, que según en qué tipologías se trabaje puede dar el fruto más o menos rápidamente. La idea feliz, la inspiración repentina, casi nunca existe porque, como ya se ha dicho, aunque sea de forma inconsciente, detrás de ella hay un gran *background* de criterios, archivados en la memoria, que produce el resultado con mayor o menor rapidez, según el desarrollo intelectual de cada creativo» [8:135-136].

Uno de los mecanismos de trabajo que le gusta señalar es el método que él denominaba del ¿Por qué? Y que intenta la unión de los conceptos del diseño y la lógica: es el procedimiento de la pregunta permanente. Esta es seguramente una de las metodologías más simples y elementales del proceso creativo.

«Si el estudiante o el profesional ilusionado por el diseño preguntase ¿qué método puedo seguir para aprender a diseñar?, la respuesta podría remitirle a las múltiples publicaciones que hay en el campo del diseño industrial y la arquitectura, pero en ello el

interesado siempre bebería en fuentes ajenas. Si él quiere ser su propio educador la pregunta deberá transformarla en otra pregunta. El proyectista deberá responder a cada elemento de diseño a la pregunta ¿por qué así?» [8:138].

«Esta es seguramente una de las metodologías más simples y elementales del proceso creativo. En realidad, no es ni más ni menos que un proceso lógico de pensamiento que va valorando y va desechando o va aceptando cada una de las respuestas a este ¿Por qué?» [8:138].

## **6.2. LA UNIDAD FORMAL**

Es recurrente en el arte el concepto de unidad, y a su descripción se dedican las líneas que siguen pues se va a proceder a definir qué constituye un todo único y sobre todo ¿cómo puede traducirse dicha expresión a algunos criterios o algunas normas que permitan identificar cuándo se constituye ese todo único, esa unidad?

«Para intentar una aproximación a este concepto, desde la perspectiva ingenieril, vinculándolo a los aspectos formales del diseño de la obra pública, se propone definir el criterio de “unidad formal con el apoyo en una materia muy afín a estas profesiones, como es la geometría. La unidad formal se definiría como: el mantenimiento de una unidad en las formas geométricas integrantes del diseño. Esta unidad puede abarcar desde los contornos de la obra hasta aquellos elementos que componen las superficies de las mismas, pero también en esto cabe incidir, sin rigorismos ni radicalismos: la unidad formal debe ser, más que una estricta normativa geométrica, un estado de espíritu donde un elemento geométrico existente en la mente del proyectista le impulsa a diseñar, teniéndolo permanentemente presente, frente a otras figuras que puedan ser antagónicas”.» [8:139].

«La idea de unidad formal podría vincularse a un concepto, muy orientalista, de “armonía interior”, concepto que se refleja en muchas actitudes de la cultura de extremo oriente. En esencia, es conseguir que la visión de las formas exteriores sea capaz de generar una sensación de coherencia, de paz espiritual, que se traduce en la armonía interior.» [8:139].

### **6.3. LA SINGULARIDAD DE SITUACIÓN**

Vaya de antemano que este apartado está íntimamente ligado al apartado denominado: El diseño y el lugar. Pero si bien en aquel, la discusión provenía de las diferentes posibilidades que se presentan al considerar la relación del sitio con el puente y bajo qué condicionantes éste era más susceptible de poder llevar a cabo la transformación en lugar. Aquí el concepto es ligeramente diferente pues de lo que se trata es de dar un criterio, síntesis de la disquisición anterior que es mucho más compleja, pero que sirva rápidamente para poder situar las primeras directrices del diseño formal del puente.

«Lo que se plantea es, ni más ni menos, que cada entorno tiene su obra y cada obra tiene su entorno. Por lo tanto, no debería proyectarse jamás sin que, en los contenidos formales, el proyectista fuese capaz de tener en cuenta su ubicación, su situación, su territorio. De alguna manera, si el proceso es correcto, la obra proyectada solo tendrá vigencia en aquella situación física concreta, sin posibilidad de otra ubicación. La obra debería ser válida para un solo espacio “singular”. No sería posible tener una ubicación “plural” porque esta pluralidad rompería su personalidad. Cada puente debe estar determinado por una situación de contorno y de entorno, es lo que podría denominarse “singularidad de situación”.» [8:156].

«¿Cómo podría determinarse si se ha cumplido con esta propuesta? Seguramente formulando las siguientes preguntas: ¿Podría emplazarse la obra en otros lugares? ¿Tiene posibilidades de ser transpuesta a cualquier entorno? Si la respuesta es positiva se produce pluralidad de situación; si es negativa, singularidad.» [8:156].

