

**Universidad de Costa Rica**

**San Pedro de Montes de Oca**

**Facultad de Ingeniería**

**Escuela de Ingeniería Civil**

# **“EL ARTE DEL DISEÑO ESTRUCTURAL”**

**Informe de Trabajo de Graduación  
para obtener el grado de  
Licenciado en Ingeniería Civil**

Preparado por:

Francisco José Álvarez Oquendo.

Agosto 2005



## **DEDICATORIA**

A Dios, Padre Creador de quien procede toda  
creatividad.

A mi mamá, Eleonor Álvarez Oquendo,  
Por el amor de siempre.

A mi hermana Muriel y a mis hermanos Manfred,  
Mario y Luis.

## **COMITÉ ASESOR:**

Director del Proyecto:

-Ing. Jorge A. Gutiérrez Ph. D.  
(profesor de la Escuela de Ingeniería Civil)

Asesores:

-Ing. Francisco Azuola S.  
(profesor de la Escuela de Ingeniería Civil)

-Arq. Álvaro Sánchez  
(profesor de la Escuela de Artes Plásticas y de la Escuela de  
Arquitectura)

## **RECONOCIMIENTOS**

Agradezco al Comité Asesor: Dr. Jorge A. Gutiérrez, Ing. Francisco Azuola S., profesores de la Escuela de Ingeniería Civil y al Arq. Álvaro Sánchez, profesor de la Escuela de Artes Plásticas y de la Escuela de Arquitectura; por lo poco común del tema, sin su ayuda no hubiese sido posible preparar este trabajo. Agradezco también al Prof. Ing. Álvaro Poveda Vargas M.Sc. por su valiosa colaboración.

Doy las gracias a los profesionales de ingeniería civil quienes muy amablemente aportaron sus experiencias en las entrevistas y me ayudaron con el material: al Ing. Carlos Fernández y al Ing. Luis Jiménez Soto de la Empresa Holcim (Costa Rica) S.A, al Ing. Juan Carlos Ortiz de estructuras metálicas Metálica Proyectos en Acero, al Ing. Ronald Steinvorth Sauter del Grupo IECA S.A. Ingenieros Estructurales Consultores Asociados, al Ing. Alfredo González Fonseca de la empresa Franz Sauter & Asociados S.A. Servicios Integrados en Ingeniería y Arquitectura, al Ing. Mario Loría del Dpto. de Diseño de Puentes del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT).

Un agradecimiento también al Sr. Gustavo Alfaro, administrador de Multiplaza de Escazú, al Ing. Marco Salazar, administrador de Multiplaza del Este, a la Sra. Ivonne Martínez del Comité Cantonal de Deportes de Cartago, al Sr. Diego Badilla asistente de la administración del Comité Cantonal de Deportes de Desamparados, al Arq. Luis Diego Barahona, editor de Líneas: Colección de Arquitectura Latinoamericana y a mi tío Jaime Álvarez Oquendo. Todos ellos me ayudaron a obtener las fotografías.

## ÍNDICE

	P.
<b>PRÓLOGO</b>	V

## CAPÍTULO I CONCEPTOS GENERALES

<b>1.1 <u>Ingeniería Estructural, Arte y Estética</u></b>	<b>1</b>
1.1.1 Ingeniería Estructural	1
1.1.2 Arte y Estética	1
<b>1.2 <u>Diseño Estructural</u></b>	
1.2.1 El diseño en general	2
1.2.2 El diseño estructural	2
1.2.3 Esquema Conceptual del Diseño Estructural	3
1.2.4 El proceso del diseño estructural.	13
<b>1.3 <u>Importancia del componente Artístico y Estético del Diseño Estructural</u></b>	<b>16</b>
1.3.1 Necesidades académicas.	17
1.3.2 Compromiso con la sociedad.	22
1.3.3 Competencia de la estética en ingeniería civil.	24
1.3.4 Competencia de la estética y relación arquitectura-ingeniería.	25
1.3.5 El problema de los costos.	28
1.3.6 Algunas recomendaciones para tratar el problema estético.	32
<b>1.4 <u>El estudio del componente Artístico y Estético del Diseño Estructural</u></b>	<b>33</b>
1.4.1 Principios del Diseño y la Composición Artística.	37
1.4.2 El estudio de la historia del arte estructural.	39
1.4.3 Aparente disconformidad entre principios de arte y arte estructural.	42

## CAPÍTULO II

### CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ARTE ESTRUCTURAL

	P.
<b>2.1. <u>El Arte Estructural</u></b>	<b>1</b>
2.1.1. ¿Qué es el Arte Estructural?	1
2.1.2. <i>Expresión y Simbolismo</i> en el Arte Estructural	4
2.1.3. El Arte Estructural y su componente Lúdico – Utilitario	5
2.1.4. Ingeniería Estructural y Ciencia	7
<b>2.2. <u>El Arte Estructural y su independencia de la Arquitectura</u></b>	<b>8</b>
2.2.1. Escala y Función	9
2.2.2. Dimensiones de la estructura	11
2.2.3. La forma estructural y la colaboración.	13
<b>2.3. <u>Características del Arte Estructural</u></b>	<b>14</b>
2.3.1. Eficiencia.	17
“La función sigue a la forma.”	18
Simplificación del análisis estructural y pruebas experimentales.	19
2.3.2. Economía	21
El principio del costo mínimo.	22
Límites de la estructura y la creatividad.	24
Economía de los concursos.	25
2.3.3. Estética	25
Adornos.	27
La personalidad individual del diseñador.	28
2.3.4. Importancia de la construcción.	29
2.3.5. Juego y disfrute.	30
<b>2.4. <u>Sinopsis de la Historia del Arte Estructural</u></b>	<b>31</b>
Thomas Telford	33
Las formas ferroviarias: Isambard Kingdom Brunel y Robert Stephenson.	37
Gustave Eiffel	40
John Augustus Roebling	44
La primera Escuela de Chicago: William Le Baron Jenney y John Wellborn Root.	48

<b>Puentes de acero: James Buchanan Eads y Gustav Lindenthal.</b>	<b>53</b>
<b>Concreto reforzado: Robert Maillart.</b>	<b>56</b>
<b>Bóvedas de concreto: Pier Luigi Nervi, Antonio Gaudí,         Eduardo Torroja, Félix Candela.</b>	<b>64</b>
<b>Segunda escuela de Chicago: Fazlur Khan.</b>	<b>70</b>
<b>4.3. <u>Santiago Calatrava Valls.</u></b>	<b>73</b>
<b>4.3.1 Datos biográficos.</b>	<b>73</b>
<b>4.3.2 El movimiento.</b>	<b>74</b>
<b>4.3.3 Síntesis y optimización.</b>	<b>76</b>
<b>4.3.4. Estrategias de diseño.</b>	<b>77</b>
<b>4.3.5. Generación de la forma.</b>	<b>79</b>
<b>4.3.6. Inspiración y estudios plásticos.</b>	<b>81</b>

## CAPÍTULO III

### DISEÑO Y COMPOSICIÓN ARTÍSTICA

	<b>p.</b>
<b><u>3.1. Introducción</u></b>	<b>1</b>
<b><u>3.2. ¿Qué es composición?</u></b>	<b>4</b>
<b>3.2.1 El campo visual.</b>	<b>5</b>
<b>Elementos del campo visual.</b>	<b>6</b>
<b>Textura, colores, sombras</b>	<b>10</b>
<b>3.2.2 El principio fundamental de la composición: Unidad-Variedad.</b>	<b>11</b>
<b>3.2.3 Proporción espacial</b>	<b>14</b>
<b>3.2.4 Equilibrio.</b>	<b>16</b>
<b>Equilibrio simétrico:</b>	<b>16</b>
<b>Equilibrio asimétrico:</b>	<b>18</b>
<b>3.2.5 Esquemas compositivos.</b>	<b>20</b>
<b>3.2.6 Contraste.</b>	<b>21</b>
<b>3.2.7 Ritmo.</b>	<b>23</b>
<b>3.2.8. Centro de interés.</b>	<b>24</b>
<b>3.2.9. Recorrido visual.</b>	<b>25</b>
<b>3.2.10. Expresividad.</b>	<b>26</b>
<b>3.2.11. Originalidad compositiva.</b>	<b>29</b>
<b>3.2.12. El color</b>	<b>29</b>
<b>Modelo RGB</b>	<b>31</b>

Modelo CMYK	33
Modelo HSL	37
Armonización de colores	40
Psicología del color	44
Recomendaciones para el diseño con color	44
<b>3.3 <u>Utilización de los principios compositivos de arte en el diseño estructural</u></b>	<b>47</b>
3.3.1. Utilidad del Esquema Conceptual del Diseño Estructural	47
3.3.2. Variedad en la génesis de la forma estructural.	48
3.3.3. Utilidad de los principios compositivos artísticos en el diseño estructural.	50
3.3.4. Ejemplo de aplicación de los principios de composición.	51

## CAPÍTULO IV

### LA ESTÉTICA EN ALGUNOS INGENIEROS ESTRUCTURALES COSTARRICENSES

	P.
4.1. <u>Introducción.</u>	1
4.2. <u>Ing. Franz Sauter Fabian.</u>	2
4.3. <u>Ing. Juan Carlos Ortiz.</u>	17
4.4. <u>Ing. Carlos Fernández.</u>	24

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIÓN

	P.
5.1. <u>Conclusiones</u>	1
5.2. <u>Recomendación</u>	3

## REFERENCIAS

## LISTA DE ILUSTRACIONES

## PRÓLOGO

Hay una necesidad de incluir en el plan de estudios de la carrera de Ingeniería Civil el componente artístico y estético del diseño estructural; no se le brinda mucha importancia al diseño estético de las obras de ingeniería. Por lo tanto, se pretende con este proyecto establecer las características del arte estructural y relacionarlo con los conocimientos básicos de diseño artístico para orientar al diseñador estructural en la creación de obras civiles que sean agradables al público.

En este trabajo se propone el estudio del componente estético del diseño estructural mediante dos frentes principales: a través del estudio de la historia del arte estructural y por medio de la aplicación de los principios de composición y diseño de artes plásticas.

Con este trabajo espera establecer lineamientos que ayuden al ingeniero estructural a mejorar la calidad estética de sus obras. Puede servir de base para mejorar su capacidad creativa y tener una nueva perspectiva de su labor.

Asimismo, la sociedad se podrá beneficiar con obras de ingeniería, no solamente funcionales, seguras y económicas, sino que también, agradables al gusto.

## CAPÍTULO I

# CONCEPTOS GENERALES



## CAPÍTULO I

### CONCEPTOS GENERALES

#### 1.1. Ingeniería Estructural, Arte y Estética

##### 1.1.1. Ingeniería Estructural

El profesor Alberto Sarria Molina expresa que la ingeniería civil es la madre de las ingenierías, por ser la más antigua y porque de ella nacieron la mayoría de las ingenierías actuales; con respecto a la ingeniería estructural señala:

*“El término ingeniería estructural se aplica a una especialidad de la ingeniería civil que permite el planeamiento y diseño de las partes que forman el esqueleto resistente de las edificaciones más tradicionales, tales como edificios urbanos, construcciones industriales, puentes, estructuras de los desarrollos hidráulicos y otras.”<sup>(25)</sup>*

Con esta definición se percibe que la ingeniería estructural principalmente está asociada a aquella parte que debe soportar la obra y sus solicitaciones.

##### 1.1.2. Arte y Estética

De acuerdo con Herbert Read, el arte se define, de la manera más corriente y sencilla, como “*el intento de crear formas agradables*”<sup>(24)</sup>. Tales formas satisfacen nuestro sentido de la belleza y este hecho se produce cuando podemos apreciar una unidad o armonía de relaciones formales entre las percepciones que nos transmiten nuestros sentidos.

Es importante hacer hincapié en que existe distinción entre arte y belleza. Hay una falta de rigor en el empleo de estos términos. Se hace una identificación entre ambos, cuando podemos encontrar manifestaciones de arte carentes de belleza, el arte no es obligatoriamente belleza. La belleza se define de manera simple y general, cuando se dice que *es aquello que proporciona una sensación placentera*.

La estética, o *ciencia de la percepción*, se refiere a una primera etapa de simple percepción de las cualidades sensibles; seguida de la disposición de tales percepciones, en formas y pautas agradables; el arte puede abarcar más allá de estos dos valores de tipo emocional.

## **1.2. Diseño Estructural**

### **1.2.1. El diseño en general**

Primero se explicará del concepto de diseño en forma general; para esto se puede citar al profesor de Diseño Robert Gillam Scott quien define que diseño es “*toda acción creadora que cumple su finalidad*”<sup>(27)</sup>. Se distingue el acto creador cuando se produce algo nuevo y hacemos algo porque lo necesitamos. Para crear algo que responda a nuestras necesidades y deseos utilizamos nuestra imaginación, conocimiento y habilidad. Es necesario aclarar que la definición de diseño lleva en forma inherente que debe haber una etapa conceptual previa.

### **1.2.2. El diseño estructural**

Ahora bien, el profesor Roberto Meli señala que:

*“El diseño estructural abarca las diversas actividades que desarrolla el proyectista para determinar la forma, dimensiones y características detalladas de una estructura” (20).*

Y define esta última como:

*“aquella parte de una construcción que tiene como función absorber las solicitaciones que se presentan durante las distintas etapas de su existencia” (20).*

Se puede apreciar que el diseño estructural, como todo diseño es un proceso; sin embargo, tiene características propias, como se podrá advertir en la siguiente sección.

### 1.2.3. Esquema Conceptual del Diseño Estructural

El profesor Jorge Gutiérrez (Ref.13) plantea un esquema conceptual acerca del diseño estructural. Esto lo consigue después de visitar y estudiar gran cantidad de estructuras, edificadas bajo diferentes escenarios; a continuación, un resumen de este esquema:

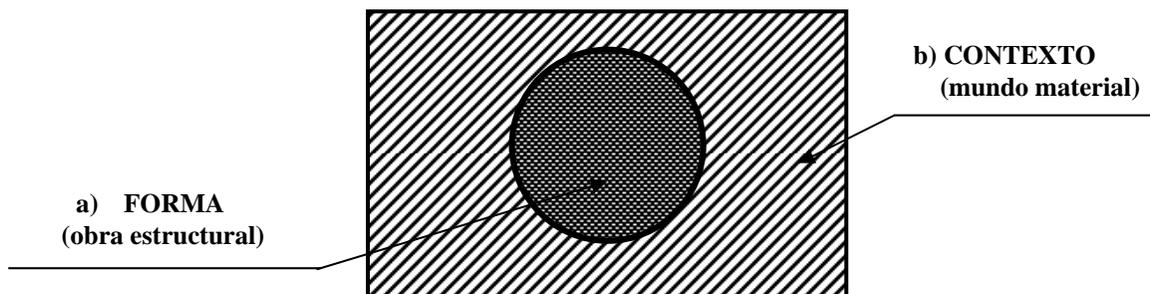


Fig. 1.1: Esquema del conjunto Forma-Contexto (Según Gutiérrez, Ref.13).

Básicamente, una solución estructural es adecuada cuando logra correspondencia entre dos entidades fundamentales: la **forma** y su **contexto**. Esta idea preliminar la plantea Christopher Alexander (Ref.1). El **contexto** define el problema, es esa parte del mundo material que pone demandas sobre la forma; mientras que la **forma** es la solución al problema, es una parte del mundo en la cual se tiene control. Ambos actúan como un conjunto, es decir, la forma no está aislada (Ver Fig. 1.1).

a) La **forma**:

La **forma** está compuesta de **intención** y **materialidad**. La creación de la forma constituye una síntesis de estos dos conceptos. La **intención** representa las condiciones ideales que conciente o inconscientemente deben ser satisfechas por la forma creada; mientras que la **materialidad** representa los recursos materiales disponibles para ese propósito.

**Intención:**

Tomando como base al autor clásico Vitruvio (Ref.33), el profesor Gutiérrez propone que la **intención** está compuesta de **deleite, firmeza, servicio**; y para completar agrega **economía**:

Con respecto al **deleite** o belleza, cada diseño estructural debería explícitamente considerar la estética como un componente fundamental. Es práctica usual que erróneamente se les deje a arquitectos y estetas esta parte del diseño estructural. En la siguiente sección 1.3.4 se brindarán los argumentos por los cuales se considera esta práctica como errónea.

La **firmeza** puede ser definida como la capacidad de la estructura de resistir su propio peso y otras cargas y acciones producidas por su uso y existencia. La **firmeza** se compone de **resistencia, rigidez y estabilidad**:

**Resistencia:** es la capacidad de soportar las cargas específicas y otras acciones definidas por el contexto mientras mantiene las fuerzas internas de sus componentes estructurales bajo límites prescritos.

**Rigidez:** es la capacidad de mantener los desplazamientos y deformaciones internas bajo límites tolerables mientras se resisten las cargas específicas y acciones.

**Estabilidad:** es la capacidad de la estructura de retornar a su posición de equilibrio original después de la aplicación de pequeñas perturbaciones y de resistir las cargas externas sin pandeo local o global.

El **servicio** envuelve dos aspectos importantes: forma funcional y armonía con el contexto (medio ambiente). La funcionalidad es conocida también como causa primera del diseño (Ref.27) debido a que se debe cumplir siempre; es la razón de ser de la obra, tal y como lo expresó el Ing. Eduardo Torroja, citado por el profesor Meli: “las obras no se construyen para que resistan. Se construyen para alguna otra finalidad o función que lleva...Su resistencia es una condición fundamental, pero no es la finalidad única, ni siquiera la finalidad primaria” <sup>(20)</sup>. Considerando la armonía con el contexto; este último es usualmente referido como el medio ambiente, los efectos de una estructura funcional no deben afectarlo más allá de límites tolerables que deben ser claramente definidos y cumplidos.

La **economía:** para consideraciones económicas los **costos** de al menos tres etapas deben ser evaluados: **construcción** (materiales, mano de obra y equipo), **operación** y **mantenimiento**.

Los cuatro componentes de la intención pueden ser representados como nodos de un tetraedro (Ver Fig. 1.2). Los lados iguales indican la equidad de la importancia de cada componente; por lo tanto, *no se debe despreciar ningún componente*.

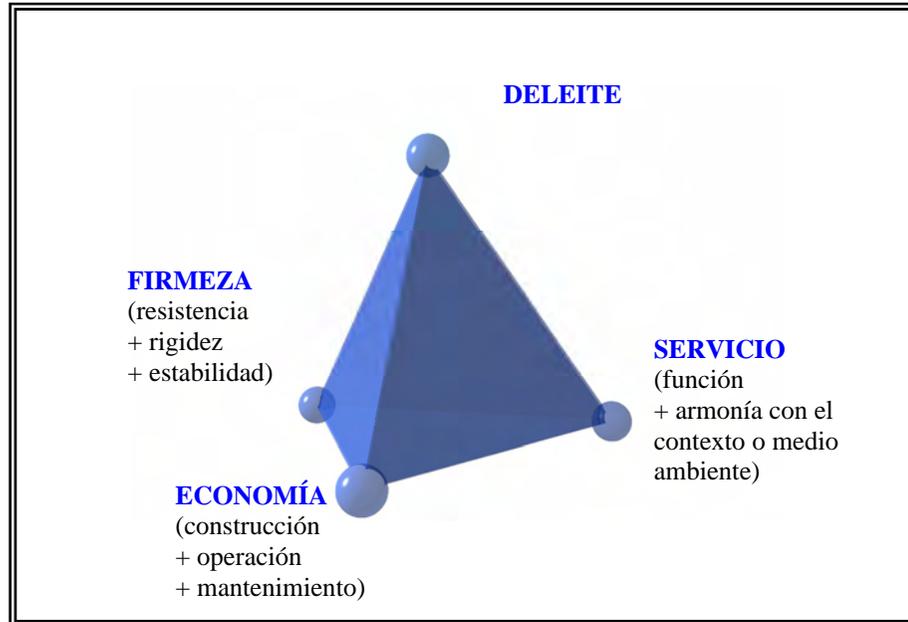


Fig. 1.2: Tetraedro que representa la Intención (Según Gutiérrez, Ref.13).

### La materialidad:

Se constituye también de cuatro componentes: **materiales, configuración, dimensionamiento y detallado y tecnología constructiva.**

Con respecto a los materiales, muchos de ellos han sido usados desde los albores de la sociedad: fibras vegetales, adobe, madera, piedra, ladrillo, concreto, acero, etc. Un apropiado conocimiento del comportamiento de los materiales, sus fortalezas y debilidades, sus aprovechamientos y tratamientos es esencial para consumir la **intención** de la **forma**.

La **configuración** está muy relacionada con los materiales. En algunas ocasiones la configuración la da el material.

El **dimensionamiento y detallado** de los elementos estructurales proveen la resistencia, rigidez y estabilidad requeridas en los componentes individuales y garantizar uniones efectivas entre ellos. La **tecnología constructiva** hace posible la construcción de la forma concebida.

Estos cuatro componentes de la materialidad también pueden ser representados como nodos de un tetraedro (Ver Fig. 3).

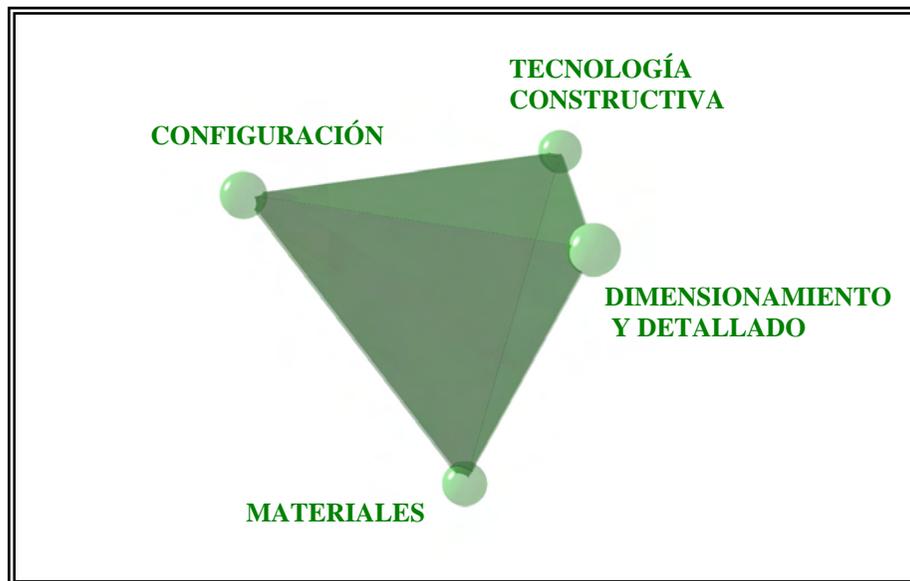


Fig. 1.3: Tetraedro de la Materialidad (Según Gutiérrez, Ref.13).

Como se mencionó, la **intención** y la **materialidad** de la forma constituyen un par dialéctico; es decir, representan un par de conceptos que se confrontan y se contraponen entre sí, en una especie de acuerdo en el desacuerdo. Una buena compatibilidad es deseada entre ellos. La intención corresponde a la tesis, mientras la materialidad corresponde a la antítesis. La síntesis sería el **diseño estructural**, un proceso creativo que demanda una solución satisfactoria para su interacción dinámica con la intención tirando hacia arriba y la materialidad resistiendo hacia abajo. La síntesis óptima puede ser representada por una estrella tridimensional con ocho nodos o “Stella Octangula” formada por los dos tetraedros originales interpenetrándose entre sí en forma simétrica

(Ver Fig. 4). Esta bella forma representa en forma conveniente el *proceso artístico* que concierne en la creación de formas estructurales adecuadas que llamaremos *diseño*.

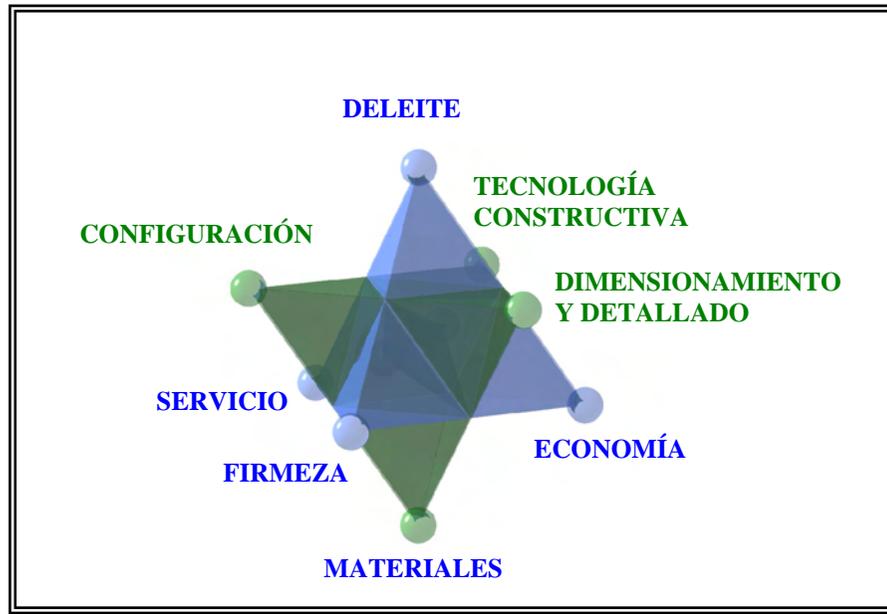


Fig. 1.4: Síntesis del diseño estructural- "Stella Octangula" (Según Gutiérrez, Ref.13).

b) El **contexto**:

Como fue explicado anteriormente, la **forma** y el **contexto** representan otra unidad dialéctica donde cada uno afecta el otro. En la teoría estructural los efectos del contexto sobre la forma son llamados *cargas* o, más genéricamente, *acciones*. Estas acciones deben ser definidas con cierto grado de precisión y seguridad. Para algunas de ellas, como las cargas gravitacionales debidas a los pesos propios de los materiales estructurales, esto es relativamente sencillo; pero puede llegar a ser muy difícil para efectos extremos eventuales como terremotos o huracanes severos, los cuales sólo pueden ser definidos en términos probabilísticos.

Asociado con la respuesta de las acciones sobre la estructura está el concepto de desempeño o suficiencia de la forma en su contexto específico. Este concepto es imposible de ser definido en términos positivos, pero puede ser definido en términos negativos especificando todo aquello

que constituya un desempeño o comportamiento inaceptable y definiendo límites de tolerancia específicos para cada posible variable. La estructura será considerada inapropiada o inadecuada si alguno de estos límites predefinidos son violentados. Resumiendo, se puede decir que es imposible llegar a enumerar todas las características que debe cumplir una obra para que se considere exitosa en correspondencia con su contexto; pero al menos se puede plantear el problema en negativo: ¿Qué no debe tener la obra para que su desempeño sea aceptable?, por ejemplo, no se debe deformar más allá de cierto valor permisible para ciertas condiciones de carga, etc. Este esquema que constituye un adecuado comportamiento para cada combinación particular o acciones es conocido como **diseño por estados límites**. Cuando los desempeños específicos esperados del comportamiento estructural son definidos por particulares niveles de cargas, este esquema es llamado **diseño basado en el desempeño**.

Debe ser enfatizado que el proceso total de creación de una **forma** estructural es dependiente del **contexto**; por lo tanto, la forma depende de la historia, cultura y geografía o, en síntesis, es temporal y espacialmente dependiente. De aquí que cuando se evalúa la correspondencia o adecuación de una solución particular, es esencial situar la evaluación en las particulares condiciones históricas, socioeconómicas y climáticas del contexto. Esto se representa en la Fig. 1.5.

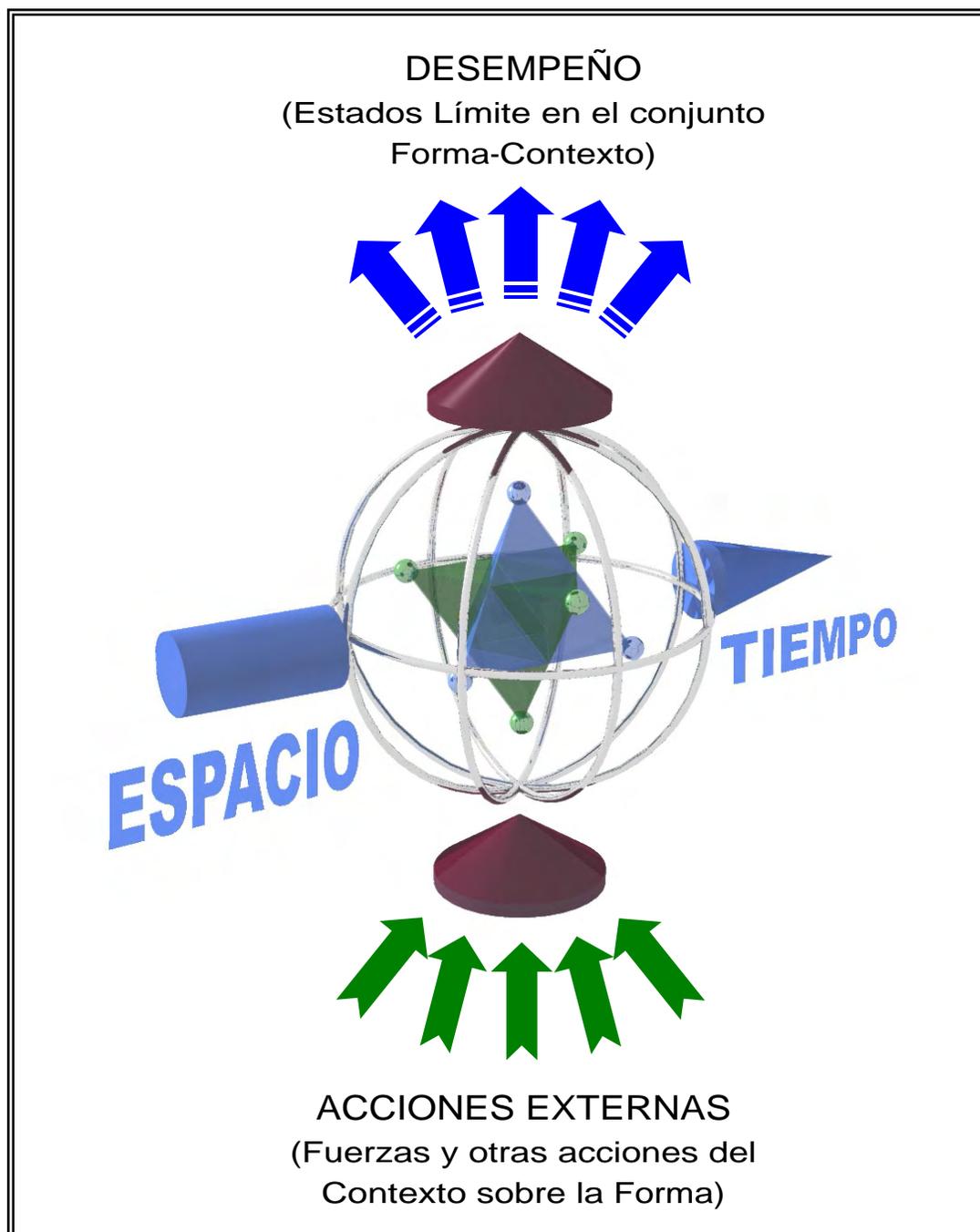


Fig. 1.5: Acciones derivadas del contexto y el adecuado comportamiento forma-contexto (Según Gutiérrez, Ref.13).

El esquema conceptual precedente resulta apropiado para mostrar las propiedades fundamentales que debe tener el diseño de una estructura de ingeniería civil para considerarla exitosa; muestra un modelo bastante fiel de las características del diseño y ayuda a explicarlo en una forma ordenada. El profesor Gutiérrez resalta que el esquema conceptual es esencial para cualquier intento de evaluación racional de la adecuación de formas estructurales. Agrega que sin esto, todos los estudios de aptitud estructural y constructiva terminan siendo un catálogo de detalles constructivos sin criterios de qué constituye soluciones adecuadas, sin mérito de divulgación y reproducción.

Es importante enfatizar aquí que el proceso de diseño de una obra de ingeniería estructural involucra necesariamente una serie de conocimientos muy diversos que se integran para encontrar una solución adecuada. Estos conocimientos son de naturaleza variada y son los que conllevan los *componentes* señalados con anterioridad: conocimientos acerca de las propiedades de los materiales, tecnología constructiva, configuración, dimensionamiento y detallado, economía, firmeza, funcionalidad, estética, acciones externas y desempeño. En resumen, debe quedar claro que el proceso de diseño estructural comprende una **síntesis de conocimientos heterogéneos**.

Por tanto, se puede interpretar que si se propone una solución a un problema estructural que sólo toma en cuenta algunos de los *componentes* del diseño o que conciente o inconcientemente no considera algunos otros en la medida correcta, consecuentemente esta solución no será la adecuada. Hay errores usuales en la práctica de la ingeniería civil que surgen por no tener en cuenta en grado suficiente algunos de los *componentes* indicados. Por ejemplo, se podría lograr que una estructura mal ideada cumpla con los requisitos de estabilidad, pero talvez sea una solución antieconómica o antifuncional. Podría suceder también que para el diseño de una estructura se proyecten características de gran belleza reconocida, pero que no pase de ser una idea imposible de construir o que amerite rediseños y aumento de los costos; etc.

Este esquema conceptual también nos ayuda a explicar la función del diseñador: el ingeniero civil o el equipo de diseño son profesionales que brindan un *servicio*, son *servidores*; su meta es

ofrecer una solución al cliente, el usuario, el ciudadano, el espectador, etc., que sea adecuada de acuerdo con la **totalidad de los componentes indicados**. Se puede poner un ejemplo extremo: un diseñador podría pensar y decir: “En el diseño, únicamente me voy a ocupar de la parte estética y de la funcionalidad de la obra; otros se ocuparán de construir con exactitud lo que yo dibuje en el papel, tal como lo imaginé”. Lo inconveniente de esta forma de pensar está en considerar que todo lo que se pueda imaginar es posible de construir. El principal reto a la creatividad en el diseño de estructuras está en “soñar con los pies en la tierra”. Es de notar la natural interrelación entre los *componentes* del diseño estructural: de **nada sirve** que un proyecto de diseño sea **funcional y bello si no se puede construir** (o si no es seguro, si es excesivamente caro, etc.). De aquí la necesidad de que el diseñador o el equipo diseñador tome en cuenta **todos los componentes del diseño** si se desea ofrecer un buen servicio.

Con esta perspectiva también se explica que no hay cabida para la búsqueda de *notoriedad* por parte del diseñador. La notoriedad es el hecho de ser reconocido y de hacer ruido en el mundo. El diseñador debe ofrecer un servicio que satisfaga las necesidades del cliente, público y/o usuario; por lo tanto, la finalidad del *componente* estético del diseño es la satisfacción plena del destinatario y no de la búsqueda de fama por parte del diseñador; ni siquiera la complacencia de los apetitos creativos y artísticos de quien diseña.

Se puede afirmar sin ningún temor, que a pesar de que un diseño o solución no sea del gusto estético de su diseñador, pero sí es del gusto del cliente que lo contrató o el público espectador o usuario; este diseñador podrá tener la satisfacción de que ha cumplido cabalmente con su labor a pesar de que la obra no sacie enteramente sus deseos artísticos personales. Lo importante es ofrecer al cliente una obra que le sea funcional, amigable con el entorno, agradable a su gusto, segura, económica, etc. (de acuerdo con el Esquema Conceptual del Diseño Estructural). En el caso de que suceda, la notoriedad será una añadidura, un producto secundario, una consecuencia y no una meta. El anterior es un caso extremo, pero también es evidente que pueden encontrarse obras que sean del agrado tanto del cliente como de su diseñador, sin embargo, lo importante es tener la conciencia de que la satisfacción del primero es lo principal.

El profesor Fritz Leonhardt comenta al respecto:

“Estética y ética están interrelacionadas, en tanto que entendemos por ética nuestra responsabilidad moral frente al ser humano y la naturaleza. Ética significa, también, humildad y modestia, virtudes de las que han carecido muchas veces los constructores de las últimas décadas. Con frecuencia ha condicionado el diseño un afán por lo llamativo, lo sensacional, lo gigantesco, consecuencia del deseo de impresionar, y de una exagerada ambición y vanidad. Así surgieron excesos superfluos, o modas, en los que se echaba de menos auténticas cualidades estéticas. La mayoría de las obras así creadas, carecían de las características esenciales necesarias para satisfacer a los usuarios de esas edificaciones”<sup>(18)</sup>.

Un cliente quedará insatisfecho con una obra que a pesar de ser bella y funcional llegue al colapso por negligencia en el diseño. Es entendible que este mismo cliente preferirá y recomendará un diseñador que además de preocuparse por darle una obra bella y funcional también le cuide su bolsillo, su integridad física, etc.

#### **1.2.4. El proceso del diseño estructural.**

En la Fig. 1.6 se ilustra mediante un esquema la secuencia del proceso de diseño sísmico. Este proceso está basado en los conceptos de Diseño basado en el desempeño de la Asociación de Ingeniería Estructural de California (SEAOC por sus siglas en inglés), Ref. 34; es la recomendación del Comité Visión 2000.

Se ha escogido esta clasificación del proceso de diseño con el fin de proporcionar un método que muestre cómo se inserta el diseño conceptual en el proceso de diseño.

Primeramente, se tiene una fase conceptual donde se seleccionan los objetivos de desempeño del diseño, se asegura que el sitio es adecuado, y entonces se procede al diseño conceptual, en el

cual se seleccionan los materiales y la configuración. Es aquí cuando se determinan las características estéticas de la obra. Si el resultado no es aceptable se repite el ciclo.

Seguidamente se prosigue con la fase numérica que consiste en realizar los cálculos necesarios para obtener un diseño preliminar y un diseño final.

Por último se tiene la fase de implementación, que consiste en revisión, seguridad y control por parte del constructor y operador de la obra.

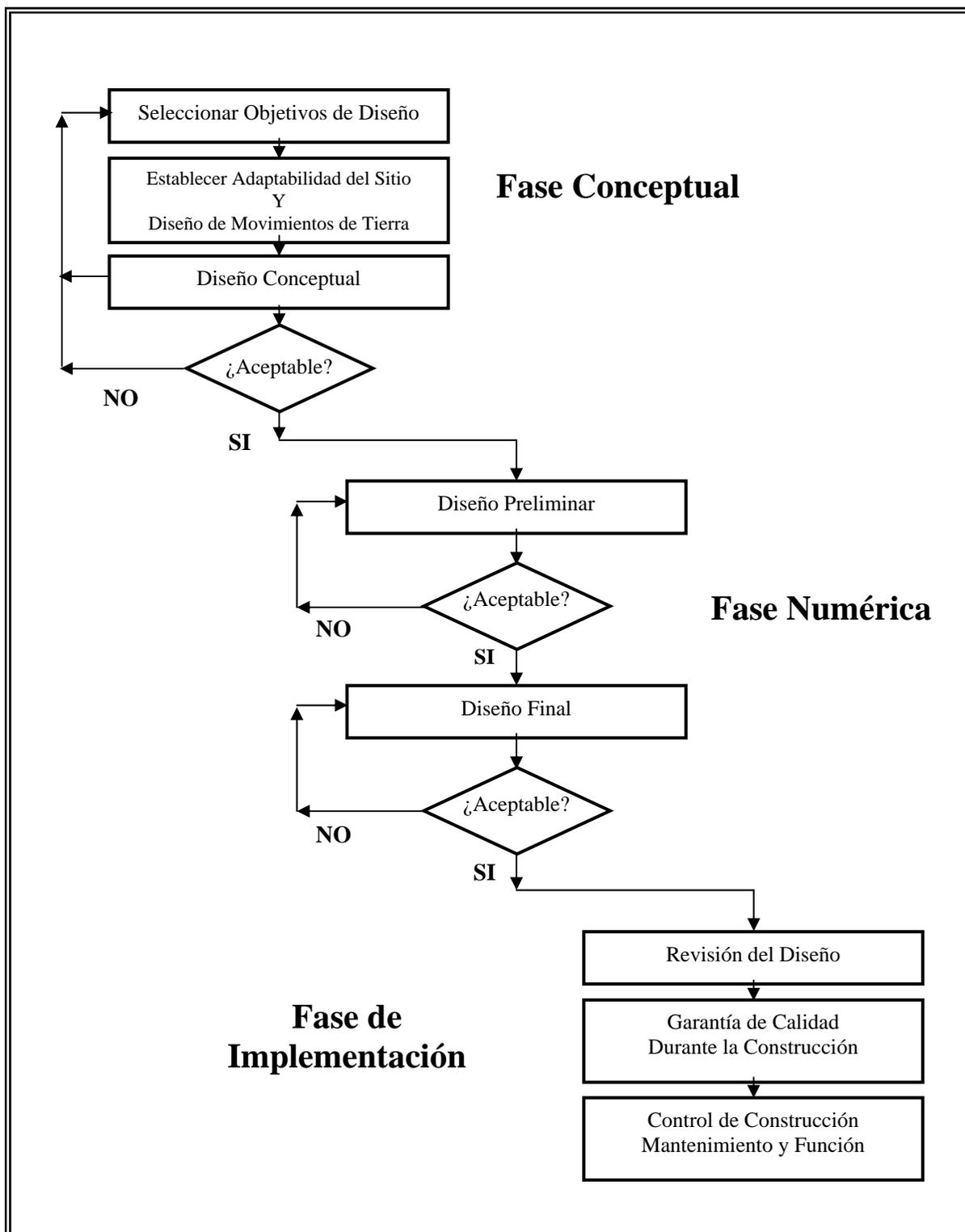


Fig. 1.6: Proceso de diseño sísmico basado en el desempeño (Visión 2000, 1995, Ref. 34).

### **1.3. Importancia del componente Artístico y Estético del Diseño Estructural**

Ahora bien, este trabajo se centraliza en el *componente deleite*, es decir, la parte estética del proceso de diseño de una obra de ingeniería estructural. En el esquema conceptual de la sección anterior se ha mencionado que la estética es otro componente fundamental del diseño estructural.

El ingeniero y arquitecto Frederick Gottemoeller subraya la importancia de la estética en el desempeño de puentes:

“Cuando uno observa los mejores puentes de los más exitosos, creativos ingenieros como Roebling, Eiffel o Maillart,...En sus puentes ellos han encontrado la disposición de los materiales con los que lograron nuevas posibilidades estructurales, alta calidad estética y menor costo, todo al mismo tiempo. La clave está en que ellos estuvieron dispuestos a considerar la calidad estética como un criterio con una categoría igual a todos los otros, y el conocimiento y la creatividad para enfrentarse con el desafío resultante...La raíz del desafío está en integrar el criterio estético dentro de la tarea del diseño estructural, tal que llega a ser un criterio en igualdad con la estabilidad, mantenimiento y costos cada vez que una decisión es hecha acerca de la parte visible del puente.”<sup>(15)</sup>

Sin embargo, esto contrasta en la realidad con la práctica de la ingeniería civil. La realidad nos muestra que mayormente los ingenieros civiles tienen poco conocimiento de arte y estética, a pesar de que este es un *componente* fundamental del proceso de diseño, como se ha reconocido aquí.

### 1.3.1. Necesidades académicas.

Cabe preguntarse aquí: ¿Por qué es usual para los ingenieros civiles carecer de conocimientos de arte y estética? Para responder esta pregunta es importante tomar en cuenta los siguientes puntos:

**Primero:** la mayoría de las instituciones de formación de profesionales de ingeniería civil no consideran en sus planes de estudios cursos de arte y estética aplicados a las obras de ingeniería; es decir, no hay cursos específicos para los estudiantes de ingeniería civil donde puedan aprender y valorar explícitamente del arte y la estética.

Frederick Gottemoeller reconoce esta falta de preparación:

“La universidad es el lugar natural para poner las fundaciones de las habilidades estéticas. Quizás la estética no parezca suficientemente seria cuando se compara al lado de la resistencia de materiales y las ecuaciones diferenciales parciales en competencia por un lugar en el currículum. Por otra parte, el público considera a los ingenieros responsables, y a la profesión, por las decisiones que hacemos que los afectan, todas las decisiones. Cuando se mide el número de la gente afectada, las decisiones estéticas pueden ser serias efectivamente. ¿Cómo podemos cumplir con esta responsabilidad, si no hemos tenido un comienzo en la universidad?”<sup>(15)</sup>.

Asimismo, el Ing. Oscar Faber está conciente de esta necesidad académica:

“Si ustedes aceptan las proposiciones que me he permitido señalarles, ustedes probablemente preguntarán que cómo es que en los planes de estudio de ninguna facultad de ingeniería –en cualquier grado, que no conozco ninguna– no hay atención dada a las consideraciones estéticas en el diseño. En efecto, pienso que aquellos quienes son responsables de elaborar los planes de estudio de algunas de nuestras escuelas técnicas no están libres de culpa por no darse cuenta de la importancia de esta materia y

de dar a los estudiantes alguna indicación, en cualquier grado, de que esta es una materia que les concernirá si ellos se dedican a este tipo de ingeniería, y por no proporcionarles alguna ayuda en la orientación de sus gustos y de sus métodos para entrar en contacto con el problema.

Cuando yo estaba en la universidad, por ejemplo, nosotros hacíamos muchos ejemplos diferentes de diseños de ingeniería, y entre otras cosas diseñábamos un puente. Ese diseño consistía en hacer dibujos de una viga armada las cuales tenían atiesadores con bellos remaches, y el diagrama de momentos de flexión por debajo mostrando la posición adecuada para colocar las placas, y algunos polígonos funiculares para llegar al diagrama de momentos de flexión. Cuando tuvimos hechos dibujos de este tipo y hubiésemos puesto todos los remaches y los hubiésemos sombreado agradablemente, estábamos completamente satisfechos que habíamos producido un perfecto diseño para un puente.

Esto ilustra la mentalidad en la cual nosotros nos educamos. No estoy diciendo ninguna cosa en contra de mi universidad, porque fue la mejor facultad de ingeniería que se disponía en aquel tiempo y todavía lo es y creo que las cosas eran enseñadas de la misma manera que hoy. Nadie sugirió que el diseño de un puente tendría algo que ver con algún sitio particular; que el puente tiene que armonizar con el lugar; que un dibujo de acuarela debió haberse hecho para presentar el sitio antes de que el puente estuviera y después, para mostrar si se le añaden o se le sustraen cosas agradables de la región; si otro tipo completamente diferente de puente se adaptaría mejor al sitio; o si un puente de arco o de suspensión sería la más agradable solución. Todo aquello no fue mencionado y que yo sepa no ha sido mencionado hoy.

Las escuelas de ingeniería todavía no indican a sus estudiantes que uno de los elementos esenciales en el diseño de una estructura es observar el sitio, considerar qué tipo de estructura demanda el lugar para armonizar con los alrededores, y para empezar desde ese objetivo y no desde otro. El trabajo del cual he estado hablando es que el diseño de

detalles debería ser el último, después de la decisión del tipo de estructura que se adapte al sitio. Es una desventaja muy seria para los estudiantes de ingeniería que ellos sean educados en una atmósfera en la cual no se les ha comunicado todavía que hay un problema estético que les concierne, y que no les sea dado la más ligera ayuda en su trato o en tener su gusto estético desarrollado. Espero que algo sea hecho para remediar lo que me parece es un asunto muy serio. En mi experiencia personal, no fue sino hasta algunos diez años después que de repente me di cuenta de que la mayoría de los diseños de ingeniería para estructuras importantes son principalmente seleccionados por sus méritos estéticos, y que por lo tanto pasar por un curso en el cual las consideraciones estéticas no son todavía mencionadas no es el camino correcto para formar a los ingenieros jóvenes.”<sup>(14)</sup>

A pesar de lo anterior, también hay que reconocer que sí existe conciencia de esta situación y se han hecho esfuerzos académicos importantes en algunas universidades. Por ejemplo, el profesor Jörg Schlaich (Ref. 28) manifiesta que en la Universidad de Stuttgart, Alemania, se han preocupado por la enseñanza del diseño conceptual: para concebir de una manera creativa estructuras que no sean solamente seguras y económicas pero también eficientes, bellas y en armonía con la naturaleza. El profesor David Billington (Ref. 3) describe los esfuerzos que se han hecho en la Universidad de Princeton, Nueva Jersey, EEUU, donde hay un curso altamente valorado por los estudiantes que se enfoca en la historia y la estética de las estructuras. Aquí en la Universidad de Costa Rica, el profesor Jorge Gutiérrez también se ha preocupado porque los estudiantes del curso de Diseño estructural (de pregrado) y de Diseño estructural avanzado (de postgrado), aprendan y tomen conciencia acerca del diseño conceptual y de la Historia del Arte Estructural.

**Segundo:** se ha dicho que el proceso de diseño estructural comprende una **síntesis de conocimientos heterogéneos**; de ellos se tiene que el tipo de conocimiento de arte y estética es de naturaleza muy diferente al tipo de conocimiento de las ciencias de la ingeniería. El

conocimiento artístico y estético tiene una mayor participación de la experiencia sensible, de la percepción a través de los cinco sentidos, es decir, es un *conocimiento de tipo empírico o sensible*; mientras que el de las ciencias de la ingeniería tienen una mayor participación del uso de la razón, es un *conocimiento de tipo racional o inteligible*.