### **6.4. EL FORMALISMO ESTRUCTURAL**

El criterio presentado en este apartado bebe de lo expuesto en el apartado: Soluciones de diseño, anteriormente descrito, pero con la salvedad de que ahora se pretende proporcionar un criterio fiable para diseñar puentes y cualquiera de sus elementos, en

lugar de la disquisición acerca de las diferentes soluciones de diseño y su relación con la forma estructural o resistente, que fue lo que se expuso allí.

Un puente puede ser muchas cosas, pero ante todo es una estructura y, es imposible la desvinculación de ésta de su forma aparente en la mentalidad clásica de la ingeniería moderna.

«En esencia, ¿qué es el formalismo estructural? El formalismo estructural, si se acepta esta, expresión, puede definirse como la traducción al exterior, a la vista del espectador, de la esencia de la estructura, de todos sus procesos tensionales y de esfuerzos, como generadores de las formas, o acaso al revés, el aprovechar los elementos resistentes para generar formas. Si en el diseño industrial se decía que su finalidad era traducir mediante formas y colores a los ojos del usuario las funciones y los materiales del objeto, en este caso el formalismo estructural es traducir también a los ojos del usuario, ya sea físico o visual, el proceso resistente del puente; es, en esencia: “la interrelación forma-estructura”.» [8:176].

«Pero dentro de este campo de interrelación entre la forma y la estructura se producen también muchos matices, desde los que consideran que la limpieza estructural es suficiente por sí sola y rechazan cualquier aditamento y a los que podríamos llamar “estructuralistas”, hasta aquellos que consideran los elementos estructurales susceptibles de ser domeñados para conseguir formas interesantes, desde una perspectiva estrictamente visual, sin renunciar a la expresividad estructural pero haciéndola compatible con la formal; son los autores que podríamos denominar “formalistas”. Haciendo un ejercicio de asimilación a la arquitectura, puede pensarse que el estructuralismo es la traducción a la ingeniería de los conceptos racionalistas de la arquitectura, como, en el otro extremo, el modernismo puede asimilarse al formalismo.» [8:177].

«Llegados a este punto, surge una pregunta de profunda trascendencia, y un debate. ¿Es el “estructuralismo” el único criterio que debe seguir un ingeniero? ¿Debe la obra pública desprenderse de todo tipo de diseño formal que no sea el estrictamente estructural?» [8:177].

## 7. CONCLUSIONES

Con todo lo hasta aquí expuesto cabe preguntarse ¿Tiene vigencia el concepto plasmado de tipo estructural como camino seguro hacia la concepción de formas resistentes, actualmente? ¿Y en un futuro próximo?

No existe hoy día una opinión unánime ni consensuada al respecto, por tanto, se limitará a ofrecer una opinión personal y totalmente subjetiva al final del presente apartado. Pero previamente se ofrecerán algunos elementos de juicio que puedan dirigir el debate acerca del desvanecimiento, o no, de los tipos clásicos heredados de nuestros ancestros y, del propio instrumento: tipo, como esquema intuitivo de renovada o caduca utilidad.

Bien es cierto que no estamos en el tiempo de las grandes innovaciones resistentes, pero también es cierto que se viven tiempos de explosión computacional en los que aportaciones menores, pero de distintos campos, son potenciadas e interconectadas por la informática, «una “supratécnica” que permite desarrollar conexiones muy activas y profundas con otras técnicas y ramas de la ciencia, que generan una transformación trascendental» [10:317].

Todo ello ha disparado la creatividad de los diseñadores de estructuras y se está produciendo un desarrollo, a su vez, casi incontrolado de formas, difícilmente clasificables. Pareciendo como si los nuevos métodos numéricos de cálculo hubiesen ya sustituido de hecho a los tipos, pues es tal el aumento de los grados de libertad introducido por las computadoras que al creador le cuesta encontrar el camino por el que transitar más allá de lo puramente especulativo.

«Con el ordenador, cualquier forma se puede visualizar y corregir en muy poco tiempo y, sea cual sea la forma resultante, podrá ser calculada con un único programa de amplio espectro. Con estos nuevos grados de libertad, el diseñador se enfrenta a una especie de vacío que le produce perplejidad y genera una proliferación de formas, a veces disparatadas y estrambóticas. El problema es común a cualquier disciplina del diseño, y

se presenta tanto en arquitectura como en ingeniería. La pureza clásica de los tipos básicos se difumina, aparecen así soluciones híbridas o mestizas y se retoman viejos esquemas estructurales que fueron arrumbados por las insuperables dificultades de su dimensionamiento.» [10:332-333].