Esto lo advierte muy claramente el Ing. Fritz Leonhardt:

“Los problemas de la estética no se pueden entender completamente con el razonamiento crítico, ya que se enraízan profundamente en los dominios de los sentidos, en los que la lógica y la razón se difuminan”<sup>(18)</sup>.

A través de la historia se ha distinguido principalmente entre Racionalismo y Empirismo, las cuales son doctrinas filosóficas opuestas de acuerdo con el origen del conocimiento. El filósofo español José Ferrater Mora escribe en su Diccionario de Filosofía, cuando se ocupa de las formas del conocimiento:

“Nos hemos referido antes a los llamados “conocimiento sensible” y “conocimiento inteligible” que corresponden *grosso modo* al conocimiento de las verdades de hecho [conseguidas por medio de la opinión] y al conocimiento de las verdades de razón [conseguidas por medio del saber riguroso] ...Se ha distinguido entre formas de conocimiento de acuerdo con los objetos que se trate conocer. De nuevo ha vuelto a hablarse en este respecto de conocimiento sensible, en cuanto conocimiento de cosas y objetos aprehensibles por los sentidos, como las cosas y objetos físicos (o macrofísicos), y de conocimiento inteligible, en cuanto de conocimiento de relaciones, objetos abstractos, etc.”<sup>(9)</sup>

El profesor Alexander Jiménez Matarrita cita que

“En la *Crítica del Juicio*, Kant distinguía entre la exposición de los pensamientos estéticos y la exposición de los pensamientos lógicos. Esas dos modalidades del

pensamiento correspondían, al *método*, o *modus logicus*, y a la *manera*, o *modus aestheticus*.”<sup>(16)</sup>

El filósofo argentino Luis Farré cuando se refiere a la definición etimológica de la palabra *estética*, nombra al filósofo alemán Alexander Baumgarten y su obra “Aesthetica” (1750-1758):

“Baumgarten,..., teniendo en cuenta que los sentidos juegan un papel importante en la percepción de lo bello, fue el primero en aplicar a esta disciplina el nombre de estética: “Estética, dice, (teoría de las artes liberales, gnoseología inferior, arte de pensar bellamente, arte de la razón analógica), es la ciencia del conocimiento sensitivo”. Procede del griego αἴσθησις, percepción por intermedio de los sentidos”<sup>(7)</sup>. (Nota: gnoseología es sinónimo de epistemología o teoría del conocimiento).

El profesor Alexander Jiménez Matarrita aclara que como disciplina filosófica, la estética además de tratar la parte de la percepción sensible, también trata de otros conceptos relacionados como la dimensión simbólica, la imaginación, las bellas artes, el gusto, la belleza, etc.

José Ferrater Mora dice que:

“Baumgarten divide la gnoseología, o doctrina del saber, en dos partes: la gnoseología inferior o estética —que se ocupa del saber sensible— y la gnoseología superior o lógica —que se ocupa del saber intelectual—”<sup>(9)</sup>.

A partir de lo mostrado en los puntos anteriores, se puede comprender que muchos estudiantes o profesionales de ingeniería civil tengan una actitud de falta de competencia o impotencia cuando se encuentren delante de la situación en la cual se les afirme que es fundamental incorporar el aspecto estético en el diseño de estructuras de ingeniería. Esto se debe a que, por

un lado **no han recibido una preparación académica para ello** y por otro, se trata de **un tipo de conocimiento muy diferente al que fueron capacitados y están acostumbrados**.

Esto lo confirma Frederick Gottemoeller cuando dice que:

“La mayoría de los puentes son construidos por ingenieros, y la mayoría de los ingenieros no están conformes con asuntos de apariencia; ellos no saben mucho acerca de estética; sus libros de normas y libros de investigación, no les dan pautas en esta área. Ellos no saben donde empezar”<sup>(15)</sup>.

En la sección 1.4. se abordará el problema del estudio del componente estético del diseño estructural.

### **1.3.2. Compromiso con la sociedad.**

El ingeniero estructural debe considerar el componente estético en sus diseños. La causa de esto es porque tiene la obligación de ofrecer un servicio de calidad a sus clientes y usuarios. Primero se debe reconocer que todas las estructuras y sus partes visibles tienen un efecto estético aunque no fuera considerado en el diseño. El Ing. Frederick Gottemoeller lo explica:

“El impacto estético es el efecto hecho sobre el observador por todos los aspectos de un puente, en su totalidad, y en sus partes individuales, tal como ha sido visto (y en algunos casos oído y sentido) por el observador cuando pasa por debajo o encima de la estructura o lo observa desde la distancia. En otras palabras, las personas reaccionan a lo que ellos ven, todo lo que ven y la secuencia en la cual lo han visto. Por lo tanto, se sigue que cada decisión hecha acerca de las partes visibles de una estructura tiene un impacto estético. No importa si quien toma la decisión lo considera o no como una decisión de impacto estético, la decisión tiene un impacto estético de todas maneras... En otras

palabras, un diseñador no puede evitar tomar decisiones que tienen impactos estéticos. Cada vez que localiza una pila o dimensiona una viga, él está tomando una decisión estética así como también una decisión estructural”<sup>(14)</sup>.

Por otra parte, se debe considerar que las estructuras se construyen para que sean perdurables; esto quiere decir que las obras se van a convertir en una parte importante del entorno y la sociedad demanda vivir en lugares agradables, tal y como lo manifiesta el Ing. Frederick Gottemoeller:

“Las personas desean estar orgullosas del lugar donde ellas viven, no solo de sus oficinas y casa, pero también de sus vecindarios y ciudades... Por la misma razón de que ellos tienen interés en la apariencia de sus propiedades individuales, la gente también tiene interés en la apariencia de sus propiedades colectivas. Los trabajos públicos son cosas que todos los ciudadanos logran juntos... Los puentes forman una importante parte de cualquier área del entorno público, y, desde que son vistos por mucha gente cada día, tienen un enorme impacto en las impresiones con respecto a esa área.”<sup>(15)</sup>

Cabe destacar que la belleza de sus edificaciones es indicación de una comunidad civilizada. El Ing. Oscar Faber lo expresa:

“...la belleza de un diseño y su concepción es una señal de civilización. Las estructuras ejercen una importante influencia sobre la humanidad, tendiendo hacia la nobleza y deleite si ellas son nobles y bellas y a la mediocridad y miseria si ellas son mediocres y desagradables. Algunas veces esto significa vivir en una noble ciudad, y una noble ciudad es a la vez el producto de mentalidades nobles y el entorno más apropiado a sus formaciones.”<sup>(14)</sup>

El profesor Fritz Leonhard coincide con esta idea y manifiesta que las propiedades estéticas de las construcciones influyen en el comportamiento ético de los ciudadanos, manifiesta:

“El bienestar humano, la alegría de vivir y la salud mental dependen fuertemente de las cualidades estéticas del entorno en que nos movemos...

Este sentido de la belleza en el subconsciente juega un papel particularmente importante en los habitantes ciudadanos. Su concepto básico del bienestar tiene que estar, sin duda, condicionado por las características estéticas de su entorno y esto conlleva consecuencias sociales... y acentúa nuestra obligación de cuidar la belleza del entorno...

Los pintores y escultores son libres para pintar y esculpir tan fea y rechazablemente como quieran; no tenemos porqué ver sus obras; pero el caso de las construcciones es completamente distinto, pues no son objetos privados, sino públicos. Por ello, el proyectista tiene una responsabilidad frente a su prójimo, y la obligación de construir con belleza...

Konrad Lorenz... dice que el sentido ético y estético están ligados manifiestamente, de tal forma que las cualidades estéticas del entorno tienen una influencia directa en el comportamiento ético del hombre...”<sup>(18)</sup>

### **1.3.3. Competencia de la estética en ingeniería civil.**

A pesar de la importancia del componente estético, debe reconocerse que hay obras de ingeniería que no van a estar expuestas y por lo tanto su apariencia no tiene sentido, dado que no van a ser percibidas. Por otra parte, es evidente que el componente estético sí es importante en aquellas obras de ingeniería visibles, como es el caso de la mayoría de las estructuras.

El Ing. Oscar Faber reconoce que:

“... el ingeniero civil puede encargarse de una gran variedad de funciones –líneas de ferrocarril, puertos, ingeniería eléctrica, calentamiento suplidoras de agua, aguas residuales- por mencionar unas pocas.

No pretendo que los ingenieros quienes están principalmente comprometidos con todas estas ramas estén todos igualmente preocupados por los asuntos estéticos. Yo no puedo honestamente decir que es esencial que el hombre quien dedica su vida, por ejemplo, diseñando drenajes y otras cosas las cuales van a estar permanentemente ocultas bajo tierra, debiera ser muy competente en hacer sus estructuras bellas; y se aplica también a muchas de las otras cosas que ciertamente hacen otros ingenieros. Todos los quehaceres del ingeniero son útiles e importantes; pero algunos de ellos conciernen con la producción de estructuras predominantes a la vista... digo que un conocimiento de las consideraciones estéticas y competencias que tratan con ellos son esenciales para el éxito de su trabajo.”<sup>(14)</sup>

### **1.3.4 Competencia de la estética y relación arquitectura-ingeniería.**

Una de las soluciones que se dan para enfrentar el problema estético, es mediante el trabajo conjunto con arquitectos. Esta práctica es bastante común y resulta muy valiosa especialmente para cierto tipo de proyectos, donde se tiene un enfoque de trabajo de muchos profesionales de distintas áreas actuando en equipo. Para esta forma de trabajar, es indispensable delimitar bien las funciones de cada integrante, especialmente, la de quien presida el equipo.

De acuerdo con el tipo de proyecto, la participación de un ingeniero estructural será mayor o menor para determinar la configuración de la obra. La estructura de ingeniería es sólo una parte de trabajos de arquitectura tales como una casa de habitación, una escuela, o un hospital, aunque esto de ninguna manera quiere decir que su responsabilidad desaparece; pero en torres, puentes, techos para grandes espacios, y muchos tipos de edificios industriales el ingeniero es el responsable de la configuración. Es precisamente para estos casos donde es ineludible la

competencia del componente estético para el ingeniero, no lo puede delegar a un arquitecto, ni siquiera puede “maquillar” la estructura con ornamentos. El Ing. Oscar Faber explica la razón:

“Una bella estructura no significa una estructura ordinaria (sea cual sea) con ornamentos superficiales adicionados a ella. No se debería decir que usted diseñará su estructura y entonces se la entregará a alguien más para que le adicione apariencias arquitectónicas; o le aplicará los convenientes ornamentos los cuales la convertirán de una estructura sin atractivo hacia una estructura bella. La belleza de una estructura surge desde sus líneas esenciales, su aptitud, su armonía y así sucesivamente, la cual no puede ser superimpuesta, pero puede estar o no estar en la concepción original. Si la concepción original es la de una estructura bella no podrá modificarla ni deseará hacerlo; y por otro lado, si la concepción original de la estructura no es bella, tampoco podrá modificarla. Usted no puede tomar una concepción errónea y, por medio de la manipulación de alguien más que la arregle, convertirla de una cosa fea en una cosa bella.

A partir de esto resulta claro que *el tratamiento del aspecto estético no puede ser delegado sin también tener que delegar el diseño básico íntegro*. Este es un punto tan importante y tan fundamental que es imposible sobre-enfatizar en él. No es posible que un ingeniero diga “Yo diseñaré esto y entonces se la entregaré a alguien más para que la haga bella,” porque si la concepción esencial no contiene esa belleza, nada que alguien más pueda añadirle puede dársela. Si el ingeniero no está interesado en la parte estética, el ingeniero no puede ser el autor del diseño básico.”<sup>(14)</sup>

También al respecto, el Ing. Frederick Gottemoeller reconoce esta situación para el caso del diseño de puentes:

“Es la estructura por ella misma, sus tramos (luces), proporciones y elementos principales quienes tienen el más importante papel en crear su efecto. Ningún ingeniero va a delegar su autoridad sobre estos principales elementos. En organizaciones exitosas

que tienen una tradición de colaboración exitosa hay una auténtica concesión mutua entre arquitectos e ingenieros. Los ingenieros han estado de acuerdo en aceptar asesoramiento de los arquitectos. Pero las decisiones finales de la capacidad estructural y las principales dimensiones quedan en manos de los ingenieros.

En organizaciones menos exitosas, la colaboración usualmente significa que los aspectos “estructurales” de una estructura son reservados únicamente para los ingenieros, dejando los tratamientos superficiales y detalles de barandas a los arquitectos. Pero, es en estos aspectos estructurales donde está la mayor importancia en crear su impacto estético. Así, los ingenieros no pueden escapar de su responsabilidad por el impacto estético de las estructuras. Por consiguiente, ellos deben desarrollar sus habilidades para encargarse de ello”<sup>(15)</sup>.

Frederick Gottemoeller cita a Sinclair Gouldie:

“En esencia, tenemos derecho a esperar de un puente alguna evidencia de que el ingeniero ha ' puesto algo de sí mismo en él ', no en el sentido de que ha adicionado un poco de toques cosméticos someros por la vía de una envoltura caprichosa para un paquete utilitario, pero en el sentido de que él ha permitido a su imaginación ser disparada para la esencial tarea estructural por sí misma y ha tenido éxito en pasar algunos de estos disparos al observador a través del apropiado y elocuente uso del lenguaje propio de su arte.”<sup>(15)</sup>

Por consiguiente, se hace evidente el deber y la necesidad de adquirir conocimientos de arte y estética por parte del ingeniero estructural en su ámbito. Así lo reconoce el Prof. David Billington:

“Es crucial para los ingenieros aprender de arte y estética así como para los arquitectos aprender de estructuras y construcción...., los más bellos trabajos de arte estructural son

principalmente aquellos creados por ingenieros entrenados en ingeniería y no en arquitectura.”<sup>(4)</sup>

El Ing. Frederick Gottemoeller dice:

“El diseñador controla la impresión estética y el público tiene derecho a hacerlo responsable por esta cualidad. Esto significa que los ingenieros individualmente y en grupo tienen que tomar la responsabilidad de la estética de los puentes...”

En nuestra sociedad los ingenieros tienen la responsabilidad profesional, legal y moral por los puentes. Las organizaciones que comisionan, financian puentes están usualmente buscando ingenieros. No es posible para ellos delegar la responsabilidad completa de un puente a un arquitecto.

La profesión tiene muchos ejemplos de ingenieros que han tomado este reto que han considerado la estética como una parte integral de sus responsabilidades para enfrentarse con las necesidades públicas. La lista comienza con Thomas Telford, quien prácticamente inventó la profesión de la ingeniería civil, junto con el primer uso sistemático del hierro en puentes, en la Inglaterra del siglo diecinueve. El siglo diecinueve nos trajo a John Roebling, Gustave Eiffel, y muchos otros en nuestro propio siglo (veinte) tenemos a Othman Amman, Robert Maillart y Christian Menn. Hay muchos otros todavía activos. Existen algunos destacados ejemplos en el programa del ACI: Arvid Grant, Jean Muller, T. Y. Lin y James Roberts...”<sup>(15)</sup>

### **1.3.5. El problema de los costos.**

Un problema que podría presentarse en el diseño estructural, es el temor de que la consideración del componente estético implique un aumento en los costos de la obra. De todas maneras, aunque este sea el caso, sería justificable; así lo reconoce el Ing. Fritz Leonhardt:

“Merece la pena gastar dinero para una mejor calidad estética. Merece la pena no solo por los favorables efectos sociales y sanitarios de la belleza, por el buen estado de nuestros conciudadanos, pero también por la reputación de nuestra profesión.”<sup>(18)</sup>

El Ing. Oscar Faber opina en forma semejante:

“... la mayoría de los problemas estructurales permiten muchos diseños alternativos y por consiguiente debe hacerse una elección. La resistencia y estabilidad deben ser satisfechas en todas ellas: ¿Qué se decide entonces? Aquí falta la cuestión del costo y la belleza. En una era incivilizada, y en ciertas transacciones comerciales, los costos son determinantes; pero con una estructura prominente en una posición importante el costo es rápidamente olvidado, donde la belleza o fealdad se mantiene por muchas generaciones. De aquí cada vez más la elección definitiva de las alternativas de diseño es la elección estética...”

...Se encontrará que en general donde tenemos un completo dominio de nuestros materiales y donde ese dominio excede las dificultades de un problema particular, como usualmente es, hay un casi innumerable número de diseños los cuales podrán satisfacer un problema dado. Si usted quiere construir un puente de 300 pies de luz (91,44 metros) puede construirlo, como regla, en acero, concreto, madera o algún otro material; puede diseñarlo como un puente en suspensión o como una viga de cuerda de arco o de otras formas; puede quizás variar el número y extensión de los claros; difícilmente hay un límite para el número de soluciones de que dispone para tal caso, donde la longitud de las luces están dentro del máximo posible para construir. Por consiguiente entre todos estos diversos diseños, todos los cuales podrían satisfacer el problema puramente funcional y de resistencia, debe hacerse una elección y en la mayoría de los casos será la elección estética. La resistencia y la estabilidad son necesarias para todos los diseños; el problema del costo debe recibir consideración pero no hasta el punto de excluir un bello diseño porque otro diseño es un 10 por ciento más barato; y finalmente, y en orden

creciente, la escogencia recaerá sobre la estructura que otorgue la mayor satisfacción estética.”<sup>(14)</sup>

También, algunos autores consideran que los costos no necesariamente tienen que aumentar. El Ing. Frederick Gottemoeller justifica esto de la siguiente manera:

“... si un diseñador escoge entre varias alternativas con igual costo efectivo porque se ve mejor, por definición no hay costo automático por la mejora estética que resulta...

...todas las partes visibles de un puente crean su impacto estético y hay muchas variaciones en su disposición que tienen un costo efectivo igual desde un punto de vista funcional. Una de estas variaciones será superior a todas las otras en su impacto estético. Pero si no hay diferencia de costo al elegirlo, entonces no hay un costo adicionado que penalice el hacer una mejor decisión estética.”<sup>(15)</sup>

Las características estéticas de una estructura se definen justamente durante la fase conceptual inicial del proceso de diseño; por consiguiente, vale la pena invertir dinero en estas primeras etapas. Si esto se hace, además de obtenerse una obra con mejor apariencia, se pueden mejorar otros *componentes* del diseño tales como construcción y configuración; y por lo tanto, a partir de un diseño mejor “pensado” disminuir los costos totales de la obra.

Frederick Gottemoeller explica:

“...he dicho anteriormente que los costos no son un necesario impedimento para la calidad estética. Esto es cierto para la estructura como un todo. Esto puede no ser cierto si uno observa los costos de diseño individualmente. Aplicar el tiempo y el ingenio necesario para hacer mejoras en la calidad estética (o seguridad o mantenimiento o cualquier cosa para el caso) cuesta dinero. De cualquier manera, la mayoría de las agencias públicas abordan el diseño sobre una base de menor costo, separado de la construcción. Esto significa que ellos usualmente logran estructuras que, para la mayor

parte, son un refrito de estructuras previas, incorporando un máximo número de detalles estandarizados, sin tener en cuenta las implicaciones estéticas para el problema entre manos. La solución es hacer de los criterios estéticos iguales a los otros criterios en el diseño y que concedan suficiente tiempo y dinero en el trabajo de diseño para el necesario desarrollo del diseño y que la creatividad sea aplicada. Uno de los resultados de aplicar este ingenio adicional bien puede ser una reducción de los costos de construcción y que el costo total sea menor.”<sup>(15)</sup>

El profesor David Billington concuerda con esta idea y además afirma que de no hacer esto sería más caro:

“Los costos del diseño están normalmente bien por debajo del 10 por ciento de los costos de construcción. Por lo tanto, un ingeniero brillante podría dedicarse más en un diseño en el cual, como sucede a menudo, hará que los costos totales sean substancialmente menores para los dueños. Por la misma razón, un ingeniero que recorta los recursos y honorarios de diseño para obtener un trabajo tendrá que hacer diseños más conservadores los cuales podrían fácilmente costar al cliente mucho más en sus costos totales. De aquí que grandes cantidades de ahorros potenciales al público son perdidos por la insensata política de ahorrar un poco durante las primeras etapas de un proyecto...

Roebing...trabajó con cuidado meticuloso y sus diseños incluyeron dibujos detallados de métodos de construcción. Eiffel tuvo alrededor de cinco mil dibujos hechos de todas las partes de la torre, y esta gran preconstrucción literalmente cara hizo posible la suavidad y extraordinariamente rápida secuencia de construcción...El uso de goznes por parte de Eiffel en el arco de Garabit, no solo simplificó las fuerzas sino que también simplificó la construcción, por permitir ajustes tales como que los arcos fueran suspendidos desde las orillas. El método de hilado de cables de Roebing hizo que sus puentes fueran a la vez mejor diseñados y más baratos de construir... La creatividad está por lo tanto relacionada con un costo total bajo de la obra.”<sup>(4)</sup>

### **1.3.6 Algunas recomendaciones para tratar el problema estético.**

En esta sección se citan algunas recomendaciones que brinda el Ing. y Arq. Frederick Gottemoeller con el fin de que las agencias de ingenieros tomen en cuenta el componente estético:

- “Los ingenieros pueden mejorar sus habilidades individuales en esta área por observación de los puentes y edificios existentes, por la comprensión de las áreas relacionadas de las tentativas estéticas, por la participación en debates y revisiones críticas acerca de puentes, y finalmente, sabiendo formar sus propios puntos de vista acerca de lo que se ve bien y de lo que no. Los ingenieros pueden mejorar las habilidades de la profesión por la incorporación de la estética estructural en las universidades, por dar la atención que merece en las sociedades de ingenieros, por la concesión de premios para los puentes sobresalientes, y lo más importante, por incluirla como una gran meta de las agencias constructoras de puentes que ellos administran.”
- “...Entre las barreras institucionales que deben ser revisadas están los procedimientos de revisión en sí mismos. La estética debería ser una parte igual de cada revisión, empezando con la primera descripción del alcance del trabajo. Las agencias deberían observar en sus revisiones internas procedimientos que aseguren que esto ocurra. La clave es la participación de individuos preparados, con el apoyo de las autoridades de la agencia.

Similarmente, la agencia debe estar preparada para articular sus políticas estéticas y las razones ocultas tras de ellas a los revisores externos, y estar preparados para defenderlos fuertemente cuando aparezcan las controversias... la controversia es una parte integral de nuestros procesos de obras públicas y las agencias deben planear defender sus

enfoques estéticos así como ellos defienden sus enfoques de seguridad, resistencia o cualquier otra materia.”<sup>(15)</sup>

#### **1.4. El estudio del componente Artístico y Estético del Diseño Estructural:**

El estudio de las características artísticas y estéticas del diseño de estructuras de ingeniería civil trae consecuencias importantes. La principal importancia radica en que con dicho estudio se obtendrá un conocimiento valioso que podrá ser aplicado en el proceso de diseño y cuyo fruto será la creación de obras de ingeniería más agradables al público espectador y los usuarios.

La primera cuestión que se debe resolver es si existe la posibilidad de realizar un estudio formal, riguroso, del componente artístico y estético del diseño estructural. Ciertamente, la respuesta es **negativa**; ya se ha mencionado (sección 1.3.1.) que el conocimiento artístico y estético tiene una mayor participación de la experiencia sensible, de la percepción a través de los sentidos, es decir, es un conocimiento fundamentalmente empírico o sensible; por lo tanto, no es posible estudiar el problema estético con todo el rigor racional o lógico. A pesar de este impedimento, podemos llegar a un estudio **no riguroso** del problema estético por medio de **“aproximaciones” racionales** cuando al reflexionar obtenemos juicios conscientes de las percepciones y sentimientos. El ingeniero Fritz Leonhardt explica:

“Los problemas de la estética no se pueden entender completamente con el razonamiento crítico, ya que se enraízan profundamente en los dominios de los sentidos, en los que la lógica y la razón se difuminan. No obstante, se debe intentar indagar en estas cuestiones tan importantes para el bienestar de la humanidad, de la forma más racional posible...”

El juicio de las cualidades estéticas depende ampliamente de sentimientos provocados por sensaciones sensoriales, y por ello no se puede medir la belleza de una manera racional... en el terreno de los sentimientos nos encontramos con el hecho de que a pesar

de toda la ciencia y la investigación, el ser humano sabe muy poco sobre sí mismo. Sin embargo, podemos acudir a observaciones y experiencias que nos son de utilidad.

Vemos, una y otra vez, que **la mayoría de los hombres están de acuerdo sobre la belleza de un paisaje, un cuadro famoso o una construcción... Podemos ser más o menos concientes de estos sentimientos...** La sensibilidad, la capacidad de sentir la belleza, difiere por naturaleza de un hombre a otro... Esta sensibilidad depende, además de las impresiones recibidas de nuestro entorno, de la experiencia, del influjo familiar, escolar y del círculo de nuestras amistades. Por ello el juicio de dos personas sobre las cualidades estéticas de un objeto resultará, por regla general diferente.

Un entorno bello despertará sin duda, en casi todo el mundo, un sentimiento de placer; uno feo y sucio produce malestar. Solo el grado de placer o malestar diferirá. En nuestra vida diaria esos sentimientos existen, con frecuencia, solo en el subconsciente, y sus causas solamente se perciben por una reflexión posterior.

Una definida capacidad de juicio hacia los valores estéticos no se forma hasta que estudiamos conscientemente el mensaje, y nos preguntamos si nos gusta o no una obra o espacio. A continuación debemos preguntarnos el por qué; por qué me gusta esto o por qué me disgusta. Solo después de un frecuente análisis, valoración y ponderación de los valores estéticos conscientemente percibidos, surge esa capacidad del juicio que, por lo común, llamamos gusto; gusto sobre el que deberíamos reflexionar para formarlo y definirlo...

El preguntarse “¿por qué?”, el analizar los valores estéticos, debe conducir... a resultados valiosos. Debemos intentar elevar lo sensitivo, lo afectivo, a la luz del conocimiento. Haciendo esto veremos que podemos encontrar respuestas a las preguntas “¿Por qué es bello?” “¿Por qué es feo?” Para las conocidas obras de arquitectura que son consideradas bellas con carácter general hay tales respuestas desde tiempos antiguos... En esas obras podemos encontrar distintivos de calidad, y con ello normas para el

diseño, como puedan ser ciertas proporciones, simetría, ritmo, repeticiones, contrastes... Dichas normas siguen siendo válidas hoy en día, y hay que actualizarlas... Hay muchos arquitectos e ingenieros que rechazan las normas, aunque en sus opiniones sobre construcciones encontramos referencias a la armonía, las proporciones, el ritmo, la dominancia, la función, etc.”<sup>(18)</sup>

El subrayado no es del texto citado, se ha hecho aquí para distinguir una serie de conceptos que forman parte de los Principios del Diseño y la Composición Artística: proporciones, simetría, ritmo, repeticiones, contrastes, armonía, dominancia, función, etc. Los Principios del Diseño y la Composición Artística son un conjunto de principios observados en el estudio, la práctica y la vivencia del arte a través de la historia de la humanidad.

Es necesario resaltar que estos Principios del Diseño y la Composición Artística y por lo tanto el estudio del problema estético, son **“aproximaciones” racionales**. Debe quedar claro que se habla de un intento de estudio racional de una materia que sabemos de antemano que es de naturaleza irracional. Por lo tanto, no es de extrañar que estos principios no sean absolutos, son solamente una “aproximación”, aunque de gran utilidad; pueden servir únicamente como una **guía** y no como un **precepto riguroso e inflexible**. En la mayoría de los textos de enseñanza del diseño de artes plásticas se hace referencia a que los principios citados no son tajantes, inclusive, la misma historia del arte presenta algunas obras maestras que llegan abiertamente a contradecir algunos de estos principios.

En relación con esta naturaleza irracional del problema estético, el profesor Fritz Leonhardt señala también que estas normas (principios) no bastan por sí solos; aunque sí son valiosos:

“No deberíamos creer, sin embargo, que la simple aplicación en el proyecto de las normas mencionadas conduce a la construcción de obras bellas. El proyectista deberá poseer, como siempre, imaginación, intuición y sentido de la forma y de la belleza, que para algunos son dones naturales, que, no obstante, deben ser educados y ejercitados. El hecho de proyectar se debe iniciar siempre en un espíritu de libertad individual, que, de

todos modos, se ve restringida por los muchos condicionamientos funcionales, por las limitaciones que impone la ubicación, y por las correspondientes ordenanzas, tan restrictivas frecuentemente. Sin embargo, las normas nos proporcionan un mejor punto de partida y ayudan a un examen autocrítico del proyecto... y nos permiten tomar conciencia de los errores de diseño”<sup>(18)</sup>.

Dada la naturaleza sensible del conocimiento artístico y estético; **éste se adquiere principalmente con la experiencia sensible**; es decir, con la práctica, con la percepción de los sentidos; aunque los principios del diseño y la composición dan una contribución racional valiosa en el proceso de diseño. Por ejemplo, para aprender cómo armonizar colores es útil entender conceptos como: tono, matiz, valor, colores complementarios, familias de color, luminosidad, etc.; pero el verdadero aprendizaje de la armonización de colores se da con la práctica, con experiencia de los sentidos, es decir, percibiendo directamente con los ojos cómo se ve un color colocado a la par de otro. Este punto es muy importante, porque en el Cap. 3 de este trabajo se enuncian los principios del diseño y la composición, y se muestran ejemplos de aplicación en ingeniería; pero **se advierte** que es necesario complementar con la práctica, con la experiencia de los sentidos; lo cual se hace en los talleres de las escuelas de arte y en la práctica profesional.

Si se tiene en cuenta esta naturaleza irracional del problema estético, se puede comprender cómo un artista virtuoso es capaz de concebir bellas obras sin aplicar conscientemente los principios del diseño y la composición artística (aunque los cumpla sin saberlo). Un virtuoso es aquella persona que tiene cualidades sobresalientes, generalmente innatas, para la ejecución de un arte. El profesor Fritz Leonhardt señala:

“Aquellos que están dotados para el arte pueden crear intuitivamente obras maestras por su belleza, incluso, manteniéndose fuera de las normas y sin recurrir a procesos racionales, pero los numerosos requerimientos funcionales de las actuales construcciones exigen la participación importante del pensamiento racional y riguroso”<sup>(18)</sup>.

Con base en lo anterior, se propone que el estudio del componente artístico y estético del diseño estructural puede ser abordado en dos direcciones:

- a) Por la aplicación de los Principios del Diseño y la Composición Artística al diseño de obras de ingeniería estructural. Estos principios son comunes y aplicables a todas las formas de arte visual: pintura, escultura, fotografía, decoración, arquitectura, etc. Este enfoque es deductivo porque a partir de principios generales se deducen características propias de una actividad específica: el diseño estructural.
- b) Por el análisis directo de las características generales de las obras de ingeniería estructural que ya han sido construidas y de sus autores. Estas obras pertenecen al bagaje cultural de la historia de las estructuras y están ahí, para ser analizadas.

#### **1.4.1. Principios del Diseño y la Composición Artística.**

Con respecto a los Principios del Diseño y la Composición Artística, hay autores que afirman (al igual que el profesor Leonhardt) que estos principios pueden ser efectivamente aplicados en el diseño de obras de ingeniería civil. Por ejemplo, el Ing. Oscar Faber de la Institución de Ingenieros Civiles de Londres obtuvo el reconocimiento “Baker Gold Medal” por un ensayo titulado: “The Aesthetics of Engineering Structures” (La estética de las estructuras de ingeniería) publicado en el boletín de la Institución en abril de 1941. El Dr. Faber manifiesta:

“En esta lectura estoy usando la palabra “estética” en su amplio sentido, así como para incluir todas las formas posibles de belleza, y voy a proponerle que... la belleza depende de un gran número de cualidades, de las cuales las siguientes son unas pocas:

Armonía; composición; carácter; interés; expresión de función; expresión de construcción; ritmo; color y textura de materiales.

Estas son sólo algunas de las consideraciones que determinan si una estructura será bella o no. Propongo tratar brevemente con unas cuantas de estas materias y entonces mostrar unas pocas ilustraciones, para ver si con ellas podemos aprender algunas lecciones que tengan cierta relación con las materias que hemos discutido...

La siguiente cosa de la cual debemos indudablemente dar alguna consideración es la composición. Esta materia es tan grande que no puedo tratar de ella en esta lectura y sólo puedo referirlos a los bien conocidos trabajos que tratan de ella competentemente.”

(14)

Se puede observar que el Dr. Faber afirma que la belleza de una estructura depende de un gran número de cualidades y menciona algunas: “Armonía; composición; carácter; interés; expresión de función; expresión de construcción; ritmo; color y textura de materiales”. Justamente estas cualidades corresponden a algunos de los Principios del Diseño y la Composición Artística muy conocidos en otras formas de arte más antiguas, pero aplicados en forma particular a las estructuras. También es importante notar la forma de dar a conocer estos principios: primero los expone o trata brevemente y luego muestra algunas ilustraciones de esquemas y de obras ya construidas que cumplen con los principios enunciados. Esta metodología se aplica en el capítulo 3.

El Ing. Charles Liebenberg al hablar del diseño estético de puentes, también se refiere a estos principios y coincide con el Ing. Faber:

“Los principios estéticos en el diseño de puentes no son propios de las estructuras de ingeniería; pero son parte de un conjunto de principios “universales” que son usualmente asociados con aquellas actividades creativas de la humanidad clasificadas bajo las artes y son apreciadas hasta el punto que ellas proveen disfrute y entusiasmo cuando son observadas o experimentadas...”

Los principios de composición que definen la belleza, como una aplicación a los puentes no pueden ser expresados en términos simples pero dependen de un gran número de cualidades, de las cuales las siguientes son unas pocas: Unidad, armonía y ritmo de composición, carácter, buena proporción, orden y balance, contraste de la forma y la masa, color y textura de materiales, apariencia de resistencia y estabilidad sin ser indebidamente macizo. Las reglas, por otro lado, definen métodos para alcanzar resultados que cumplen con los principios de composición arriba mencionados.

Mientras que es claro que estos principios son de una naturaleza general y serían de aplicación universal, las reglas son disposiciones específicas que no necesariamente cubrirían todo el espectro de creaciones satisfactorias estéticamente y pueden no ser consecuentemente el mejor método. Hay una considerable controversia acerca de la necesidad y el valor de las reglas.”<sup>(15)</sup>

Es oportuno y necesario resaltar la distinción que hace el Dr. Liebenberg entre **principios** y **reglas**. Los principios son de naturaleza universal, aplicables a todas las formas de arte visual; mientras que las reglas son de naturaleza particular, para una forma de arte específica. Entender esta diferencia es fundamental; porque este autor advierte que han surgido intentos por establecer convenciones y reglas para dominar el diseño estético de puentes; algunos han pretendido hacer manuales o especificaciones estéticas para estructuras, las cuales considera que pueden no ser de aplicación general. El Dr. Liebenberg afirma que la mayoría de los artistas y arquitectos de hoy parecen consentir que no hay **reglas** por las cuales uno pueda crear o medir la calidad del arte y la arquitectura.

#### **1.4.2. El estudio de la historia del arte estructural.**

Otra fuente para el estudio de la parte estética de las estructuras es mediante el análisis directo de las características generales de las obras de ingeniería estructural que ya han sido construidas

y de sus autores. Por características generales se entiende aquí todas aquellas que son comunes a las estructuras creadas en su totalidad y no solamente las características estéticas en forma aislada; es decir se indaga el proceso de diseño en forma integral.

El profesor David Billington (Ref. 4) de la universidad de Princeton, Nueva Jersey, EEUU ha sido un gran investigador de la historia de las estructuras. Se ha dedicado al estudio de las grandes obras y de sus autores; y manifiesta que hay una innumerable cantidad de edificaciones de ingeniería recientes que constituyen lo que llama una *nueva forma de arte*, el *arte estructural*, el cual es paralelo y totalmente independiente de la arquitectura. Esto tiene un gran impacto en la sociedad actual ya que se instituye *una nueva tradición: el arte en la ingeniería*. Por otra parte, también se evidencia la importancia del componente estético del diseño estructural.

A partir del estudio de esta nueva forma de arte se puede obtener información de características comunes y propias de estructuras estéticamente exitosas. El profesor Billington llegó a identificar con propiedad una serie de características distintivas del diseño del arte estructural. En el capítulo dos se tratarán estas características; por ahora se mencionan algunas de ellas en forma textual, esto con la finalidad de mostrar de que se trata de un arte que pertenece al ámbito de la ingeniería y que tiene características particulares que lo distinguen de otras formas de arte como la arquitectura, la escultura, etc.:

“He tratado de mostrar... que los mejores ingenieros siguieron ciertos principios generales de diseño para alcanzar bellos trabajos, y que estos principios generales fueron admitidos por sus específicas y personales visiones de una estructura.”

“Los elementos de esta nueva forma de arte fueron, entonces, eficiencia (materiales mínimos), economía (costo mínimo), y elegancia (máxima expresión estética).”

“Algunas veces los ingenieros han trabajado con arquitectos al igual que con ingenieros mecánicos y eléctricos, pero las formas han llegado de las ideas de la ingeniería

estructural... Los diseñadores estructurales dan la forma a objetos que tienen relativamente una gran escala y un uso único, y estos diseñadores ven a las formas como el medio de control de las fuerzas de la naturaleza para ser resistidas. Los diseñadores arquitectónicos, por otra parte, dan la forma a objetos que tienen relativamente una pequeña escala y de uso humano complejo, y estos diseñadores ven las formas como el medio de controlar los espacios para ser usados por las personas.”

“El primer principio del arte estructural es que la forma controla las fuerzas. En términos generales, esto significa que la función sigue a la forma y no a la inversa... Específicamente para la Torre Eiffel esto significa que las cargas de viento y peso dependen de la escogencia de la forma por parte del diseñador, y que hasta para la misma carga las fuerzas internas de la estructura dependen de esa forma...”

...Los ímpetus por las nuevas formas vienen de la necesidad de crear estructuras económicas, y este hecho empírico conduce al segundo principio del arte estructural: costo mínimo (economía) es una disciplina esencial para la creación del arte estructural. La economía estimula la creatividad...

...Estos dos principios de la forma y la economía van juntos con un tercero relacionado más directamente con la estética y el arte: que es la personalidad propia del ingeniero...”

“No hay arte estructural sin una expresión de delgadez o ligereza, pero este ideal no permanece solo: debe ser siempre balanceado con la seguridad, y estas dos tienen consecuencia para el costo y la apariencia. Eficiencia significa, para el arte estructural, el delicado balance entre ligereza y seguridad.”

“Así hemos encontrado tres pares de criterios para el arte estructural: ligereza y seguridad, integración y costo, y contraste y afinidad” <sup>(4)</sup>.

### 1.4.3. Aparente disconformidad entre principios de arte y arte estructural.

Debido precisamente a que el arte estructural tiene características propias que lo distinguen de otras formas de arte, surge la controversia acerca de la validez de los principios del diseño y la composición artística en su aplicación al diseño estructural. Porque por ejemplo, si un artista de cualquier forma de arte sabe de estos principios, entonces se concluye que podrá diseñar estéticamente un puente, edificio, etc. Tal conclusión sería incorrecta porque, como hemos visto, el diseño estructural es una síntesis de conocimientos con varios componentes además del componente de arte; y por lo tanto, se dice, que no es válido aplicar los principios artísticos en ingeniería.

El profesor Billington al referirse al ingeniero y artista estructural Thomas Telford manifiesta que la belleza de una estructura surge desde dentro de sí misma y no por la aplicación de viejas ideas externas como lo serían los principios de composición y arte:

“...él [Telford] fue el primer ingeniero civil que concientemente salió de los viejos cánones del estilo arquitectónico. Él no escribió acerca de las viejas ideas arquitectónicas de proporción, simetría y ritmo, más bien acerca de los nuevos problemas de construcción, peso y fundaciones. Estuvo pensando todo el tiempo acerca de la apariencia, el paisaje y la forma pero, para Telford, la posibilidad de belleza debe llegar internamente, sugerida por los límites técnicos y económicos, más bien que desde las imágenes y formulaciones refinadas acerca de siglos en la arquitectura de la mampostería.”<sup>(4)</sup>

“Para Telford, eran las leyes naturales y las necesidades de la sociedad las que daban estímulo a la forma, no en preconcebidas reglas estéticas.”<sup>(4)</sup>

Otro de los argumentos que se tienen para afirmar que no son aplicables los principios de diseño y composición artística tradicionales es que el arte estructural es una forma de arte nueva y

diferente que rompe con las viejas formas de arte como la arquitectura. El profesor Billington explica:

“Empezando con los puentes de hierro de Thomas Telford,..., las nuevas formas estructurales comenzaron a aparecer; estas requirieron especial estudio y entrenamiento, lo cual permitió la profesión de la ingeniería moderna... Como aquella otra forma de arte de la Revolución Industrial, la fotografía, el desarrollo de la nueva tecnología del hierro industrializado dio a luz un nuevo significado de la expresión artística... Pero la distinción entre las dos es... tan clara como la diferencia entre la fotografía y la pintura. En efecto, siendo formas de arte más tradicionales la pintura y la arquitectura, ambas sufrieron un especial trauma moderno debido a la supuesta competición de las nuevas artes de fotografía y estructuras.”<sup>(4)</sup>

Cuando se refiere a la aparición y uso de los nuevos materiales estructurales (metal industrializado y posteriormente concreto reforzado) el profesor Billington manifiesta:

“Las nuevas ideas estuvieron esencialmente en el orden de construir con los nuevos materiales. Pero como estas nuevas ideas rompieron tan radicalmente con el gusto tradicional, fueron rechazadas por la clase dirigente cultural. Este es, por supuesto, un problema clásico en la historia del arte: las nuevas formas a menudo ofenden a las académicas. En este caso fueron las bellas artes contra las artes estructurales. Los esqueletos de metal del siglo diecinueve ofendieron a la mayoría de los arquitectos y líderes culturales. Los nuevos edificios y puentes de las ciudades padecieron de atentados valerosos por cubrir o contorsionar sus estructuras para darles la apariencia de forma de piedra [el cual era el material usado tradicionalmente]. En el siglo veinte, el uso del concreto reforzado condujo a atentados similares.”<sup>(4)</sup>

Ahora bien, a pesar de las objeciones anteriores, es posible formular la siguiente pregunta: ¿Las características particulares y novedosas del arte estructural, necesariamente excluyen los

principios de diseño y composición artística tradicionales que se aplican en otras formas de arte?, o dicho de otro modo: ¿En una misma estructura será posible la coexistencia de características particulares de ingeniería y a la vez de características que cumplen los principios artísticos y estéticos generales?

No se pretende dar aquí una solución ecléctica, es decir, no se trata de conseguir la simple reconciliación de dos cosas que aparentemente son opuestas; no se pretende “tratar de quedar bien” con los viejos postulados y creencias de la arquitectura y el arte, y a la vez “tratar de quedar bien” con las características de una nueva forma de arte: el arte del diseño estructural, el cual es diferente de la arquitectura. *Lo que principalmente se busca es esclarecer el camino para abordar el estudio del problema estético del diseño de obras de ingeniería estructural.*

Para dar una respuesta afirmativa a la última pregunta es necesario recordar que los Principios de diseño y composición artística son de naturaleza **universal**, tal y como lo manifestó el Dr. Liebenberg, pero **se aplican en forma particular**, adaptándose a las características propias y evidentes de cada forma de arte. Por ejemplo, un pintor podrá hacer uso consciente o inconsciente de la composición para dar el encuadre adecuado a sus pinturas. Sin embargo esto es absolutamente innecesario en el caso de la escultura, donde ni siquiera hay un encuadre, una escultura no tiene por qué estar confinada en un recuadro. Por lo tanto se advierte que los principios compositivos son válidos, pero no se aplican de la misma manera en cada forma de arte, sino de acuerdo con las características particulares de cada una.

A partir de esto, se pueden explicar las aparentes disconformidades, que se mencionaron anteriormente, entre principios de arte y el arte estructural:

Si se torna al ejemplo de la supuesta competición entre la pintura y la fotografía; es claro que a pesar de que un pintor sepa de composición (aplicada a la pintura), no podrá crear obras de fotografía si ni siquiera sabe usar una cámara fotográfica, es decir si no conoce las características propias del arte de la fotografía. De la misma manera no basta que un arquitecto o escultor sepan de los principios compositivos de arte en tres o cuatro dimensiones; de nada le

sirve, si no tiene conocimientos acerca de los otros *componentes* del diseño estructural que se mencionaron antes (sección 1.2.3.): propiedades físicas y mecánicas de los materiales, tecnología constructiva, economía, determinación de principales acciones del contexto sobre la estructura, el desempeño de la misma ante esas acciones, etc. Por lo tanto, no será capaz de diseñar una estructura de ingeniería; no por causa de que los principios de diseño y composición artística tradicionales no sean válidos en el diseño estructural, sino más bien porque no conoce cómo se aplican esos principios ajustándose a las características propias del diseño estructural.

Se pueden citar un par de ejemplos clave de algunas estructuras estéticamente exitosas; donde se percibe que se cumplen los principios de diseño y composición de arte a pesar de que estos se tomen o no en cuenta en forma conciente en el diseño de la estructura: el profesor Billington comenta:

“En los principales estructuras...las formas finales, siendo obras humanas, contrastan claramente con el entorno natural. Cuando se construye dentro de una ciudad, el trabajo normalmente contrasta claramente con los ya construidos alrededores. Esto no es una expresión personal arbitraria o deliberada del diseñador buscando notoriedad es sólo una consecuencia de la práctica de la disciplina... La idea del contraste con el entorno natural es ejemplificada por los puentes de Ganter y Salgina... A pesar de que el contraste con la naturaleza podría ser difícilmente más enfático, todavía en un profundo sentido también hay expresada armonía. Esta armonía tiene que ver con el áspero clima, para el cual el concreto es relativamente impenetrable, y con las fundaciones, cuyos arcos triarticulados o pilas esbeltas permiten a los puentes mantenerse libres de esfuerzos peligrosos provocados por los movimientos de la montaña. Pero no hay razón para cubrir el concreto con la piedra para armonizar con los bancos de roca.”<sup>(4)</sup>

El profesor Billington cita como el Ing. Eugène Freyssinet explica la belleza de su puente preferido:

“Freyssinet...describe porqué [el puente] Le Veudre era como un trabajo de arte. Para él los contrastes de las pilas ojivales con la superficie plana del agua, y los firmes contrafuertes apoyados en las colinas con la ligereza de los arcos de gran claro, dieron al puente su carácter y valor. “La belleza de un puente está solamente dada por las delicadas armonías entre sus partes y su emplazamiento...”<sup>(4)</sup>

De estas observaciones del profesor Billington se advierte que, en forma clara y evidente, se cumplen viejos conceptos conocidos en composición de arte: el *contraste* y la *armonía*, ambos aplicados a la relación figura-fondo (o forma-contexto). Tal y como se explicará en el capítulo tres, estos conceptos son útiles para cumplir con el principio fundamental de la composición artística: Variedad-Unidad. Si hay un efectivo *contraste* (valga decir que hay muchos tipos de contraste) se percibe variedad en el campo visual. Y si hay *armonía* (hay muchas formas de obtener armonía, no solamente cubriendo el concreto con la piedra) se percibe una unidad o integración. Ambos conceptos en la medida correcta pueden explicar una mejor apariencia en la obra. Ahora bien, si hay muchas maneras de otorgar *contraste* y *armonía* en una obra, es claro que será apropiado escoger aquellas que más se adapten y cumplan con las características propias del diseño estructural en lugar de escoger aquellas que las contradigan.

Falta por esclarecer el problema de la ruptura con las reglas académicas. Se dice que un problema clásico en la historia del arte es que las nuevas formas artísticas a menudo ofenden a las académicas, rompen con ellas. Y se puede deducir entonces que las reglas de diseño que se aplican en una forma de arte anterior no se aplican en una nueva forma de arte diferente. Es conveniente recordar aquí la distinción entre principios y reglas: las reglas son de naturaleza **particular** para una forma de arte específica; mientras que los principios son de naturaleza **universal**, se aplican siempre a toda forma de arte visual.

Un ejemplo apropiado para ilustrar este problema, es el caso del choque que hubo entre dos tendencias de la pintura: el Academicismo y el Impresionismo. El academicismo es toda tendencia que sigue en forma estricta las normas dictadas por una institución o escuela

académica de un momento determinado. El movimiento de arte impresionista rompe con las normas académicas de la pintura francesa del siglo XIX y es la fuente para nuevos movimientos modernos. Es conocido el “Salón de los Rechazados” de 1863, en París, donde expusieron sus obras precisamente los pintores rechazados por la academia: los primeros impresionistas. No obstante, esto no quiere decir que en los cuadros de los impresionistas no se apliquen los principios de composición, sucede todo lo contrario; por ejemplo, el profesor Jorge Manuel Vargas Benavides (Ref. 32) apunta que el pintor impresionista Édouard Manet sigue una estricta composición en sus pinturas, utiliza grandes áreas geométricas escrupulosamente equilibradas y distribuidas. Paul Cézanne tiene un fuerte sentido de la composición en su obra: la asimetría, el ritmo de las líneas, el ritmo de la pincelada; los objetos como áreas de composición y no como objetos reales y gravitatorios. Justamente las obras de estos y otros autores impresionistas sirven de modelo en la enseñanza de la composición en muchos libros de arte de nuestros días.

Es natural que la llegada de un nuevo movimiento de arte cause extrañeza donde reina una tendencia artística anterior. Esto se debe a que produce una variación en el “Statu Quo” del arte imperante en su momento. El profesor Fritz Leonhardt dice:

“Con frecuencia lo nuevo es rechazado al principio, pues el hombre está muy influenciado por la costumbre, por lo que ve a menudo, y solo más tarde se reconoce su valor”<sup>(18)</sup>

Se puede decir que por los muchos siglos de la tradición arquitectónica no se reconoció el nacimiento de una nueva y diferente forma de arte: el arte estructural.

Por otra parte, a pesar de que cada forma de arte tiene sus características distintivas; cumple con los principios generales del arte y la composición comunes a todas las formas de arte. Lo que cambia es la forma en que se aplican estos principios al ajustarse a las características de cada una de ellas.

Podemos concluir entonces que los principios de diseño y composición artísticos sí pueden ser útiles en el proceso de diseño estructural. Siempre y cuando se apliquen en forma apropiada, de acuerdo con las características particulares de esta nueva forma de arte: el arte estructural. Es necesario recordar que el proceso de diseño estructural comprende una síntesis de conocimientos heterogéneos, donde existen una serie de *componentes*, mencionados en el esquema conceptual de la sección 1.2.3., los cuales deben ser tomados en cuenta siempre y en la forma correcta, si se pretende obtener una solución estructural idónea.

Es precisamente aquí donde se puede notar que el estudio de la aplicación de los principios de diseño y composición artísticos y su ajuste a las características propias del diseño estructural forma parte de una nueva materia, el Ing. y Arq. Gottemoeller (Ref. 15) la denomina: “Estética Estructural”.

El estudio de esta nueva materia, se puede abordar desde dos direcciones diferentes, las cuales **no son antagónicas ni excluyentes**, sino más bien **complementarias**: por un lado la aplicación de los principios del diseño y la composición artística al diseño de obras de ingeniería estructural; y por otro lado por el análisis directo de las características generales de las obras de ingeniería estructural que ya han sido construidas y de sus autores. Esto se ilustra en la Fig. 1.7.



Fig. 1.7: Esquema del estudio del componente estético del diseño estructural.

## CAPÍTULO II

# EL ARTE ESTRUCTURAL

*Arte Estructural:  
"Es el arte creado por el ingeniero estructural y aparece más claramente en puentes, edificios altos y grandes espacios cubiertos"*  
(Prof. David Billington).



## CAPÍTULO II

### CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ARTE ESTRUCTURAL

#### **2.1. El Arte Estructural**

En este capítulo se resumen las características generales del arte estructural. Está basado en el resultado del estudio que ha hecho el profesor David Billington a lo largo de 20 años a cerca de este tema, recopilado en su libro: “La Torre y el Puente: el nuevo arte de la ingeniería estructural”<sup>(4)</sup>. La idea de que las estructuras de ingeniería pueden ser una forma de arte surgió por el ejercicio de sus actividades de docencia: en su interacción con estudiantes graduados de arquitectura al enseñarles acerca de estructuras. La idea también surgió de su investigación de la vida y obras del ingeniero suizo Robert Maillart (1872-1940). La historia del arte estructural resulta una fuente fundamental para el estudio del *componente Deleite* del proceso de diseño estructural.

##### **2.1.1. ¿Qué es el Arte Estructural?**

El arte estructural es el arte creado por el ingeniero estructural y aparece más claramente en puentes, edificios altos y grandes espacios cubiertos. Este arte ha sido poco conocido, es una tradición que a través del tiempo ha sido confundida con la arquitectura o la ciencia aplicada. Son numerosos los trabajos de ingeniería recientes que constituyen lo que se llama una *nueva forma de arte*, el *arte estructural*, el cual es paralelo y totalmente independiente de la arquitectura.

Esta nueva tradición surge con la Revolución Industrial (Inglaterra, 1760-1820) y su nuevo material, el hierro industrializado; el cual a su vez trajo sucesivamente nuevas utilidades como el ferrocarril. Estos eventos condujeron directamente a la creación de una nueva clase de gente: los modernos ingenieros entrenados en escuelas especiales. Estos desarrollos llevaron a un cambio radical de la civilización occidental, pero además, condujeron a un nuevo tipo de arte – enteramente del trabajo de los ingenieros y de la imaginación de los ingenieros- y desde finales del siglo dieciocho algunos de ellos han practicado concientemente este arte.

Los artistas estructurales han sido todos pioneros en obras de ingeniería, fueron (excepto por unos pocos) entrenados en escuelas de ingeniería y se preocuparon profundamente en combinar economía y elegancia. Estos diseñadores son verdaderamente artistas en el mismo sentido que, por ejemplo Alberto Giacometti y Le Corbusier fueron artistas. La diferencia está en que los trabajos de los primeros están enraizados en el mundo técnico y racional de la ingeniería.

El hecho de que el público se interese de la belleza de las obras construidas por los artistas estructurales, constituye *la demostración de esta nueva tradición del arte de la ingeniería estructural*. La torre Eiffel y el puente de Brooklyn llegaron a ser grandes símbolos de su época porque el público general reconoció en sus nuevas formas un mundo tecnológico de sorpresa y agrado.

Fotografías y modelos de las estructuras del ingeniero suizo Robert Maillart han aparecido en numerosas exhibiciones de museos de arte desde la primera mostrada en el Museo de Arte Moderno de Nueva York en 1947. Fue en gran parte a través de la obra de Maillart que el movimiento de arte moderno del siglo veinte formó sus ideas acerca de la ingeniería como arte. Él confrontó el mundo del arte por primera vez, con una recopilación de obras del siglo veinte que fueron reconocidas como arte pero que surgieron completamente de la imaginación de un ingeniero. La idea de que hay una forma de arte independiente en la ingeniería estructural tiene su origen en los estudios de la obra de Maillart.

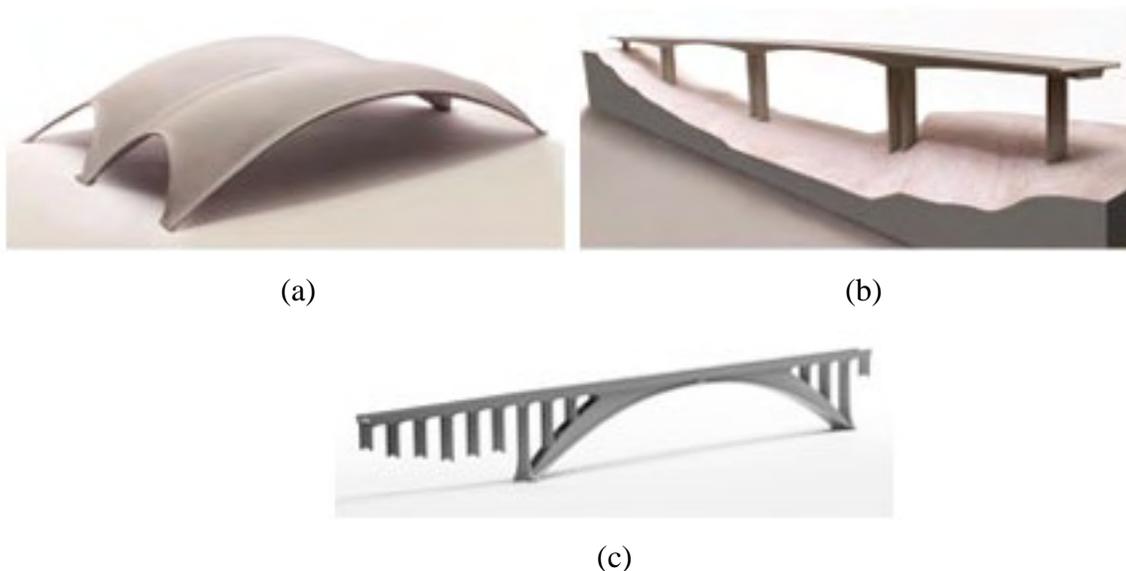


Fig. 2.1: Diversas maquetas de obras de arte estructural fueron elaboradas por estudiantes de la universidad de Princeton, EE.UU., para exposición en el museo de la universidad.

En la Fig. 2.1 se muestran algunas maquetas de obras de arte estructural tales como (a) una réplica del Centro de Tennis de Heinz Isler, (b) del puente Felsenau de Christian Menn y (c) del puente Salginatobel de Robert Maillart. Estas maquetas fueron creadas por estudiantes de la universidad de Princeton, EE.UU., para su exposición en el museo de la universidad.

El profesor David Billington creó un curso de arte estructural similar a los cursos de literatura y pintura en los cuales los trabajos de arte son estudiados uno tras otro; a través de este curso se sugiere la evolución de los principios de la forma estructural. Similarmente, aquí en la Universidad de Costa Rica, el profesor Jorge Gutiérrez elaboró un curso de historia de las estructuras para estudiantes de pregrado y postgrado.

Por otra parte, para ser justos, debe ser notado que la era del hierro industrial también ha producido muchos edificios y puentes feos, diseñados sin ningún sentido de cualquier estilo (los cuales evidentemente no son obras de arte estructural). Miles de estructuras industriales cuya utilidad sin forma sugirieron la progresiva mecanización de la vida; esto ha sido ampliamente criticado. Por ejemplo en Alemania, en los inicios del concreto reforzado, este llegó a ser un material de construcción estándar cuyas propiedades eran bien probadas en los ensayos y cuyas

estructuras podían ser matemáticamente calculadas, pero los ingenieros no vieron sus obras de manera estética, la tendencia en Alemania era considerar las cuestiones estéticas de puentes y edificios como la jurisdicción de la arquitecto y no del ingeniero. Desafortunadamente, esta forma de pensar ha permanecido y es lo común hasta nuestros días; sin embargo los artistas estructurales han demostrado desde siempre (y hasta la saciedad) con su vida y obras exitosas, que esta práctica es incorrecta. Los artistas estructurales son diseñadores que han tomado la estética como un aspecto importante del diseño de ingeniería.

A pesar de lo anterior, se debe reconocer que el arte estructural tiene una larga historia así como también un prometedor futuro.

### ***2.1.2. Expresión y Simbolismo en el Arte Estructural***

La historia de las estructuras muestra que los artistas estructurales lograron alcanzar con sus obras expresión y simbolismo:

El carácter expresivo del arte estructural está enmarcado fundamentalmente en la “*expresión de estructura*” por parte del diseñador; el cual en su búsqueda de una solución de los problemas estructurales encuentra diferentes alternativas creativas y originales con las cuales expresa su propia personalidad y los rasgos de la sociedad en su momento.

Por ejemplo, la expresión estructural (expresión de estructura) en edificios altos puede surgir de cualquiera de una serie de problemas de diseño, los cuales invoquen la imaginación estructural: cargas laterales (viento y sismo), la reducción del espacio de piso conforme el edificio se vuelve más alto, la necesidad de abrir plazas en la planta baja, la desigual distribución de cargas gravitacionales en muros exteriores, etc. La búsqueda de solución a estos problemas estructurales ha conducido a rascacielos que son verdaderas obras de arte estructural, los cuales expresan con su estructura la solución particular al problema dado.

Al “*expresar la estructura*” el diseñador imprime su personalidad a sus obras. Se puede mencionar por ejemplo, que las obras de los ingenieros Pier Luigi Nervi y Eduardo Torroja brindan soluciones diferentes, pero idóneas, a problemas similares de cobertura de grandes espacios con bóvedas delgadas de concreto. Ambas soluciones ofrecen costos de construcción idóneos y en resumen, son excelentes soluciones de ingeniería. La diferencia se encuentra en las preferencias estéticas de cada diseñador. Nervi escogió expresar en sus estructuras contrafuertes y nervaduras con bellos patrones geométricos, mientras que Torroja escogió expresar las superficies suaves y limpias.

En cuanto al “*simbolismo*”, se puede apreciar que los materiales y formas del arte estructural poseen un particular significado simbólico. Pintores, poetas y escritores perspicaces han reconocido en el arte estructural un nuevo tipo de símbolo. Simbolizan lo artificial en lugar de lo natural; el concreto y el metal son materiales elaborados artificialmente, sus formas reflejan directamente el motor interno de la creatividad emergiendo de las sociedades contemporáneas industriales.

Como obras de arte, las estructuras deben tener un significado simbólico conciente. Gustave Eiffel reconoció este significado, como es evidente en la defensa de su torre: “Me parece que esta Torre Eiffel es digna de ser tratada con respeto, por lo menos porque ella mostrará que nosotros no somos simplemente gente con gracia, pero también [somos] el país de ingenieros y constructores los cuales son llamados en todo el mundo a construir puentes, viaductos, estaciones de trenes y los grandes monumentos de la moderna industria”. La torre era para Eiffel el gran símbolo de una Francia resurgida.

### **2.1.3. El Arte Estructural y su componente Lúdico - Utilitario**

Algunas teorías del arte destacan el componente lúdico (relativo al juego), no utilitario del arte; esto quiere decir que algunos creen que las obras de arte sirven únicamente para el disfrute y el

entretenimiento y que por lo tanto no pueden ser obras de arte aquellas que tengan una función utilitaria.

Por el contrario, los artistas estructurales exitosos reconocieron intuitivamente que los nuevos materiales cambiaron radicalmente la vieja separación entre bellas artes y artes útiles (arte y artesanía). La estructura empezaría a liberar la imaginación y tomar su lugar con las otras artes plásticas como la pintura, escultura y la arquitectura. La estructura empezaría a comunicar ideas estéticas y a mostrar cómo un objeto diseñado estéticamente puede ser al mismo tiempo una obra útil.

El diseño en el arte estructural también tiene un componente lúdico; por ejemplo, Heinz Isler mostró que la disciplina de ingeniería va junto con el juego de imaginación para crear nuevas formas estructurales.

Heinz Isler a la hora de diseñar sus estructuras, muestra un vivo deseo y curiosidad por *aprender y conocer*, por *hacer y crear*, pero también por *jugar y disfrutar*, todo al mismo tiempo. El conocimiento, la creación y el juego son parte de su vida: desde la ventana de su oficina hasta el patio, un tren de juguete recorría a través de modelos de bóvedas de plástico, casas de concreto con forma de globo y árboles cargados de frutas; en su casa de campo, en el invierno se le podía encontrar noche tras noche rociando agua sobre toldos o globos inflados o sobre arbustos y árboles para crear un mundo de formas estructurales de hielo.

El artista estructural Félix Candela comentaba que Robert Maillart “lograba una belleza en sus obras sin necesidad o propósito; sólo por el puro disfrute. El tipo de disfrute que se puede percibir en las obras de Haydn o Vivaldi. Ellos simplemente disfrutaban lo que hacían, y así era obviamente Maillart.”

#### 2.1.4. Ingeniería Estructural y Ciencia

Hay una fundamental diferencia entre ingeniería y ciencia: la ingeniería es hacer cosas que no existen previamente, es decir, *la ingeniería crea*; mientras que la ciencia es el *descubrimiento* de cosas que ya existen. De la ingeniería resultan formas que existen solo porque la gente quiere hacerlas, mientras que de la ciencia resultan formulaciones las cuales existen independientemente de las intenciones humanas. Tampoco las obras de ingeniería son meramente los reflejos de descubrimientos científicos generales, con esto se perdería el significado expresivo del estilo individual de los diseñadores. La ciencia y la ingeniería son mejor vistas como actividades paralelas, cada una a veces sirve como recurso de la otra.

El conocimiento alcanzado por los artistas estructurales está fundado principalmente sobre la experiencia con obras específicas ya construidas, y solo secundariamente sobre generalizaciones teóricas. Sus teorías llegan de generalizar características empíricas comunes encontradas en estructuras en servicio, pruebas a escala natural y en elementos estructurales; ellos no crearon sus estructuras al buscar aplicaciones particulares de teorías científicas generales. Aunque creyeron firmemente en la educación científica y estuvieron atentos a las posibilidades de los resultados de investigaciones académicas, no obstante, sus diseños no pueden ser explicados con referencia a tales investigaciones. Por ejemplo, por más que Eiffel elogió la teoría francesa, no se esperó hasta la formalización matemática de los arcos, para ejecutar sus diseños. También, la historia de las estructuras muestra que la teoría general de bóvedas delgadas, hizo poco para estimular los diseños de ingeniería, más bien, la construcción de las bóvedas delgadas estimuló a los académicos a estudiar la teoría.

Los métodos de análisis útiles a los científicos para explicar los fenómenos naturales, son a menudo útiles a los ingenieros para descubrir el comportamiento de sus creaciones artificiales. Es esta similaridad de método que ayuda a alimentar la falacia de que la ingeniería es ciencia aplicada. Pero los científicos buscan descubrir formas preexistentes y explican su comportamiento por la invención de fórmulas, mientras que los ingenieros buscan inventar formas, usando fórmulas preexistentes para revisar sus diseños.

## **2.2. El Arte Estructural y su independencia de la Arquitectura**

El mundo moderno tiende a clasificar las torres, estadios y hasta puentes como arquitectura. Repetidamente, la gente sugiere que la ingeniería estructural y la arquitectura son una misma cosa y que sus diseños tienen los mismos ideales. Por el contrario, la historia del arte estructural demuestra que los más bellos trabajos de arte estructural son principalmente aquellos creados por ingenieros entrenados en ingeniería y no en arquitectura.

Los trabajos de arte estructural han procedido de la imaginación de los ingenieros quienes han surgido de un nuevo tipo de escuela, la escuela politécnica, desconocida antes de finales del siglo dieciocho. Los ingenieros organizaron nuevas sociedades profesionales, trabajaron con los nuevos materiales. Sus escuelas desarrollaron planes de estudio que decididamente cortaron cualquier vínculo que haya existido previamente entre aquellos quienes hacían formas arquitectónicas y aquellos quienes comenzaban a hacer las nuevas formas de ingeniería (metal industrializado y posteriormente concreto reforzado). Para estas nuevas formas, las ideas heredadas del mundo de la mampostería de la antigüedad no eran aplicables. Las nuevas ideas fueron esencialmente para construir con los nuevos materiales.

El arte estructural es una *forma de arte independiente* y por lo tanto tampoco puede ser confundido con una escuela o movimiento de arquitectura. Por ejemplo, la escuela alemana Bauhaus de principios del siglo veinte enfatizaba eliminar las diferencias entre bellas artes y artesanía utilitaria; afirmaba que los problemas de diseño del arte y la arquitectura deben ser resueltos de acuerdo con las necesidades del mundo industrial moderno; sostenía que un buen diseño debe ser satisfactorio en lo técnico y en lo estético; por lo cual, su educación consistía en talleres de arte y de materiales y procesos industriales. A pesar de estas características, la Bauhaus y otros movimientos similares escasamente reconocieron la tradición del arte

estructural. En una obra clásica donde se define la Bauhaus, su fundador Walter Gropius incluyó cuarenta y cinco ilustraciones de las cuales ninguna mostraba alguna obra de arte estructural. Es más, al describir la educación comprensiva dada a los nuevos arquitectos, Gropius notó que no había cursos ofrecidos en construcción de acero o concreto. A pesar de que Gropius y otros estimularon la nueva forma de pensar acerca de la tecnología y el diseño, ellos lo hicieron desde la perspectiva de la arquitectura y no de la estructura.

### 2.2.1. Escala y Función

Los diseñadores estructurales dan la forma a objetos que tienen relativamente una *gran escala* y un *uso único* y estos diseñadores ven las *formas como el medio de controlar las fuerzas* de la naturaleza para ser resistidas. Los diseñadores arquitectónicos, por otro lado, dan forma a objetos que tienen una *escala relativamente pequeña* y un *uso humano complejo* y estos diseñadores ven la *forma como el medio de controlar los espacios para ser usados por la gente*.

La **función** en ingeniería estructural no es definida por el uso humano en el sentido de vivir, trabajar, encontrarse, rendir culto. Estos usos más complejos fueron y son las funciones por las cuales los arquitectos crean formas. **Entre más jueguen las cargas un papel principal en el diseño la obra más se aproxima a la categoría de estructura pura, y la estructura crea espacios solo secundariamente.** Por el contrario, entre más lleguen a ser los espacios proyectados principalmente para el vivir humano, la obra más llega a ser un medio para controlar el espacio y por lo tanto, **arte arquitectónico**.

Esta distinción de términos acerca del significado de **función** entre estructura y arquitectura depende de otra distinción entre las dos: la escala. Eiffel vio claramente que los nuevos materiales y las nuevas formas estructurales definieron una nueva forma de arte; para él hay una atracción y un encanto inherente en lo colosal (gran escala) que no es materia para las teorías ordinarias de arte.

La **gran escala** y su **uso definido estrechamente** son los principios sobre los cuales depende el arte estructural. La pequeña escala de las casas privadas y su uso humano complejo las hacen la obra prototípica de arquitectura. Las grandes luces de un puente y lo elevado de sus torres combinadas con sus pesadas cargas lo hace la obra prototípica del arte estructural.

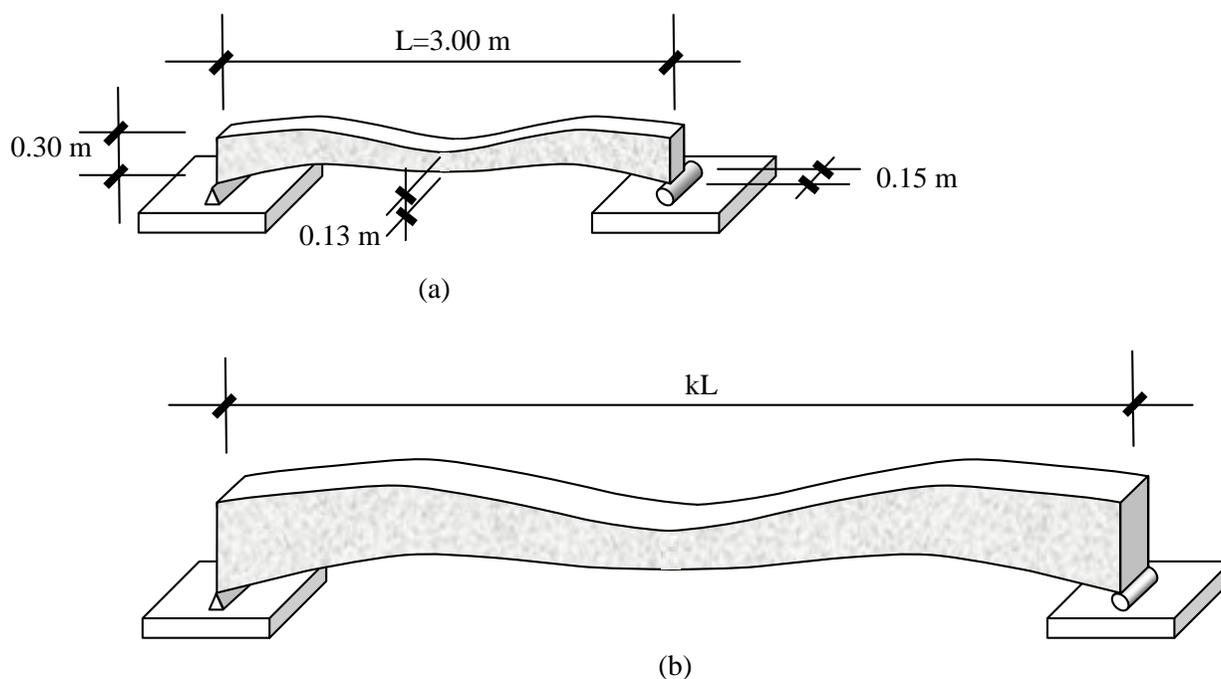


Fig. 2.2: Esquema del efecto de la función y la escala en una viga de forma "libre".

El siguiente ejercicio puede ser útil para ilustrar el efecto de la **escala** y la **función** en la creación de la **forma** y distinguir así el arte arquitectónico del arte estructural. En la Fig. 2.2a se muestra el esquema de una viga de concreto reforzado simplemente apoyada. Esta viga tiene una forma "libre", con lo cual se quiere decir que la forma de la viga fue definida tomando en cuenta funciones muy diversas como lo serían, por ejemplo, las funciones arquitectónicas y sin dar mucha importancia a la función estructural.

La viga tiene una luz corta de  $3\text{ m}$  y con las dimensiones de la Fig. 2.2a se puede calcular un peso propio aproximado de  $230\text{ kg}$  y un momento flexionante máximo de  $0.074\text{ ton}\cdot\text{m}$ . Si, para

simplificar, solo se toman en cuenta los esfuerzos de flexión por peso propio; se puede calcular un área de acero longitudinal aproximado de  $0.32 \text{ cm}^2$  y con lo cual una sola varilla longitudinal número 3 será suficiente.

El problema se presenta cuando se intenta utilizar esa misma forma “libre” con una escala mayor; es decir, se amplían las dimensiones con un factor de proporción  $k$ , como se muestra en la Fig. 2.2b. Si se aumenta la luz  $k$  veces el peso de la viga no aumenta linealmente, sino más bien a la tercera potencia  $k^3$  y el momento flexionante aumenta a la cuarta potencia  $k^4$ . Por ejemplo, si la luz se aumenta el doble ( $k = 2$ ) el peso se aumenta ocho veces (1.8 ton) y el momento dieciséis veces (1.2 ton\*m). Para cuando el factor de proporción se aumenta a  $k = 15$ , con una luz de 45 m, el rectángulo equivalente de esfuerzos de compresión de concreto de Whitney es de más de la mitad de la altura de la viga en su parte central; es decir, se calcula que la viga ha fallado solo por su propio peso.

Este ejercicio simplificado evidencia que es posible construir algunas formas “libres” en pequeña escala; pero si se pretende llevar la obra a situaciones límite, la función estructural tiende a ser la más importante en la generación de la forma.

Es importante enfatizar que se está hablando de formas de arte diferentes, por lo tanto, no se pueden juzgar de la misma manera las obras de ingeniería estructural y de arquitectura, ni se puede decir que el arte estructural es mejor que el arte de la arquitectura, o viceversa, porque siguen ideales bastante diferentes.

### **2.2.2. Dimensiones de la estructura**

Según el Prof. Billington, la estructura tiene tres dimensiones. Su primera dimensión es la *científica*. Cada estructura o máquina en servicio debe desempeñarse de acuerdo con las leyes de la naturaleza. Esta dimensión científica es medida por la eficiencia.

La segunda dimensión de la estructura es la *social*. Las formas tecnológicas existen también en un mundo social. Sus formas son moldeadas por los patrones de la política y la economía. En el mundo moderno civilizado las formas tecnológicas son el producto de una sociedad. El público debe sustentarlas a través de los impuestos públicos o el comercio privado. La economía mide la dimensión social de la estructura.

La tercera dimensión de la estructura es la *simbólica*. Los objetos tecnológicos como las estructuras y las máquinas dominan visualmente los panoramas industriales y urbanos. Están entre los más poderosos símbolos de la era moderna. Esta dimensión es la que abre la posibilidad para la nueva ingeniería de ser arte estructural. A pesar de que no puede haber medida para una dimensión simbólica, se reconoce un símbolo por su elegancia y su poder expresivo.

Se pueden mencionar tres tipos de diseñadores que trabajan con formas en el espacio: el ingeniero, el arquitecto y el escultor. Al hacer formas, cada diseñador debe considerar las tres dimensiones o criterios mencionados. El primero, o criterio científico, se llega al hacer estructuras con un mínimo de materiales y todavía con suficiente resistencia a las cargas y al entorno. Este análisis de eficiencia y resistencia y permanencia es arbitrado por lo concerniente a la seguridad. El segundo, o criterio social, comprende principalmente análisis de costos como comparación de la utilidad de las formas por la sociedad. Finalmente el tercer criterio, el simbólico, consiste de estudios de apariencia junto con una consideración de cómo la elegancia puede ser lograda dentro de las restricciones fijadas por los criterios científico y social. **Dentro de estas dos restricciones los diseñadores estructurales encontraron la libertad para inventar la forma.** Y fue precisamente la austera disciplina de minimizar materiales y costos que les dio la licencia para crear nuevas imágenes que pudieran ser construidas y duraderas. Esta es la base estética-ética sobre la cual el diseñador individual funda su obra.

Para el diseñador estructural el criterio científico es el principal, como lo es el criterio social para el arquitecto y el criterio simbólico para el escultor. Además, el diseñador estructural debe balancear el principal criterio con los otros dos. En cierta manera, los arquitectos necesitan

satisfacer todos estos criterios pero el social es el principal; ellos **diseñan formas para controlar los espacios para el uso humano directo**. Este tipo de utilidad, en la mejor arquitectura, es ligada a la economía también. Los diseñadores arquitectónicos siempre han estado concientes del criterio simbólico en sus trabajos, sin embargo la separación entre la apariencia y los ideales tales como materiales mínimos y mínimo costo han transformado algunas de las obras modernas más conocidas en símbolo de derroche y arrogancia. Satisfacer el criterio científico es también esencial para la buena arquitectura. Por ejemplo, el techo la Casa de la Ópera de Sydney fue diseñado sin ninguna referencia estructural, y sus costos se incrementaron flagrantemente como resultado. Para la escultura el criterio principal es el simbólico, pero también los otros dos son esenciales, las obras deben encontrar cierta aceptación social y deben tener resistencia y permanencia.

El artista estructural Félix Candela expresó una visión artística del diseño y fue claro en contrastarla con la que él tomaba que era la postura de famosos arquitectos: "... esta es bastante lo opuesto de la tarea del artista profesional quien tiene que producir belleza como una obligación o la tarea del arquitecto célebre quien tiene que ser original a cualquier costo en cada proyecto nuevo." Lo que separa a Robert Maillart y Félix Candela de Le Corbusier y otros artistas es su insistencia a cerca de tomar la **eficiencia** y **economía** como el marco intelectual de su arte. No se encuentra mucha referencia de tales ideas en Le Corbusier. Le Corbusier no era menos artista que Maillart o Candela, pero practicó un arte diferente: el arte de la arquitectura.

### **2.2.3. La forma estructural y la colaboración.**

Algunas veces los ingenieros han trabajado con arquitectos al igual que con ingenieros mecánicos y eléctricos, pero las formas han llegado de las ideas de la ingeniería estructural. Los ingenieros estructurales y los arquitectos aprenden uno del otro y algunas veces colaboran fructíferamente, especialmente cuando, como en edificios altos, la gran escala va junto con el uso complejo. Pero los dos tipos de diseñadores actúan predominantemente en diferentes esferas.

Por ejemplo, para el diseñador de rascacielos Fazlur Khan: “El proceso de diseño de cualquier edificio grande... debe ser multidisciplinario por naturaleza”, con lo cual quiere decir que “la idea de que el arquitecto dibuje un bonito boceto representando su visión de un edificio puede tener alguna validez posible para una estructura menor como un edificio residencial o para un pequeño proyecto comercial, pero podría resultar un total desastre arquitectónico para cualquier edificio grande”.

Khan reacciona en contra de la idea de que colaboración quiera decir que el arquitecto individualmente produzca el diseño visual y el ingeniero solamente se encargue de hacer la obra segura y económica. Khan ejemplificó con su propio trabajo el ideal de que el ingeniero directamente tome el mando en el diseño de la forma visual en lugar de que meramente siga “un diseño preconcebido por un arquitecto donde el ingeniero tiene que resolver simplemente el problema que le han dado... Las fachadas arquitectónicas a priori, inconexas con los sistemas estructurales naturales y eficientes, no solo son un desperdicio de recursos naturales pero también tendrán dificultad de resistir la prueba del tiempo.”

Khan subraya que la estética resultante de la interacción del equipo estructural-arquitectónico puede tener un valor y calidad trascendente mucho más allá de formas arbitrarias y expresiones que reflejen la moda del momento. El ingeniero debe tener la oportunidad y la responsabilidad de participar activamente en la evolución arquitectónica de un edificio sobre todo en el caso de edificios altos.

### **2.3. Características del Arte Estructural**

Tal y como se mencionó en las secciones 2.2.1 y 2.1.2. el Prof. Billington propone que la obra de arte estructural tiene las características de Escala-Uso-Símbolo. Lo anterior significa que para que una obra de ingeniería estructural pueda ser considerada como una obra de arte debe tener

un gran **tamaño** o **escala**, conjuntamente, debe tener un **uso** o **función reducida**, estando este **uso** o **función restringido al ámbito estructural**, es decir, **la forma es utilizada para controlar las fuerzas y no los espacios**; y además, debe alcanzar un grado de **expresión simbólica** y **belleza** reconocida por el público.

Por ejemplo, Gustave Eiffel al defender la apariencia de su torre respondió cuidadosa y profundamente: “El primer principio de la belleza... es que las líneas esenciales de una construcción son determinadas por una perfecta adecuación a su uso.” Para Eiffel **uso significa la habilidad de la torre de tomar las cargas**: “¿Cuál fue el principal obstáculo que tuve que vencer al diseñar la torre?” y continúa: “Su resistencia al viento, y enfatizo que las curvas de sus cuatro pilares producidas por nuestros cálculos, levantándose desde una enorme base y estrechándose hacia la parte superior, consiguen dar una gran impresión de resistencia y belleza.”

En el diseño de la torre, Eiffel integró forma y función en una nueva manera. Para él y para todos los artistas estructurales **la función** o **uso** debe ser estrechamente definido para soportar las grandes cargas.

Por otra parte, si la torre fuera de 10 m en lugar de 300 m las cargas de viento serían irrelevantes en el diseño. Así Eiffel describió su torre por la identificación de las tres características indispensables del arte estructural: gran escala, uso definido estrechamente y la personificación de valores sociales e ideas estéticas.

Como señala el Prof. Billington, la **gran escala** es una característica importante del arte estructural. No obstante, el Prof. Jorge Gutiérrez afirma que es discutible que esta característica sea indispensable para catalogar una obra como obra de arte estructural.

Por un lado se debe reconocer que la gran escala es una característica estructural importante, porque como se ha visto, esta tiene un efecto fundamental sobre las cargas; lo cual hace que la **función estructural** sea la principal función generadora de la **forma**. Por otro lado, sin

embargo, la **forma** también puede ser generada como resultado de restringir **directamente** las funciones (en una obra de menor tamaño), a las funciones estructurales; dando así como resultado, una obra estructural en **pequeña escala**.



Fig. 2.3: Vista interna del restaurante del balneario Kursaal en Ostia, Italia.



Fig. 2.4: Vista interna del restaurante del balneario Kursaal en Ostia, Italia, 1950.

En las Figs. 2.3 y 2.4 se muestran imágenes del restaurante del balneario Kursaal en Ostia, Italia, de 1950, diseñada por el ingeniero y artista estructural Pier Luigi Nervi. Este restaurante tiene forma circular en planta con un diámetro de apenas 14.3 m y una altura de 4.35 m. Aquí, **la forma es la estructura** y Nervi utilizó nervaduras con sus característicos patrones geométricos; los cuales otorgan movimiento (figurado) a la composición y ayudan a realzar el centro de interés. Esta estructura puede considerarse como una obra de arte estructural en pequeña escala.

El Prof. Billington añade que el arte estructural tiene tres ideales principales: eficiencia, economía y elegancia.

### **2.3.1. Eficiencia.**

La disciplina de la **eficiencia** es un deseo por materiales mínimos, el cual resulta en menos peso, menos costo y menos masa visual. La eficiencia conduce a la *delgadez*, no hay arte estructural sin la expresión de delgadez; aunque la eficiencia algunas veces requiere que algunas partes de una estructura sean relativamente masivas. La expresión de delgadez no está aislada, debe ser siempre balanceado con la *seguridad*. Entonces, para el arte estructural la eficiencia significa el delicado balance entre delgadez y seguridad, para los cuales no puede haber un óptimo automático.

Debido al gran costo del nuevo hierro industrializado, los ingenieros del siglo diecinueve encontraron formas para usarlo lo más *eficientemente* posible. Por ejemplo, en sus puentes encontraron formas que tomarían las cargas pesadas (la locomotora) como nunca antes con una mínima cantidad de material. La primera disciplina del ingeniero fue usar la menor cantidad de recursos posibles. Al mismo tiempo, estos ingenieros fueron llamados a construir estructuras más y más grandes con menos material: puentes más largos, torres más altas y espacios cubiertos más grandes. Ellos se esforzaron en encontrar los límites de la estructura, en hacer las

nuevas formas que serían livianas y resaltarían su ligereza. Así empezaron a aligerar el hierro, luego el acero y el concreto.

### **“La función sigue a la forma.”**

El primer principio del arte estructural es que **“La función sigue a la forma”**. Como se ha visto, **la función de la estructura es la de tomar las fuerzas**. Por lo tanto, este principio dice que las fuerzas siguen a la forma, o lo que es lo mismo: **“la forma controla las fuerzas”** y no a la inversa (el aforismo opuesto de que la “forma sigue a la función” fue propuesto por el arquitecto Louis Sullivan (1856-1924) y ha sido muy invocado como principio arquitectónico por los críticos de arquitectura de edificios del siglo diecinueve).

Que la **forma controla la función** significa, en el caso específico de la torre Eiffel, que las cargas de viento y peso son dependientes de la escogencia de la forma por parte del diseñador, y que hasta para la misma carga las fuerzas dentro de una estructura dependen de esa forma.

La presión sobre la estructura depende de la presión del viento y del área de la superficie de metal expuesta. Si la torre fuera más ancha en la parte superior, entonces la fuerza horizontal debida al viento sería más grande y el peligro de volcamiento mayor. Además, las fuerzas horizontales en la parte superior son más peligrosas que en la parte inferior (por el aumento en el brazo de palanca). Así, una forma con la cual la superficie expuesta decrece conforme aumenta su altura tendrá sus fuerzas de viento reducidas. Cada cambio en la forma, por lo tanto, cambia la carga actuante, y esta es la carga que causa las fuerzas internas en las piezas de metal y en las fundaciones. También, las fuerzas dependen de la forma de otra manera: la separación de las piernas de la torre controlan las fuerzas internas en el metal. Entre más separadas las piernas, aumenta el brazo de palanca resistente que equilibra el momento actuante de volcamiento producido por las cargas de viento. Así, **la forma domina las fuerzas** tanto de

**acción** (cargas de viento) como de **reacción** (fuerzas internas en las piezas de metal y en las fundaciones).

De este principio de que la forma controla las fuerzas surge una característica fundamental en edificaciones: *para encontrar arte estructural se debe buscar en edificios donde la estructura es la función primaria*. Es decir, la **estructura y la forma son indisolublemente una**. *La forma por sí misma es diseñada para controlar las fuerzas, más bien que para crear espacios*.

Por ejemplo, Robert Maillart inventó nuevas formas para tres importantes tipos de edificaciones en los cuales la estructura y la forma son una sola: pisos soportados por columnas cuyos capiteles tienen la forma hiperbólica del diagrama de fuerza cortante (ver Fig. 2.28); techos soportados por vigas que siguen la forma del diagrama de momento flexionante (ver Fig. 2.29) y bóvedas delgadas de concreto con forma parabólica. En cada caso, Maillart creó obras de arte, sirviendo a diferentes propósitos que condujeron a diferentes formas visuales.

### **Simplificación del análisis estructural y pruebas experimentales.**

Una idea central del arte estructural es la **reducción del análisis**. Esta idea está relacionada con la dimensión científica. Se opone a la tendencia a sobre-enfatizar el análisis, el cual hoy es representado con el uso pesado de las computadoras para los cálculos estructurales. La computadora como cualquier máquina, aunque puede reducir el trabajo humano, no puede sustituir la creatividad humana.

Por ejemplo, en el diseño de bóvedas delgadas de concreto los mayores avances se presentaron de 1955 a 1980; esto se logró no por el desempeño de complejos análisis usando computadoras, sino más bien por la reducción del análisis a ideas muy simples basadas en la observación experimental del comportamiento físico.

El analista, siendo también el creador de la forma es libre de cambiar las formas tal que la complejidad analítica desaparezca. Cuando la forma está bien escogida sus análisis llegan a ser sorprendentemente simples. Los artistas estructurales argumentan que la reducción del análisis libera la imaginación.

Eiffel creía que el camino seguro hacia el progreso llega de combinar la teoría con la práctica. Eiffel no quiso decir que la teoría científica sería el estímulo para mejores diseños; más bien, quiso decir que los cálculos eran esenciales para el diseño porque “en el inicio [del diseño estructural moderno], los diseñadores multiplicaron el número de miembros que soportan cargas y así complicaron sus sistemas estructurales; hoy, por otro lado, hay una tendencia a simplificarlos lo más posible, porque entre más simple sea un sistema, más estará uno seguro de cómo las cargas serán conducidas.” Los cálculos, por lo tanto, son justificados solo cuando ellos conducen a simplificar los sistemas y a aligerar los miembros.

La computadora, por supuesto, ha llegado a ser más y más útil en el ahorro de tiempo en los cálculos de rutina que llegan después de que se selecciona la forma. En las manos de diseñadores maduros, las computadoras gráficas ofrecen nuevas posibilidades. El despliegue visual de estructuras deformándose bajo carga regresa a un más tradicional modo de ingeniería, donde los diseñadores ven los resultados computacionales y entonces modifican sus diseños para buscar estructuras más eficientes. En este proceso, la máquina toma los cálculos tediosos, la manipulación de datos, y el dibujo; mientras que el diseñador integra visualmente y evalúa patrones de comportamiento y hace las decisiones conceptuales. Estas decisiones pueden ser mejor hechas por diseñadores quienes han hecho tales cálculos manualmente y quienes entienden materiales y desempeño estructural debido a observaciones experimentales a escala natural. Los mejores diseñadores siempre han buscado estimar el comportamiento estructural por fórmulas muy simples.

Por el contrario, en diseñadores sin experiencia, las formulaciones matemáticas complejas pueden conducirlos a laberínticos análisis numéricos complejos; y alejarlos de la evaluación y concepción.

También, es importante comprender y no olvidar, que todos los cálculos, sin importar cuán sofisticados, complejos y precisos sean, no pueden ser más que aproximaciones del fenómeno natural que ellos tratan de representar por medio de un modelo matemático. No existe un método exacto de análisis estructural.

Los modelos experimentales son una fuente fundamental para analizar el comportamiento de una nueva forma estructural, independientemente de que exista o no una teoría matemática para analizarla. El ingeniero Eduardo Torroja enfatizó que los proyectos deberían empezar con un modelo. Así en el laboratorio se puede observar cómo lucirían las formas estéticamente, y además el cuidado de detalles esencial para extraer comprensiones técnicas útiles. Posteriormente a las pruebas experimentales o la observación del comportamiento real de una obra en servicio, los cálculos matemáticos pueden ser refinados y conducir a fórmulas simples. Así, los modelos son un medio de expansión de posibilidades de diseño y además de estética como un objetivo primordial de diseño.

### **2.3.2. Economía**

Después de la conservación de los recursos naturales, surgió el ideal de la conservación de los recursos públicos. Los diseñadores, al ser servidores de la comunidad, tienen la obligación de la economía. El ingeniero tuvo, por lo tanto, que trabajar siempre bajo la disciplina de la **economía** coherentemente con la utilidad. Lo que el creciente público general demandaba era más utilidad por menos dinero. Así surgieron las grandes obras del arte estructural; por el contrario, cuando los monumentos eran construidos con una importancia secundaria a los costos, no floreció el arte estructural. En la historia del arte estructural siempre se encuentra que los mejores diseñadores maduraron bajo la disciplina de la extrema economía. La economía además de ser un requisito, es un incentivo y no un obstáculo a la creatividad en el arte estructural.

### **El principio del costo mínimo.**

El segundo principio del arte estructural es: **el costo mínimo** (economía). **Es una disciplina esencial para la creación del arte estructural**, sin ella no puede haber arte estructural. Todos los grandes artistas del arte estructural trabajaron bajo condiciones de extrema economía. La economía estimula la creatividad. La torre Eiffel y el puente de Brooklyn son la culminación de la larga experiencia de sus diseñadores donde ofrecieron a los clientes las soluciones con costos mínimos.

La economía no significa meramente lo más barato, el diseñador debe pensar acerca de todo el concepto, incluyendo su futuro mantenimiento y la relación entre los métodos de construcción y la integridad de la obra terminada. Christian Menn diseñó la conexión entre la parte intermedia de las vigas en voladizo del puente Felsenau para ser conectada rígidamente; este pequeño costo extra evitó los ligeros golpes en la carretera causados por deflexiones y de aquí reducir los posteriores costos de mantenimiento, ver Fig. 2.5.



Fig. 2.5: Puente Felsenau diseñado por Cristian Menn, Suiza, 1974.

Relacionado con esta idea de la economía, es importante y vale la pena reiterar que esta restricción esencial se aplica al costo total y no solo a alguno de los componentes individuales de costo: diseño, construcción y mantenimiento. Muy a menudo estos son financiados por separado, y de aquí el costo total puede ser confundido con solo uno o dos de estos elementos esenciales. Muy a menudo es cierto que un desembolso substancial para diseño resultará en una reducción en los otros dos elementos de costo como para permitir unos costos totales bajos.

Los costos del diseño están normalmente bien por debajo del 10 por ciento de los costos de construcción. Por lo tanto, un ingeniero brillante podría dedicarse más en un diseño en el cual, como sucede a menudo, hará que los costos totales sean substancialmente menores para los dueños. Por la misma razón, un ingeniero que recorta los recursos y honorarios de diseño para obtener un trabajo tendrá que hacer diseños más conservadores los cuales podrían fácilmente costar al cliente mucho más en sus costos totales. De aquí que grandes cantidades de ahorros potenciales al público son perdidos por la insensata política de ahorrar un poco durante las primeras etapas de un proyecto.

Roebing trabajó con cuidado meticuloso y sus diseños incluyeron dibujos detallados de métodos de construcción. Eiffel tuvo alrededor de cinco mil dibujos hechos de todas las partes de la torre, y esta gran preconstrucción literalmente cara hizo posible la suavidad y extraordinariamente rápida secuencia de construcción. El uso de goznes por parte de Eiffel en el arco de Garabit, no solo simplificó las fuerzas sino que también simplificó la construcción, por permitir ajustes tales como que los arcos fueran suspendidos desde las orillas. El método de hilado de cables de Roebing hizo que sus puentes fueran a la vez mejor diseñados y más baratos de construir. La creatividad está por lo tanto relacionada con un costo total bajo de la obra.

## **Límites de la estructura y la creatividad.**

Estos ideales de *eficiencia* y *economía* conducen al ingeniero a extenderse hasta los **límites de la estructura**. Se puede citar por ejemplo que el ingeniero francés Eugène Freyssinet pudo desarrollar la idea del concreto preesforzado en su puente Le Veudre (1911), debido a que por ser este extremadamente ligero (lo cual surgió por la disciplina de la economía), debió controlar las deformaciones por flujo plástico del concreto a través de una idea completamente nueva: aplicando fuerzas artificiales por medio de gatos. Esto ilustra como las restricciones de la eficiencia y la economía son un incentivo a la creatividad y no un obstáculo.

La *eficiencia* es una limitación impuesta por la naturaleza (cargas gravitacionales, sísmicas, etc.) y la *economía* es una limitación impuesta por los patrones de la sociedad (costos). Estas inevitablemente **son necesarias** si se quiere edificar una obra de gran tamaño. Por ejemplo, en la Casa de la Ópera de Sydney las así llamadas bóvedas con formas “libremente modeladas” actuaron más bien como la más rígida prisión para el arquitecto, los ingenieros y los propietarios. Al final el arquitecto tuvo que ser despedido, los ingenieros renunciaron al análisis después de cuantiosos años-hombre de labor y los propietarios tuvieron que pagar más de veinte veces el costo inicial estimado para obtener al final una versión mucho más pequeña que la obra proyectada inicialmente. De esta experiencia se puede aprender que al hacer los objetos ostentosos sin poner atención a los costos públicos o al correcto uso de los materiales, no se está ofreciendo el servicio que se debe dar a la sociedad.

Para Freyssinet la principal característica de la civilización creada por sus ancestros artesanos es “un extremo compromiso por la simplificación de la forma y la economía de medios”: “Yo amo el arte de la construcción el cual concebí de la misma manera que mis ancestros artesanos, como un medio de reducir al extremo el trabajo duro necesario para alcanzar una meta útil.”

### **Economía de los concursos.**

Otra idea central del arte estructural es la economía de los concursos públicos de diseño. Esta idea está relacionada con la dimensión social. Los diseños de calidad surgen del estímulo de las competencias en el diseño de un mismo proyecto. Así, el gobierno puede asegurar mejores diseños por la delegación de algunos de sus controles acerca de quién diseña y quién escoge las formas al público informado. Suiza tiene la más larga y más intensiva tradición de concursos de diseño en puentes, no es coincidencia que sean suizos los exitosos diseñadores de puentes: Robert Maillart, Othmar Ammann, Christian Menn. Suiza tiene prominencia mundial debida a la centralidad de la economía y la estética en sus diseñadores y profesores de ingeniería. Los concursos de diseño estimulan obras con menor costo y elegancia así como también educan al público general.