«¿Qué les ha pasado a los puentes en el último tercio del siglo XX y en estos primeros años del siglo XXI desde el punto de vista del ingeniero? Lo que les ha pasado es consecuencia del desarrollo de la tecnología que ellos mismos han ayudado a crear. Por primera vez en la historia de la humanidad, la tecnología para hacer puentes sobrepasa las exigencias que presentan no sólo los puentes normales sino casi todos los extraordinarios. Hemos desarrollado infinitas posibilidades como resultado de resolver los problemas meramente tecnológicos que se presentan durante este período.» [5:102].

Los siguientes párrafos constituyen un resumen acertado de la situación descrita remontada a sus orígenes. Pero, además, en ellos Javier Manterola Armisén sintetiza en un simple concepto la causa que él estima como origen del problema, y que no es otra que la necesidad.

«Como resultado de este proceder, la época de los siglos XIX y XX desarrolló y proyectó materiales de gran capacidad resistente –acero y hormigón– así como formas resistentes estrictas, eficaces, tecnológicamente muy perfectas, económicas y de gran facilidad constructiva. Pero esto ha tenido una consecuencia, no por lógica menos triste. La tecnología lleva siempre a un camino de optimización y, por tanto, a la creación de modelos o tipos de puentes muy definidos y acotados. Esta superdefinición es también su esclerotización. El puente se convierte en un cliché, en un punto más de un catálogo que señala, casi con toda seguridad, qué modelo de puente se debe usar para cada problema de cruce que se presente. Es la industrialización del puente, convertido en este caso en un objeto con sus prestaciones y su precio. Casi la mayoría de los puentes que cruzan nuestras carreteras pertenecen a este grupo de objetos de uso.» [5:103].

«Pero el hecho de que la tecnología haya podido producir tantas posibilidades ha llevado también a hacerse preguntas de otro tipo, menos claras, más confusas, donde se necesitan otros talentos. ¡Qué bueno era diseñar puentes cuando estaban todos constreñidos por la



necesidad, por una urgencia casi inapelable! Si se quería el cruce de un entorno complicado, o encontrabas la solución o te quedabas sin puente.» [5:103].

«Ahora, la ausencia de necesidad parece ser el resquicio por donde se cuelan los planteamientos estéticos. Y eso es verdad a medias. En la pintura, en la escultura, y también, aunque menos, en la arquitectura contemporánea, los caminos actuales son muy personales. No hay escuelas ni academias que marquen trayectorias por las que transitar, y la máxima libertad es también la máxima dificultad para hacer algo trascendente. En el diseño de puentes seguimos teniendo el cuerpo conceptual, científico y técnico, pero empezamos a sentir el efecto de la ausencia de necesidad. Es el momento de crear formas resistentes nuevas que amplíen las muy optimizadas formas heredadas» [5:103].

Después de estas palabras alentadoras que transmiten un mensaje de optimismo, pues no es más que cuestión de tiempo que la necesidad vuelva a aparecer, como demuestra siempre la historia. Se está en posición de poder afirmar que el conocimiento del tipo es la mejor forma de evitar el capricho formalista y de poder también valorar, a la postre, la verdadera talla intelectual del artífice o artífices de la obra, y saber así discernir quién hay detrás del trabajo presentado.

Todo esto sin tener en cuenta el enorme valor docente del tipo que conforma la comprensión casi instantánea de siglos de tradición y vicisitudes. Y que ha de propiciar un camino claro que permita orientar a los autores, a medida que éstos aprendan a gestionar los nuevos grados de libertad adquiridos. Por otra parte, tal y como ha ocurrido siempre en todas las etapas análogas del mundo del arte y del conocimiento.