Por ejemplo, en 1875 el Ferrocarril Real Portugués abrió un concurso internacional para la construcción de un puente (Doña María, Pia Maria) sobre el río Duero (Duoro) cerca de la ciudad de Oporto, Portugal. Se presentaron ocho diferentes diseños, de los cuales el arco de medialuna de Eiffel fue la forma más elegante y también el menos costoso, estando un 31 % debajo de los otros. Esto muestra que las más bellas formas coinciden con la estructura más útil, esto es, la estructura provee la utilidad requerida con el menor costo. De hecho, el diseño de Eiffel también probó ser duradero, el puente se mantiene en buenas condiciones después de más cien años.

### **2.3.3. Estética**

Los materiales y costos mínimos pueden ser necesarios, pero no son suficientes. Muchas estructuras feas resultan de diseños mínimos. La conciencia **motivación estética** del ingeniero debe intervenir en el diseño final. Los ingenieros tienen actualmente una gran libertad para expresar un estilo personal sin comprometer las disciplinas de la eficiencia y la economía. No

hay formas óptimas en estructuras, sino más bien escogencias razonables que le permiten al diseñador individual la libertad de expresar sus propias ideas.

Es sorprendente encontrar en la historia del arte estructural que aquellos diseñadores que *mejor comprendieron el comportamiento estructural* de las obras, fueron aquellos quienes también tuvieron una fuerte motivación estética. La conexión entre esta motivación estética y la clara percepción del desempeño estructural no es accidental **por que es solamente desde la claridad técnica que el arte estructural puede florecer.**

Por ejemplo, los artistas estructurales del siglo diecinueve Thomas Telford y John Roebling comprendieron muy bien el problema de las oscilaciones en puentes de suspensión debidas a los efectos de viento. La atención a sus escritos pudo haber ayudado a prevenir el posterior colapso del puente del estrecho de Tacoma en 1941. Otro ejemplo se da en el también diseñador de puentes Othmar Ammann, su sensibilidad estética demandaba apariencia esbelta en el tablero del puente de suspensión Verrazano, pero necesitaba que también fuera rígido, para lo cual desarrolló armazones tubulares lo cual fue una importante contribución en el diseño de puentes, ver Fig. 2.6.



Fig. 2.6: Puente Verrazano, EE. UU., diseñado por Othmar Ammann.

Estos tres criterios de *eficiencia, economía y estética* son muy complejos y además están muy relacionados y se comprometen entre sí. Esto significa que los mejores diseños son aquellos que satisfacen los tres razonablemente bien.

### **Adornos.**

De la característica primordial de que la forma sea definida estructuralmente, la cual junto con la economía restringen y moldean el ideal estético; se obtiene como consecuencia que en el arte estructural no tienen razón de ser los ornamentos (elementos no estructurales, costosos, e innecesarios). Cada nueva forma en los doscientos años de historia del arte estructural ha surgido bajo restricciones que no permitieron adicionar elementos de costo con la simple intención de adornar. La belleza surge de las formas estructurales por sí mismas.

### La personalidad individual del diseñador.

El tercer principio del arte estructural es: **la personalidad individual del diseñador**. Este principio está más directamente relacionado con la estética y el arte. Esto es algo crucial para el arte estructural, porque en todas las otras formas de arte también se puede dar crédito en cada una de las grandes obras a un solo artista. Por ejemplo, Eiffel tuvo un equipo de colaboradores que le ayudaron en el trabajo del diseño de la torre, pero Eiffel fue el que tuvo la idea, él realmente desarrolló las formas, y tuvo la experiencia de dirigir el proyecto entero, así como también tuvo la personalidad para alcanzar el resultado final.



Fig. 2.7: Pequeño palacio de los Deportes de Pier Luigi Nervi, Roma, 1957.

También, este principio afirma que el diseñador le imprime su estilo a sus creaciones. Por ejemplo, Pier Luigi Nervi consiguió más rigidez en sus domos a través del uso de nervaduras. Pero no era simplemente adicionar material, era redistribuirlo, y esto se podía hacer de muchas maneras, con lo cual se abre la posibilidad para un estilo estético personal. Este método seguro

y económico, liberó su imaginación para expresar una variedad de formas espectaculares (ver Fig. 2.7).

Todos los artistas estructurales sorprendieron a sus contemporáneos con formas que siempre fueron ligadas a sus creadores: las armaduras de arco de Telford, las diagonales de Roebling, los arcos con forma de lente de Maillart, las torres arriostradas de Ammann, los arcos poligonales delgados de Menn, las nervaduras de Nervi, las hojas de concreto ondulado de Isler, los paraboloides hiperbólicos de Candela y los muros de esqueleto de Khan; todos son signos de un estilo personal dentro del rigor de la ingeniería.

#### **2.3.4. Importancia de la construcción.**

Una característica importante del diseño estructural es que la responsabilidad del diseñador debe incluir consideraciones detalladas del proceso de construcción, así como también del producto completo. Esto evitaría defectos de detalles y hasta colapsos generales.

El diseñador debe sentir que él es un socio activo del constructor, si no es que él mismo es también el constructor. Este sentimiento de sociedad no es solamente una práctica necesaria: es una base central del arte estructural. El diseñador en su oficina puede bosquejar bellos diagramas, hacer elegantes cálculos, y construir bellas maquetas, pero todo ese trabajo profesional es desperdiciado si no conduce a una estructura que pueda ser construida económicamente y bien.

Heinz Isler tuvo una colaboración exitosa con una firma de construcción. Instruyó cuidadosamente al personal en sus métodos para construcción precisa. Esta asociación le aseguró el control de calidad esencial para estructuras que son a la vez competitivas y permanentes.

También, artistas estructurales como Maillart, Telford, Roebling, Eiffel, Nervi y Candela estuvieron completamente al cargo de sus trabajos en la entera operación de *diseño* y *construcción*. La independencia y la responsabilidad son importantes en el arte estructural así como la competencia económica. Félix Candela manifestó que “la única forma de ser un artista en esta difícil especialidad de la construcción es ser su propio contratista”.

Félix Candela confió más en su experiencia como constructor que en las teorías matemáticas del comportamiento estructural. Candela, al igual que Maillart creó nuevas formas, salidas de su larga experiencia en la construcción y usó los cálculos como una guía y revisión; y también como Maillart, sus primeros trabajos sirvieron como modelos de tamaño natural para su propio desarrollo futuro.

#### **2.3.5. Juego y disfrute.**

Otra característica del arte estructural es que las formas sirven para el disfrute tanto de sus creadores como del público espectador.

La torre Eiffel y el puente de Brooklyn muestran visualmente el juego con la forma por parte de sus diseñadores y también son parques tecnológicos diseñados para el placer directo de los visitantes.

Eugène Freyssinet se inició como ingeniero de un departamento provincial de carreteras en Francia. Empezó con una serie de pequeños puentes de los cuales escribió: “me hacen perfectamente feliz porque el gozo que una obra da a su creador no depende de su tamaño, más bien del amor que le ponga y esas cosas permanecerán conmigo hasta la vejez.”

## **2.4. Sinopsis de la Historia del Arte Estructural**

Se prefirió empezar el estudio del arte estructural a partir de finales del siglo XVIII con el inicio del uso del hierro colado en estructuras completas. Antes de esto los principales materiales de construcción fueron la piedra, el ladrillo de barro cocido y la madera; con los cuales es difícil separar los diseños estructurales de los arquitectónicos. Empezando con los puentes de hierro de Thomas Telford las nuevas formas estructurales empezaron a aparecer; estas requirieron un especial estudio y entrenamiento, lo cual condujo a la creación de la moderna profesión de la ingeniería. Por lo anterior, no se señalan ningunos diseños anteriores al Puente de Hierro (“Iron Bridge”, en inglés) de 1779 (ver Fig. 2.8).

En la historia del arte estructural se pueden diferenciar dos grandes períodos históricos. El primer período abarca desde la revolución industrial (finales del siglo dieciocho) hasta la terminación de la torre Eiffel y el puente de Brooklyn (década 1880), la torre es el último gran trabajo en hierro. El segundo período abarca desde la terminación de esta torre hasta nuestros días. Las principales distinciones se encuentran en los materiales y las formas; en el primer período el material es hierro y las formas tienden a ser visualmente complejas; en el segundo, los materiales son acero y concreto y las formas tienden a ser visualmente simples.

El primer período comienza en Gran Bretaña hacia finales del siglo dieciocho. Las nuevas formas del arte estructural fueron posibles debido al material central de la Revolución Industrial: el hierro. Los nuevos métodos de producción de este antiguo material fueron esenciales para el principal desarrollo tecnológico del siglo dieciocho: la máquina de vapor. Y con estos nuevos métodos, y de aquí el hierro barato y abundante, fue posible el desarrollo la Revolución Industrial. Los nuevos métodos reemplazaron el carbón vegetal con la hulla en el proceso de fundición del hierro. Y este material más denso y resistente reemplazó la madera para los productos.

En este primer período surgen las nuevas formas las cuales están conectadas directamente al uso de los nuevos materiales en la solución de los problemas de transportes representados por la industrialización. Las redes de transporte -canales, carreteras y ferrocarriles- aceleraron el paso de los desarrollos tecnológicos, condujeron a la urbanización y a posteriores cambios industriales. Como las ciudades crecieron más abarrotadas, los edificios de oficinas llegaron a ser más altos, terminales de trenes más amplias y puentes de realmente inmensas proporciones comenzaron a ser económicamente factibles.

El segundo período del arte estructural comienza en la década de 1880, cuando los precios del acero cayeron y fue desarrollado el concreto reforzado. Los ingenieros pronto comenzaron a explorar las nuevas formas tanto que antes el cataclismo de 1914, una desconcertante variedad de estructuras surgieron a un paso vertiginoso. Pero la madurez de las nuevas formas en acero y concreto llegaron solamente después, cuando la civilización occidental se volcaba desde una guerra mundial a otra a lo largo de auges, inflación y depresión.



Fig. 2.8: El primer puente de hierro (“Iron Bridge”, en inglés), construido por Abraham Darby III, 1779.

El puente de Coalbrookdale (Fig. 2.8) sobre el río Severn en Inglaterra, llamado “el Puente de Hierro” (“Iron Bridge”) fue construido en 1779 por Abraham Darby III (fue el primero en usar

coque para fundir hierro). Es el primer puente de hierro de la historia, y representa el inicio de la construcción industrial moderna. Es un puente semicircular de hierro colado con 30 m de luz; probó ser el único puente en sobrevivir a las desastrosas avenidas del río Severn, justamente porque al ser de hierro, con una resistencia cinco veces mayor que la madera, requirió la quinta parte de cantidad de material para tomar la misma carga. Esta drástica reducción permitió la ligereza para dejar pasar más flujo de agua durante una crecida. Esto contrastó con los puentes de mampostería tradicionales, los cuales, por el contrario actuaban como presas y la presión del agua fácilmente destruía estas obras de piedra. También los puentes de madera tienen este efecto de presa y además son susceptibles a romperse en las uniones y flotar.

La ligereza visual y la resistencia desplegada por el Puente de Hierro estimularon a Tomas Telford y a otros a pensar acerca de este material y a nuevas formas. Al principio, por supuesto, ellos todavía pensaron en términos de las anteriores estructuras de piedra o madera y muchos diseñadores trataron simplemente de poner el nuevo material dentro de nuevas formas. El Puente de Hierro por sí mismo tiene la forma semicircular típica de los arcos de piedra y sus piezas unidas son reminiscencias de las obras de madera.

Por lo anterior el Puente de Hierro no es una obra de arte estructural, tiene una forma ineficiente, solo el arco inferior trabaja y no tiene diagonales que tomen cortante.

### **Thomas Telford**

El inglés Tomas Telford (1757-1834) es el primer artista estructural del hierro, fue el presidente fundador de la primera sociedad profesional de ingenieros civiles: La Institución de Ingenieros Civiles (The Institution of Civil Engineers) de Londres, Inglaterra, en 1818.

Lo que distinguió a Telford de sus contemporáneos fue su estilo personal, sus puentes de arco eran más atractivos visualmente.

En 1787 Telford diseñó su primer puente, con tres arcos de piedra en Montford, se concluyó en 1792. Desde 1795 trabajó con estructuras de hierro colado. En 1810 diseñó el puente Bonard con el cual sus ideas maduraron hasta el punto donde una nueva forma emergió. Para este puente, en el estuario de Dornoch en Escocia, Telford propuso un arco de hierro de 45 m de luz. Escogió esta ancha separación en lugar de la solución tradicional de dos arcos de mampostería en parte por el peligro de las crecidas y el hielo. Pero lo más importante fueron sus criterios de diseño: “para mejorar los principios de la construcción de puentes de hierro y también su apariencia externa... [y] ahorrar una considerable porción de hierro y consecuentemente peso.” Telford manifestaba así las ideas centrales de esta nueva tradición –**eficiencia en los materiales, economía de construcción y la apariencia de la forma final**– y estos los han mantenido todos los artistas estructurales desde siempre.

El diseño del puente Bonar envuelve un solo arco, soportado por una cara de los bastiones de mampostería perpendicular a la inclinación del arco, y en las enjutas “rombos, o más bien formas triangulares son introducidas... [para mantener] los puntos de presión en dirección de los radios... esta disposición de la obra de hierro, especialmente en las enjutas, también mejora grandemente la apariencia general.” Telford fue el más técnico de los diseñadores pioneros, así como también fue el que más dio peso a la estética. Él es el primer ingeniero moderno en mostrar que la incumbencia de la estética no compromete la calidad técnica, más bien la puede mejorar. Las obras de ingeniería pueden ser a la vez de arte y tecnología. En la Fig. 2.9 se muestra el puente Craigellachie de Tomas Telford, el cual es similar al Bonard.

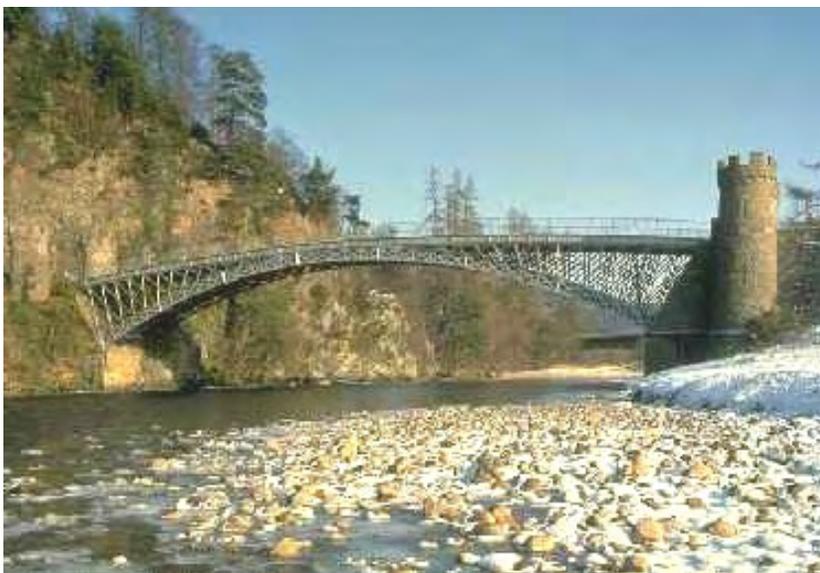


Fig. 2.9: Puente Craigellachie de Thomas Telford, Escocia, 1814.

El hierro colado liberó la imaginación de Telford y otros, lo cual literalmente fundó la moderna profesión de la ingeniería, al forzar a un grupo de diseñadores a pensar acerca de la estructura a una nueva escala, llegando a los límites de la estructura.

Telford fue el primero en ser estimulado a pensar acerca de puentes de luz muy grande, cuando en 1799 las Cámaras del Parlamento designaron un comité selecto para investigar acerca de la necesidad de un nuevo Puente de Londres, se propuso una sola luz sobre el río Thames que permitiera el paso navío por debajo. Entre muchas propuestas, el diseño de Telford (Fig. 2.10) de un arco de hierro colado de 180 m de luz impresionó al comité al máximo. Se siguió una extensiva investigación de factibilidad, se consultó a varios profesores universitarios. Hubo consenso de que el inmenso y elegante diseño de Telford era factible, sin embargo a pesar de esto no fue aprobado.



Fig. 2.10: Proyecto de Tomas Telford para el puente de Londres, 1799.

El hierro colado, como la piedra es mejor en compresión que en tensión, por lo tanto es obvio que remplazara a la piedra en puentes de arco. Por el contrario el hierro forjado, al ser más resistente a la tensión que el hierro colado, tuvo su primer uso estructural importante en las cadenas de puentes de suspensión de principios del siglo diecinueve.



Fig. 2.11: Puente sobre el estrecho de Menai, de Tomas Telford, Gales, 1826.

Así, Telford diseña su obra maestra: el puente de suspensión sobre el estrecho de Menai (ver Fig. 2.11), desde Gales hasta la isla de Anglesey, con 177 m de luz, la más larga del mundo para cuando se completó en 1826. Este puente permanece hasta ahora, aunque debió ser reforzado,

debido a las vibraciones provocadas por ráfagas de viento. Este comportamiento fue claramente descrito por Telford, lo cual muestra que los grandes artistas estructurales siempre han aprendido del desempeño al tamaño natural de sus propias obras y de las de otros.

### **Las formas ferroviarias: Isambard Kingdom Brunel y Robert Stephenson.**

Si el hierro hizo la revolución industrial, el ferrocarril fue el que lo movió. El material de Abraham Darby y la máquina de vapor de James Watt se combinaron para acelerar violentamente el paso de la industrialización y la urbanización. La estructura de hierro se mudó de los confines estrechos de los puentes de arco a un dominio más amplio que incluyó fábricas, edificios públicos, navíos, y principalmente, todo lo asociado con el ferrocarril.

Mientras que Telford había trabajado por 35 años en la idea restringida de puentes de hierro colado, los jóvenes Isambard Kingdom Brunel y Robert Stephenson experimentaron con una amplia variedad de formas, desarrollando al mismo tiempo maquinaria ferroviaria y diseñando sistemas enteros de transporte.

El ferrocarril forzó a los ingenieros estructurales a cambiar ideas antiguas acerca de la forma, porque por primera vez en la historia una carga pesada y dinámica debía ser soportada por una forma de metal ligera. La idea de la forma de arco fue severamente cuestionada, si una gran carga, como la de la locomotora, se podía mover sobre la estructura. Es más, dado que las líneas del ferrocarril deben estar cercanamente niveladas, casi como los canales viaductos, las vigas y las armaduras fueron a menudo más prácticas que los arcos. Tales formas, bajo cargas locomotoras, deben resistir tensión y vibraciones. Por ello se buscaron nuevas formas en hierro forjado (más resistente a la tensión).

El inglés Robert Stephenson (1803-1859) ayudó a su padre George Stephenson (1781-1849), también ingeniero, a la construcción de la primera locomotora ferroviaria utilizable, llamada el Cohete (Rocket) en 1825, desarrollada por su experiencia en el transporte en las minas de

carbón. Esto estimuló la construcción de otras locomotoras y el tendido de líneas de ferrocarril. Así, diseñaron de todo, desde locomotoras hasta puentes ferroviarios.

Una de las grandes obras de Robert Stephenson fue el puente ferroviario Britannia (ver Fig. 2.12) sobre el estrecho de Menai, Gales, 1850, una forma tubular recta de viga cajón en hierro forjado, con luces principales de 140 m. Su gran rigidez ofrece muy buena resistencia a las vibraciones provocadas por el ferrocarril y el viento. Esta forma inventada por Stephenson la planeó inicialmente como parte de un puente de suspensión con cables, por lo cual construyó torres, pero las pruebas mostraron que los tubos eran tan resistentes que no fueron necesarios los cables. Esta es precisamente la gran inconveniencia de este puente, que es muy conservador en lo referente a seguridad y fue menos crucial en economía y estética. El imperativo por poner la línea ferroviaria en servicio rápidamente, anuló la meta del ingeniero estructural por una construcción económica. Por lo tanto, esta no se puede considerar como una obra de arte estructural.

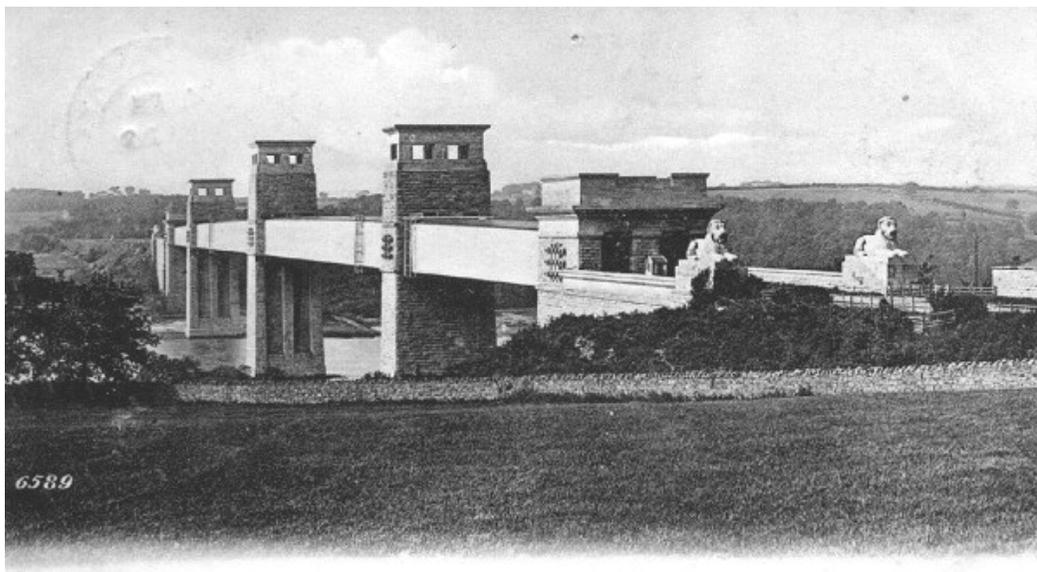


Fig. 2.12: Puente Britannia, de Robert Stephenson, sobre el estrecho de Menai, Gales, 1850.

Se puede considerar al inglés Isambard Kingdom Brunel (1806-1859) como un genio de la ingeniería, con una exuberante imaginación. Al igual que Stephenson fue hijo de un ingeniero: Marc Brunel (1769-1849). Estudió matemáticas y relojería en París.

En 1829, sin ninguna experiencia previa en puentes procedió a hacer cuatro diferentes diseños para una competencia de un puente en Clifton cerca de Bristol. Hizo cuatro diferentes diseños de puentes de suspensión, con una luz central mucho mayor de cualquier puente previo, en cualquier parte y de cualquier tipo (luz de 265 a 277 m). Ganó la segunda competencia en 1831 y el puente se empezó a construir en ese año, se suspendió por disturbios políticos y fue terminado hasta 1864.

Durante la interrupción de la construcción del puente, el joven Brunel retornó a los ferrocarriles: de 1825 a 1841 dirigió el diseño, construcción y operación de la más larga línea ferroviaria en el mundo, el Gran Ferrocarril del Oeste (Great Western Railway), de Londres a Bristol, el cual contenía el túnel ferroviario más largo del mundo (alrededor de 3 km), y el puente de arco de ladrillo más largo del mundo. En 1838 diseñó la terminal de su ferrocarril, la Estación Paddington en Londres. Y en 1859 completó el puente ferroviario Saltash sobre el río Tamar, cerca de Plymouth.

El virtuosismo de Brunel como un artista de la estructura se muestra en estos vastos tipos diferentes de construcción, por ejemplo, en la ligera y elegante intersección de bóvedas de hierro sobre las plataformas de tren de Paddington. Pero su vida relativamente corta, y su ocupación en varios diseños extraordinarios en ingeniería mecánica, no le permitieron el tiempo para llevar sus ideas estructurales más lejos. Brunel no solo ponía líneas enteras de ferrocarril, también diseñó los rieles, los cambios de línea, la estación con edificios y pensó profundamente acerca del diseño de la locomotora, y además diseñó grandes buques.

En el puente ferroviario Saltash (ver Fig. 2.13), sus dos tramos principales tienen luces de 138 m. Diseñó una combinación de arco tubular y cables de cadena para rigidizar y tomar mejor las cargas de la locomotora. Esta nueva forma es altamente expresiva, muestra visualmente como

se toman las cargas: por compresión en el arco y tensión en los cables. La estructura es un 33% más ligera y costó alrededor de la mitad que el puente Britannia.



Fig. 2.13: Puente Saltash de Isambard Kingdom Brunel, Inglaterra, 1859.

### **Alexandre Gustave Eiffel**

El francés Gustave Eiffel (1832-1923) se graduó en 1855 de ingeniero químico de las Escuela Central de Artes y Manufacturas. Fue por casualidad que cayó en la gran industria del hierro: tomó un trabajo con una firma que diseñaba y construía equipo ferroviario. Para 1858 fue enviado a Burdeos a construir un puente de hierro colado de 488 m con siete tramos. Sus cuidadosos cálculos combinados con un inventivo plan constructivo llevaron al puente a su terminación según lo previsto en 1860.

En 1867 se estableció independientemente como diseñador y constructor con una fábrica de construcción en metal. Su negocio creció rápidamente a proporciones internacionales; en 1885 había construido cientos de grandes estructuras: puentes, estaciones ferroviarias, salas de exhibición, fábricas de gas, tanques grúas, y tiendas de departamento. Además de haber logrado un lucrativo negocio, también en sus estructuras mostró sus ideas estéticas. Así lo reconoció

tiempo después su compatriota, el arquitecto Le Corbusier: “Sus cálculos fueron siempre inspirados por un admirable instinto de proporción, su meta era la elegancia.”

Para Eiffel el camino seguro para el progreso consistía en combinar la teoría con la práctica; en lugar del empirismo inglés con el cual se dimensionaban los miembros por prueba y error y experimentos con modelos a pequeña escala. Para Eiffel los cálculos teóricos permiten estructuras más ligeras y más resistentes. También, Eiffel buscaba simplificar los sistemas estructurales, porque para él entre más simples, más se está seguro de cómo las cargas serán llevadas.



Fig. 2.14: Torre Eiffel, diseñada por Gustave Eiffel, París, Francia, 1889.

Con las Exposiciones Universales de la segunda mitad del siglo diecinueve (1855, 1867, 1878, 1889) el deseo de Francia era recapturar su gloria pasada, así como también la promesa de un mejor futuro. La torre Eiffel debería ser el mejor símbolo de una nueva forma de ver el mundo y su ligereza de forma, un contraste con las épocas oscuras.

La torre Eiffel permanece como un hito de la construcción monumental en hierro forjado (ver Fig. 2.14). Eiffel la proyectó para la Exposición Universal de París de 1889. El edificio, sin su moderna antena de telecomunicaciones, mide unos 300 m de altura. La base consiste en cuatro enormes arcos que descansan sobre cuatro pilares situados en los vértices de un rectángulo. A medida que la torre se eleva, los pilares se unen hacia el interior, hasta convertirse en un solo elemento articulado. Cuenta con escaleras y ascensores, y en su recorrido se alcanzan tres plataformas a distintos niveles, cada una con un mirador, y la primera, además, con un restaurante. Para su construcción se emplearon unas 6.300 t de hierro forjado en 18.000 piezas unidas por 2.500.000 remaches. Cerca del extremo de la torre se sitúan una estación meteorológica, una estación de radio, una antena de transmisión para la televisión y unas habitaciones en las que vivió el propio Eiffel.

Como se ha visto en las secciones 2.1.2., 2.2.1. y 2.3.1. en la torre Eiffel se identifican los tres principios del arte estructural: gran escala, uso definido estrechamente y la personificación de ideas sociales e ideas estéticas. La belleza de su forma surge por las restricciones de la eficiencia, economía y la búsqueda deliberada de valores estéticos por parte del diseñador. La función de la forma estructural es la de controlar las fuerzas de acción y reacción sobre la estructura, las cuales se vuelven muy importantes debido a su gran escala.

Entre las obras más importantes de Eiffel están los viaductos (puentes para el paso de un camino sobre una hondonada). La forma de las torres refleja la influencia de las cargas laterales de viento, que usará posteriormente en la torre.

Para el concurso del viaducto Pia Maria (ver Fig. 2.15) sobre el río Duero, cerca de Oporto, Portugal (1877), entre las ocho propuestas de diseño presentadas, la de Eiffel fue la menos

costosa (31% menos que las otras) y la forma más elegante. Se puede observar que utilizó cuatro columnas (dos de ellas muy pequeñas) apoyadas en el arco central de 160 m de luz; con esto consiguió disminuir la luz libre de las vigas armadas horizontales y por lo tanto estas vigas necesitaron poca altura.

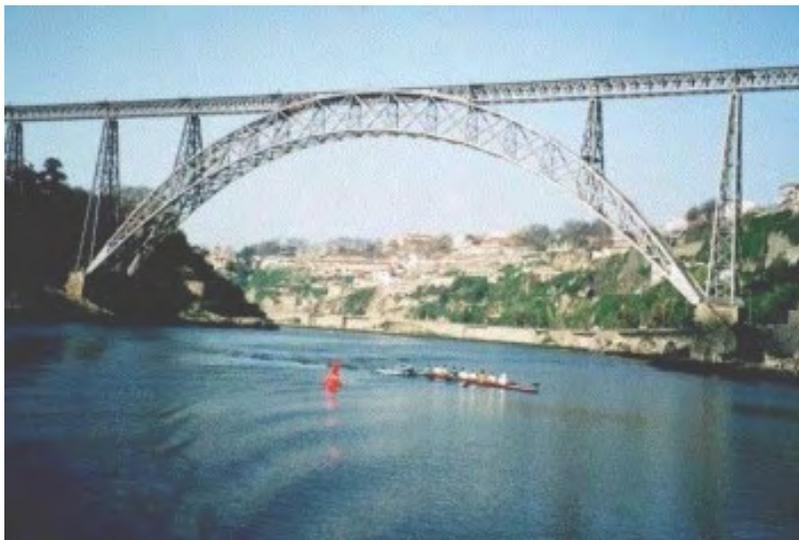


Fig. 2.15: Puente Doña María, de Gustave Eiffel, Portugal, 1877.



Fig. 2.16: Viaducto de Garabit, de Gustave Eiffel, Francia, 1884.

Pero la mayor virtud de estos viaductos es el uso de soportes articulados en el arco, lo que le da una forma de “medialuna” esto permitió que el arco fuera construido económicamente. En planta, el arco es más ancho en los apoyos y se vuelve más estrecho hacia el centro, lo que le da gran rigidez lateral, además de que esta configuración tridimensional (altamente racional) es más impresionante y elegante.

Eiffel construyó el arco doblemente articulado apoyándose en los pilares de hierro, sin andamiajes mediante cables suspendidos. También desde lo alto de las torres construyó las vigas y las unió en el centro. Esta idea hizo la construcción de los viaductos económica.

En 1879 Eiffel fue contratado para construir el viaducto Garabit (terminado en 1884) sobre el río Truyère, Francia (ver Fig 2.16), con lo cual se estimaba un gran ahorro en los costos. Los ingenieros estatales juzgaron que él era el más calificado y que con un viaducto similar al Pia Maria se ahorraría 2 millones de francos, por lo tanto, ni siquiera hicieron un concurso.

La diferencia del viaducto de Garabit con el del Duero está en que las columnas sobre el arco están más cerca del centro superior del mismo, esto mejora la carga sobre el arco y a la vez hace iguales las luces de la viga armada a ambos lados de las torres más altas. Otra diferencia está en la unión de la viga armada con el centro del arco. Mientras que en el Pia Maria la viga armada es interrumpida, en el Garabit Eiffel mantiene la viga visualmente continua y por lo tanto estructuralmente diferente. Esta diferencia surge porque en Garabit, la línea ferroviaria está más alta sobre el valle que en el Duero.

### **John Augustus Roebling**

John Augustus Roebling (1806-1869) nació en Alemania. Fue muy bien educado en ingeniería, en 1826 recibió el diploma de ingeniero del Instituto Politécnico Real de Berlín. Emigró a Estados Unidos en 1831. Trabajó como ingeniero estatal en Pennsylvania. Estando en

Johnstown sustituyó exitosamente las cuerdas de cáñamo con que se jalaban los botes por los canales con cuerdas de alambre de hierro. Así, en 1841 estableció en Saxonburg una planta manufacturera de cuerda de alambre.

Las obras de Roebling señalaron el comienzo de un claro entendimiento del comportamiento de los puentes de suspensión.

El primer puente de suspensión para carretera fue construido en Pittsburg en 1845 sobre el río Monongahela. Sus siguientes mejores trabajos llegaron a los límites de la estructura por su escala, fueron lo más ligeros posible, seguros y perdurables. El puente de suspensión ferroviario y para carretera en las cataratas del Niágara terminado en 1855; el puente de suspensión de Cincinnati de 322 m de luz, terminado en 1856. Y el puente de Brooklyn, Nueva York, cuyos planos presentó en 1869 poco antes de su muerte. Su hijo dirigió la terminación del Puente de Brooklyn cinco años antes de que Eiffel terminara su torre en 1883.



Fig. 2.17: Puente de Cincinnati, de John Augustus Roebling, EE. UU., 1866.

Para el reporte del puente de Cincinnati (Ver Fig. 2.17) Roebling expuso sus ideales para el diseño estructural, manifestó que: “Donde la resistencia debe ser combinada con la ligereza y la elegancia, la naturaleza nunca desperdicia incómodas masas.” Esta es la ética de menores recursos, que fue, para Roebling, expresada por “los arquitectos de la Edad Media [quienes] plenamente ilustraron este hecho por sus bellos contrafuertes y arbotantes, combinaciones de una gran resistencia y estabilidad, ejecutadas con la menor cantidad de material.”

Además de esta expresión visual de ligereza y resistencia, Roebling llega a una integración de la forma: relaciona las torres masivas y el tablero liviano en apariencia por medio de rayos diagonales y armaduras de piso, lo cual da un efecto agradable y una apariencia de resistencia y seguridad. Si esto se hubiera contemplado seriamente, se evitarían diseños defectuosos posteriores y hasta el colapso del puente de suspensión del estrecho de Tacoma en 1940.

En el diseño de sus torres Roebling explica su forma: “La masa no es sólida pero dividida en dos partes... la parte saliente central forma un contrafuerte. Esta características de los contrafuertes es preservada a lo largo de toda la altura, no solo a causa de la apariencia, pero también por la resistencia, ahorro de material y reducir el peso sobre la fundación.”



Fig. 2.18: Puente de Brooklyn, de John Augustus Roebling, Nueva York, EE. UU., 1883.

El puente de Brooklyn cruza el East River (ver Fig. 2.18), es todo un símbolo de la ciudad de Nueva York; fue durante 20 años el puente colgante más largo del mundo.

El 1 de Junio de 1869, se aprueba el diseño del puente pero cinco días después Roebling sufre un accidente cuando un traspordador que entraba en el muelle de Brooklyn aplastó su pie. A pesar de la amputación de la extremidad, murió a causa del tétano. Su hijo Washington se hizo cargo del proyecto y el 3 de Enero de 1870, se inicia la construcción.

Las obras desde su inicio fueron muy duras. Se utilizaron 600 obreros inmigrantes que tuvieron que trabajar en condiciones miserables y peligrosas. Para la excavación del terreno por debajo del río, donde se construirían arcones neumáticos, se utilizó dinamita. Los continuos accidentes y el aeroembolismo, enfermedad ocasionada por los cambios de presión en el agua, provocó la muerte de 20 obreros. El mismo Washington sufrió los efectos de dicha enfermedad y quedó

postrado en la cama. A través de la ventana de su apartamento en Brooklyn, supervisó y dirigió las obras gracias a la ayuda de su mujer Emily quien daba las órdenes pertinentes a ingenieros y constructores.

En 1876, las orillas de Manhattan y Brooklyn son unidos por primera vez a través de un cable de acero. Cada cable tiene un diámetro de 40 centímetros y está compuesto por 19 hilos de acero. En 1877 se finalizó la construcción de las torres de anclaje y los pilares de estilo gótico con doble arcada y una altura de 84 m.

En Octubre de 1878 se completa la instalación de los cables principales y se procede a instalar los cables de suspensión y las vigas de la plataforma del puente. En total, más de 23.000 kilómetros de cable de suspensión sujetan el puente.

En origen el puente estaba diseñado para albergar en los extremos dos calzadas de doble vía para carruajes y caballería, dos vías de tranvía en el centro y una plataforma peatonal elevada. El tramo principal del puente que une los dos pilares, tiene una longitud de 486 metros y una anchura de 26 metros.

A comienzos de 1883, termina la construcción del puente. En la actualidad el puente cuenta con dos niveles. El inferior con dos calzadas de tres carriles cada una por la que circulan a diario más de 145.000 vehículos. El nivel superior es una pasarela para uso peatonal y carril para bicicletas.

### **La primera Escuela de Chicago: William Le Baron Jenney y John Wellborn Root.**

En los antiguos edificios de mampostería, debido al gran peso, el espesor de las paredes se incrementaba con la altura, esto ocasionaba una reducción en el espacio habitable de las plantas bajas. Además, la ausencia de ascensor limitaba la altura a cinco pisos o menos.

El nacimiento de los rascacielos en el siglo diecinueve, en Chicago, EE.UU. se debe a las ideas de Eugène Emmanuel Viollet-le-Duc, al uso eficiente de los nuevos materiales (como el hierro colado, hierro forjado y acero para columnas y vigas, y el concreto reforzado para fundaciones) que reducen considerablemente el espesor de las paredes, y también, a las nuevas tecnologías como el ascensor (Elisha Graves Otis desarrolla el primer ascensor seguro del mundo en 1853).

El Gótico Medieval expresó por primera vez en la historia el potencial visual de la estructura diseñada a sus límites. El arquitecto francés Viollet-le-Duc, después de estudiar profundamente el Gótico, desarrolla una teoría arquitectónica en la cual la construcción y la estructura son más importantes que la expresión arquitectónica. Viollet-le-Duc valora el gótico por su honestidad estructural al expresar en su forma su función estructural. Su influencia contribuirá a la arquitectura simple, sin ornamentos de los rascacielos en EE.UU. Al aplicar su teoría se transmutó el ligero esqueleto de mampostería del gótico a los nuevos “esqueletos” de metal de las estructuras de los edificios del siglo diecinueve.

Chicago es la cuna del rascacielos moderno principalmente por las siguientes causas: fue el centro de intercambio y comercio del Medio-oeste, sufrió un gran incendio en 1871, siendo una ciudad fronteriza para la expansión hacia el oeste se caracterizaba por una ausencia de regulaciones limitantes y las necesidades de utilización de espacio de bajo costo.

En la década de 1880 surgió en Chicago, un gran número de edificios de oficina de 10 a 16 pisos, los cuales en esa época parecían tan altos que adquirieron el nombre de “rascacielos”. No obstante, a pesar de que la nueva altura de estos edificios del siglo diecinueve reflejó las nuevas condiciones técnicas, económicas y estéticas de la época, ellos todavía no tenían la escala (el tamaño) para llevar la estructura a sus límites y así calificar como arte estructural.

Las nuevas técnicas de metal y concreto usadas en estos primeros “rascacielos” de Chicago pusieron las bases de ingeniería para posteriores usos en escalas mucho más grandes (los más apropiadamente llamados rascacielos). Pero para edificios de 16 pisos el estímulo de ingeniería era muy poco como para provocar cualquier arte estructural imaginativo importante. Como es

el caso, en arquitectura las necesidades de iluminación, espacio utilizable y servicios de alquiler toman prioridad por encima de la estructura. Por lo tanto, la estructura es solo una parte en edificios de oficina en las ciudades.

Es importante distinguir las características del arte estructural en lo que se refiere a rascacielos, porque en esta materia muy a menudo se confunde arte estructural con arte arquitectónico. Así, para el arte estructural, William Le Baron Jenney y John Wellborn Root son los grandes precursores de los rascacielos de la Escuela de Chicago, mientras que para el arte arquitectónico, Louis Sullivan (1856-1924) es el principal exponente.

El desarrollo de los modernos rascacielos, al igual que los puentes, aconteció porque los nuevos diseñadores entrenados en ingeniería civil inventaron nuevas formas que controlaron nuevas funciones, porque sus clientes insistieron en la disciplina de la economía.

El inversionista de Boston, Peter Brooks expresó esta disciplina en una carta de 1881 enviada a su arquitecto John Root “Prefiero tener una estructura simple... con un techo plano... y bien reforzado con barras de hierro si es necesario. El edificio en su totalidad debe ser para uso y no para ornamento. Su belleza debe estar en toda su adaptación a su uso.”

Estos criterios han producido los más excelentes ejemplos de rascacielos urbanos. Como se ha comentado, los dos diseñadores más responsables por llevar los ideales de Brook a la práctica fueron William Le Baron Jenney (1832-1907) y John Wellborn Root (1850-1891). Ambos llegaron a Chicago con grados en ingeniería civil.



Fig. 2.19: Primer edificio Leiter, de William Le Baron Jenney, Chicago, 1879.

William Le Baron Jenney fue el fundador de la Escuela de Chicago. Estudió al igual que Eiffel en la Escuela Central de Artes y Manufacturas de París, se graduó un año antes que él. Tres edificios establecieron la reputación de Jenney como el diseñador pionero de edificios de esqueleto citadinos. El primer Edificio Leiter de 1879 (ver Fig. 2.19) marcó el inicio de la forma de “esqueleto” urbana cuya fachada consistía solo en vidrio y estructura. No había casi ornamento. Este énfasis de la estructura pura fue grandemente influenciado en las obras de Viollet-le-Duc, las cuales conoció en París.



Fig. 2.20: Edificio Home Insurance, de William Le Baron Jenney, Chicago, 1884.

Su segunda gran obra fue el edificio de 10 plantas de la compañía Home Insurance de 1884 (ver Fig. 2.20), el cual fue la base de los verdaderos rascacielos modernos. Aquí, la estructura era la forma. Se empleó por primera vez columnas de hierro colado para sostener vigas de acero, así las paredes exteriores quedaban liberadas de cargas estructurales y podían transformarse en grandes ventanales.

Su tercer gran edificio es el segundo Edificio Leiter de 1891, de 8 pisos, sin detalles ornamentales. Sus columnas verticales están ampliamente espaciadas. Su fachada es tan claramente su estructura que señala las posibilidades para grandes alturas. De hecho, este edificio fue comprado por la empresa Sears Roebuck, quien posteriormente, en su torre de 110 pisos (443m) tiene la misma fachada básica y columnas principales espaciadas.

John Wellborn Root estudió ingeniería civil en la universidad de Nueva York. En 1873 se asoció con el arquitecto Daniel Hudson Burnham (1846-1912). En la Escuela de Chicago esta fue una asociación muy productiva. Al enfocar el problema del subsuelo pantanoso de Chicago,

Root inventó la fundación de concreto reforzado con mallas de rieles de acero. En su edificio Monadnock, 1892, la fachada es un muro sin decoraciones perforado con ventanas desde la base al techo. La base ligeramente extendida expresa una fundación ancha donde la mampostería debe encontrarse por debajo con el relativamente débil terreno pantanoso de Chicago.

### **Puentes de acero: James Buchanan Eads y Gustav Lindenthal.**

Cuando los arquitectos de Chicago de la década de 1880 necesitaron ayuda estructural se volvieron más y más a los ingenieros de puentes y especialmente a aquellos quienes tenían experiencia ferroviaria. Las construcciones ferroviarias fueron la escuela de entrenamiento para los ingenieros estructurales de EE.UU. con acero. Alrededor de 1880 hubo un número de diseñadores de puentes experimentados quienes fueron forzados, al trabajar con grandes estructuras bajo las restricciones de seguridad y economía, a desarrollar un enfoque científico más riguroso al diseño en acero.



Fig. 2.21: Puente sobre el río Misisipí, de James Buchanan Eads, San Luis, 1874.

A pesar de que ingeniero estadounidense James Buchanan Eads (1820-1889) no tenía experiencia en puentes, sí tenía experiencia en el diseño y construcción de flotas de barcos; construyó su único puente sobre el río Misisipí, en San Luis, en 1874 (ver Fig. 2.21), el cual es el primer puente de acero. Su obra es una pieza de arte estructural que ilustra como su diseñador se propuso construir una nueva forma apropiada al acero, cuyos costos de producción lo hacían muy económico.

Al respecto Eads manifestó “Estamos propensos a asociar la belleza... en arquitectura e ingeniería con la idea de precios elevados... Es fácil probar, más allá de cualquier posibilidad de pregunta, que en ninguna otra forma el material de estos miembros de su Puente (los cuales le conceden la principal característica de su elegancia) podría ser usado con tal economía.” Este es el *ideal básico del artista estructural*, hacer su diseño elegante y económico todo al mismo tiempo.

La intención para este puente de San Luis era crear un objeto de arte cívico. La ciudad concientemente quería crear un monumento que simbolizara sus aspiraciones de reestablecimiento del dominio económico en el Medio Oeste, frente al explosivo crecimiento de Chicago.

Este puente era nuevo en materiales y en escala. Usó acero en lugar de hierro, con lo cual pudo aumentar la escala a una luz de 153 m (solo alcanzada en esas fechas en puentes de suspensión). El diseño de Eads mejoró grandemente la apariencia de los arcos manteniéndolos por debajo del tablero.

Gustav Lindenthal (1850-1935) nació en Austria, estudió ingeniería en el Instituto Politécnico de Dresden, Alemania y llegó a Estados Unidos en 1874. Diseñó muchas formas radicalmente diferentes; no obstante, no llegó a alcanzar suficientemente la cima del arte estructural; él tendió

a separar el componente estético y la estructura por aparte. Para él la estructura y la forma eran cuestiones separadas. Prefirió las formas masivas a las formas ligeras. Esta actitud lo condujo a consultar con arquitectos cuando sus trabajos llegaron a ser más grandes y más complejos.



Fig. 2.22: Puente Hell Gate, de Gustav Lindenthal, Nueva York, 1916.

Lindenthal diseñó el puente de arco de acero Hell Gate (ver Fig. 2.22), sobre el río East, Nueva York, en 1916. Fue el puente de arco con luz más larga del mundo cuando se construyó con 298 m. Fue hecho para verse masivo por sus torres de piedra y porque la separación de sus cuerdas superior e inferior aumenta conforme se aproximan a los apoyos. Con la forma escogida se pretendió expresar visualmente la rigidez de la forma de arco de los antiguos puentes de mampostería.

Esto da un efecto engañoso, porque el arco aparenta estar empotrado en las torres cuando en realidad funciona estructuralmente como una articulación, las torres no sirven para ningún propósito estructural, son solo apariencia.

Además, casi toda la carga es tomada por la cuerda inferior. Al tener la cuerda superior poca utilidad estructural, se convierte en un elemento decorativo que aumenta significativamente (dadas las grandes dimensiones) el peso propio y el costo de la estructura.

Esta forma no es eficiente. Una forma más apropiada para esta condición sería el arco de medialuna de Eiffel, es decir, que la separación de sus cuerdas disminuya conforme se aproximan a los apoyos articulados.

En este puente la estética y la estructura están dissociadas. A pesar de que tiene una apariencia estética agradable, la forma no cumple con los otros dos ideales del arte estructural: no es eficiente ni económica.

### **Concreto reforzado: Robert Maillart.**

Así como el siglo diecinueve fue la época del hierro, el siglo veinte fue la época del concreto. Los romanos mezclaron regularmente polvo de cemento, arena, piedras y agua para hacer una piedra artificial que era un verdadero concreto natural. El hierro también fue usado en la antigüedad. Lo que fue completamente nuevo fue la combinación de estos dos antiguos materiales producidos artificialmente para hacer un nuevo material (compuesto) con nuevas propiedades extraordinarias. Entre los grandes maestros del concreto tenemos a Robert Maillart, Eduardo Torroja, Pier Luigi Nervi y Félix Candela.

El concreto reforzado tiene tres principales fuentes: a) en 1867, un jardinero francés, Joseph Monier (1823-1906) patentó la idea de reforzar recipientes delgados de concreto al embeber una malla de alambre de hierro en el concreto. Posteriormente aplicó sus ideas a edificios y puentes. b) en 1879, otro francés, François Hennebique (1843-1921) protegió contra el fuego una casa con estructura metálica que había construido en Bélgica. Su decisión de cubrir las vigas de hierro con concreto lo condujo directamente al desarrollo de un sistema estructural en donde el

metal tomaba la tensión y el concreto la compresión. c) los diseñadores de puentes de finales del siglo diecinueve encontraron que era más económico producir piedras artificiales por el colado del concreto que estar sacando de la cantera las piedras naturales; con esto ahorraban mano de obra.

Robert Maillart efectuó entre 1900 y 1940 una revolución en el arte estructural. Fue el primer diseñador del siglo veinte en romper completamente con la mampostería pasada. Puso el concreto en formas técnicamente adecuadas a sus propiedades y además visualmente sorprendentes. Fotografías y modelos de sus obras han aparecido en numerosas exhibiciones en museos de arte. La idea moderna de que hay una nueva forma de arte en la ingeniería (arte estructural) surgió en los estudios de la obra de Maillart.

Maillart (1872-1940) nació en Berna. Estudió en el Instituto Técnico Federal de Zurich. En 1894, después de graduarse, trabajó en diseño ferroviario en una firma de ingeniería en Berna, luego en el diseño de caminos y puentes para el Departamento de Obras Públicas de la ciudad de Zurich y por último trabajó en el diseño y construcción de puentes para un diseñador y constructor de Zurich. En 1902 fundó en Zurich una firma de diseñadores y constructores de estructuras de concreto reforzado. Por último, de 1920 a 1940, se dedicó al diseño (no a la construcción) con oficinas propias en Ginebra, Berna y Zurich. De sus cuarenta y siete grandes puentes, la gran mayoría están en servicio.

En 1900 Maillart reconoció que el diseño de concreto permitía formas que no eran previamente posibles con piedra o metal. Otros diseñadores también crearon nuevas formas, pero tendieron a reflejar la mampostería en arcos y madera o acero en las estructuras de edificios.



Fig. 2.23: Puente Stauffacher, de Robert Maillart, Suiza, 1899.

Un año antes, en 1899 Robert Maillart diseñó el puente Stauffacher (ver Fig. 2.23) sobre el río Sihl, en Zurich. Este puente de 38.3 m de luz, consta de un arco triarticulado de concreto, pero está escondido detrás de una fachada de mampostería decorativa diseñada por el arquitecto de la ciudad Gustav Gull. Esta fachada no tiene función estructural, pues la carga de la superficie de rodamiento es llevada hacia el arco por muros de concreto transversales.



Fig. 2.24: Puente Zuoz, de Robert Maillart, Suiza, 1901.

Ya en 1901 en su puente de Zouz (Ver Fig. 2.24), sobre el río Inn, con una luz de 38.3 m, Maillart cambió los muros decorativos de mampostería de Stauffacher en muros estructurales, formando así el primer puente de viga cajón en concreto reforzado. En este caso fue la sugestión de la forma decorativa la que lo motivó a cambiarla en forma estructural.

Es interesante notar que para el diseño del puente de Zouz no había teoría matemática para analizar una viga cajón de concreto reforzado. Esto fue reconocido por parte de Wilhem Ritter (1847-1906), profesor de Maillart del Instituto Técnico Federal de Zurich, quien fue contratado por los dueños como consultor. Por lo cual Ritter tuvo que pensar tenazmente acerca de la idea y diseñar una cuidadosa prueba de carga a escala natural para asegurar su validez. Las pruebas revelaron grietas menores, y así se aprobó el diseño y se comentó favorablemente acerca de su nueva estética.

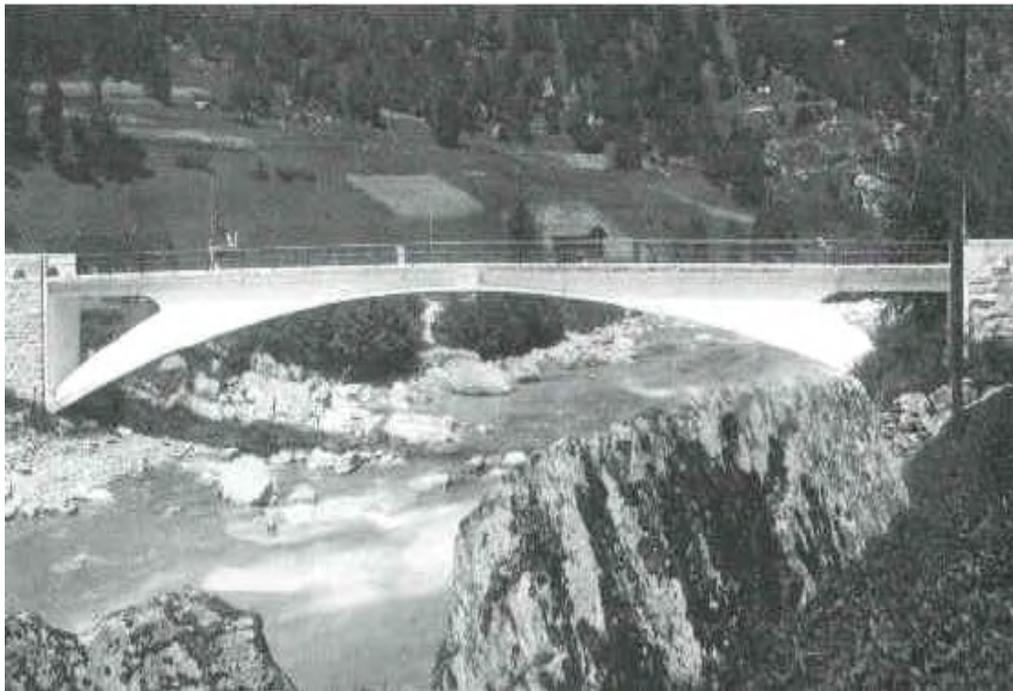


Fig. 2.25: Puente Tavanasa, de Robert Maillart, Suiza, 1905.

Maillart aprendió mucho del comportamiento estructural directamente de la observación de las obras ya terminadas en uso. Para el puente de Zouz las autoridades lo llamaron para que lo aconsejara acerca de unas nuevas grietas longitudinales en el muro cerca de los bastiones. Toda la obra estaba sin daño, pero Maillart aprendió una invaluable lección. En el diseño del puente de Tavanasa sobre el río Rin de 1905, con 51 m de luz, removió esa parte del muro que se había agrietado en el puente Zuoz. El resultado fue una nueva forma con un poder visual sin precedentes, incrementó la eficiencia del material y disminuyó los costos de construcción y mantenimiento, es decir, resultó un mejor puente. Esta fue la primera obra maestra de Maillart. Sus más famosos puentes de la década de 1930 derivaron de la forma del Tavanasa (ver Fig. 2.25).

El puente de Tavanasa, al igual que el de Zouz y Stauffacher, era un puente triarticulado. Los arcos de concreto fueron hechos con mitades idénticas y conectados en ambos bastiones y uno a otro en la corona con articulaciones, las cuales permitieron rotación libre en esos tres puntos. Estas articulaciones permitieron al arco ascender o descender libremente sin esfuerzos internos con los cambios de temperatura.



Fig. 2.26: Puente Salginatobel, de Robert Maillart, Schiers, Suiza, 1930.



Fig. 2.26 (continuación): Puente Salginatobel, de Robert Maillart, Schiers, Suiza, 1930.

En 1927 una avalancha destruyó el puente de Tavanasa y estimuló a Maillart a diseñar, cerca, un puente sobre el Salginatobel con la misma forma (ver Figs. 2.26). Terminado en 1930 y con una luz de 90 m, en este puente Maillart dispensó de los bastiones de piedra y creó una forma sin ninguna referencia a ningún otro material. El puente Salginatobel es reconocido como una obra de arte moderno; ha recibido varios reconocimientos como la declaración de “Monumento Mundial” en 1991, por parte de la Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles (ASCE, por sus siglas en inglés).

En estos puentes de Zouz, Tavanasa y Salginatobel Maillart ganó las competencias de diseño-construcción. Estas obras y otras posteriores, por lo tanto, cumplieron con los criterios del arte estructural: materiales mínimos, costos mínimos y máxima expresión estética.

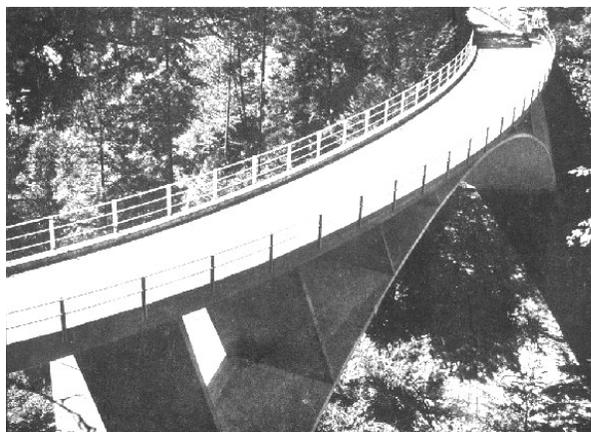


Fig. 2.27: Puente Schwandbach, de Robert Maillart, Suiza, 1933.

En 1933 Maillart diseña el puente Schwandbach (ver Fig. 2.27), en Suiza con 37.4 m de luz. Removió enteramente los pesados e innecesarios bastiones de piedra y reemplazo el pesado parapeto del tablero con una ligera viga curva e integró suavemente la calzada horizontalmente curva con el arco verticalmente curvo. Esta integración de la forma permite una nueva delgadez y elimina cualquier analogía superficial con los puentes de piedra.



Fig. 2.28: Bodega Giesshübel, de Robert Maillart, Suiza, 1910.

Robert Maillart también inventó nuevas formas en las cuales la estructura y la forma son indisolublemente una. Diseñó y probó un nuevo tipo de columnas para soportar sistemas de piso de losa, principalmente para bodegas (ver Fig. 2.28). Las losas de concreto descansan directamente sobre las columnas con capiteles expuestos. Esto ayuda a eliminar las vigas debajo de los pisos e incrementar el espacio utilizable permitiendo correr libremente las tuberías debajo de la losa de piso.

La forma de los capiteles es una transición suave de la losa hacia las columnas. Esta forma es racional, tiene un perfil hiperbólico que sigue el diagrama de cortante, por lo cual la resistencia a cortante es la misma en la losa y se evita el problema de punzonamiento.

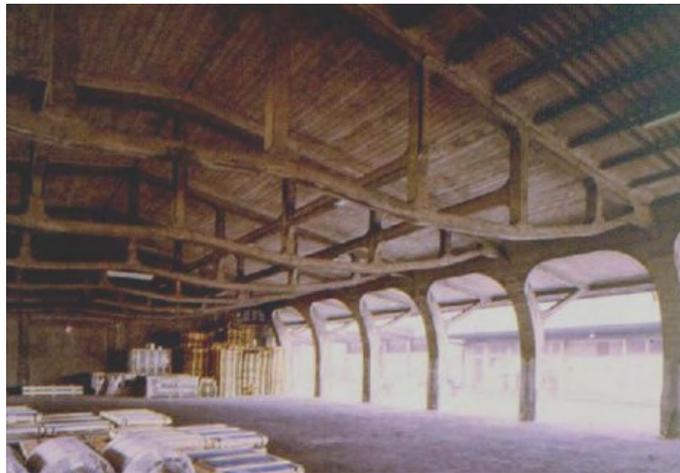


Fig. 2.29: Bodega Magazzini Generali, de Robert Maillart, Chiasso, Suiza, 1924.

En 1924 Maillart diseña un original techo para un cobertizo de una bodega en Chiasso, Suiza (ver Fig. 2.29). Está compuesto de vigas armadas, las cuales siguen la forma del diagrama de momento, con esto los elementos se vuelven muy eficientes y delgados.

**Bóvedas de concreto: Pier Luigi Nervi, Antonio Gaudí, Eduardo Torroja, Félix Candela.**

El italiano Pier Luigi Nervi (1891-1979) se graduó de ingeniero civil en Bologna en 1913, diseñó superficies con nervaduras, las cuales fueron reinterpretaciones de antiguas bóvedas de mampostería con nervaduras, heredadas de la cultura histórica y artística italiana.

Fue un ingeniero que centró su carrera entera en la estética. Empezó a diseñar al mismo tiempo que Maillart hizo sus grandes trabajos. Vio que la estructura podía ser arte cuando ella surge de la correcta forma, de la práctica constructiva cuidadosa y una intención estética conciente.

Nervi buscó siempre la economía. Al referirse a sus experiencias como constructor manifestó: “me formaron el hábito de buscar soluciones que fueran intrínsecamente y constructivamente las más económicas” Por ejemplo, ahorró materiales al prefabricar las nervaduras como armaduras de concreto. La mayoría de sus grandes estructuras de concreto fueron las ganadoras de competiciones de costos. No hubiera tendido oportunidad de construir si sus diseños no hubieran sido los más económicos.

Al mismo tiempo, esta economía estaba íntimamente conectada con la búsqueda del “método de llevar las cargas muertas y vivas hacia las fundaciones... con el mínimo uso de materiales.” Además de la economía de costo y eficiencia de materiales también se preocupó por la estética: “Todavía recuerdo los largos y pacientes esfuerzos por encontrar un acuerdo entre las necesidades estáticas... y el deseo de obtener algo que para mí tuviera una apariencia satisfactoria.” Continuamente enfatizaba que en diseño estructural, el estudio de las cargas externas y las fuerzas internas resistentes (la estática) “ofrecen una definida dirección,... el detallado de las formas y su interrelación es una escogencia personal.”

Al igual que lo hizo Maillart con sus primeros puentes, Nervi aprendió del comportamiento a escala natural (medía meticulosamente las deformaciones de sus obras) y así fue estimulado a desarrollar nuevas formas.

En 1957 Nervi diseñó y construyó el Pequeño Palacio de los Deportes en Roma (Ver Fig. 2.5), con un espacio cubierto de 60 m de luz. El doble sistema de nervaduras diagonales crea un patrón decorativo salido de una idea de diseño técnica.

La idea está relacionada con el problema técnico de los domos de cáscara delgada: el pandeo. Es posible construir inmensos domos sin nervaduras excepcionalmente delgados, en los cuales los esfuerzos de compresión internos sean bajos. Pero hasta los pequeños esfuerzos pueden causar deformaciones, las cuales en una superficie muy delgada pueden cambiar la geometría suficientemente como pandear la bóveda y colapsar. El pandeo es combatido por el aumento de la rigidez y no por aumentar la masa.

Nervi hizo más rígido el domo de su Pequeño Palacio por el uso de nervaduras. El material no es adicionado, es meramente redistribuido, y esa redistribución puede ser hecha de muchas maneras, lo cual abre la posibilidad para un estilo estético personal. Con esta obra Nervi alcanzó un punto alto en el arte estructural de la construcción en concreto, y lo alcanzó al aprender de sus obras pasadas y por procurar siempre belleza y economía.

En muchos edificios de Nervi hay colaboración con arquitectos, pero el constante desarrollo en estilo es enteramente suyo. Las obras de Nervi son más importantes cuando los requerimientos arquitectónicos convergen más cercanamente con los requerimientos estructurales más puros.

Por el contrario, donde hay una complejidad de funciones, entonces es comprometido el arte de Nervi. Por ejemplo, el Pequeño Palacio de los Deportes es casi una estructura pura (la forma y la estructura son la misma). Por el contrario, para el Gran Palacio de los Deportes (ver Fig 2.30) para las olimpiadas de Roma de 1960, de 100 m de luz, es tan grande que sus funciones

auxiliares producen edificaciones complejas circundantes, que destruyen la expresión estructural exterior y parcialmente interrumpe la lógica visual de la estructura interior también.

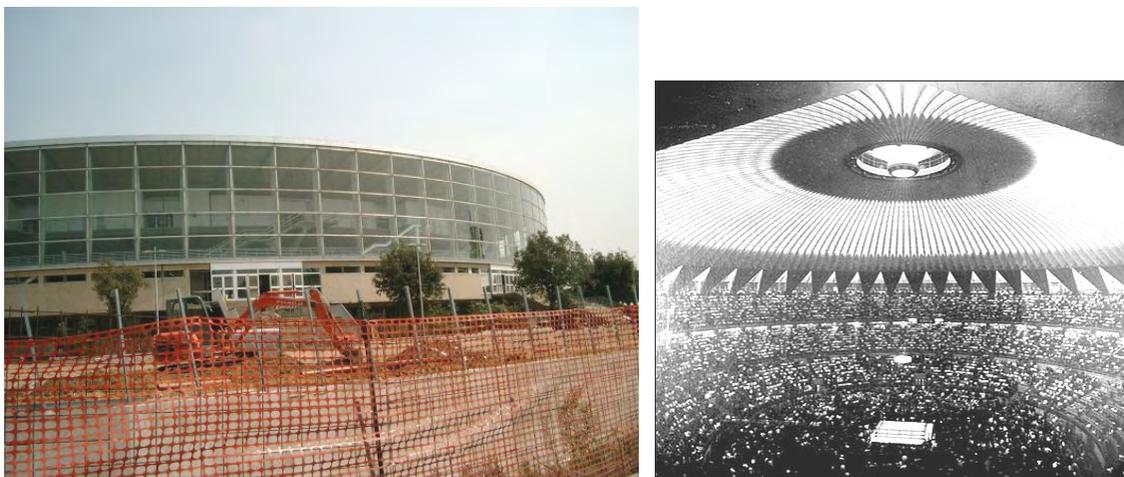


Fig. 2.30: Gran Palacio de los Deportes, de Pier Luigi Nervi, Roma, 1960.

Los diseñadores españoles expresaron visualmente la idea estructural de delgadez al enfatizar superficies suaves sin nervaduras a través de nuevas formas. Los tres diseñadores que más caracterizan la moderna escuela española son: Antonio Gaudí (1852-1926), Eduardo Torroja (1899-1961) y Félix Candela (1910-1997).

El arquitecto catalán Gaudí buscó nuevas formas que coincidieran con estructuras racionales. Para Gaudí la forma no seguía la estructura y construcción, sino que eran una misma. Torroja, un profesor de ingeniería y diseñador mostró como la identidad de forma y estructura alcanzada por Gaudí en mampostería puede ser realizada con delgadas bóvedas de concreto. Candela, entrenado en Madrid como arquitecto pero con habilidades en análisis matemático, siguió a Gaudí en su búsqueda de nuevas formas y a Torroja en su creencia en los nuevos materiales y desarrolló una fascinación por las bóvedas delgadas.

En dos de las casas del parque Güell, en Barcelona, Gaudí usó techos con forma de paraboloides hiperbólicos (silla de montar). Debido a las curvaturas opuestas de la silla de montar, un techo

con esa forma es más rígido, con menos tendencia al pandeo y por lo tanto puede ser más delgado que un domo, sin necesitar nervaduras.

Otra ventaja de la silla de montar es que tiene la virtud de que su superficie contiene líneas rectas, lo que lo hace fácil de construir, especialmente en concreto como lo demostró Candela después.



Fig. 2.31: Hipódromo de La Zarzuela, de Eduardo Torroja, Madrid, 1935.

Para el techo del Hipódromo de la Zarzuela (ver Fig. 2.31), en Madrid, 1935, Torroja escogió una superficie doblemente curvada, con una forma hiperbólica no diferente de la de Gaudí y sin nervaduras. Este techo tiene un voladizo principal de 12.8 m, tiene solamente 5 cm de espesor en el extremo libre, lo que le da una apariencia extraordinariamente ligera. El espesor incrementa hasta 14 cm en la línea de los soportes principales, los cuales tienen una separación de 5 m. Este cascarón es muy resistente, el constructor hizo un modelo a escala natural de una sección del techo y soportó tres veces la carga de diseño.

Félix Candela llegó a México en 1939. Fue fuertemente influenciado por las obras y escritos de Robert Maillart, especialmente en el sentido de confiar más en su experiencia como constructor que en las teorías matemáticas de comportamiento estructural.



Fig. 2.32: Pabellón de Rayos Cósmicos, de Félix Candela, México, 1951.

El pabellón de Rayos Cósmicos (ver Fig. 2.32) de 1951, en México, fue la primera gran estructura de Candela. El techo de este laboratorio tenía que ser delgado para no bloquear los rayos, por lo que le dio una doble curvatura e hizo la bóveda muy delgada: 1.5 cm de espesor 10.75 m de luz. Con este trabajo Candela llamó inmediatamente la atención del mundo de la construcción, ganó muchos contratos y fue capaz de tratar de variar otros tipos de bóvedas y ganó invaluable experiencia en diseño y construcción.

Como todos los artistas estructurales, Candela tuvo dificultades con algunas de sus obras, de las cuales aprendió y mejoró. Pero todo su éxito como diseñador llegó principalmente de su central motivación estética y del reconocimiento de que las predicciones adecuadas del comportamiento

estructural solo puede llegar de las observaciones de estructura a escala natural en servicio. Candela también buscó la economía.

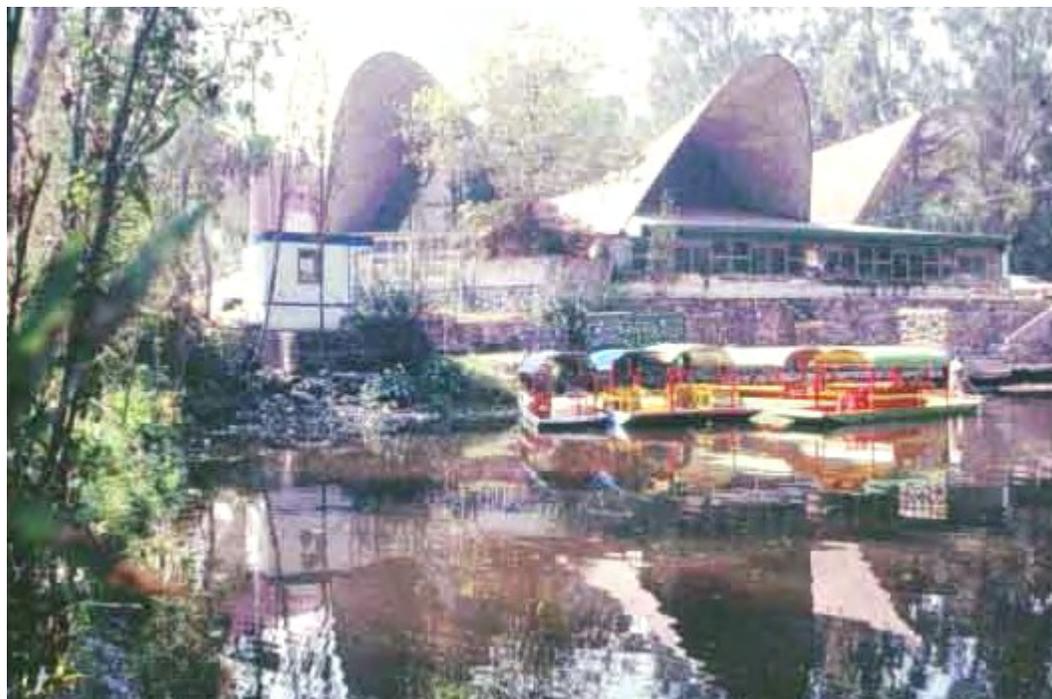


Fig. 2.33: Restaurante Los Manantiales, de Félix Candela, México, 1958.

El deseo por la delgadez, su experiencia madura y contratos competitivos lo condujeron a formas nuevas y originales. Un ejemplo de sus muchas bóvedas delgadas, que sirve para ilustrar esto, es el techo del restaurante Los Manantiales, en Xochimilco (ver Fig. 2.33), de 1958. Este techo contiene ocho bóvedas con forma de paraboloides hiperbólicos, arregladas en una planta circular de 43 m de diámetro. En este techo la forma y la estructura son una. El espesor es de 4.2 cm, la delgadez es expresada tan poderosamente que es difícil creer que esté construida en concreto. No tiene nervaduras ni discontinuidades, Candela consideró este como su mejor trabajo, e influyó en la siguiente generación de artistas estructurales como Heinz Isler.

## **Segunda escuela de Chicago: Fazlur Khan**

Fazlur Khan (1950-1982) nació en Paquistán, se graduó en ingeniería en 1950, recibió el doctorado en ingeniería estructural en 1955 e inmediatamente empezó a trabajar en la firma Skidmore, Owings y Merrill (SOM) de Chicago.

Khan diseñó algunos de los edificios más altos del mundo. Entre ellos el centro John Hancock y la Torre Sears, ambos en Chicago. Tuvo una gran comprensión técnica acerca de las estructuras, aunque esta no fue su motivación primaria. Así lo manifestó: “el impacto social y visual de edificios es realmente mi motivación para buscar nuevos sistemas estructurales,” y para alcanzar el impacto visual correcto “una natural resistencia del edificio debe ser expresada.” Con su fecunda imaginación creó nuevas formas para edificios.

Los rascacielos inevitablemente tienen un uso complejo, en la actualidad hay muchos de ellos que no son arte estructural. Sin embargo, en algunos ha sido posible la expresión estructural. Khan diseñó rascacielos donde la búsqueda de solución a los problemas estructurales lo condujo a verdaderas obras de arte estructural. En problemas tales como cargas laterales (viento), la reducción del espacio de piso conforme el edificio se vuelve más alto, la necesidad de abrir plazas en la planta baja, la desigual distribución de cargas gravitacionales en muros exteriores, etc., Khan logró expresar con su estructura la solución particular al problema dado.

Por ejemplo, en las torres de puentes de suspensión la carga principal es la componente vertical en el apoyo del cable sobre la parte superior de la torre. Esta carga concentrada crea grandes y constantes cargas verticales a lo largo de toda la altura de la torre; mientras que la carga del peso propio de la torre en sí es menos importante. Es diferente el caso de edificios, el peso propio sí es importante, la carga vertical es cero en la parte superior y se incrementa gradualmente hasta la base. De aquí que conviene disminuir el área de las plantas superiores, con el fin de disminuir la carga acumulada en la base.



Fig. 2.34: Torre Sears, de Fazlur Khan, Chicago, 1974.

Como solución a este problema Khan, en su diseño de la torre Sears (ver Fig. 2.34) utilizó un “atado” de 9 tubos cuadrados en planta (23 m de lado) con diferentes alturas: dos tubos llegan hasta el piso 50, otros dos alcanzan hasta el piso 66, tres más terminan en el piso 90 y los últimos dos tienen toda la altura del rascacielos. Este edificio de 1974, de 110 pisos, con una altura de 443.5 m, fue el más alto del mundo hasta 1998. Con esta solución se logra la disminución del área en planta del edificio con la altura; por otra parte, esta variedad de planos en diferentes posiciones y direcciones ayuda a disminuir los efectos de viento sobre la estructura; además el edificio tiene una fachada diferente desde cualquier punto de vista, lo que le da un gran interés visual a lo lejos, cuando no se diferencia el metal y el vidrio.



Fig. 2.35: Centro John Hancock, de Fazlur Khan, Chicago, 1970.

El centro John Hancock de Chicago (ver Fig. 2.35), 1970, de 100 pisos y 344 m de altura; es otra solución donde se logra una gran expresión a un problema estructural. Khan diseñó este edificio con arriostres diagonales para crear una estructura rígida exterior y así crear una forma de tubo, la cual toma las cargas más eficientemente.

La eficiencia del tubo deriva del hecho de que los muros exteriores toman la mayor parte de las cargas gravitacionales verticales y toda la carga horizontal de viento. La forma es especialmente eficiente porque las diagonales atan las columnas y así distribuyen las cargas verticales equitativamente entre ellas. Por lo cual estas pueden tener dimensiones iguales, esto resulta en una considerable reducción en su construcción y costos.

Esta forma eficiente disminuye la cantidad de columnas interiores y crea grandes espacios. Por lo tanto, esta estructura de tubo provee, con relativamente poco material, alta resistencia y rigidez. Así, se puede decir que la idea de osar nuevas formas que expresen estructuras llegó naturalmente de diseñadores que vivían y trabajaban en Chicago.

## **2.5. Santiago Calatrava Valls.**

Santiago Calatrava Valls es el más reciente de los artistas estructurales. Su obra comienza en la década de 1980. Como sección final de este capítulo, se quieren investigar los procedimientos de diseño de este ingeniero y arquitecto español. Este diseñador es reconocido a nivel mundial porque posee un número importante de obras creativas y de gran belleza.

### **2.5.1. Datos biográficos.**

Santiago Calatrava nació en 1951, creció en un pequeño pueblo cerca de la ciudad de Valencia, España. Alexander Tzonis (Ref. 31) apunta que Santiago Calatrava pasó horas en este pueblo rural observando obsesivamente la naturaleza, dibujando y diseñando juegos de niños imaginarios que envolvían la construcción de artefactos voladores. También, sus visitas frecuentes a la ciudad le impartieron un fuerte sentido de aventura humana y una apreciación de la creciente tecnología moderna, el flujo del tiempo, la fuerza de cambio y el poder del movimiento.

A la edad de ocho años asistió a clases en la Escuela de Artes y Oficios de Valencia. A los catorce años fue enviado a París a aprender el idioma francés, y a los diecisiete a Zurich, Suiza, a aprender alemán. Estos viajes enriquecieron su experiencia cultural y de diseño.

Suplementó sus cursos de secundaria con lecturas extracurriculares que incluyó un libro de geometría descriptiva y un folleto del arquitecto francés Le Corbusier. Se asignaba a sí mismo problemas del libro de geometría y entonces los aplicaba tratando de generar las formas de las obras de Le Corbusier.

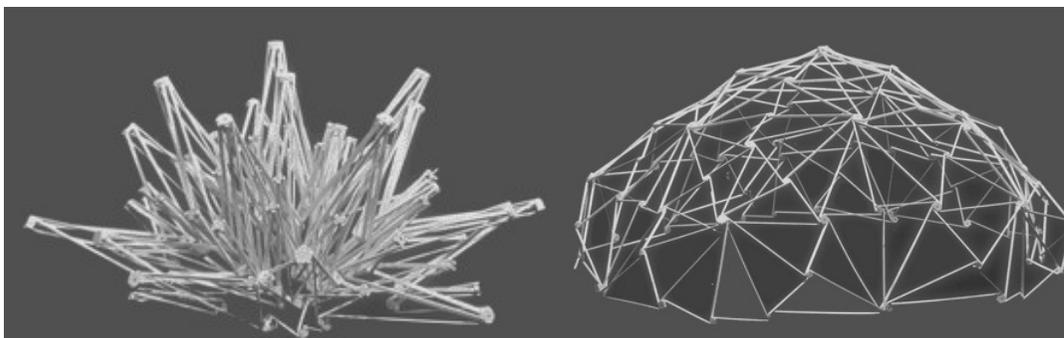


Fig. 2.36: Armadura tridimensional desplegable.

En 1975 Calatrava se graduó de la Escuela de Arquitectura de Valencia y partió a Zurich a estudiar ingeniería civil en el Instituto Federal Suizo de Tecnología. Su tesis doctoral (1981) fue un estudio interdisciplinario acerca de la plegabilidad de armaduras espaciales (ver Fig. 2.36); en la cual trató de generar sistemáticamente y enumerar todas las posibles maneras que armaduras tridimensionales, compuestas de varillas y uniones móviles, podían ser plegadas. Esta investigación plantó las semillas para su crecimiento profesional.

En el mismo año de 1981 fundó su oficina en Zurich y empezó así su prolífica carrera.

### **2.5.2. El movimiento.**

Santiago Calatrava desarrolló una inusual morfología que traslapó la estructura y el movimiento.

En la búsqueda por desarrollar una morfología de movimiento, Calatrava saca un significado dramático de la acción acrobática de los cuerpos -los bailarines que con sus gestos desafían la gravedad- para capturar la forma de cambio y sumergirse en un mundo en flujo.

Calatrava introduce el movimiento en sus obras; en ellas el movimiento juega un papel a) funcional o b) simbólico. Las partes del proyecto se mueven o ayudan a elementos que se mueven (ver Fig. 2.37); o transmiten la idea de movimiento figurativamente, partes de la estructura que implícitamente representan movimiento (ver Fig. 2.38).



Fig. 2.37: Tres posiciones de la estructura plegable del planetario del Centro de Ciencia de Valencia, España. Con su reflejo en el agua asemeja un ojo.



Fig. 2.38: Puente del Puente del Alamillo, Sevilla, España, 1992. El mástil inclinado da la idea de movimiento simbólico.

Esta reformulación de elementos estructurales básicos en términos del movimiento coloca a Calatrava junto a un grupo significativo históricamente de arquitectos, ingenieros, y artistas quienes han tratado de incorporar el tiempo, el proceso y la transformación en sus diseños.

### **2.5.3. Síntesis y optimización.**

Su estrategia básica de diseño es hacer la búsqueda para soluciones óptimas, la disciplina de la investigación crítica, el espíritu de experimentación y trabajo de aventura juntos en el mismo esquema.

Sus proyectos tienen un alto nivel de síntesis; con una excelente comprensión de múltiples dominios y la competencia cognitiva para crear. Su éxito se debe a la integración de sus muchas destrezas y talentos que utiliza todos en sus proyectos. Calatrava es capaz de abarcar muchos tipos de conocimiento y una inventiva sin límites.

Sus primeros proyectos son una prueba con diseños óptimos en el uso de los materiales y la geometría. Posteriormente, estas ideas se expanden para atacar requerimientos y medio ambiente más complejos. Sus estrategias de diseño desarrollan siempre componentes eficientes y efectivos.

Calatrava busca diseños técnicamente óptimos, donde maximiza beneficios y minimiza los costos. Lleva sus esquemas hasta el límite extremo. Teniendo los diseños dentro de estos límites conduce a la ineficiencia. Empujándolos más allá de esta frontera o punto crítico conduce al colapso. Se debe encontrar, entonces, el estrecho lugar entre la ineficiencia y el colapso para alcanzar la optimización. Calatrava logra este estado óptimo a nivel técnico, mientras que al mismo tiempo alcanza un poderoso estado estético. Estos conceptos que menciona Tzonis coinciden con los tres ideales del diseño estructural que apunta el profesor Billington: Eficiencia, Economía y Estética.

#### 2.5.4. Estrategias de diseño.

A pesar de que la obra de Calatrava es bastante diversa, esta emerge de un limitado número de estrategias básicas de diseño que pueden ser remontadas a sus primeros proyectos. De estas, muchas de las ideas y temas espaciales y estructurales de sus posteriores obras son originadas. Es común a todos esos primeros proyectos el imperativo de diseñar resolviendo problemas a través de la optimización; es decir, minimizando recursos y maximizando el desempeño. Calatrava alcanza la optimización en parte por el seguimiento de dos principales estrategias de diseño: **perfilando** elementos de una estructura y **diferenciando** elementos en funciones especializadas y materiales.

El **perfilado** consiste en definir el contorno de un miembro estructural tratando de descubrir la forma adecuada para dar a un objeto igual resistencia en cada punto. Así la sección transversal de un miembro cambia minuciosamente a lo largo de ese miembro para evitar o minimizar la abrupta transferencia de fuerzas que pueda causar la falla estructural. Las partes planas se encuentran en una suave y continua forma curva, y todas las partes se ensanchan donde cambian de dirección. Como resultado, las partes son reforzadas en sus puntos más débiles, mientras que permiten que sus extremos se estrechen con elegancia. De hecho, la ideal silueta sigue el contorno del diagrama de momento flexionante y la curva de deflexión. Así, la torsión, el pandeo y la deflexión delinean el perfil de elementos con abdomen hinchado y minúsculas extremidades tan típicas en la obra de Calatrava.

La **diferenciación** consiste en dividir una estructura en muchos miembros separados, cada uno desempeñando una función diferente y en cada caso usando el material que mejor se ajuste a la función asignada al miembro. Un miembro estructural que trabaje a la vez en tensión y compresión es cortado en dos, con el miembro en compresión diseñado con un material adecuado a esa tarea y el miembro en tensión en otro.

Ambos miembros sostienen desempeño óptimo en un altamente articulado y todavía integrado cuerpo. También el movimiento es expresado en la configuración de la estructura.

Con cada nuevo proyecto que Calatrava diseña comienzan a surgir patrones de formas discernibles: por un lado, la variación de la sección transversal del perfil de una columna o viga acomodándose a las cambiantes formas de carga; por otro lado, la articulación de miembros individuales de diferentes materiales amoldándose a su función estructural.

Dos temas de configuraciones estructurales complejas también surgen de sus primeros proyectos, los cuales son motivos que son repetidos y elaborados en todas las obras posteriores de Calatrava. Uno presenta un inusual nuevo perfil: una columna inclinada y aparentemente caída es salvada de su destino al plegar el miembro en la dirección opuesta para contrabalancear o, por otro lado, por la adición a la columna de algún elemento auxiliar que soporte o suspenda la columna primaria. El efecto es acentuado por la concentración de cargas hasta un punto crítico, secciones delgadas hasta el extremo y el levantamiento de líneas inclinadas hasta un grado crítico; la estructura es así vista como suspendida entre permanencia estoica y violenta desintegración. Entre estos dos estados se encuentra la ilusión de movimiento. Ejemplos de obras donde se muestra la columna inclinada típica de Calatrava aparecen en las Figs. 2.39 y 2.40.



Fig. 2.39: Estación de Lucerna, Suiza.

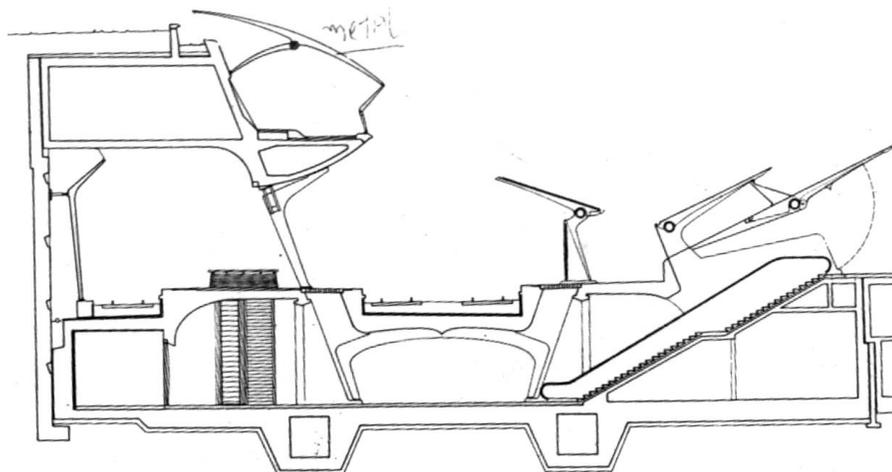


Fig. 2.40: Estación ferroviaria de Estadelhofen, Zurich, Suiza.

### 2.5.5. Generación de la forma.

El perfilado y la diferenciación son aplicados solo hasta **después** de que Calatrava ha concebido la configuración del esquema, es decir, **la composición general** de la estructura o la disposición y la articulación de los componentes. Esta temprana etapa es una **fase conceptual** decisiva en el proceso de diseño; es una fase rodeada por un aura de misterio; aquí pueden ocurrir los más importantes avances, pero también muchos serios errores. Es aquí donde se ve con más claridad la universalidad de su pensamiento y su capacidad de sintetizar.

Para Alexander Tzonis (Ref. 31) hay dos maneras de inventar un esquema de diseño: la **analítica** y la **analógica**. Y afirma que los ingenieros prefieren la primera y los arquitectos la segunda; Calatrava emplea ambas. El análisis y la analogía llegaron a ser dos complementos en la poética del movimiento de Calatrava.

Es conveniente recordar aquí la experiencia del también ingeniero y artista estructural español Eduardo Torroja con respecto a este tema. Enfatizó que la forma estructural del hipódromo de La Zarzuela no era ni puramente racional ni puramente imaginativo “pero más bien ambos a la vez. La imaginación sola no podría haber alcanzado tal decisión sin la ayuda de la razón, ni podría un proceso de deducción, avanzando por sucesivos ciclos de refinamiento, haber sido tan lógicos y determinados como para conducir inevitablemente a ello.”

Los diseñadores no solamente dependen del análisis (fruto del lado izquierdo del cerebro humano). En muchos de los casos los diseños creativos son motivados por la imaginación, la intuición o la perspicacia (lado derecho del cerebro humano). Estos términos indican el acto de “mirar por dentro” y revelan muy poco acerca de la complejidad del pensamiento que genera los diseños originales o acerca de la naturaleza de la idea misteriosa que da nacimiento a las formas de cosas desconocidas.

Una analogía es una relación de semejanza entre cosas distintas. Una metáfora es una figura por la cual se transporta el sentido de una palabra a otra mediante una comparación oculta.

Al observar la obra de Calatrava y al considerar sus libretas llenos de dibujos del cuerpo humano –solo o en grupos, con gestos vagos o cuidadosamente detallados y combinados con puentes, o edificios o animales- se puede ver el papel que tales precedentes han jugado como fuente de analogías y metáforas en sus proyectos de ingeniería y arquitectura. Posiciones, gestos, perfiles, esqueletos y músculos, órganos, piel, alas y cuernos son constantemente recordados, reinterpretados y proyectados en los esquemas de sus proyectos.

La clave en esta interacción del **análisis** y la **analogía** está en la actuación recíproca entre **memoria** e **invención**. Este principio de diseño es explotado consistentemente por Calatrava. Como el análisis y la analogía, la experiencia pasada y la invención son complementarias. La memoria incita a la invención y la invención invita a la memoria.

Lo nuevo no llega de ninguna parte tal y como han afirmado a menudo los vanguardistas. De hecho, los diseños sin precedentes a menudo emergen de un profundo entendimiento de la historia. El mejor aliado de la invención es la memoria.

Los dibujos de Calatrava están basados en una gama de precedentes históricos de arte. Sus dibujos del cuerpo humano en movimiento son reminiscencias de los dibujos de bailarinas de Degas y las esculturas de Rodin.

#### **2.5.6. Inspiración y estudios plásticos.**

Una fuente de interés que Calatrava enfatiza es la naturaleza. Los esquemas de Calatrava surgen de la naturaleza. Señala que la observación muy simple de la naturaleza, significa observar de una manera franca y pura los objetos circundantes: árboles, pasto, flores o cualquier objeto natural.

Por ejemplo, de un grupo de bocetos de estudio, intentó tomar en un modelo inicial la estructura de un árbol y aplicarlo a la idea para un grupo de árboles usando acero y vidrio (ver Fig. 2.41). No se trataba de pensar en las cualidades específicas del objeto en sí mismo, sino más bien de un tipo de aproximación sistemática al objeto. Luego decidió hacerlos transformables, que cambiaran sus formas. Esta idea de los árboles fue incorporada después a un proyecto para la galería en la plaza BCE en Toronto, Canadá (ver Fig. 2.42).

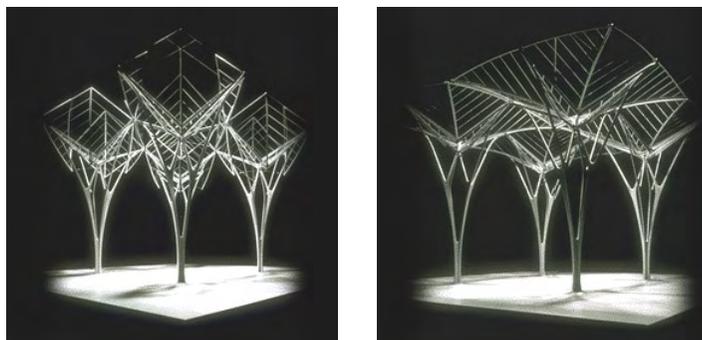


Fig. 2.41: Estudio basado en la forma de un árbol.



Fig. 2.42: Plaza BCE, Toronto, Canadá.

Una fuente muy poderosa de inspiración para Calatrava es la anatomía y la idea de observar en el cuerpo humano estructuras. La anatomía, la idea de la mano, de la mano abierta, la idea del ojo, la boca y el esqueleto, es una rica fuente de ideas e inspiración.

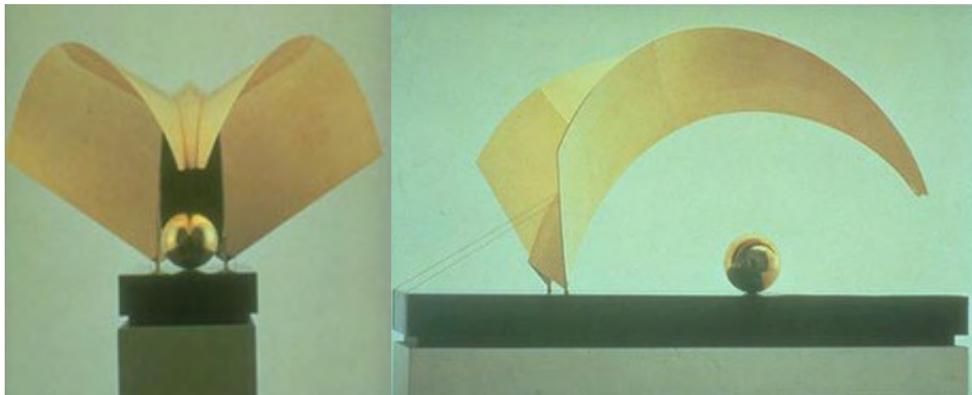


Fig. 2.43 (continuación): Estudio Plástico basado en la forma del ojo humano.



Fig. 2.44: Estación ferroviaria en el aeropuerto de Lyon, Francia, 1994.

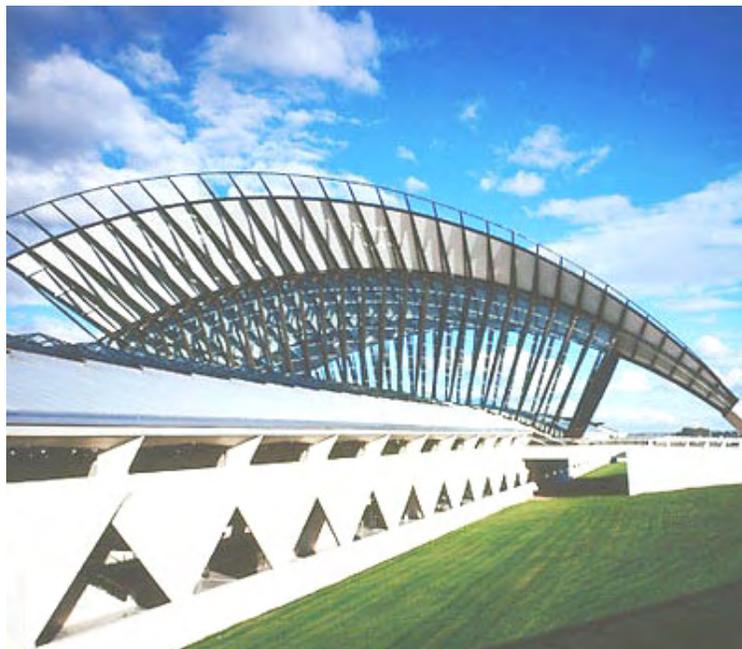


Fig. 2.44 (continuación): Estación ferroviaria en el aeropuerto de Lyon, Francia.

Por ejemplo, las alas de la estación de Lyon tomaron su geometría de bocetos y una escultura que fueron hechos previamente como un estudio plástico basado en el ojo humano (ver Figs. 2.43 y 2.44).

¿Cómo puede el cuerpo ser imaginado como un edificio? ¿Cómo puede dibujarse una analogía? Para Calatrava la respuesta se encuentra en otra serie de sus trabajos de arte: las esculturas, las cuales han sido tan importantes y tan numerosas como las figuras de sus bocetos.

Hechas de partes elementales, a menudo cubos y prismas, varillas, cables o superficies plegadas planas; las esculturas son el primer nivel del camino concreto por el cual Calatrava planea y enfrenta las formas y las ideas, enmarca los cuerpos como esquemas de diseño y comienza a pensar metafóricamente.

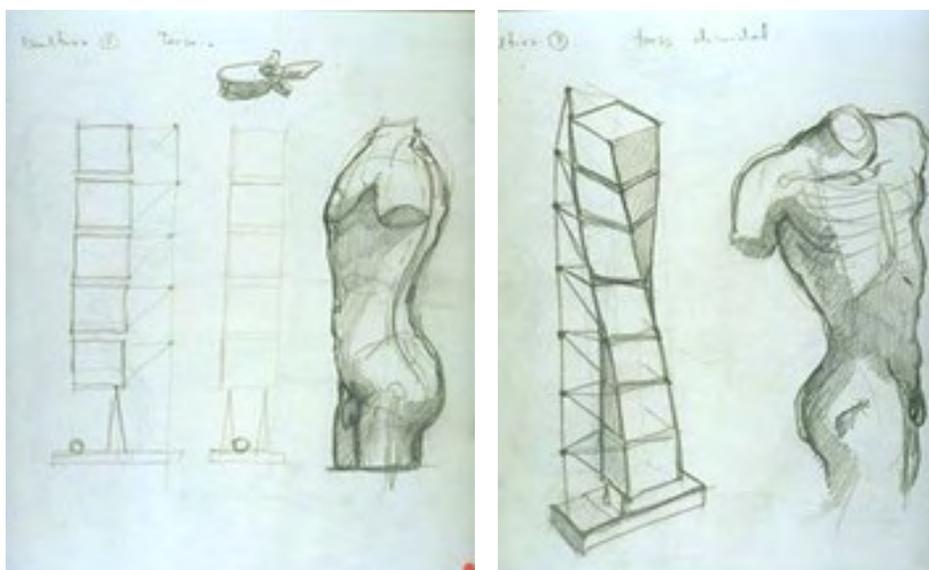


Fig. 2.45: Estudio plástico basado en la columna vertebral humana.