## **8. REFERENCIAS**

### **8.1. BIBLIOGRAFÍA**

**[1] Filosofía de las estructuras**

Cardellach Alives, Felix, 1910

Barcelona: Editores Técnicos Asociados, S. A., 1970

- [2] **Razón y ser de los tipos estructurales**  
Torroja Miret, Eduardo, 1960  
Madrid: CSIC, 2004
- [3] **Tierra sobre el agua. Visión histórica universal de los puentes**  
Fernández Troyano, Leonardo, 1999  
Madrid: CICCPC, 2004
- [4] **La arquitectura del ingeniero**  
Fernández Casado, Carlos, 1975  
Madrid: CICCPC, 2005
- [5] **La obra de ingeniería como obra de arte**  
Manterola Armisén, Javier  
Pamplona: Editorial Laetoli, 2010
- [6] **El oficio del ingeniero**  
Manterola Armisén, Javier  
Madrid: Círculo de Bellas Artes, 2016
- [7] **La torre y el puente**  
Billington, David P., 1983  
Madrid: Cinter Divulgación Técnica, 2013
- [8] **Diseño y funcionalidad visual en la obra pública**  
Batlle Girona, Modest  
Madrid: CICCPC, 2005
- [9] **Teoría Estética**  
Adorno, Theodor W., 1970  
Madrid: Ediciones Akal, 2004
- [10] **Forma y tipo en el arte de construir puentes**  
Aguiló Alonso, Miguel  
Madrid: Abada Editores, S. L., 2010
- [11] **Pensar la ingeniería**  
Fernández Ordoñez, José Antonio  
Madrid: CICCPC, 2009
- [12] **Puentes**  
Manterola Armisén, Javier  
Madrid: ETSICCPM, 2003

- [13] **Caminos en el aire. Los puentes**  
Arenas de Pablo, Juan José  
Madrid: CICCOP, 2002
- [14] **Ponts Puentes**  
Leonhardt, Fritz, 1982  
Lausanne, Suisse: Presses polytechniques romandes, 1986
- [15] **Sobre la creatividad**  
Bohm, David, 1992  
Barcelona: Kairós, 2002
- [16] **Typology and design method**  
Colquhoun, Alan  
Arena, journal of architectural association, 1967
- [17] **American building art: the twentieth century**  
Condit, Carl W.  
Nueva York: Oxford University Press, 1961
- [18] **L'architecture et les ingénieurs, deux siècles de réalisation**  
Deswarte, Sylvie; Lemoine, Bertrand  
Paris: Le moniteur, 1997
- [19] **Evolution of engineering design technique**  
Duffy, M. C.  
Engineering designer, 1979
- [20] **Los gozoso las formas. Reflexiones sobre la estética de las formas estructurales**  
Elices Calafata, Manuel, 2004  
Madrid: Real academia de ciencias exactas, físicas y naturales, 2005
- [21] **The existential pleasures of engineering.**  
Florman, Samuel C.  
Londres: Barrie & Jenkins, 1976
- [22] **Historia de la arquitectura moderna**  
Frampton, Kenneth, 1980  
Barcelona: Gustavo Gili, 1993
- [23] **The aesthetic treatment ob bridge estructuras. Discussion**

- Husband, Joseph  
Institution of Civil Engineers, 1901
- [24] **Cognitive change in technology and science**  
Laudan, Rachel  
R. Laudan Ed., 1984
- [25] **Relación entre la estructura resistente y la forma. Notas en torno a la valoración estética de los puentes**  
Manterola Armisén, Javier  
Madrid: Real academia de bellas artes de San Fernando, 2006
- [26] **Écrits d'ingénieurs**  
Marrey, Bernard  
Paris: Editions du Linteau, 1997
- [27] **An engineer Imagine**  
Rice, Peter  
London: Ellipin, 1994
- [28] **Grandes voutes**  
Séjourné, Paul  
Bourges: Tardy-Pigelet, 1913
- [29] **What engineers know and how they now it**  
Vincenti, Walter G.  
Baltimore, Londres: The John Hopkins University Press, 1990
- [30] **Diccionari d'Enginyeria Civil**  
Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, Enciclopèdia Catalana SA, 2005

## 8.2. INTERNET

[W] *Wikipedia*  
<https://es.wikipedia.org>

*Instituto de la Ingeniería de España*  
<http://iies.es/>

*Asociación de Ingenieros de Caminos*  
<http://ingenieria-civil.org/>

Procedimiento Constructivo de Pilas en Puentes  
<https://www.youtube.com/watch?v=qo-Le6pMN7s>

*Buscador de Internet*  
<https://www.bing.com>

*Buscador de Internet*  
<https://www.google.es/>

*Bibliotècna. La biblioteca digital de la UPC*  
<http://bibliotecna.upc.edu>

*Unión Académica Internacional (UAI)*  
<http://www.uai-iaa.org/>

*Instituto de España*  
<http://www.mecd.es/insde/>

*Institut d'Estudis Catalans*  
<http://www.iec.cat>

*Institut de France*  
<http://www.institut-de-france.fr/>

*Diccionario de la Lengua Española (2014)*  
Asociación de Academias de la Lengua Española (ASALE). 23ª Edición. Madrid  
<http://dle.rae.es/?w=diccionario>