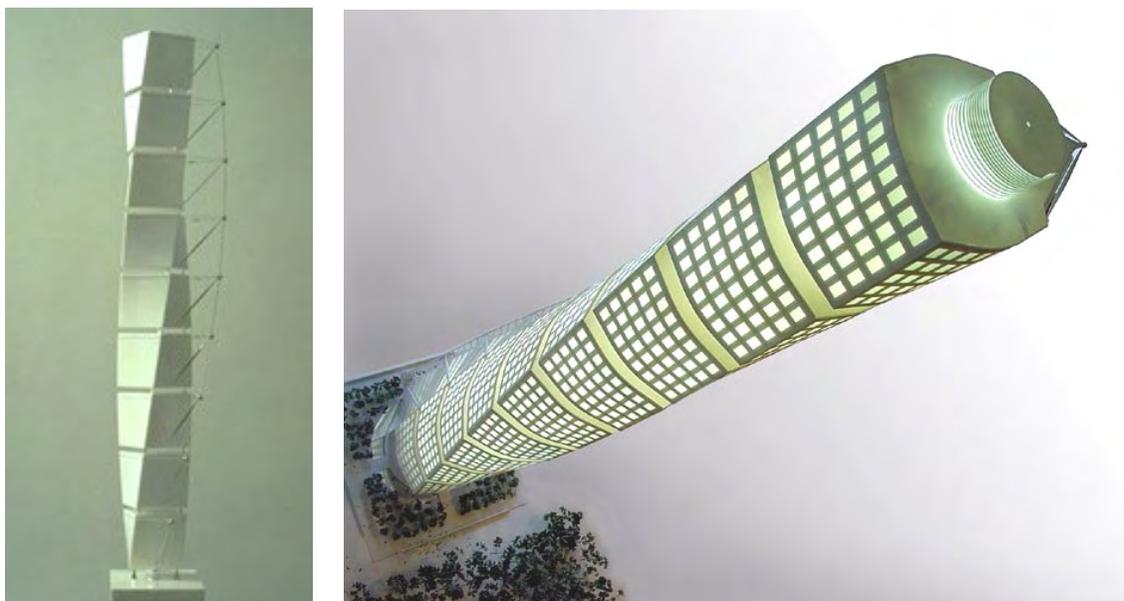


Fig. 2.46: Aplicación del estudio plástico de la columna vertebral humana en la génesis de la forma del edificio del Torso Rotado, Malmö, Suecia, actualmente en construcción.

Por ejemplo, la forma del puente del Alamillo, de Sevilla, España, 1992, comenzó con una serie de estudios plásticos. Primero se describió la columna vertebral humana ( ver Fig. 2.45) y cómo

se yergue. La columna está formada de vértebras que son representadas en las esculturas de una manera muy elemental como una serie de cubos.

Al girar los elementos, se le da forma a la columna de muchas maneras. Es importante ver como se retuerce la columna alrededor de un eje y como el movimiento se vuelve muy explícito (ver Fig. 2.45). Este estudio plástico de la columna vertebral humana fue la base en la génesis de la forma del edificio del Torso Rotado, en Malmö, Suecia, actualmente en construcción (ver Fig. 2.46).

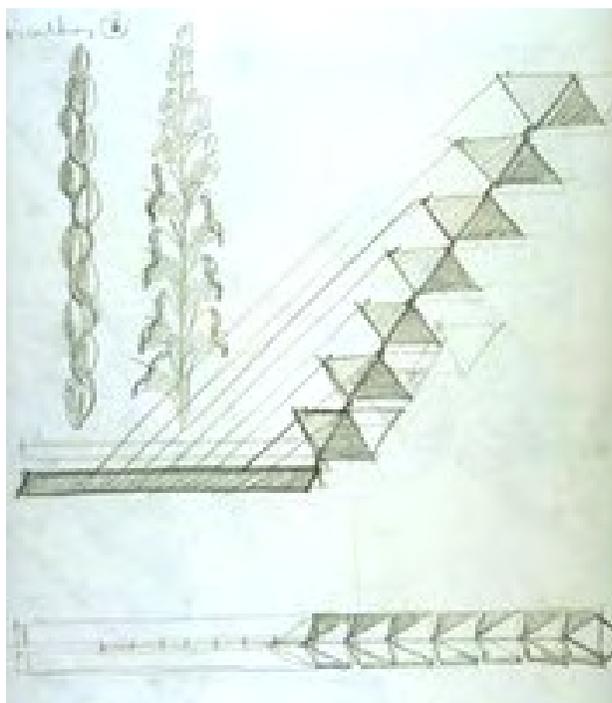


Fig. 2.47: Aplicación del estudio plástico de la columna en la génesis de la forma del puente del Alamillo.

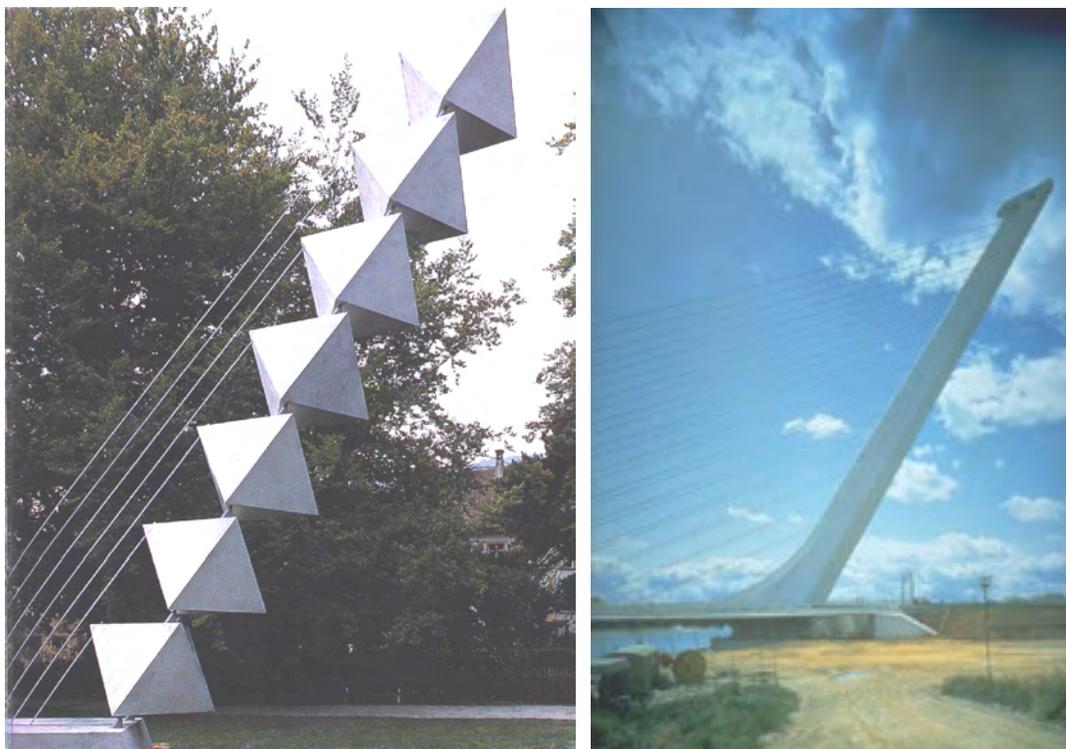


Fig. 2.47 (continuación): Aplicación del estudio plástico de la columna en la génesis de la forma del puente del Alamillo.

En algunos estudios posteriores, Calatrava cambió la geometría del cubo con la finalidad de hacer las esculturas más grandes. En este proyecto de 12 m de alto, intentó crear una forma más orgánica usó octaedros en lugar de cubos (ver Fig. 2.47). Una serie de estos siete octaedros de concreto, uno tras otro, se soporta por dos clavijas y un solo cable. Las siete piezas tienen como contrapeso dos piernas muy largas (ver Fig. 2.47). A esta escala la escultura es más que una forma abstracta; hay también un principio de construcción. Esta escultura se convirtió en la fuente de inspiración para el puente del Alamillo (ver Fig. 2.47).

Este estudio escultórico es un buen ejemplo de la generación de la forma del puente. Se empezó con un estudio muy puro y abstracto basado en la **analogía** del cuerpo humano y de relaciones anatómicas de peso y se evolucionó hacia un mayor problema en acero. Cuando se empieza a construir una escultura que tiene 12 metros de alto, los problemas de construcción empiezan. ¿Cómo sostener las cosas?, ¿Cómo escoger el material?; estas preguntas se vuelven críticas. Se

debe de tratar con concreto. Se debe de tratar con cables. Se debe de tratar con soportes y con tensiones, con transporte y con muchas otras cosas.



Fig. 2.48: Puente La Devesa, Ripoll, España.

El puente peatonal de La Devesa (ver Fig. 2.48) se encuentra en la ciudad de Ripoll, la cual está en la parte norte de Cataluña en un paisaje muy dramático de los Pirineos españoles. En este paisaje se construyó el puente para ligar la estación del tren con un vecindario residencial localizado al otro lado del río Ter. El área entre el puente y la frontera del vecindario fue también transformada en un parque con una plaza.

Este puente es un buen ejemplo de que cuando se quiere regenerar un sitio, los puentes son muy poderosos porque ellos introducen una buena razón para reestructurar el área de los alrededores y al hacerlo vuelven estas partes de la ciudad más habitables en lugar de perderlas.

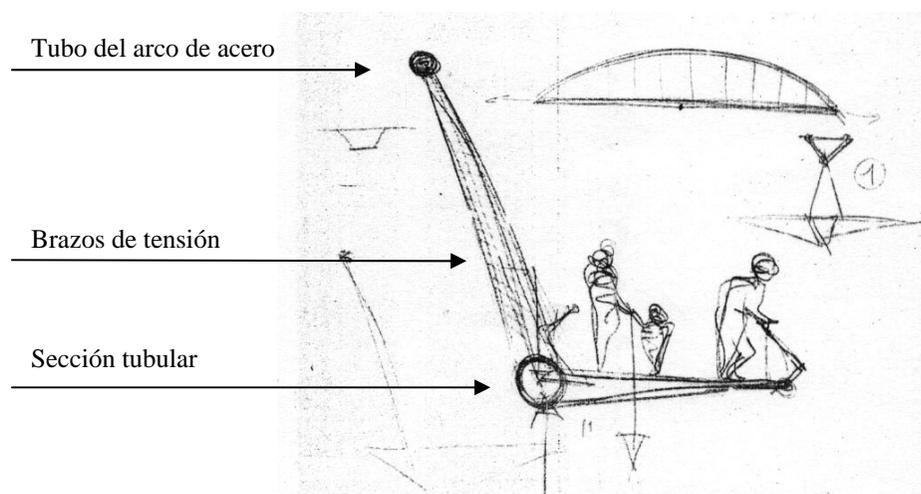


Fig. 2.49: Boceto de la sección del puente La Devesa, Ripoll, España.

La Devesa es un puente peatonal de arco de acero. Fue diseñado en 1989 y cubre una luz de 70 m. Tiene una asimetría muy audaz que explota el fenómeno de la torsión (ver Fig. 2.49). Debido a que el arco soportante es desviado hacia un lado del puente, el peso del puente y su carga crean un momento torsional en el punto de soporte. Este momento torsional es transferido a una sección tubular que recorre toda la longitud del puente y que conecta las nervaduras del tablero con el arco inclinado.

Los brazos de tensión de acero que se encuentran dentro del plano del arco de 6.5 m de profundidad toman las cargas del tablero. Como estas cargas causan deflexiones en el tablero y en los brazos de tensión, el ángulo del arco cambia y se mueve a una posición vertical. La rotación natural del tablero mueve los brazos de tensión a una posición que arriestra el plano del arco y **le da rigidez contra el pandeo**. El tubo de acero colecta la torsión y la reparte hacia los apoyos de los extremos.

Lo que es interesante en este tipo de puente es la torsión. En muchas de las secciones estándar de puentes de arco es vertical y así la rigidez y capacidad torsional que se tiene en la viga cajón que soporta el camino es principalmente desaprovechada porque se tiene solamente una carga unilateral.

Calatrava ha tratado de explorar en este tipo de puentes el fenómeno de la torsión. Cómo explotar la resistencia torsional del camino para crear una cierta asimetría en el puente que permita, por ejemplo, enfatizar la posición del puente en relación con la ciudad que lo rodea, o la dirección del agua o hasta la posición del sol.

Las obras de Calatrava realzan el paisaje como enormes organismos que crecen de él o viven dentro de él. Cuando las creaciones de Calatrava son puestas en olvidadas partes periféricas de una ciudad, traen esperanza y un renovado deseo.

Calatrava también ha investigado acerca de estructuras que pueden moverse. Construyó un pabellón para el estado de Kuwait para la feria mundial de Sevilla (ver Figs. 2.50 a 2.52). Fue hecho usando una serie de 17 medios arcos de madera de 25 m de largo que pueden abrirse. Esta estructura cubre una terraza de piso de 525 m<sup>2</sup>, la cual está hecha de mármol translúcido. Debajo de esta terraza está la parte interior del pabellón. Durante el día la luz del sol se filtra a través del mármol para iluminar el espacio interior.

Los elementos de techo están soportados por miembros de concreto y cada uno de ellos puede ser activado por un motor individual de tal manera que muy lentamente todo el techo se abre y transforma. Debido a que los elementos son independientes, se pueden controlar las diferentes etapas de la apertura del techo.

En el movimiento del techo es posible imaginar las manos con sus dedos curvados hacia abajo, sirviendo para proteger el espacio; y entonces se abren las palmas hacia arriba, como clamando al cielo a voces (ver Fig. 2.52).

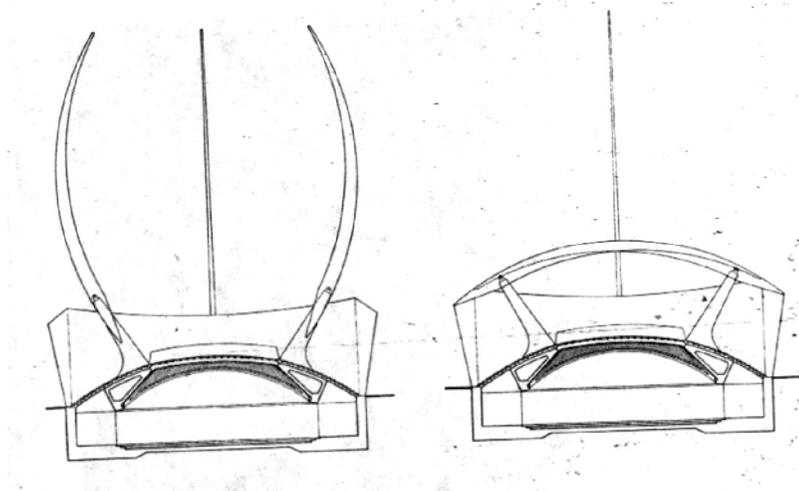


Fig. 2.50: Secciones del pabellón de Kuwait, Sevilla, España.

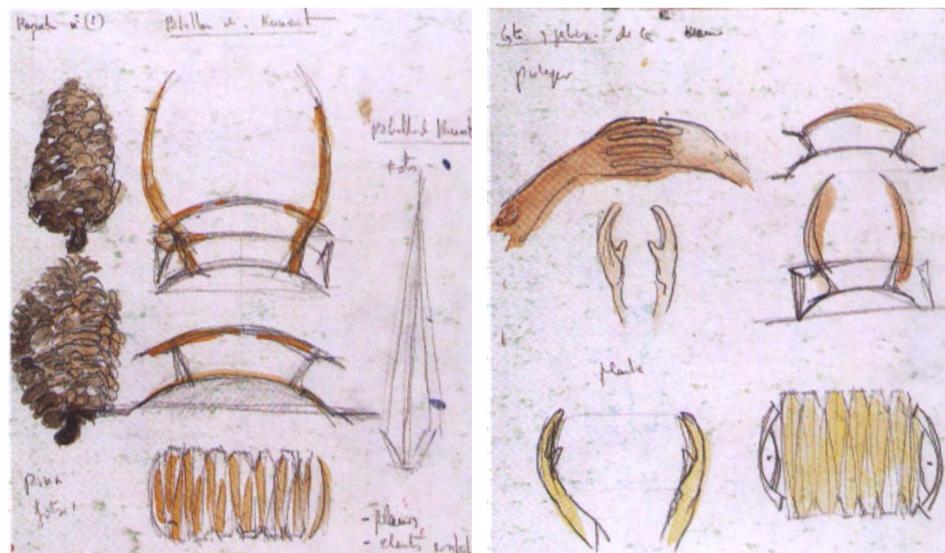


Fig. 2.51: Estudio plástico del pabellón de Kuwait, Sevilla, España.

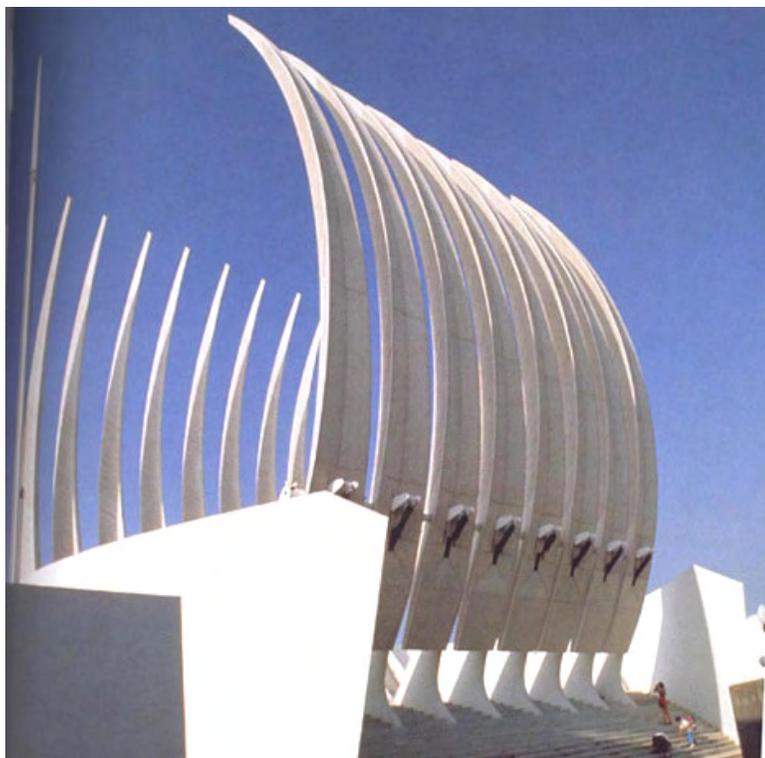


Fig. 2.52: Pabellón de Kuwait, Sevilla, España.

El Museo de Arte de Milwaukee, Wisconsin, Estados Unidos, obtuvo el “Premio a la Estructura más Sobresaliente” del año 2004 por la Asociación Internacional de Puentes e Ingeniería Estructural, IABSE por sus siglas en inglés.

Este premio reconoce la más extraordinaria, innovadora, creativa y estimulante estructura finalizada en los últimos años. El Museo de Arte de Milwaukee es un museo en expansión, que combina arte, arquitectura dramática y una estructura complementaria que figura una pantalla solar o “brise soleil” que se abre (ver Fig. 2.53) y cierra (ver Fig. 2.54) como una extraordinaria escultura en movimiento que además provee sombra al interior del museo a lo largo del día.

Esta obra maestra es un anexo al museo existente; el complejo de la edificación incluye formas inusuales de concreto y acero, bóvedas de concreto en voladizo que llegan a los límites del material y un extraordinario puente atirantado. Su característica distintiva el techo alado móvil

de 110 ton, cuya envergadura se abre y se cierra en la parte superior de del Pabellón Quadracci, de acero y vidrio, todo en un poco más de 3 minutos.



Fig. 2.53: Pabellón Quadracci, del Museo de Arte de Milwaukee, Wisconsin, Estados Unidos, 2001. con techo desplegado.

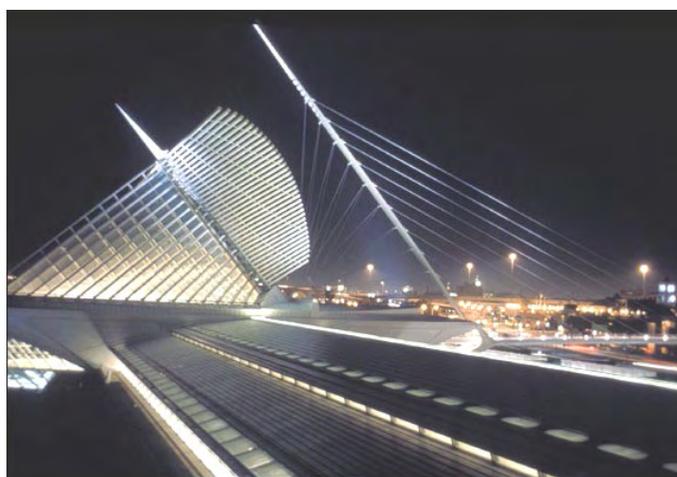


Fig. 2.54: Pabellón Quadracci, del Museo de Arte de Milwaukee, Wisconsin, Estados Unidos, 2001, con techo plegado y desplegado.

Este diseño resalta su estructura por el ingenioso uso de fuerzas que se contrabalancean y el uso de formas estructurales clásicas. El Pabellón Quadracci fue concebido como una obra de arte dentro de la cual residen obras de arte. Fue construido a orillas del lago Michigan; su forma recuerda las imágenes de botes y aves; y fácilmente complementa el entorno natural donde se encuentra.

Los trabajos de Calatrava y en general la historia del arte estructural, muestran sin lugar a dudas el sorprendente e ilimitado potencial creativo del ingeniero estructural. El ingeniero debe ser motivado para desarrollar esa creatividad que posee. Para Calatrava, en el ojo reside

“la facultad para ver y juzgar e inventar cosas. Hay dos clases de ojos: los dos ojos que tenemos al frente y los ojos de la mente que inventa y combina cosas”<sup>(5)</sup>.

## CAPÍTULO III

# DISEÑO Y COMPOSICIÓN ARTÍSTICA



*Composición  
artística:  
“Consiste en  
configurar,  
posicionar y  
relacionar  
elementos de la  
forma y el  
contexto, de tal  
manera que el  
conjunto  
resultante sea  
grato a los ojos  
del espectador y  
con poder  
expresivo.”*

## CAPÍTULO III

# DISEÑO Y COMPOSICIÓN ARTÍSTICA

### 3.1 Introducción.

Un objetivo primordial de este trabajo es dar una introducción de los temas de diseño y composición artística; esto para que el ingeniero pueda aplicarlos durante el proceso de diseño estructural. Se espera despertar el interés del lector y motivarlo para que descubra el potencial creativo de que puede ser capaz. Son conceptos de artes plásticas que le resultarán muy sencillos de comprender y aplicar.

Los conceptos que se señalan en este capítulo **son nuevos** para el ingeniero civil, no se enseñan en su formación académica. No obstante, distinguidos ingenieros civiles, en distintas épocas, han estudiado seriamente el problema estético del diseño de obras de ingeniería estructural y coinciden en que estos conceptos son una ayuda valiosa para abordar este problema (ver sección 1.4.1.)

La composición es practicada por diseñadores de arte como: dibujantes, pintores, escultores, fotógrafos, decoradores, grafistas, arquitectos, artistas estructurales, etc., es decir, por diseñadores de artes plásticas visuales (el artista estructural también es un diseñador plástico porque moldea, crea formas). Puede que algunos artistas no se hayan percatado, pero sí hicieron uso de la composición sin darse cuenta.

Como se mencionó en la sección 1.4. los principios de la composición artística son el resultado de muchos años en la búsqueda de explicación de por qué una obra es agradable.

Conviene recordar que la composición trata de conocimiento sensible; que intenta hacer inteligible un conocimiento que va más allá de lo racional. Por lo tanto, no se puede

pretender que la composición sea un conjunto de dogmas racionales exactos. Si se es capaz, estos principios se pueden alterar; pero su conocimiento es importante.

La comprensión de los conceptos de este capítulo resulta un salto significativo para el proceso de diseño estructural, por la naturaleza de este conocimiento. Como se mencionó en la sección 1.3.1., el conocimiento artístico y estético es un *conocimiento de tipo empírico o sensible*; mientras que el de las ciencias de la ingeniería es un *conocimiento de tipo racional o inteligible*.

Es importante que el ingeniero esté conciente de la naturaleza del conocimiento que toca este capítulo. Se tratará de explicar esto de la siguiente manera: La Dra. Betty Edwards manifiesta que:

“Los hemisferios cerebrales humanos tienen una asimetría funcional”, “ambos hemisferios reciben la misma información sensorial, aunque cada uno maneje la información de manera diferente...” “el hemisferio izquierdo analiza, abstrae,...verbaliza, hace declaraciones racionales basadas en la lógica... Por otra parte tenemos otra forma de conocimiento: la del hemisferio derecho. Con él podemos ver cosas que son imaginarias... Vemos cosas en el espacio y cómo se combinan las partes para formar el todo..., entendemos las metáforas, soñamos...”<sup>(6)</sup>.

La Dra. Edwards indica que “El cerebro derecho –el soñador, el artífice, el artista- se pierde casi totalmente en nuestro sistema educativo” las clases verbales y numéricas de los colegios no pueden enseñarnos el modo de conocimiento del hemisferio derecho del cerebro humano, este hemisferio no tiene muy buen control verbal, no se puede razonar con él. Para desarrollar esta parte del cerebro están las clases de arte, los talleres de escritura creativa, los cursos de música.

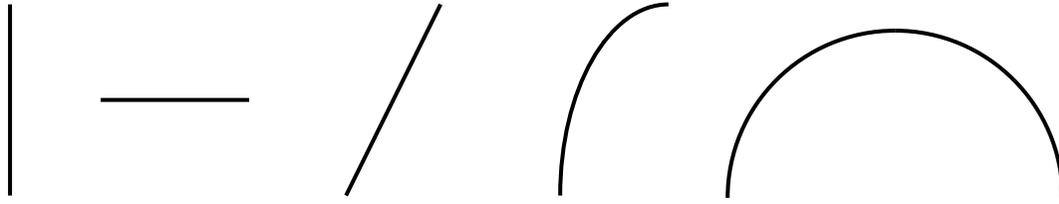


Fig. 3.1: La información de las diferentes líneas puede ser procesada de dos modos diferentes en el cerebro humano.

La Fig. 3.1 puede servir para ilustrar estas dos formas de conocimiento. En ella vemos una serie de líneas; de las cuales, por el **lado racional**, para cada una de ellas: se podría obtener una ecuación matemática en coordenadas rectangulares, estas ecuaciones se podrían derivar para encontrar la pendiente en cada punto, calcular la longitud de arco con una integral o resolver una ecuación diferencial para hallar el radio de curvatura en cada punto de ellas.

Pero, por el **lado no-racional**, la percepción de estas líneas sugieren *sensaciones* y *emociones*: las líneas rectas horizontales y verticales son, equilibradas, estáticas, monótonas; las líneas inclinadas o curvas expresan la idea de dinamismo y variedad, etc. Este capítulo trata de esta última forma de conocimiento.



a)



b)

Fig. 3.2: a) escultura de Umberto Boccioni, 1913, Futurismo Italiano, “*Formas únicas de continuidad en el espacio*”. b) Santiago Calatrava, estación de Lucerna, Suiza, 1989.

En la Fig. 3.2 se ilustran obras que *expresan la idea de dinamismo por medio del uso de líneas o esquemas inclinados*. En la Fig. 3.2a se muestra una fotografía de una reconocida escultura de Umberto Boccioni, de 1913, del Futurismo Italiano, titulada “*Formas únicas de continuidad en el espacio*”; en esta obra las formas inclinadas ayudan a dar un carácter visual dinámico a la composición (aparenta movimiento) a pesar de que se trata de una escultura netamente estática.

Este mismo recurso ha sido muy aprovechado por el artista estructural Santiago Calatrava, el cual, como se ha visto en el capítulo 2, ha desarrollado una poética del movimiento. En la Fig. 3.2b aparece una imagen de la estación de Lucerna, Suiza, 1989; con sus columnas y elementos *inclinados* dan la idea de *movimiento*, similar a la obra de Boccioni. Es posible percatarse que si se logra encontrar la **analogía** entre estas dos obras es porque se ha utilizado el lado derecho del cerebro.

Por otra parte, conviene recordar también que la composición artística no es en sí misma suficiente para generar la **forma estructural**. La idoneidad de la forma estructural está dada por el correcto equilibrio de todos los componentes del esquema conceptual del diseño estructural (sección 1.2.3.). A pesar de esto, los conceptos de este capítulo resultan muy útiles si se emplean adecuadamente.

### **3.2. ¿Qué es composición?**

Consiste en configurar, posicionar y relacionar elementos de tal manera que el conjunto resultante sea grato a los ojos del espectador. La composición también trata de relacionar los elementos con el contexto donde se encuentran y hasta con los espacios no ocupados por

ningún elemento. En resumen, la composición es una organización total figura-fondo (o forma-contexto) con la finalidad de obtener un resultado agradable y con poder expresivo.

### 3.2.1. El campo visual.

El campo visual consiste en aquella área que puede ser percibida por los ojos del espectador. Se está hablando entonces de un campo bidimensional que depende de la posición del órgano visual del espectador y la dirección hacia donde vea. A pesar de que los objetos materiales se encuentren distribuidos en un espacio tridimensional, su representación en el campo visual es **bidimensional** porque este campo es relativo al sentido de la vista.

Al crear esquemas bidimensionales solo interesa una relación con respecto al observador, es decir, el diseño solo tiene una cara (una fachada es un buen ejemplo de composición bidimensional). No ocurre lo mismo cuando se proyectan composiciones en el espacio real (tridimensional) como es el caso del arte estructural, el cual es siempre tridimensional.

En este caso, para componer formas, se tiene que considerar desde todos los puntos de vista. Lo mismo sucede con el espectador. No puede apreciar las formas si no las ve desde varios lados. Esto significa que no se está tratando con un sistema sencillo de relaciones, sino con una serie de sistemas de interrelaciones.

Por esta razón, el escultor cuenta con un caballete giratorio que le permite estudiar continuamente desde varios ángulos la composición de su obra. Al variar los ángulos, cada plano y contorno tiene un nuevo valor y expresión al cambiar su relación con respecto a él.

En el caso de una obra de ingeniería estructural, el observador se puede mover a través del espacio y su experiencia visual consiste, entonces, en una **sucesión continua de diferentes puntos de vista**. Esto acontece por ejemplo cuando el espectador viaja por una carretera, se acerca a un puente y lo recorre ya sea por el tablero de rodamiento o pasa por debajo, en todos los casos el campo visual varía.

Lo que se quiere enfatizar aquí es la necesidad de que el diseñador tome en cuenta las diferentes trayectorias y puntos de vista por donde el espectador pueda tener contacto visual con la obra a la hora de definir el campo visual.

Lo anterior evidencia la importancia capital de la representación gráfica de la obra desde varios puntos de vista durante el proceso de diseño estructural. Tradicionalmente se ha utilizado la proyección ortogonal y las maquetas y modelos a escala; ahora se cuenta con útiles y prácticos programas de aplicación de dibujo por computadora.

También es importante conocer la variación del campo visual a través de las estaciones del año o las horas del día, por ejemplo, el entorno de un puente puede ser muy diferente en estación seca o en estación lluviosa, así como su iluminación es diferente en la mañana, al mediodía, la tarde y la noche.

### **Elementos del campo visual.**

El campo visual de composiciones *bidimensionales* está constituido de dos elementos básicos: la línea y la masa.

#### **La línea:**

La percepción visual determina líneas al distinguir las aristas de los cuerpos sólidos, en bordes e intersecciones de planos, así como en elementos con forma muy alargada en una dimensión (una viga, un cable, una barra).

Las líneas contribuyen considerablemente a dar cualidades expresivas a las formas, cada una posee un sentido psicológico especial (ver Fig. 3.3):

La línea recta horizontal crea una impresión de paz, calma, estabilidad y descanso (ver Fig. 3.3a). El efecto de la línea vertical es de ascensión, sublimidad, permanencia, estabilidad, dignidad (ver Fig. 3.3b). Dada su gran estabilidad (asociada con características gravitacionales) el abuso de estas líneas puede provocar monotonía, aburrimiento y falta de

interés. Las líneas inclinadas evocan inestabilidad, dinamismo, desafío a la gravedad y contrastan con las verticales y horizontales (ver Fig. 3.3c).

Las líneas curvas sugieren gracia, flexibilidad, elegancia y femineidad (ver Fig. 3.3d). Las curvas más cerradas son más voluptuosas, mientras que las líneas rectas son más sólidas, firmes, masculinas.

Un conjunto de líneas ascendentes crean una impresión de superación y monumentalidad (ver Fig. 3.3e). Las descendentes de abatimiento o depresión. Las líneas radiadas que se expanden hacia fuera, sugieren glorificación, devoción, libertad (ver Fig. 3.3f). La radiación hacia el centro acentúa con gran fuerza un centro o foco (ver Fig. 3.3g). Las líneas espirales también evocan movimiento (ver Fig. 3.3h).

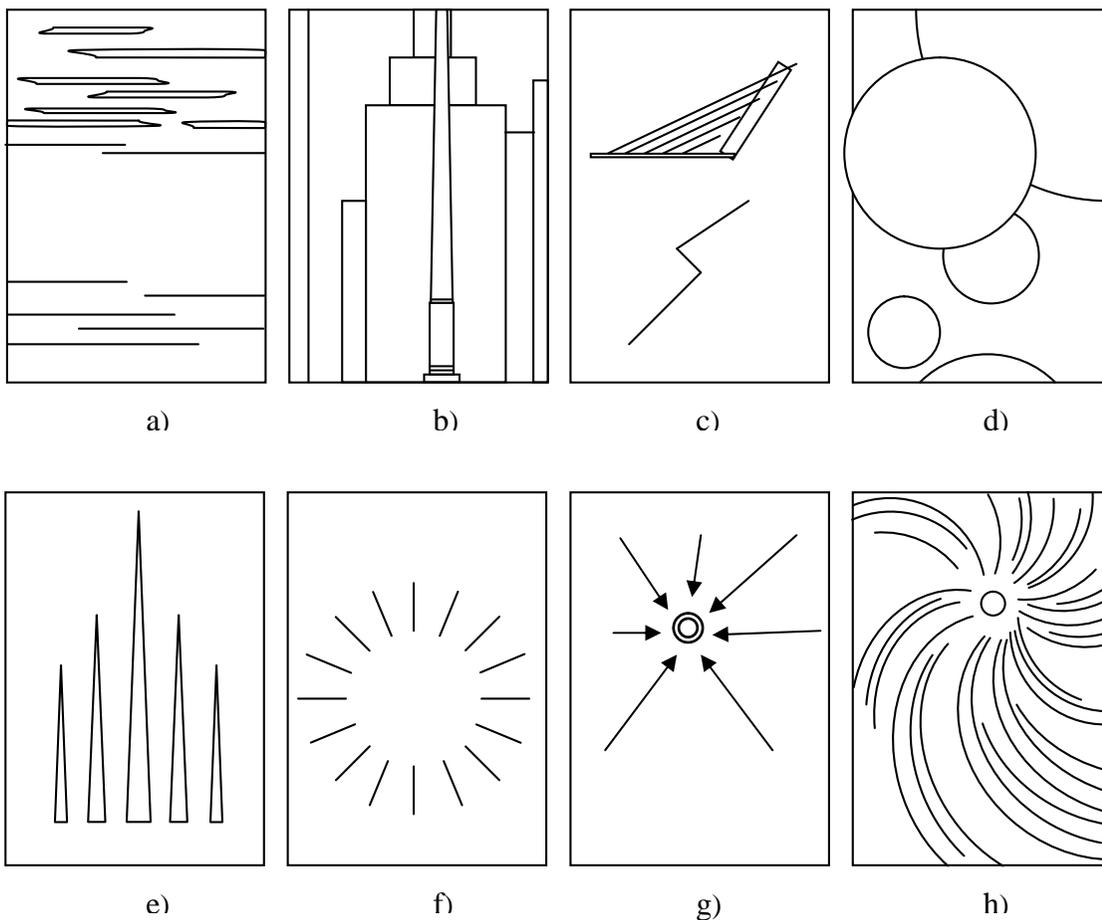


Fig. 3.3: Poder expresivo de las líneas.

Como ejemplo de aplicación del poder expresivo de las líneas en obras estructurales, ya se mencionó que la estación de Lucerna (ver Fig. 3.2b) expresa la idea de dinamismo por medio del uso de líneas o esquemas inclinados. En otro proyecto de Calatrava (ver Fig. 3.4) también se puede observar que los cables atirantados del puente están dispuestos en forma radiada; esto hace que se realce el punto de convergencia de ellos.

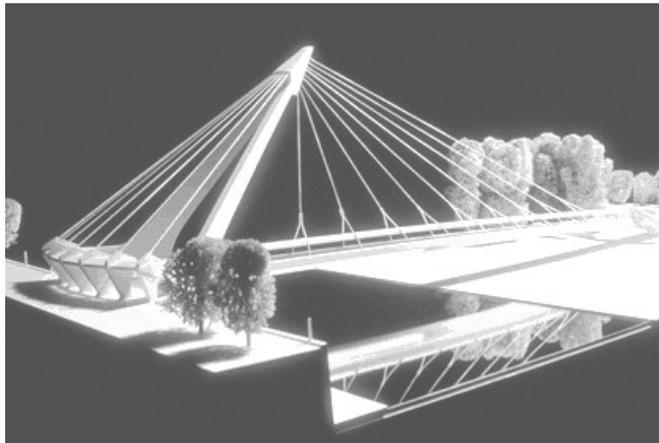


Fig. 3.4: Proyecto de un puente atirantado de Santiago Calatrava.

### **Las masas:**

Las masas o manchas son elementos bidimensionales que se observan en el campo visual al distinguir las caras o superficies de los cuerpos, o espacios con apariencia similar. Las masas poseen cualidades significativas como tamaño, forma, situación y valor tonal. Estas cualidades, como se verá después, son muy importantes para lograr el equilibrio de una composición.

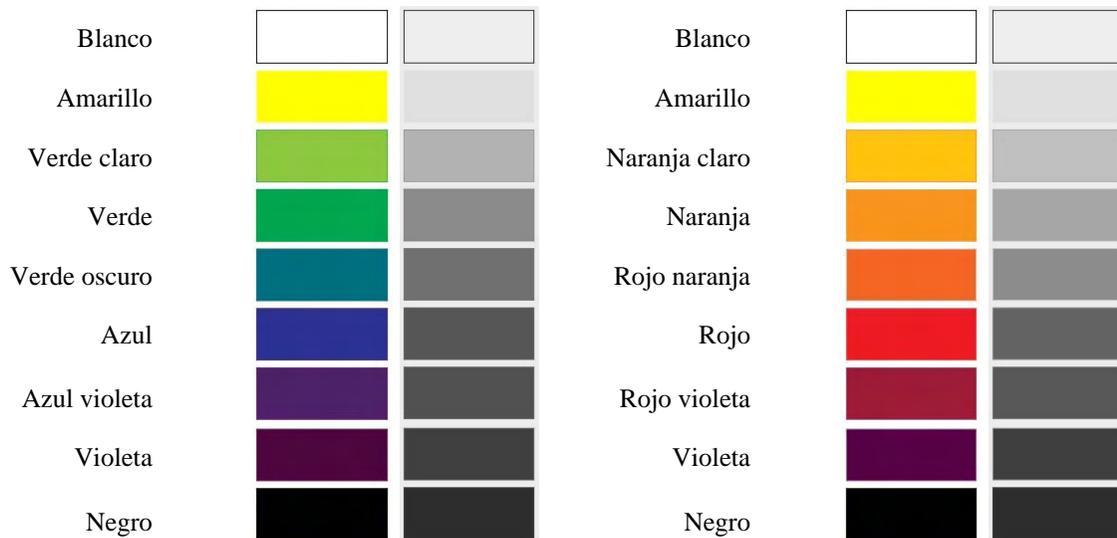


Fig. 3.5: Escala de valores tonales.

*El tono:* Se entiende por tono la mayor oscuridad o claridad de una masa en una escala de grises que va desde el blanco al negro. En el caso de los colores el tono viene dado por la mayor o menor luminosidad de un color comparado con la escala del blanco al negro (ver Fig. 3.5.) El color más claro es el amarillo y el violeta es el más oscuro. Al tono también se le llama valor tonal o intensidad de un color.

### **Elementos plásticos:**

En la Fig. 3.6 se ilustran los elementos plásticos tridimensionales. Son elementos básicos materiales con los cuales se construye un esquema *tridimensional*. Tienen la característica de que cuando la luz incide sobre ellos individualmente o en conjunto se ven como un esquema de luz y sombra con contrastes y gradaciones de valor. El empleo plástico de luz y sombra definen la figura tridimensional; es decir, el contraste entre el material y el espacio define la forma.

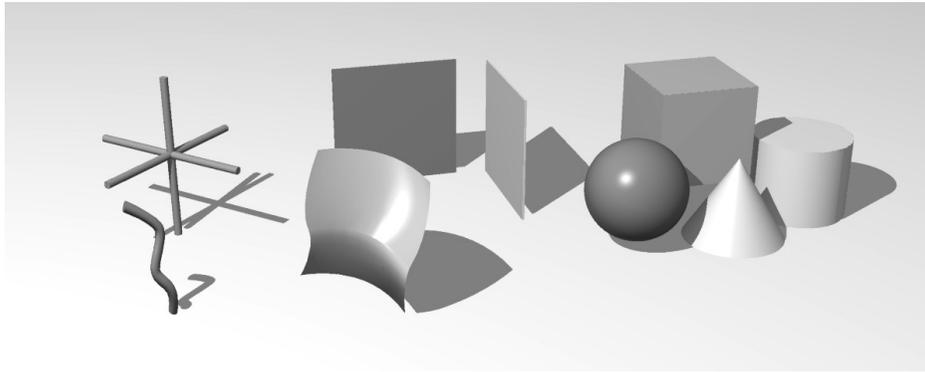


Fig. 3.6: Elementos plásticos tridimensionales: las líneas, las superficies, los sólidos y el espacio.

**Las líneas:** se mencionó anteriormente.

**Los planos y las superficies:** son elementos con dos dimensiones muy grandes comparados con su espesor.

**Los sólidos:** se entiende por cuerpo sólido algo que tiene volumen, que se expresa por la proyección de las tres dimensiones del espacio. Los volúmenes pueden ser sólidos o huecos.

**El espacio:** Este otro elemento plástico se origina de las actividades de los otros tres elementos materiales anteriores.

**Textura, colores, sombras:** a pesar de que cada material posee características propias que lo hace más o menos apto para un tipo de estructura; también posee características visuales como textura y color, que son percibidas en el campo visual y tienen un peso en la composición. En un inicio la textura se definía como la disposición y orden de los hilos de una tela; en los cuerpos materiales es una característica superficial asociada con la apariencia visual y táctil, esta apariencia puede ser lisa, rugosa, cuarteada, satinada, graneada, etc.

La belleza de una estructura también depende de la textura y el color. Después de haber dibujado una estructura en un papel en blanco y negro, también se tiene una gran oportunidad de escogencia acerca de los colores y texturas.

El uso del color varía con los climas, siendo usado con mayor profusión en los países cálidos donde el sol brillante los hace lucir. La selección de los colores requiere el conocimiento de las teorías en que se fundamenta su armonización así como del buen gusto.

La exposición de los objetos a la luz produce sombras propias y arrojadas por otros. Los efectos de estas sombras deben de ser explotadas en la composición. Para esto es necesario, entonces, hacer un estudio de sombras.

### **3.2.2. El principio fundamental de la composición: Unidad-Variedad.**

El autor José María Parramón cita que Platón definió y resumió en pocas palabras el difícil y complejo arte de componer: dijo que sencillamente consistía en hallar “**la variedad dentro de la unidad.**”

“**Variedad** en el color, **variedad** en la forma, **variedad** en la situación, en el tamaño y en la disposición de los elementos. Cuando existe esta **variedad** el espectador se siente atraído por la obra; esa **variedad** reclama su atención, intensifica su interés.

Pero tampoco esta **variedad** puede a ser tanta que llegue a desconcertar y dispersar la atención y el interés creados inicialmente. Es preciso entonces que la **variedad** esté organizada, respondiendo a un orden y **unidad** de conjunto.

Este principio es una condición universal en toda obra artística y se puede enunciar doblemente:

**Unidad dentro de la Variedad o Variedad dentro de la Unidad”**<sup>(23)</sup>

Esto quiere decir que para que una obra sea agradable, los elementos que la conforman deben presentar características comunes que los integren como una unidad y a la vez debe haber variedad en el conjunto. Es recomendable lograr un equilibrio entre esta integración de los elementos y la variedad de los mismos.

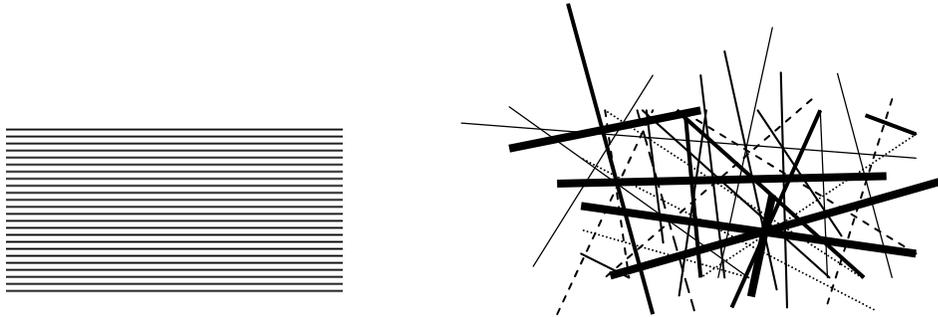


Figura 3.7: Ejemplo de casos extremos de Unidad y Variedad.

Por ejemplo, este principio se ilustra con sencillez en la Fig. 3.7; la parte de la izquierda es un conjunto donde los elementos son líneas, todas con igual separación, igual longitud, igual espesor e igual dirección (horizontal); este conjunto tiene demasiada “Unidad”, es excesivamente monótono, lo cual lo vuelve aburrido, no es atractivo como composición. El conjunto de la derecha es un caso radicalmente opuesto, las líneas presentan excesiva “Variedad” de separación, longitud, espesor y dirección; se torna confusa y esta variedad no es agradable (a menos que se pretenda utilizar para dar un efecto especial).



Figura 3.8: Puente Lusitania, diseñado por Santiago Calatrava, Mérida, España, 1988-91.

El factor unidad se puede mostrar en el campo visual a través de la integración de los elementos entre sí *interna* y *externamente*. Por ejemplo, una estructura puede tener dos tipos de integración o unidad: puede armonizar con sus alrededores (con su contexto) e internamente con sus partes componentes. La estructura puede tener unidad con sus alrededores, por medio de similitud de formas, escala, texturas, colores, motivos, etc.

Por ejemplo, en la Fig. 3.8 se muestra una imagen del puente Lusitania, en Mérida, España, 1988-91 el cual es un buen ejemplo de armonía con los alrededores. Este puente tiene un arco central de acero de 34 m de altura y cubre un a luz de 189 m; fue diseñado por Santiago Calatrava y concientemente quiso utilizar este puente de arco como un homenaje al puente de arco romano de 2000 años de antigüedad (de 64 arcos de mampostería) que corre paralelo 600 m aguas arriba. Además se puede apreciar que tiene armonía con los alrededores donde se encuentra emplazado, la forma de su arco de acero tiene similitud con la forma de las montañas del fondo.

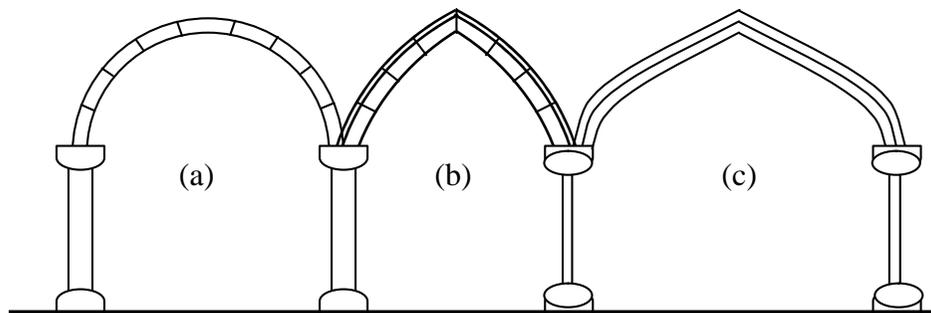


Fig. 3.9: Tres tipos diferentes de arcos: a) de medio punto, b) ojival y c) tipo Tudor

Por otro lado, en la Fig. 3.9 se ilustra la carencia de unidad de las partes componentes de una edificación con varios arcos; a pesar de que cada uno de los arcos por separado sean bellos (de medio punto, ojival y tipo Tudor), son muy diferentes y hacen que la edificación carezca de unidad interna.

Para conseguir el factor unidad el diseñador puede recurrir a principios como: proporción espacial, simetría, asimetría, equilibrio y esquemas compositivos. Asimismo, para lograr el factor variedad el diseñador puede recurrir a principios como: contrastes, ritmo, centro de

interés, recorrido visual, expresividad, movimiento y originalidad. En las siguientes secciones se explican.

### 3.2.3. Proporción espacial

Se conoce como eurytmia la combinación armoniosa y con buena proporción de las diversas partes de una obra de arte. La proporción es la correspondencia de unas partes con el todo o entre las cosas relacionadas entre sí.

El diseño de proporciones ha sido muy estudiado, se han obtenido reglas de dimensionamiento armónico con las cuales algunos artistas y autores pueden estar de acuerdo o no. Tales reglas pueden ser cuestionadas en el dimensionamiento de obras estructurales, de las cuales ya se mencionó que su forma y dimensionamiento están relacionados con varios componentes del diseño estructural.

A pesar de esto, lo que interesa aquí es señalar que el fundamento de la eurytmia o proporción correcta radica en el logro de medidas que eviten tanto la gran igualdad de medidas como la gran diferencia entre ellas. Esto es simplemente la aplicación del principio fundamental Unidad-Variedad.

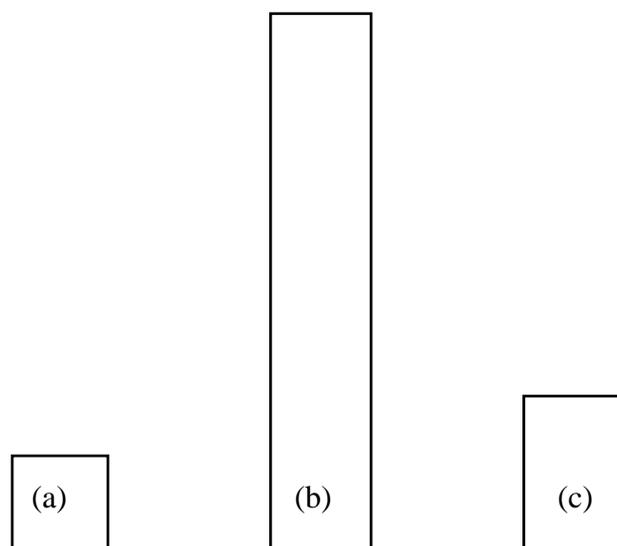


Fig. 3.10: Tres tipos diferentes de proporciones.

Por ejemplo, en la Fig. 3.10 se puede apreciar que el cuadrado (a) por sus medidas iguales es una figura muy monótona, con mucha unidad; mientras que, por el contrario, en el rectángulo (b) hay un marcado contraste entre las dimensiones del ancho y el alto, tiene una variedad extrema. Por lo tanto, unas proporciones intermedias, como en el rectángulo (c), resultarán más agradables.

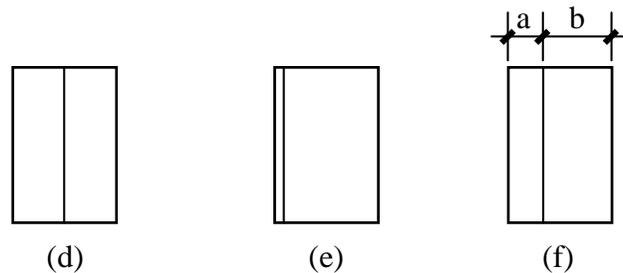


Fig. 3.11: Tres tipos de formas diferentes de dividir un rectángulo.

Algo similar puede suceder si este último rectángulo se debe dividir en dos partes por una línea vertical. En la Fig. 3.11, el rectángulo (d) ha sido dividido a la mitad y por su igualdad de medidas resulta de poco interés. Lo contrario sucede en el rectángulo (e) donde hay una notable diferencia de las dos partes. Por lo tanto, otra vez, una solución intermedia sería más agradable (f).

De acuerdo con el autor José María Parramón, una solución clásica a este problema fue dada por el ingeniero y arquitecto Vitruvio (70 A. C.-25 A. C.), cita: “Para que un espacio dividido en partes desiguales resulte agradable y estético, deberá haber entre la parte más pequeña y la mayor la misma relación que entre esta mayor y el todo.”<sup>(23)</sup>

Para el caso de la Fig. 3.11f esto se expresa: **a:b::b:a+b**, cuya solución es  $b = \frac{1}{2}(1+\sqrt{5})a$ , es decir,  $b \approx 1.618a$ . Esta se conoce como la Sección Dorada o Regla Áurea.

### **3.2.4. Equilibrio.**

Este principio está basado en el equilibrio gravitacional de masas materiales (para distinguirlas de las masas tonales de la sección 3.2.1.) Desde el punto de vista físico, el equilibrio es el estado de un cuerpo en el cual las fuerzas que operan sobre él se compensan mutuamente. Esta definición es aplicable al equilibrio visual. En la representación bidimensional del campo visual las masas visuales sustituyen a masas físicas.

El equilibrio es un estado tan natural que no se percibe cuando existe, pero si se viola, automáticamente se experimenta una sensación de molestia y desagrado. Similarmente, la carencia de equilibrio en una composición ocasiona una sensación de molestia.

Por lo tanto, el equilibrio compositivo se basa en la compensación de unas masas respecto de otras. Esta compensación viene dada por la combinación de los siguientes factores: el tamaño de unas masas respecto de otras, la distancia que separa unas masas respecto de otras y el valor tonal de unas masas respecto de otras, las manchas de tono oscuro pesan más que las de tono claro.

#### **Equilibrio Simétrico:**

En este tipo de equilibrio hay un eje en la composición que sirve como eje central donde elementos con formas y valor tonal iguales, se colocan espaciados a igual distancia a cada uno de los lados. Se puede representar con el ejemplo de la balanza corriente constituida de una cruz con dos platillos de igual forma y peso, equidistantes respecto al fiel. Ver Fig. 3.12.

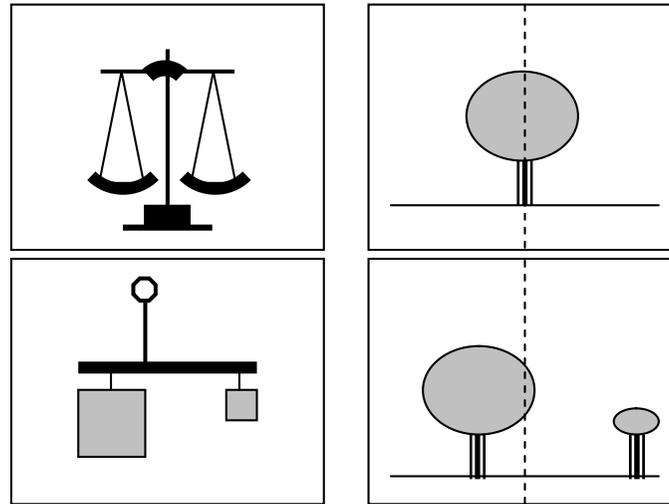


Fig. 3.12: equilibrio simétrico y asimétrico.

Este eje de simetría es a la vez es el centro de interés. Es el tipo más obvio de equilibrio, es fácil de lograr, tiene la desventaja de ser muy pobre en cuanto a variedad. Sin embargo, expresan muy bien ideas como religiosidad, severidad, solemnidad, grandiosidad, lujo, seguridad, estabilidad, fuerza.



Fig. 3.13: Pabellón de Rayos Cósmicos, de Félix Candela, Ciudad Universitaria, México, D. F., 1951.

En pintura y otras formas de arte contemporáneo es menos corriente el diseño simétrico, porque se prefiere obtener variedad a través de composiciones más dinámicas, variadas y

complejas. Sin embargo, la solemnidad y severidad de la composición simétrica todavía subsiste en la pintura mural de interiores de iglesias en nuestros días, en arte comercial y publicitario, donde se aprovechan sus cualidades expresivas; y por supuesto en el arte estructural, donde muchas de las obras de arte son simétricas, por su gran poder de estabilidad, facilidad constructiva, economía y expresión. Por ejemplo, en la Fig. 3.13 se muestra el Pabellón de Rayos Cósmicos, de Félix Candela, 1951, el cual es una estructura con simetría en los tres ejes de coordenadas principales.

### **Equilibrio asimétrico:**

En este tipo de equilibrio hay una distribución libre e intuitiva de los elementos de la composición, equilibrando unas partes respecto de otras, a fin de mantener y conseguir una unidad de conjunto. El equilibrio es similar al caso de la balanza romana con el fiel descentrado respecto a dos masas diferentes. La estrategia de equilibrio consiste en compensar debidamente la diferencia de peso, situando el peso mayor más cerca del fulcro (punto de apoyo de la palanca) y el peso menor a mayor distancia del mismo; análogamente, lo mismo se hace con las masas tonales. Ver Fig. 3.12.

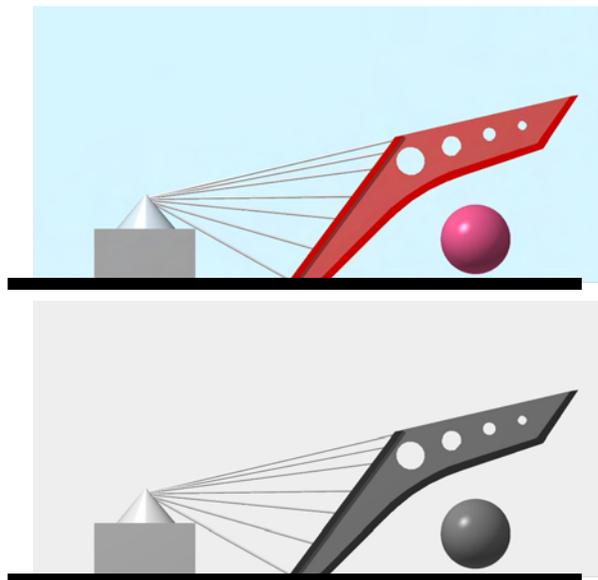


Fig. 3.14: Ejemplo de equilibrio asimétrico de masas

En la Fig. 3.14 se muestra un ejemplo de equilibrio compositivo asimétrico. Se puede apreciar que los elementos de la derecha tienen más peso visual, llaman más la atención a la vista, tienen mayor valor tonal y además en ellos está el área mayor. Esta zona se equilibra con los elementos más pequeños, que se sitúan a la izquierda en un extremo.

Es interesante notar que además del valor tonal, también el interés psicológico tiene peso compositivo: una pieza muy valiosa puede equilibrarse con algo de mayor tamaño y de menor interés.

La composición asimétrica posee mayor variedad. Es más libre, no obstante, esta libertad debe ser encausada para que no degenera en libertinaje, en un exceso de variedad, en perjuicio de la unidad.

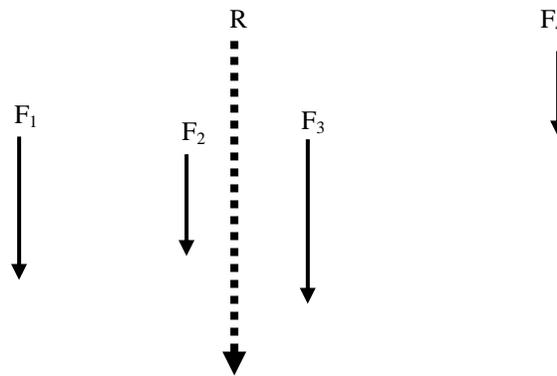


Fig. 3.15: Diagrama de equilibrio asimétrico tridimensional.

Al igual que se hace con dos dimensiones, la definición física de equilibrio es aplicable al equilibrio visual por medio de asociaciones. En tres dimensiones, también se tiene el equilibrio de todas las partes en un campo definido. Esto se ilustra en el diagrama de la Fig. 3.15 donde  $R$  es la resultante de un conjunto de fuerzas o elementos visuales  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  y  $F_4$  distribuidos asimétricamente en un espacio tridimensional.

Es importante resaltar que por tratarse de elementos plásticos materiales, el equilibrio debe ser tanto visual como físico, porque los materiales también tienen características mecánicas. Por lo tanto, los problemas de unidad plástica son inseparables con respecto a los problemas estructurales de peso y esfuerzo.

La composición puede ser simétrica o asimétrica. Pero en la organización tridimensional, ambos tipos pueden estar incluidos en la misma composición, puesto que si se observa desde diferentes puntos de vista, lo que en un enfoque se ve como simétrico, puede no serlo en otro. Una composición simétrica vista de frente, puede dejar de serlo si se la ve desde un lado.

En las tres dimensiones también es posible tener simetría exacta o aproximada; con un eje central correspondiente a cada dimensión. Es decir simetría en planta y en elevación. Sin embargo este tipo de equilibrio tiene muy poca aplicación en la práctica. Debido a la variabilidad de las vistas de los objetos, se utiliza más el equilibrio oculto, el cual es más flexible y se adapta mejor a la complejidad del problema.

### **3.2.5. Esquemas compositivos.**

Son esquemas de figuras generales que no están explícitamente mostrados en la obra; sino más bien, están ocultos pero son como guías de las formas a manera de esqueleto compositivo.

Los esquemas compositivos están basados en la predilección por ciertas formas simples que son más atractivas, que llaman más la atención y que se recuerdan con mayor facilidad. Estas pueden ser líneas o figuras geométricas simples, como diagonales, triángulos, rectángulos, círculos, elipses, etc. Por ejemplo, en la Fig. 3.16 el puente del Alamillo y la torre Eiffel tienen esquemas triangulares.

Estos esquemas se pueden apreciar en las siluetas de edificios en las ciudades y campos en el horizonte al amanecer o al atardecer, o a la distancia, cuando las formas detalladas no se distinguen.

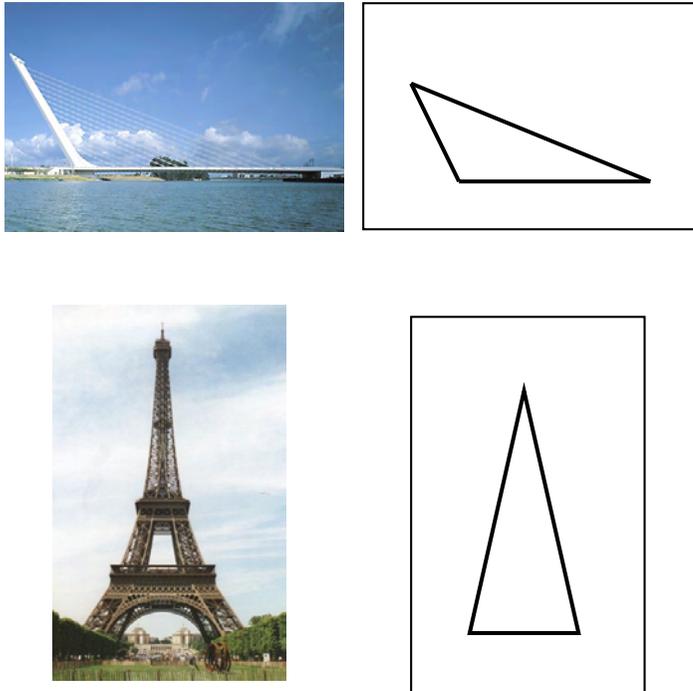


Fig. 3.16: esquemas compositivos triangulares.

### 3.2.6. Contraste.

Los contrastes son una síntesis de elementos o características o cualidades contrarias. Por medio de la creación de ellos es posible alcanzar interés, vitalidad, variedad dentro de la unidad, en la obra.

Hay mucha diversidad de contrastes: los hay de tono, de color, de luz, de textura, de forma, de situación, de dirección, de tamaño, de volúmenes, de expresión, de movimiento, de formas definidas e imprecisas, etc., etc., etc.,...

Los contrastes son un recurso prácticamente ilimitado que evitan la monotonía (dan **variedad**), pero han de emplearse en su justa medida, para no quebrar la **unidad** de la composición. Es fácil caer en lo chocante. El grado y las proporciones correctas dependen de la sensibilidad del diseñador.



Fig. 3.17: Ejemplo de contraste de torres masivas y tablero esbelto. Puente de Clifton, Inglaterra, 1864, de Isambard Kingdom Brunel.



a)



b)

Fig. 3.18: a) Plaza BCE, Toronto, Canadá, 1992, de Santiago Calatrava. b) Puente Salginatobel, Suiza, 1930, de Robert Maillart.

Por ejemplo, en las Figs. 3.17 y 3.18 se muestran algunas obras estructurales que tienen algún tipo de contraste que les otorga cierta característica interesante. En el puente colgante de Clifton, de Isambard Kingdom Brunel (Fig. 3.17), se puede apreciar el contraste que hay entre las torres masivas y el tablero muy esbelto. En la Plaza BCE, de Santiago Calatrava (Fig. 3.18a) las formas similares a árboles contrastan con las formas rectangulares y monótonas de los edificios cercanos. Para el Puente Salginatobel, de Robert Maillart (Fig. 3.18b) sucede lo contrario, la forma artificial del puente contrasta con las formas naturales de las montañas y además hay un contraste de color: el color claro del concreto contrasta con los tonos oscuros circundantes.

### 3.2.7. Ritmo.

Así como hay ritmo de sonidos y movimiento, también hay ritmo espacial. El ritmo es algo que se refiere a la idea de movimiento, paso, cambio, fluir. Sin embargo, para que exista ritmo, es necesario que haya algo más que movimiento. Falta una ordenación de ese movimiento. Por lo tanto, se puede decir que el ritmo es un movimiento ordenado (unidad en la variedad).

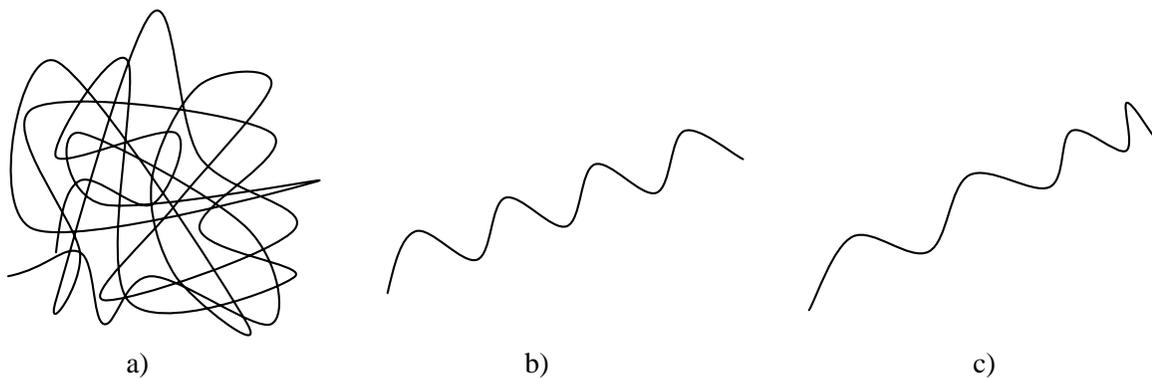


Fig. 3.19: a) línea carente de ritmo. b) línea con un ritmo senoidal con longitud de onda constante. c) línea con un ritmo senoidal con longitud de onda variable.

Un papel en blanco produce una impresión de calma estática. Pero, apenas se dibuja una línea el espacio se habrá activado, el ojo seguirá esa línea que corre, se desarrolla y avanza sobre la superficie blanca creando una impresión psicológica de movimiento. Si esa impresión es desorganizada resulta confusa e inquietante (ver Fig. 3.19a), y si es ordenada, se convierte en rítmica (ver la línea con forma senoidal de la Fig. 3.19b).

El movimiento rítmico se organiza por la repetición de formas, por la proporción de tamaños y por un movimiento de línea continuo y fácilmente conectado. Cuando la forma se repite gradualmente a intervalos regulares, determina un movimiento que lleva la vista de una unidad a la siguiente y de forma que no las vemos separadas, sino en progresión rítmica que

facilita el recorrido visual sobre toda la longitud del espacio. La progresión de tamaños establece un recorrido fácil, creando un movimiento rápido de la vista.



Fig. 3.20: Ejemplo de ritmo en los arcos.

El ejemplo más simple de ritmo visual sería el de una serie regular de configuraciones con igual intervalo entre sí, tal como la repetición de luces y pilares de un puente de arco. Si se modifica el tamaño o el espacio entre los elementos se perturba la expectativa de la recurrencia. Por ejemplo, en la Fig. 3.20 se puede notar el ritmo en el espaciamiento de los arcos de un puente de mampostería.

Existen muchas otras clases de recurrencias, se puede introducir una progresión regular, modificando la altura o el ancho de los elementos o intervalos, por medio de una cantidad proporcionada (ver Fig. 3.19c). El ritmo también puede aplicarse a cualidades visuales, tales como la configuración, el color, la textura; también se pueden alternar motivos, etc.

### 3.2.8. Centro de interés.

Para que una composición tenga unidad es necesario que haya un centro visual, es decir, un punto focal que atraiga la mirada y que aparezca dominando netamente el conjunto. La duda, la indecisión, solo sirve para aminorar un efecto o desviar la atención del espectador.

El centro de interés debe llevar la mirada a lo más importante primero y luego a los restantes elementos, según su orden de importancia, de tal manera que éstos sirvan de soporte al elemento principal.

Hay varias maneras por las cuales puede ser conducida la atención del espectador hacia un centro de Interés: por la dirección intencional de líneas y formas, por la distribución calculada de espacios y formas, por contraste tonal, de color, etc.



Fig. 3.21: Templo de Santa Mónica, diseño estructural de Félix Candela, San Lorenzo, México, D. F., 1966.

En el templo de Santa Mónica de Félix Candela (ver Fig. 3.21), las formas radiadas de la cubierta, además de que físicamente conducen las aguas del techo, también conducen visualmente hacia un centro de interés: el crucifijo y el altar.

A pesar de lo anterior, este principio puede tener sus excepciones. A veces puede no ser conveniente o posible crear o realzar un centro de interés concreto.

### **3.2.9. Recorrido visual.**

El ojo se mueve constante y permanentemente, la vista no se queda fija sobre un objeto; realiza un viaje inquieto y rápido sobre las cosas y esto hace preciso que esta facultad fisiológica pueda ser aprovechada para orientar la vista en su camino y hacer que el

observador aprecie inconscientemente el conjunto de la obra y que capte el mensaje que se quiere expresar.

La vista sigue siempre su curso por el hábil uso de la línea y de las formas, haciéndola entrar en el conjunto, entreteniéndola en un punto de interés, y luego, dejándola que continúe su recorrido hacia otros puntos de interés secundarios. El templo de Santa Mónica de la Fig. 3.55 es un buen ejemplo del recorrido visual a través del campo visual. El camino debe ser fácil, natural y sin obstáculos y sin la indecisión de dos caminos por seguir.

La mirada tiene la tendencia a seguir una línea y viajar a lo largo de ella hasta dar con el final. De este camino solo se desvía por fuertes atracciones contrarias, como otras líneas que lo crucen o formas importantes muy próximas. Cuando el camino para la vista resulta muy fácil el ambiente expresa reposo, en cambio, un exceso de líneas rotas que corren en todas direcciones hacen que la mirada vaya a saltos y producen confusión.

Por lo tanto, se deben distribuir las atracciones, las direcciones y la fuerza de las ideas de movimiento para crear un circuito cerrado. Es decir, que se mantengan los ojos en movimiento dentro del campo visual hasta que se agote la atención. No deben existir brechas por las que los ojos puedan escapar accidentalmente del esquema.

### **3.2.10. Expresividad.**

La emoción es la primera potencia de las artes. La finalidad artística del pintor, del fotógrafo, del escultor, del artista estructural, es la de expresar una emoción, produciendo un símbolo espacial por medio del cual pueda transmitir deliberadamente al espectador toda la suma de emociones que él ha percibido o sentido conscientemente. Como se vio en la sección 2.1.2. el artista estructural busca la *“expresión de estructura”*.

En su representación el artista debe reforzar los elementos de la obra que sirvan para acentuar el móvil emotivo que sacudió su sensibilidad. Por lo tanto, todos los elementos organizados de la obra sean líneas, formas, tonos, colores deben ayudar a expresar el

pensamiento íntimo del artista sobre el asunto. Cuanto más ponga éste de su reacción subconsciente, más posibilidades tiene de que su expresión sea considerada y su mensaje percibido simple y directamente. No es coincidencia, entonces, que en el arte estructural “**la forma y la estructura tiendan a ser una sola**” y que además esta estructura muestre su forma y función estructural abiertamente: “la estructura no solo debe ser resistente, también debe aparentar ser resistente.”

Para la expresión de la estructura se pueden utilizar muchos recursos, con los cuales se puede dar énfasis al contenido de la obra:

- Se pueden utilizar las características expresivas de las líneas y los esquemas compositivos ya mencionados.
- Mediante colores, los cuales manifiestan las más diversas emociones. Los colores cálidos son animados, excitantes y hasta irritables. Los fríos son tranquilos, depresivos y hasta trágicos, etc.
- Por medio del uso de la luz. La cantidad de luz, la calidad, los reflejos, las áreas enfocadas pueden influir en la matización expresiva del tema.

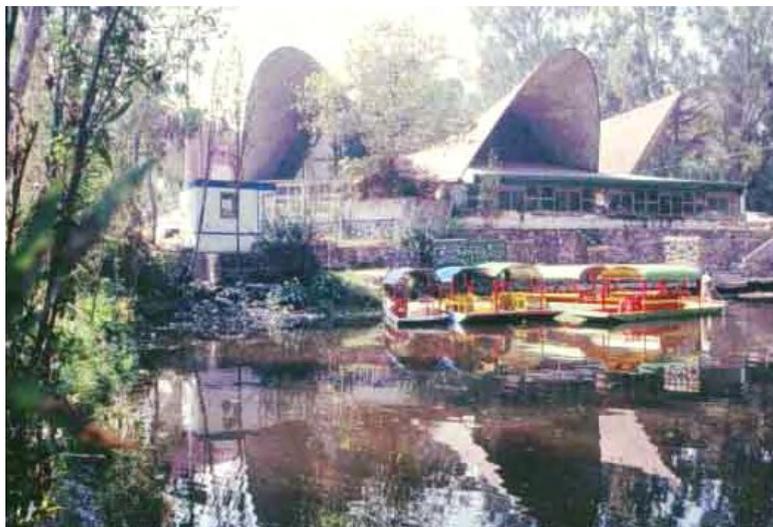


Fig. 3.22: Restaurante Los Manantiales, de Félix Candela, Xochimilco, México, D. F., 1958.

Además de expresar la estructura, la obra también puede tener a la vez una expresión **analógica** o **metafórica**. Por ejemplo, en el restaurante Los Manantiales, de Félix Candela

(ver Fig. 3.22) su forma estructural compuesta por ocho hojas de paraboloides hiperbólicos dispuestas en forma regular, tienen por sí mismas una apariencia agradable.

Sin embargo, también esta forma es **análoga** a las flores flotantes, como un gran nenúfar que flota sobre el agua (la palabra Xochimilco significa “lugar del sembradío de flores”). En tiempos prehispánicos, las “chinampas” fueron jardines flotantes sobre una laguna donde los aztecas y otros pueblos indígenas cultivaban flores y hortalizas y así lograban ampliar zonas de cultivo. En la actualidad todavía subsisten chinampas en el lago de Xochimilco y son un centro de atracción para visitantes del lugar.



Fig. 3.23: Iglesia de San José Obrero, diseño estructural de Félix Candela, Nuevo León, México, 1959.

En la Iglesia de San José Obrero de la Fig. 3.23, también con el diseño estructural de Félix Candela, las formas escalonadas en la parte frontal del techo dan la idea de una **alegoría metafórica** de “escalera para subir al cielo”.

Como se vio en el capítulo 2, Santiago Calatrava también usa las **analogías** y **metáforas** en sus estudios plásticos para obtener ideas que ayuden a generar formas estructurales. Además, es evidente que las obras estructurales también están inmersas en un contexto del

tiempo y el espacio tal y como está definido en el Esquema Conceptual del Diseño Estructural (ver sección 1.2.3.); y por lo tanto, la forma estructural depende de la historia, la cultura y la geografía.

### **3.2.11. Originalidad compositiva.**

Una obra compuesta originalmente, que se aparta de lo corriente, será sin duda un ejemplo de variedad dentro de la unidad. Tendrá el interés y la fuerza creadora necesarios para ser atractiva para el espectador.

Ser original es ser uno mismo, partir de uno mismo, crear sin copiar ni imitar a nada ni a nadie.

Los artistas originales estudiaron los conocimientos posibles relativos a su arte; iniciaron su propia obra a partir del ejemplo dado por las composiciones de los grandes maestros; transformaron estas enseñanzas adaptándolas y aportando a ellas nuevas concepciones y maneras de ver y hacer; pero no se conformaron con lo logrado, avanzaron siempre, se renovaron siempre.

### **3.2.12. El color**

De acuerdo con el Ing. Frederick Gottemoeller (ver la sección 1.3.2.) todas las estructuras y sus partes visibles tienen un efecto estético aunque no fuera considerado en el diseño. También, el Ing. Fritz Leonhart afirma que:

“Todas las cosas tienen propiedades estéticas... los objetos emiten valores estéticos a modo de mensajes, de estímulos...”<sup>(18)</sup>

Por lo tanto, dado que el color es una parte esencial de la percepción de un objeto (y las partes visibles de una estructura no son la excepción); se justifica plenamente que el ingeniero estructural tenga experiencia y conocimientos acerca del uso del color. Estos conocimientos no son difíciles de adquirir, lo que pasa es que son poco conocidos en ingeniería civil.

Con respecto a los puentes, el Ing. Gottemoeller manifiesta:

“Los puentes son una parte de una gran escena visual o paisaje, del cual todas sus partes tienen un color. Los otros colores del paisaje [los del fondo o medio ambiente] están casi siempre más allá del control del ingeniero. El puente por sí mismo tendrá colores, incluso si estos son simplemente los colores naturales de los materiales seleccionados por razones estructurales. Estos colores llegarán a ser parte del paisaje donde será añadido el puente.

La impresión creada por el puente y las emociones evocadas por él serán influenciadas por todos estos colores al ser vistos juntos. El puente será visto contra los otros colores del campo visual y la impresión que se forma el observador será influenciada por estos colores...”<sup>(12)</sup>

Es necesario advertir que el color es solamente una parte (aunque también importante) del *componente* estético del diseño estructural (Deleite); además, este último debe ser equilibrado con los otros componentes del diseño (ver sección 1.2.3.) En esta sección se da una introducción de aquellas pautas del color que puedan ser útiles en el estudio de la composición.

El color depende de: las características de la luz (radiaciones electromagnéticas del espectro visible), los objetos (perceptibles) y del receptor (ojo y cerebro humano).

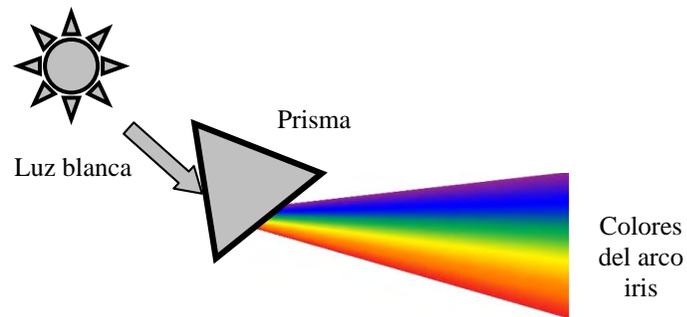


Fig. 3.24: Descomposición de un haz de luz blanca en los colores del espectro visible con sus tintes o matices.

La luz visible procedente del sol está compuesta de muchos colores diferentes. Un haz de luz blanca al pasar por un prisma se descompone en los colores del arco iris (Ver Fig. 3.24); cada una de estas ondas electromagnéticas tiene diferente longitud de onda, la luz roja tiene una longitud de onda de 700 nm y la luz violeta, de 400 nm.

Los **sistemas de clasificación** o **modelos de color** se utilizan para describir y reproducir el color, para identificar objetivamente cualquier color. Hay muchos modelos de color. En esta sección se utilizarán tres modelos de color muy comunes en la actualidad; estos se utilizan, por ejemplo, en muchos programas de aplicación en computación accesibles al ingeniero:

a) El modelo **Rojo-Verde-Azul** (conocido por sus siglas en inglés como **RGB**). El ojo humano contiene receptores (los conos) para tres matices de colores distintos: rojo, verde y azul. Estos tres colores son los **colores luz primarios**. Los colores primarios son aquellos colores básicos que mezclados en determinadas proporciones producen los demás colores. Estas proporciones usualmente se dan en porcentajes o en una escala del 0 al 255 (desde 0 para la ausencia de luz hasta 255 para la saturación máxima).

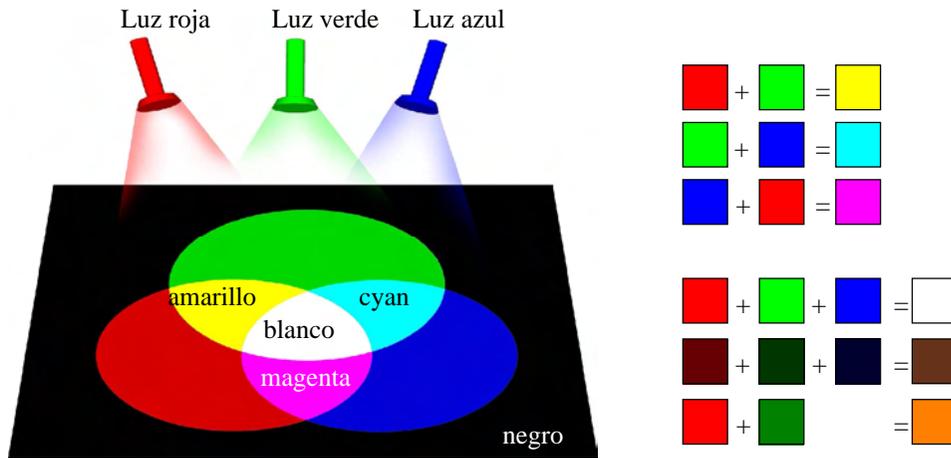


Fig. 3.25: Colores Luz Primarios y Secundarios.

Por ejemplo, si tres haces de luz roja, verde y azul se mezclan en iguales proporciones (100 % de saturación cada uno) producen la luz blanca (ver Fig. 3.25). Esta mezcla se conoce como **mezcla aditiva** porque las luces de colores se suman. El negro se obtiene de la ausencia de luz (ver Fig. 3.25).

Estos tres colores luz se utilizan en las pantallas luminosas de computadoras y televisores; las cuales constan de una matriz de pequeños puntos que emiten luz roja, verde y azul en diversas proporciones y pueden reproducir los colores de una imagen.

Los **colores luz secundarios** se obtienen por la mezcla en iguales proporciones de **dos** de los colores luz primarios anteriores y son el cyan (azul claro), el magenta (rojo claro) y el amarillo (ver Fig. 3.25):

Luz azul + luz verde = luz cyan

Luz azul + luz roja = luz magenta

Luz roja + luz verde = luz amarilla

Otras luces de colores se obtienen de la mezcla de colores luz primarios rojo, verde y azul en otras proporciones; por ejemplo, una luz *café* se obtiene de la adición de un 40 % de luz

roja, 20 % de luz verde y 10 % de luz azul; la luz *naranja* se obtiene de la adición de un 100 % de luz roja, 50 % de luz verde y 0 % de luz azul (ver Fig. 3.25); etc.

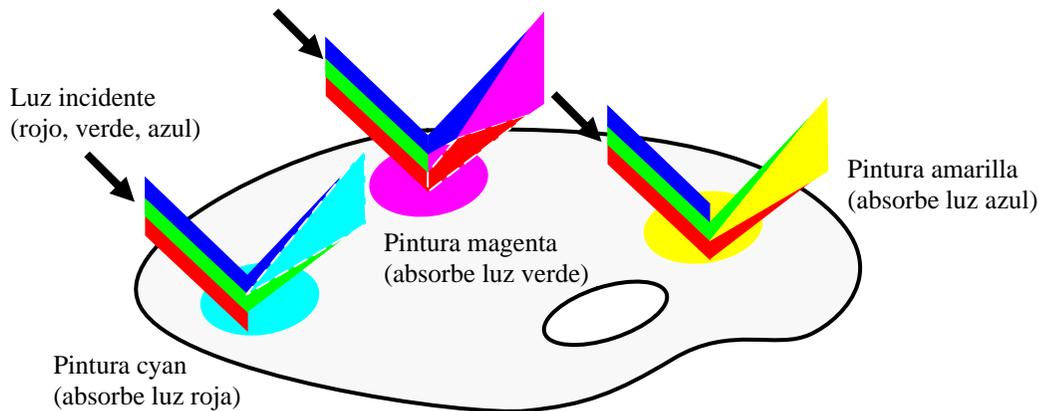


Fig. 3.26: Colores Primarios Pigmentarios.

b) El modelo **Cyan-Magenta-Amarillo** (conocido por sus siglas en inglés como **CMY** o **CMYK**) consta de los **colores pigmento primarios**. Los pigmentos son los colores en polvo o materias colorantes de las sustancias organizadas (tintas, etc.)

A la mezcla de colores pigmento se le llama **mezcla sustractiva** porque cada pigmento o tinta, al recibir la luz sustrae o absorbe determinadas ondas de luz y refleja otras. Por ejemplo la tinta *cyan* aparenta ese color porque absorbe la luz roja y refleja las luces verdes y azules, las cuales combinadas (tal y como se vio en el modelo anterior) producen la luz cyan (ver Fig. 3.26). La tinta *magenta* absorbe la luz verde y refleja las luces rojas y azules, estas combinadas producen el magenta (ver Fig. 3.26). La tinta *amarilla* sustrae la luz azul y refleja las luces verdes y rojas, las cuales combinadas producen el amarillo (ver Fig. 3.26).

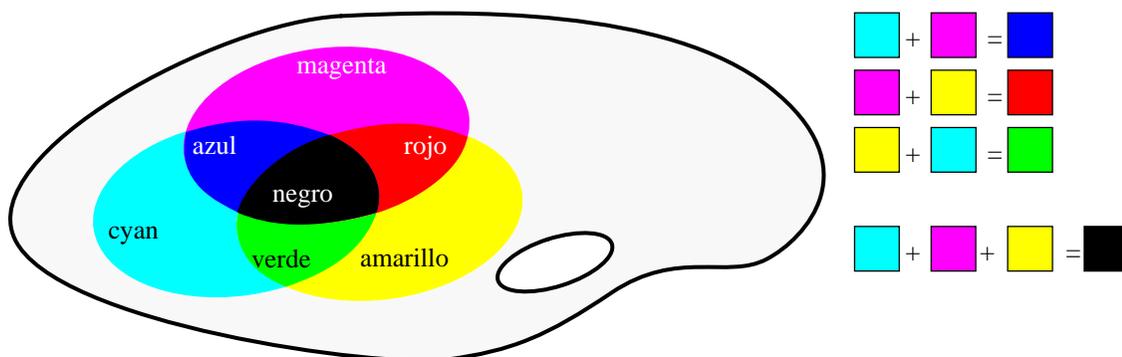


Fig. 3.27: Colores Pigmento Primarios y Secundarios.

Los **colores pigmento secundarios** se obtienen por la mezcla en iguales proporciones de **dos** de los colores pigmento primarios anteriores y son el rojo, el verde y el azul (ver Fig. 3.27):

Pigmento magenta + pigmento amarillo = rojo

Pigmento cyan + pigmento amarillo = verde

Pigmento magenta + pigmento cyan = azul

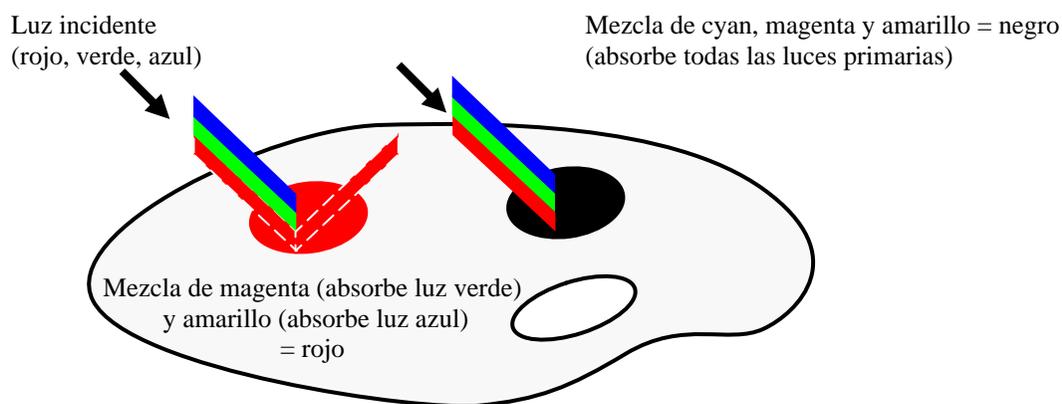


Fig. 3.28: Colores Pigmento Primarios y Secundarios.

Por ejemplo, de la mezcla de tintas magenta (sustraer el verde) y amarilla (sustraer el azul) se refleja únicamente la luz roja (ver Fig. 3.28).

Si **tres** pigmentos cyan, magenta y amarillo se mezclan en iguales proporciones producen el color negro (ver Fig. 3.28) porque absorben los tres colores primarios luz, mientras que el color blanco se obtiene por la ausencia de pigmentos (es el blanco del papel).

Los tres colores pigmento primarios se utilizan, por ejemplo, en las tintas de impresión de libros y revistas. En la práctica, debido a que las impurezas de los pigmentos o tintas no reproducen adecuadamente el color negro, se complementa con una cuarta tinta de color negro, por lo que el modelo se conoce como **CMYK**.

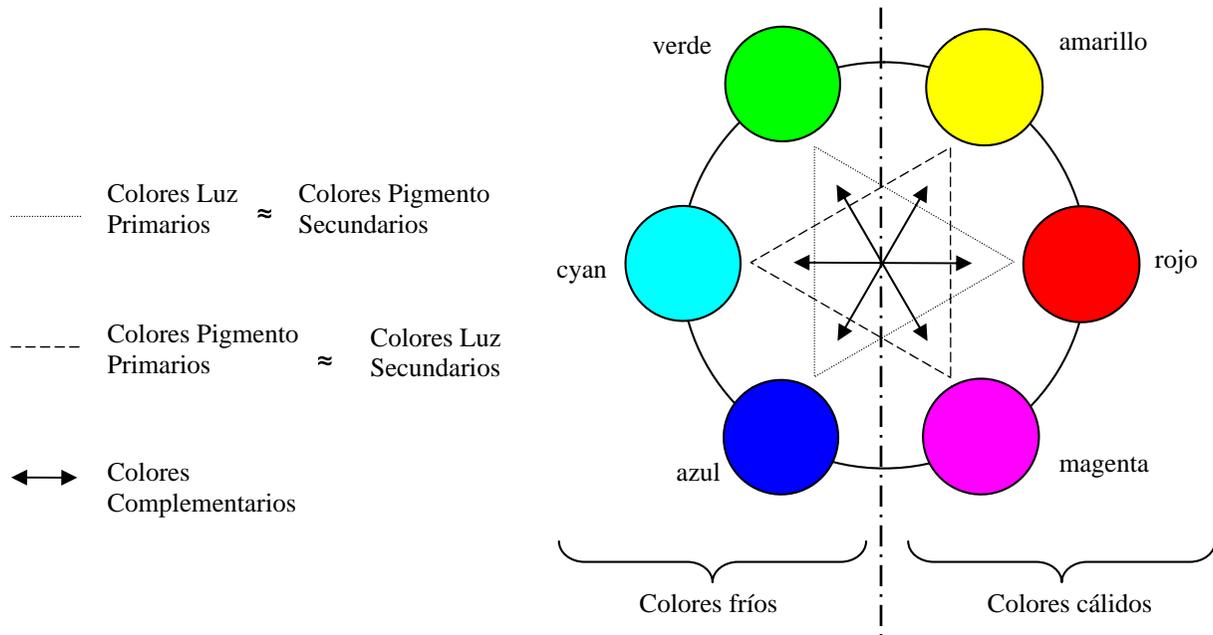


Fig. 3.29: El círculo cromático. En él se representan los diferentes colores o matices.

Como se puede notar, hay una relación inversa entre colores luz y colores pigmento; los primarios de un modelo son los secundarios del otro y viceversa. Todos estos seis colores se pueden organizar para formar un círculo cromático (ver Fig. 3.29). En este círculo, la mezcla de dos colores primarios de un modelo da como resultado el color que está en medio. Por ejemplo, de la mezcla de luz roja y verde se obtiene la luz amarilla; de la mezcla de tintas de color cyan y amarillo se obtiene el color verde; etc.

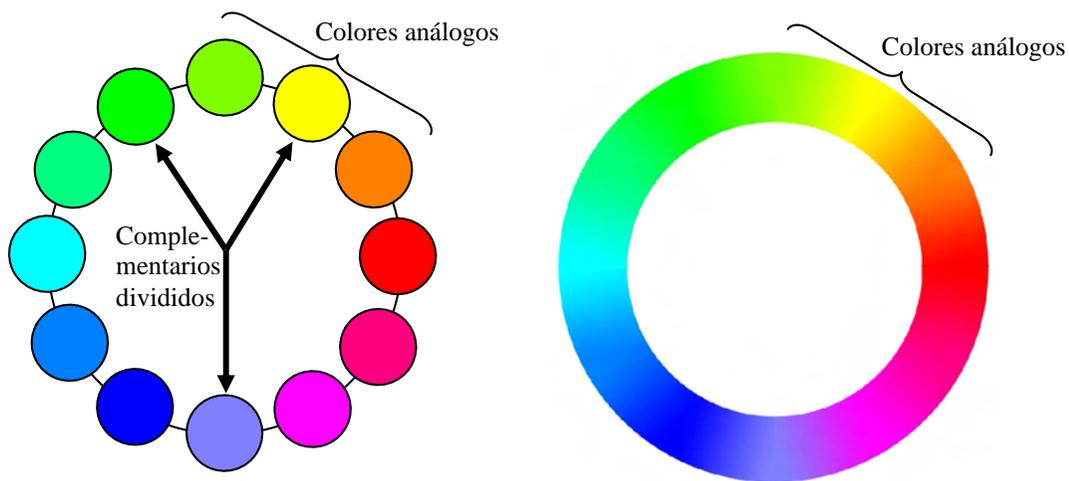


Fig. 3.30: El círculo cromático con colores terciarios y la gama de matices. Colores análogos y complementarios divididos.

Además, cuando se mezclan dos colores vecinos de este círculo se obtienen otros matices o colores llamados intermedios o terciarios (ver Fig. 3.30) y así sucesivamente hasta formar una gran gama de matices (ver Fig. 3.30).

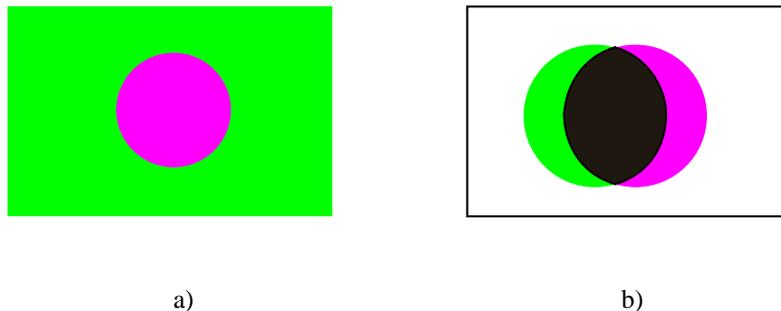


Fig. 3.31: a) Contraste de colores complementarios verde-magenta.  
b) Mezcla de tintas complementarias verde-magenta

Los **colores complementarios** son los opuestos diametralmente en el círculo cromático (ver Fig. 3.29): el rojo es el complementario del cian, el verde es el complementario del magenta, etc. Es decir, un color primario y el secundario que no lo contiene son colores complementarios.

Si dos áreas de colores complementarios se sitúan cerca (uno a la par del otro *sin mezclarse*) forman el contraste máximo y se resaltan mutuamente, son colores chirriantes, desagradables (ver Fig. 3.31a). Estos colores juntos contienen los tres colores primarios; por ejemplo el amarillo es la mezcla de las luces primarias roja y verde; si se coloca cerca de esta un área azul se completan los primarios luz (ver Fig. 3.31a).

Al ser *mezclado* un color pigmento con su complementario se transforma en un **color neutro** (pardo, tierra, café, gris o negro) según la proporción de color que se añade; esto se debe a que intervienen los tres pigmentos primarios, se dice entonces que la mezcla se neutralizó, se ensució (ver Fig. 3.31b).

Los **colores análogos** son un grupo de colores vecinos en el círculo cromático (ver Fig. 3.30). También se les llama familias de color, debido a que constan de colores que están muy cerca en el círculo y todos tienen un color en común. Por ejemplo, la familia del amarillo contiene al amarillo verdoso, el amarillo y el naranja; la característica de esta familia es que todos contienen amarillo en su mezcla (ver Fig. 3.30).

Cada color tiene una cualidad de “temperatura”: si se traza una línea vertical sobre el círculo de colores en la Fig. 3.29, se tienen a la derecha los **colores cálidos** y a la izquierda los **colores fríos**.

Los colores cálidos, especialmente los más intensos, parecen adelantarse. Son psicológicamente dinámicos y estimulantes; sensaciones que son *análogas* a la luz del sol y el fuego. Sugieren vitalidad, alegría, movimiento.

Los colores fríos son los colores de la distancia en la naturaleza y siempre sugieren alejamiento. Son calmantes, tranquilizantes y estáticos como el hielo y la distancia; también sugieren tristeza, melancolía, misterio, pesadumbre.

c) El modelo **Matiz-Saturación-Luminosidad** (conocido en inglés como Hue-Saturation-Lightness: **HSL**) Es necesario aclarar que no hay una convención en la terminología del color en general; muchos conceptos pueden recibir diferentes nombres. Lo importante es entender el concepto que se define.

**Matiz** (llamado también *tono* o *tinte*): es *el color en sí*; es la cualidad que distingue un color de otro; como el rojo, azul, amarillo, etc. Es determinado por aquellas longitudes de onda de la luz que son absorbidas y reflejadas en un material. En los colores del arco iris (Ver Fig. 3.24) y el círculo cromático (Ver Fig. 3.29) se pueden percibir los diferentes colores o matices o tonos o tintes.

**Saturación** (llamado también *intensidad* o *pureza* o *croma*): es la intensidad o grado de pureza de un color. Por ejemplo, cuando un color rojo es completamente rojo, la saturación es máxima, en cambio, cuando contiene en su mezcla algún color neutro como blanco, gris, negro o algo de su complemento la saturación es menor.

**Luminosidad** (llamado también *valor* o *luminancia* o *claridad*): es el grado de iluminación u oscuridad de un color. Se determina por la cantidad de absorción o reflexión de la luz que incide sobre una superficie. La escala va del blanco al negro. Estos valores se pueden apreciar cuando se entrecierran los ojos; con luz limitada no se reconoce el matiz pero sí el valor.

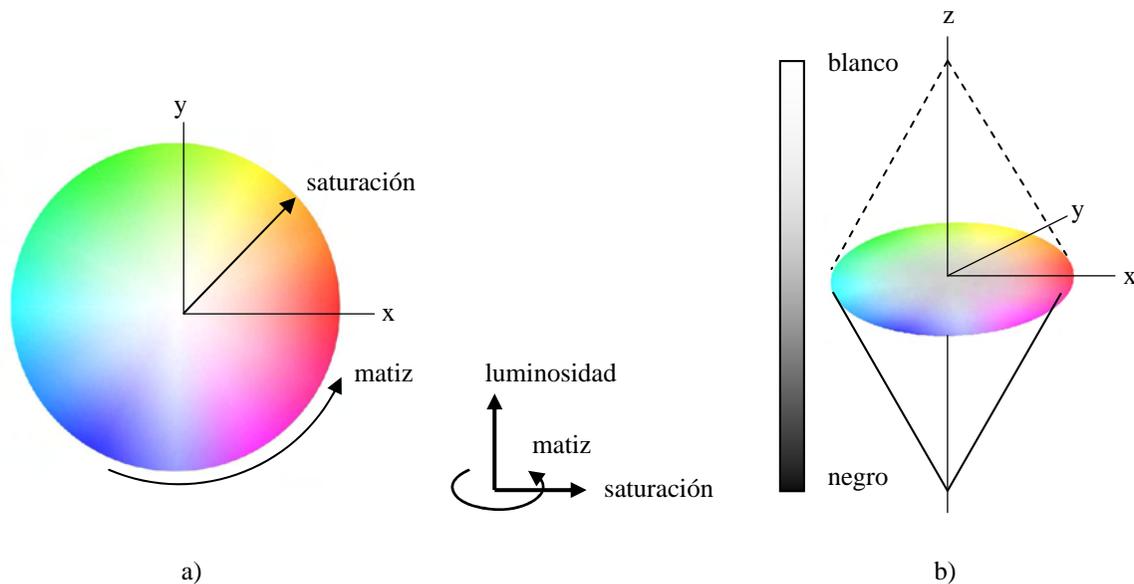


Fig. 3.32: Representación del Modelo HSB.

En la Fig. 3.32 se muestra una forma de organizar este modelo en tres dimensiones: el círculo cromático se representa en el plano xy (ver Fig. 3.32a). El matiz se establece en dirección tangencial, alrededor del círculo. La saturación, en dirección radial; se puede notar que en exterior del círculo la saturación es máxima, mientras que hacia el centro tiende al color neutro. En el eje z se organizan estos colores neutros en una escala que va del blanco al negro (ver Fig. 3.32b). El conjunto forma un cono doble.

Otra forma de disponer este modelo se muestra en la Fig. 3.33. En dos dimensiones rectangulares se representa el matiz y la saturación, mientras que la luminosidad, en una dimensión lineal.

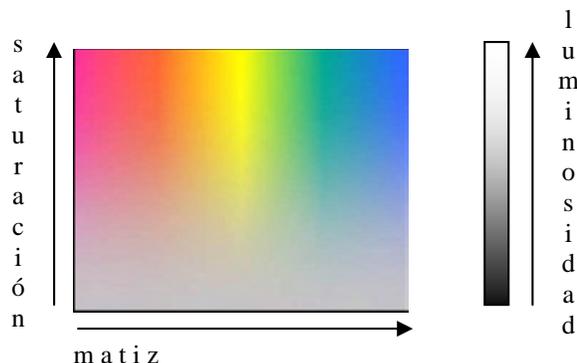


Fig. 3.33: Representación del Modelo HSB.

Es importante también hacer notar que los colores de los objetos se ven afectados por la incidencia de la luz, la sombra y los colores de objetos cercanos. En la Fig.3.34 se muestra un objeto cuyo **color local**, es decir, su propia coloración natural es amarilla.

Este color local se ve afectado por la luz directa en sus partes brillantes (se aclara); así como también se modifica su color en sus partes que están cubiertas en sombra propia (se oscurece). También afectan el color local las luces indirectas que reflejan los objetos cercanos; los reflejos tiñen al objeto de los otros colores locales.

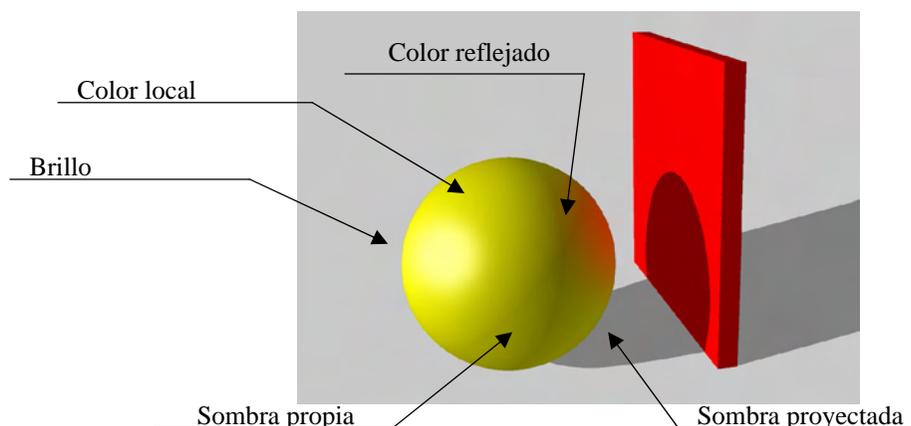


Fig. 3.34: Efecto de la luz, la sombra, y los objetos cercanos sobre el color.

### Armonización de colores:

Un área de color no actúa solamente por sí mismo; depende de su posición y su interacción con los otros colores circundantes. Un color es chocante cuando está fuera de lugar, disociado, sin relación con los colores que lo rodean. Por lo tanto, el diseñador deberá desarrollar la habilidad de visualizar el efecto final que obtendrá y el equilibrio total de los colores de los elementos.

De acuerdo con el autor José Luis Moia:

“Los problemas de armonización de colores son similares a los de la composición: “Variedad dentro de la Unidad”. Crear unidad entre dos tonos y evitar la monotonía por medio de la variedad.”<sup>(21)</sup>

Como se ha explicado anteriormente, no hay reglas fijas para resolver la armonía de colores; porque la percepción del color y las reacciones a sus armonías son procesos subjetivos. Sin embargo hay conocidos métodos para combinar colores que ayudan a orientar y desarrollar la sensibilidad para la apreciación del color:

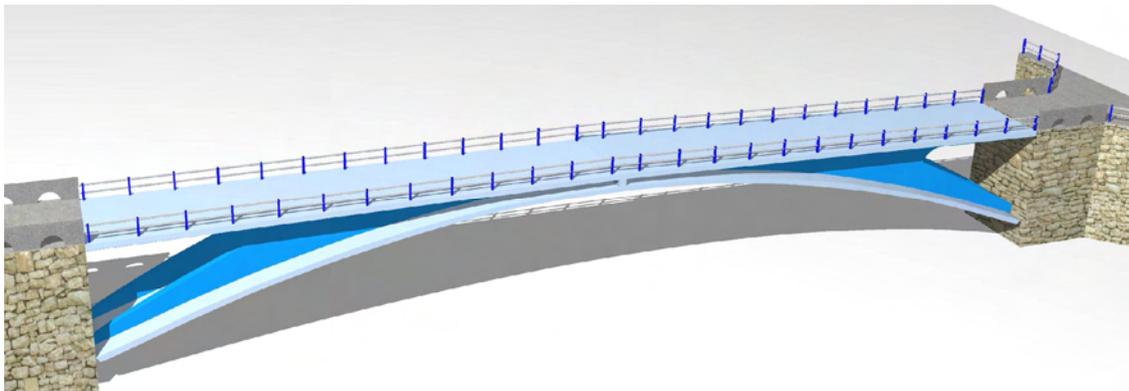


Fig. 3.35: Ejemplo de armonía monocromática.

**Armonía monocromática:** es un medio simple y seguro de obtener armonía; se utiliza un único color (matiz). Es decir, los colores difieren solamente en los valores y saturaciones. El matiz único crea automáticamente la *unidad* en la armonía del color. Por otra parte, aunque la desventaja de esta armonía es que carece de diversidad cromática (solo hay un color), sin embargo los diferentes valores o saturaciones otorgan *variedad*.

Por ejemplo, en la Fig. 3.35 se muestra un modelo donde se utilizó el matiz azul como denominador común, lo que varía es el valor. El arco y el tablero contienen el azul más claro (celeste), los muros longitudinales tienen un valor de azul intermedio, hasta culminar con las pequeñas áreas de azul intenso en los postes de las barandas.

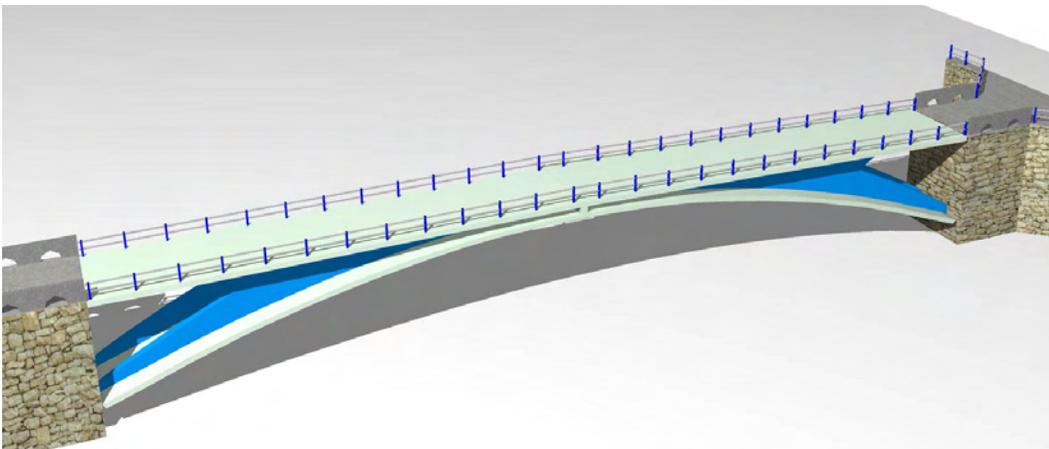


Fig. 3.36: Ejemplo de armonía por colores análogos.

**Armonía por analogía:** este tipo de armonía es similar al anterior; aquí se utilizan los colores análogos o familias de color que son colores adyacentes en el círculo cromático. El color común que tienen en su mezcla los colores análogos otorga *unidad*; mientras que sí hay, efectivamente, una mayor *variedad* cromática.

En la Fig. 3.36 se muestra el modelo anterior donde el arco y el tablero tienen un color con matiz verde claro, el cual es análogo al azul predominante.

Otra posibilidad de obtener armonía por analogía consiste en la repetición de los mismos tonos en distintas partes de la composición.

**Armonía por contraste:** es un medio admirable para lograr variedad y viveza de color. Consiste en el equilibrio de matices opuestos en el círculo cromático (colores complementarios). El problema radica en tener suficiente control de los tonos contrastantes como para que no destruyan la unidad de la composición y puedan conservar también toda su potencia.

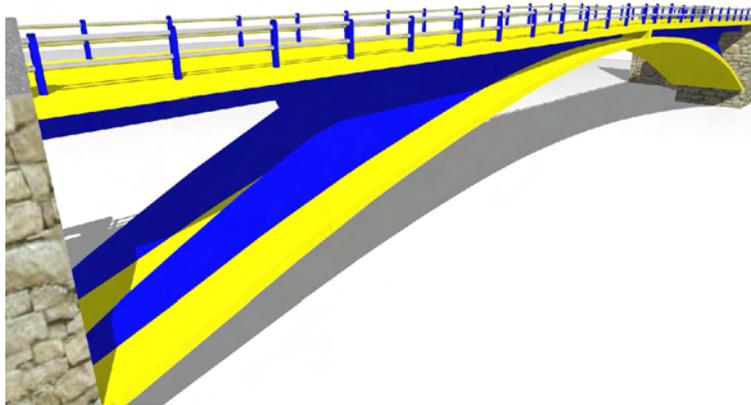


Fig. 3.37: Ejemplo de contraste excesivo de colores complementarios.

El contraste de colores complementarios *muy saturados*, aplicados en *áreas similares*, puede ser tan extremo que produce repulsión (ver Fig. 3.31a y 3.37) y por lo tanto, su armonización debe ser cuidadosa.

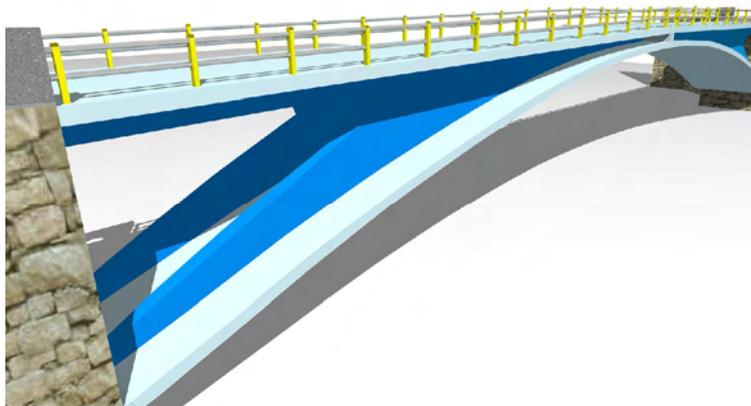


Fig. 3.38: Ejemplo de armonía por colores complementarios.

Hay varios métodos para lograr armonía por contraste. Uno muy conocido es el de usar varios matices y saturaciones de un mismo color dominante en la composición y contrastarlos con *pequeñas áreas* de su complementario directo. En la Fig. 3.38 se muestra el modelo con dominio del matiz azul y se armoniza con pequeñas áreas intensas de su complementario (amarillo) en los barandales.

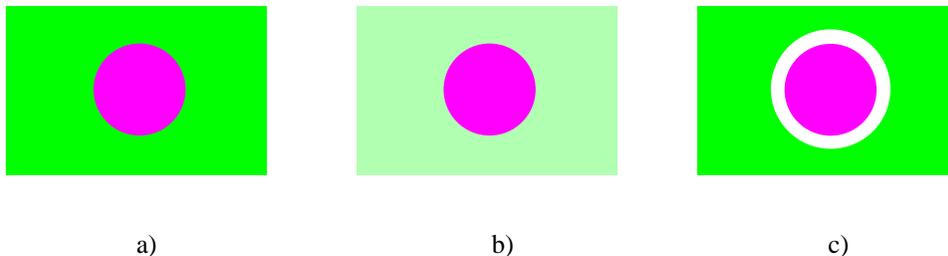


Fig. 3.39: a) Contraste de colores complementarios verde-magenta. El contraste es menor si b) la saturación disminuye o c) se aíslan los tonos con un color neutro.

Otro método consiste en *reducir la intensidad* de un tono para subordinarlo al otro; es decir, cuando uno es puro y el otro se ha neutralizado. Esto se ilustra en la Fig. 3.39b.

Un método muy utilizado también para lograr armonía por contraste, consiste en el *aislar* los tonos contrastantes al separarlos con una línea o área de un tono neutro como el blanco o el negro. Esto debilita el contraste de los complementarios intensos (Ver Fig. 3.39c).

**Armonía por complementarios adyacentes o divididos:** en vez de utilizar los extremos absolutos del contraste, se buscan los dos adyacentes del complemento directo en el círculo cromático (Ver Fig. 3.30). Este contraste es más suave que el de los complementarios directos.

**Armonía por temperatura:** en este caso los tonos dominantes en la composición pertenecen a una familia de colores cálidos o fríos, con lo cual se logra la unidad en el esquema. Se pueden introducir pequeñas áreas de colores de la otra temperatura para otorgar variedad.

No se recomienda que se empleen los tres colores primarios puros, porque entonces se produciría una lucha entre ellos que anularía todo efecto armónico. Se puede emplear puro solo un primario, los colores restantes se deben mezclar algo con el color puro, para relacionarlos armónicamente entre sí y atenuar sus respectivas intensidades.

**Psicología del color:** el ser humano reacciona de diferente forma ante los colores, no obstante, ciertos efectos permanecen constantes. Conocer bien el aspecto emocional del color le ayudará al diseñador a expresar mejor sus sensaciones a través de la composición del color.

Al igual que las líneas, los colores tienen una cualidad emotiva. Los cálidos son excitantes, activos y alegres; los fríos deprimentes y quietos. El amarillo es el color de la luz, el sol, la vida, simboliza oro, fuerza, estímulo. El rojo simboliza sangre, fuego, calor, alegría, acción, pasión. El naranja simboliza entusiasmo, exaltación, movimiento y también un poco calor y pasión. El verde es vegetación, primavera, frescura, juventud, esperanza. El azul es frialdad, pero también infinito, sabiduría, descanso y recogimiento. El violeta es tristeza, dolor, martirio, misterio y misticismo. El púrpura dignidad y suntuosidad.

### **Recomendaciones para el diseño con color:**

El Ing. Frederick Gottmoeller (Ref. 12) recomienda comenzar identificando los puntos de vista más importantes del sitio. Y desde esos sitios observar características de los colores del fondo donde la estructura será colocada: tales como *matices* y sus *valores (luminosidades)*.

Recomienda tomar fotografías de color (son una herramienta muy valiosa) y visitar el sitio bajo diversas condiciones de luz, así como tener en cuenta los cambios estacionales. La escogencia de color podría usualmente estar basada en el período más largo de colores similares.

En lugares con una luz fuerte y brillante se crearán fuertes sombras y permitirán que colores oscuros sean bien percibidos, pero los colores muy claros podrían parecer lavados. Por el contrario, en lugares con una luz muy débil resultarán sombras borrosas y con menos contraste; los colores deberán ser más claros para que el matiz sea percibido.

Seguidamente, se debe tratar de comprender la posición de la estructura en el campo visual desde varios puntos de vista. ¿Cuánto de ese campo lo ocupará? Y la influencia de los colores del fondo sobre el resultado final.

Posteriormente, el diseñador deberá definir su *intención de diseño*. Por ejemplo, si quiere que la estructura se “funda” o “desaparezca” con el fondo para evitar distraer la atención de otro objeto importante (una obra puede ser diseñada para no ser el centro de atracción de un área) o para evitar una cacofonía visual de muchos colores diferentes en el campo visual.

O por el contrario, la *intención de diseño* puede ser la de contrastar con el entorno, la de proveer “variedad” e “interés”, la de convertir la estructura en una atracción, una fuente de emoción u orientación. Con los colores se puede enfatizar la forma estructural por sí misma al darle un color que contraste fuertemente con el fondo.

Es importante notar que el color puede ser un método efectivo para alcanzar estas metas y de una manera que no compromete la forma estructural ni añade costos indebidos.

Una vez que la *intención de diseño* está definida, el diseñador continúa con la **selección** de los colores que mejor armonicen con el fondo de acuerdo con su intención. Ahora puede concentrarse en consideraciones de *valor (luminosidad)* y *matiz*. Las comparaciones de *valor* dominan la impresión inicial. Muchos fondos naturales tienden hacia rangos de valor medios, por lo tanto, valores medios de colores en la estructura ayudarán a que se funda o mezcle con el fondo. Valores muy claros o muy oscuros serán necesarios para hacer que la estructura destaque.

Con respecto a la selección de los *matices* de la estructura, si el deseo es el de mezclarla con el fondo, los colores deberán ser similares a los colores dominantes del fondo; aquí se debe definir con qué parte del fondo se debería fundir la estructura (el cielo, una colina, etc.)

Si el deseo es que la estructura destaque contra su fondo, cuanto más pequeña sea su área en el campo visual, la más efectiva herramienta para darle presencia a la estructura será un contraste fuerte de matiz, intensidad y/o valor. El uso de colores que son complementarios a los colores del fondo tendrán el más sorprendente efecto. Usar dos o tres colores que son vecinos o familia del color complementario es también efectivo.

Por consideraciones de costo y mantenimiento, una de las políticas puede ser la de *no cubrir o colorear los materiales estructurales* (por ejemplo el concreto). En este caso hay algunas soluciones posibles. La más sencilla se da cuando los colores de los materiales por sí mismos armonizan con el fondo y con la *intención de diseño*.

En el caso de que no fuese así, el diseñador puede armonizar de acuerdo con su *intención de diseño* mediante la aplicación de color a ciertos detalles, proveyendo un área de color intenso, añadiendo “vida” a la estructura.

Es imprescindible utilizar medios de representación. Se puede empezar a experimentar las escogencias y armonizaciones de color, con borradores y bocetos, utilizando las fotografías a color como fondo. Para esto, se pueden usar lápices o marcadores de color sin mucho detalle, son las grandes áreas de color las que crearán el efecto. En la actualidad hay programas de aplicación en computación muy versátiles y amigables para el modelado tridimensional de una estructura.

Después de que las decisiones están hechas y los colores se han seleccionado, queda un paso importante: asegurarse que los *colores reales* que se aplicarán finalmente a la obra construida sean los mismos que los *colores seleccionados*. Un mismo color puede variar con el medio de creación, por ejemplo lápices de color, marcadores, fotografías, pantallas de computadoras, impresoras de color y empresas manufactureras de pintura. Una forma de integrar estas diferentes versiones es por medio del uso de un sistema de juegos o catálogos

de color, como por ejemplo el sistema Pantone<sup>®</sup>, con este sistema las muestras son uniformes y se identifican con un número.

### **3.3 Utilización de los principios compositivos de arte en el diseño estructural**

#### **3.3.1. Utilidad del Esquema Conceptual del Diseño Estructural**

Todo parece indicar en la historia del arte estructural que se cumple el enunciado del Esquema Conceptual del Diseño Estructural (sección 1.2.3.) en dos direcciones: no solamente es un esquema apropiado para **evaluar** la idoneidad de obras estructurales ya definidas; sino que también sus componentes pueden **conducir o ser fuente** de las ideas generadoras de la forma estructural.

Por ejemplo, por un lado la **economía** se puede utilizar como componente de evaluación a la hora de juzgar si una obra estructural terminada es adecuada; pero también, en la historia del arte estructural se muestra que la economía fue a la vez un estímulo para encontrar nuevas formas estructurales.

En el caso del componente **materiales**, por ejemplo, el nuevo hierro industrializado produjo nuevas formas estructurales, lo mismo sucedió con el concreto reforzado y el concreto preesforzado. En el caso del componente **firmeza**, se sabe, que las nuevas formas ferroviarias en puentes surgieron por la búsqueda de resistencia y estabilidad en los puentes, para soportar el efecto de las nuevas cargas dinámicas y más pesadas de la locomotora. Algo similar puede señalarse con los demás componentes.

De lo anterior es posible derivar que el proceso de diseño estructural puede ser visto como un proceso **iterativo**, donde los componentes del Esquema Conceptual del Diseño Estructural pueden servir como fuente de ideas que generen la forma estructural, y además, también se pueden utilizar para valorar la idoneidad estructural de una obra, no solamente al

final cuando el diseño esté finalizado, sino más bien, durante todas las etapas del diseño. Una modificación durante el proceso de diseño, sea pequeña o grande, puede ser evaluada de acuerdo con su impacto en estos componentes de la intención y la materialidad del diseño estructural.

Para llegar más lejos aún, además de que los componentes del diseño estructural pueden ayudar a brindar ideas generadoras de la forma estructural; ayudar a evaluar esas formas y otras nuevas posibles durante el proceso de diseño; ayudar a evaluar el efecto de las variaciones que se introduzcan en el proceso de diseño; también son fuente de ideas y evaluación durante el proceso constructivo de la obra y durante la etapa de operación. En la práctica de la ingeniería civil ha ocurrido que un constructor puede sugerir a los diseñadores ideas y modificaciones en el diseño que ayuden notablemente a mejorar el proceso constructivo, la economía, etc. Por último, en la historia del arte estructural se sabe que la observación y el análisis de obras terminadas y en operación ayudan a conocer el comportamiento estructural y a crear obras posteriores mejores.

Se puede concluir entonces que los componentes del diseño estructural son útiles durante todo el proceso de diseño, construcción y operación.

### **3.3.2. Variedad en la génesis de la forma estructural.**

Como se mencionó en la sección anterior, los componentes del diseño estructural pueden ser fuente de las ideas generadoras de la forma estructural y además ayudan a evaluar la idoneidad estructural de las obras. Pero, ¿Cómo se genera la forma estructural?

Es muy complicado tratar de dar una respuesta a esta pregunta, si es que existe. Por otra parte, se puede recurrir al estudio de las obras maestras de la historia del arte estructural. Entonces, es posible darse cuenta que, sencillamente, las ideas que generaron las formas estructurales exitosas fueron de naturaleza muy diversa. Por lo tanto, esto indica que no se puede limitar o circunscribir la fuente de donde emanan las ideas de creación de formas

estructurales. Lo que sí se puede hacer es evaluar y modificar las ideas generadoras, sea cual sea su fuente, para conocer su idoneidad estructural.

Por ejemplo, las formas de las bóvedas delgadas surgieron de la imaginación de los ingenieros quienes imitaron ideas simples basadas en las formas de la naturaleza.

Durante el primer congreso de la Asociación Internacional de Bóvedas Delgadas, en 1959, el artista estructural suizo Heinz Isler (citado por el prof. Billington, Ref. 4) describió tres maneras de alcanzar formas de bóvedas delgadas: 1) la colina moldeada libremente, donde, por ejemplo, la tierra moldeada es la forma; 2) la membrana bajo presión, donde una membrana de goma inflada da la forma; y 3) a través de una tela colgada y girada al revés, donde un tejido tendido define una forma superficial tal y como un cable colgado define una línea funicular. Con estos tres tipos de métodos, se pueden lograr ilimitadas formas de bóvedas de concreto.

Para el diseño de estas formas, el procedimiento de Isler consistía primeramente en utilizar modelos a pequeña escala, a los cuales se le hacían pruebas y se medían sus deformaciones con instrumentos muy precisos. Posteriormente, se construían, medían y probaban las estructuras a escala natural.

Otro ejemplo que muestra el origen variado de las formas estructurales lo da Eduardo Torroja cuando, citado por el Prof. Billington, describió el modo por el cual él llegó a la forma estructural del hipódromo de La Zarzuela (1935): enfatizó que este diseño no era ni puramente racional ni puramente imaginativo “pero más bien ambos a la vez. La imaginación sola no podría haber alcanzado tal decisión sin la ayuda de la razón, ni podría un proceso de deducción, avanzando por sucesivos ciclos de refinamiento, haber sido tan lógicos y determinados como para conducir inevitablemente a ello.”<sup>(4)</sup>

### 3.3.3. Utilidad de los principios compositivos artísticos en el diseño estructural.

En el inicio de este capítulo se describieron los principios de la composición artística. Estos son principios visuales que son útiles para ayudar a explicar si una obra es estéticamente agradable; por lo tanto, estos principios son útiles para evaluar la idoneidad del componente **deleite** del esquema conceptual del diseño estructural.

Una objeción obvia es que no hace falta tener conocimientos artísticos para poder apreciar si una obra resulta agradable o no; y además, que esta apreciación es diferente en cada espectador. Esto es correcto, sin embargo, no es un obstáculo para el uso de los principios de la composición artística.

Ya se sabe que los principios compositivos son de utilidad para la evaluación del componente **deleite** de obras ya concluidas; pero queda por determinar si son útiles durante el proceso de diseño estructural.

En las dos secciones anteriores se ha visto que las ideas que generan la forma estructural pueden tener causas muy variadas; entre ellas pueden estar también las ideas estéticas. Pero se debe recordar que el componente **deleite** no es en sí mismo suficiente para generar la forma estructural. La adecuación de la forma estructural está dada por el correcto balance de todos los componentes del esquema conceptual del diseño estructural (sección 1.2.3.)

A continuación se mencionan algunos ejemplos donde participa el factor estético en la generación de la forma estructural:

Pier Luigi Nervi hizo más rígidos sus domos por el uso de nervaduras y así solucionó el problema del pandeo. No adicionó material, sino que lo redistribuyó, y esa redistribución puede ser hecha de muchas maneras, así pudo expresar su estilo estético personal. Por ejemplo, en 1957 Nervi diseñó y construyó el Pequeño Palacio de los Deportes en Roma (ver Fig. 2.7), donde el doble sistema de nervaduras diagonales crea un patrón decorativo salido de una idea de diseño técnica. Nervi procuró siempre belleza y economía.

Othmar Ammann tuvo una gran motivación estética además de una clara percepción del desempeño estructural de sus puentes. Su sensibilidad estética demandaba la delgadez de los tableros, pero estos debían ser rígidos, aprendió del trágico ejemplo del colapso del puente del estrecho de Tacoma. Por lo tanto, Ammann para el diseño del puente de Verrazano, de 1964, con 1298 m de luz, fue capaz de crear un tablero delgado (con una relación de profundidad-luz de 1/180) y a la vez rígido al desarrollar una armadura tubular. Este es un ejemplo de una solución estética y técnica.

El artista estructural Félix Candela al hablar de su aversión a la fealdad en su procedimiento de diseño; dio a entender que la eficiencia y economía son asuntos principales en el diseño estructural, “pero una estructura eficiente y económica no tiene necesariamente que ser fea.” “... no hay una única solución a un problema de ingeniería. Por lo tanto, siempre es posible modificar el todo o las partes hasta que la fealdad desaparezca.”

### **3.3.4. Ejemplo de aplicación de los principios de composición.**

A continuación se muestra un ejemplo, muy sencillo, de las posibilidades de aplicación de los principios de composición en el diseño de la pila de un puente de 44 m de luz. Se reitera la simplicidad de la forma resultante de este ejemplo. No es una obra de arte estructural, pero puede ser útil para ilustrar los conceptos de la sección 3.2. anterior.

Para mayor facilidad de este ejercicio, se supondrán los materiales constructivos: vigas de concreto preesforzado con luces de 22 m; y tablero, una pila central y barandas de concreto reforzado.

Las vigas de concreto preesforzado tienen, por un lado, la facilidad de que se fabrican y se adquieren comercialmente con formas y dimensiones preestablecidas. Por otra parte, son elementos a los cuales no se les podrá variar su forma. Es entonces que se propondrá una configuración de los demás elementos de manera que se integren como conjunto. Esta

integración debe darse entre los elementos entre sí; y también entre los elementos y los alrededores (el sitio).

Primero es importante definir el campo visual: ¿Cuáles son las vistas del puente que estarán expuestas a ser percibidas por el espectador? En la Fig. 3.40 se evidencia que debido a la trayectoria que siguen los vehículos, la parte superior y lateral serán vistas por el público y además es fácil darse cuenta que la parte de abajo del puente estará en su momento muy cercana al espectador.

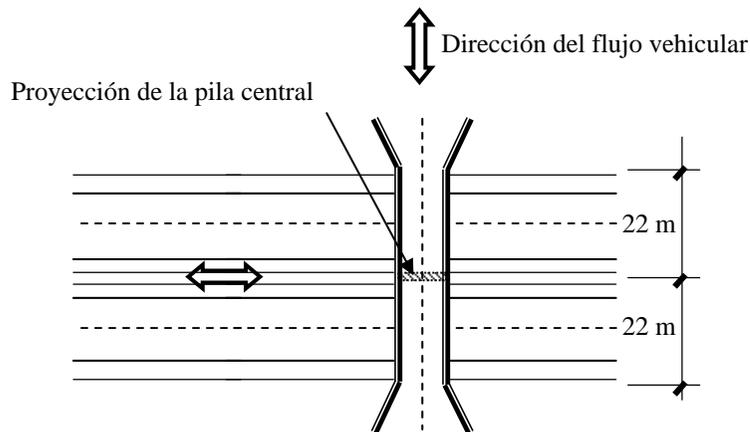


Fig. 3.40: Planta de Distribución del puente (sin escala).

El principio fundamental de la composición es “Unidad dentro de la Variedad” o “Variedad dentro de la Unidad”; esto quiere decir que para que una obra sea agradable, cada uno de los elementos que la conforma debe presentar características comunes que los integren como una unidad y a la vez debe haber variedad en el conjunto. Es recomendable lograr un equilibrio entre esta integración de los elementos y la variedad de los mismos.

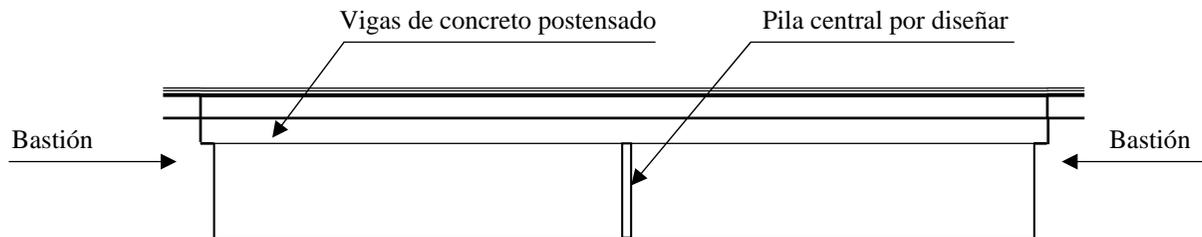


Fig. 3.41: Esquema de la elevación principal del puente (Esc. 1:400)

En la Fig. 3.41 se muestra un esquema del alzado del puente con vigas preesforzadas. Este esquema sencillo se presenta a escala (sin acotar) para mostrar la forma y proporción de los principales elementos del puente. Se nota que estará compuesto especialmente por elementos horizontales y verticales.

En ingeniería es una práctica usual que muchos de los elementos que se diseñan tengan forma rectangular. Por un lado esto tiene la ventaja de que sean sencillos, más económicos, fáciles de analizar, dimensionar, construir, etc. El problema que se presenta es que las obras se vuelven excesivamente simples, monótonas o como se dice “cajoneras”.

Tal y como se ha indicado anteriormente, los elementos compuestos solamente por líneas rectas horizontales y verticales son monótonos, estáticos; mientras que los elementos inclinados o curvos expresan la idea de variedad y dinamismo. Por lo anterior, es que intentará romper la monotonía del esquema de líneas verticales y horizontales del puente, introduciendo en la pila elementos visuales inclinados y curvos.

Es necesario aclarar que para la escogencia de estos elementos visuales hay que tomar en cuenta los demás *componentes* del esquema conceptual del diseño estructural; es decir, se debe buscar que tales elementos visuales inclinados y curvos sean fáciles de construir, económicos, brinden la debida firmeza a la estructura, etc.

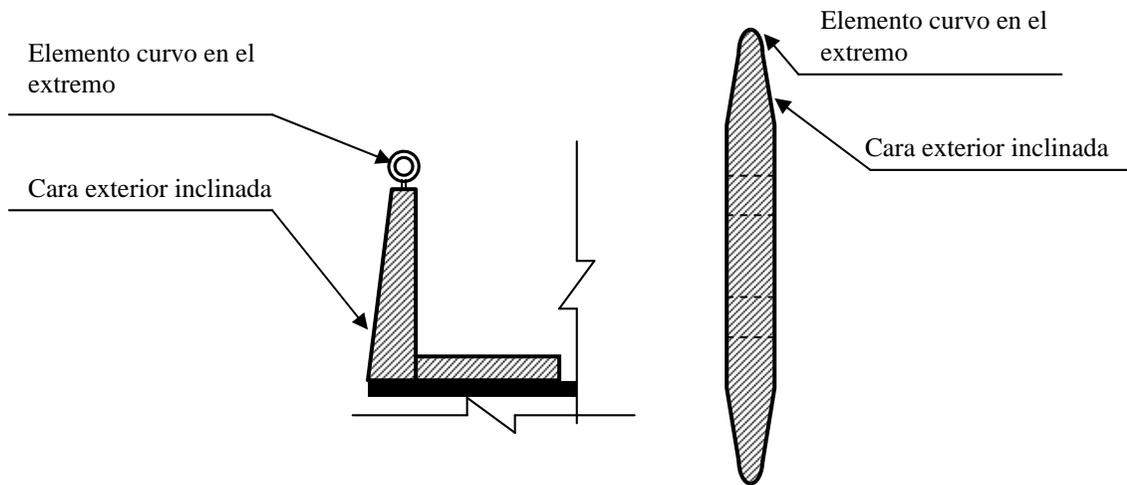


Fig. 3.42: Sección de las barandas y planta de la pila central.

También se dará cierta integración o unidad entre la forma de las barandas y los extremos de la pila central. Las barandas componen la parte superior extrema del puente; en la Fig. 3.42 se representa una sección de las barandas, se puede observar que tienen una cara inclinada exterior de concreto, rematadas en la punta de un elemento circular de tubo de acero. La pila central tendrá también en sus extremos caras inclinadas y estarán rematadas por una curva.

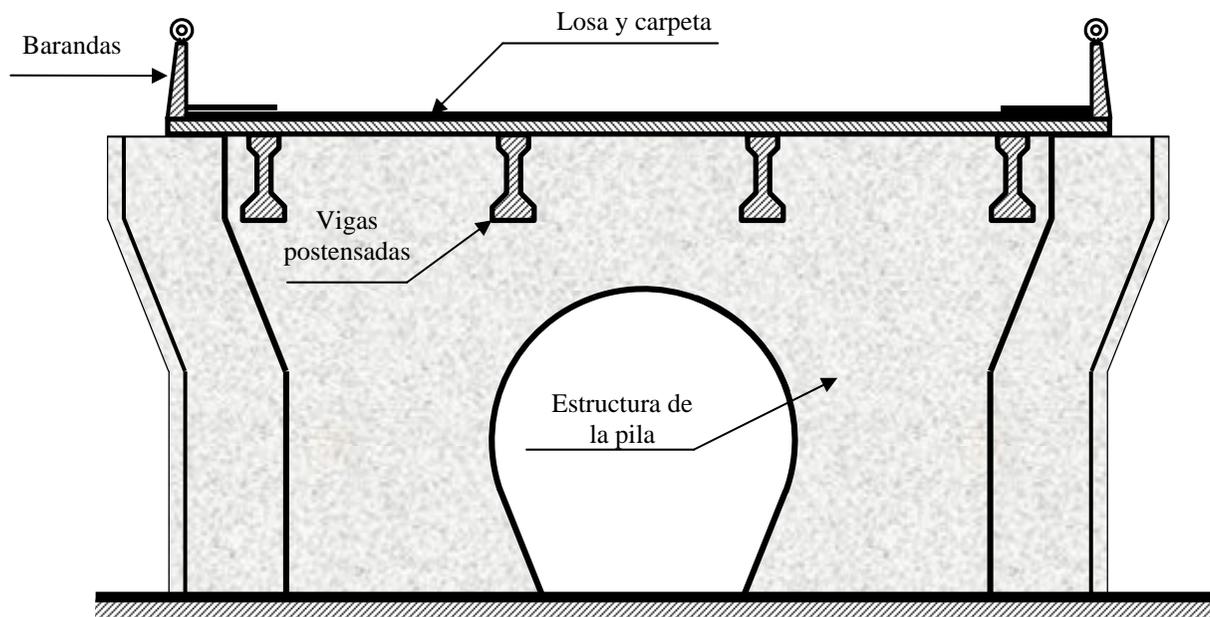


Fig. 3.43: Vista de la pila propuesta.

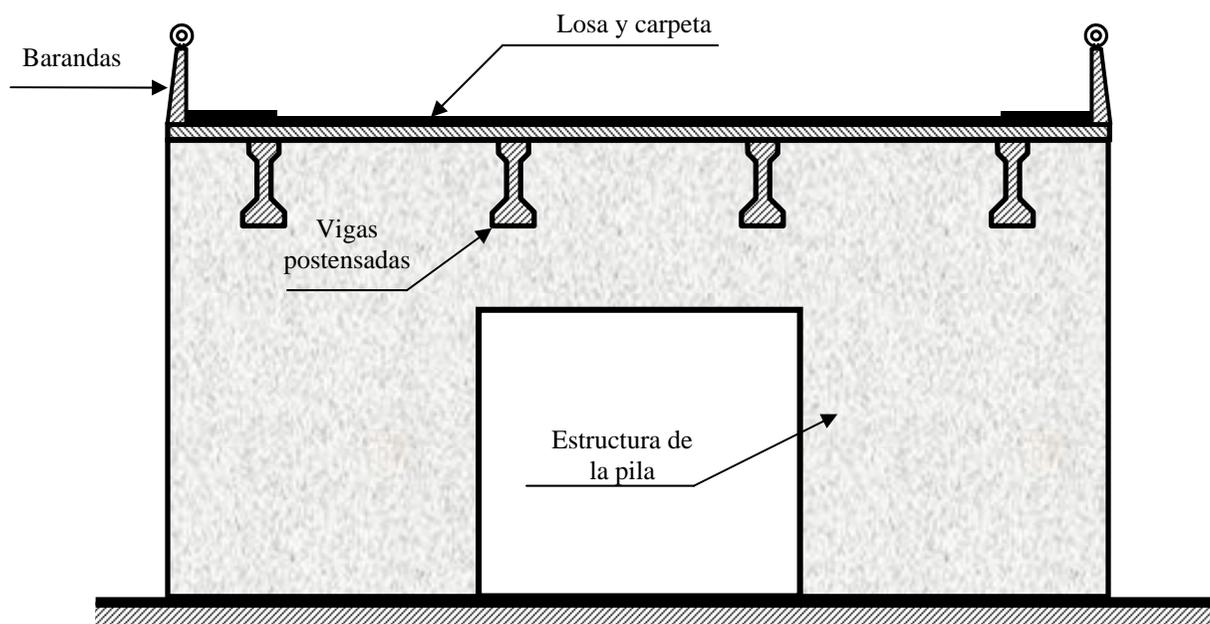


Fig. 3.44: Solución monótona.

En las Figs. 3.43 y 3.45 se muestran vistas de la pila propuesta. Se puede notar que esta ofrece mayor variedad y contrasta con una solución “cajonera” (ver Fig. 3.44).

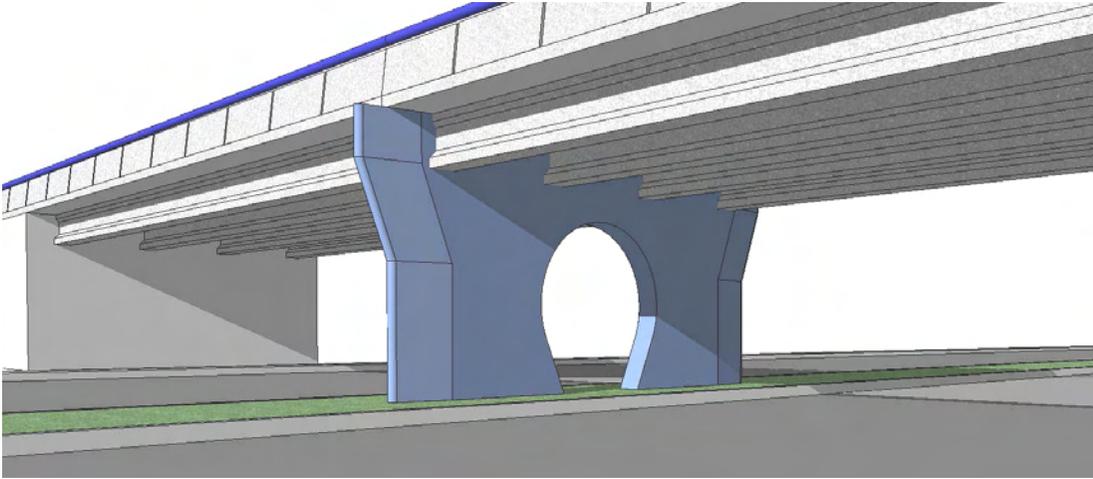
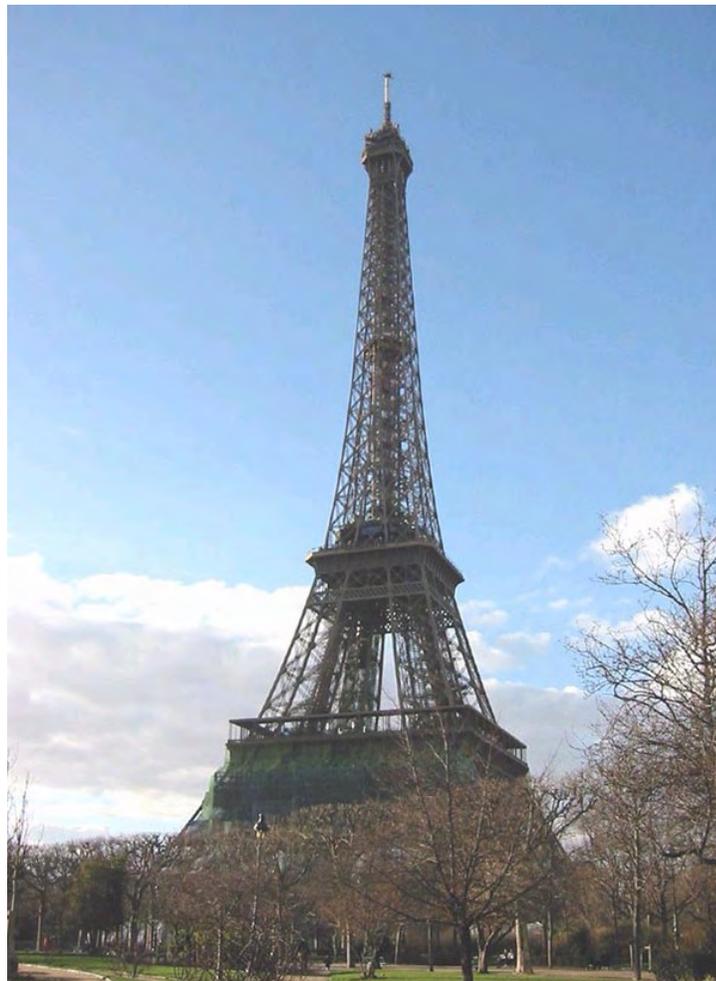


Fig. 3.45: Perspectiva de la solución propuesta

## CAPÍTULO IV

# LA ESTÉTICA EN ALGUNOS INGENIEROS ESTRUCTURALES COSTARRICENSES



## CAPÍTULO IV

# LA ESTÉTICA EN ALGUNOS INGENIEROS ESTRUCTURALES COSTARRICENSES

### 4.1. Introducción.

En este capítulo se muestran ejemplos de obras de diseño estructural y se exponen características importantes que surgieron en entrevistas a diseñadores estructurales nacionales. La finalidad de este estudio es la de conocer los procedimientos de diseño que siguieron. El enfoque se centra en el componente estético del proceso de diseño estructural.

Se seleccionaron algunos diseñadores estructurales nacionales que han tenido una preocupación consciente por incorporar el componente estético del diseño estructural en sus creaciones. De esta manera, la inquietud estética en su trabajo se refleja en forma congruente en sus obras. El orden en el cual se mencionan estos diseñadores en este capítulo está en secuencia cronológica.

De acuerdo con las características del arte estructural, enunciadas en el capítulo 2, principalmente se buscan aquellas obras costarricenses donde el ingeniero directamente tome el mando en el diseño de la forma visual de la obra. La determinación de la forma por parte del ingeniero se da principalmente en obras de ingeniería de **gran escala y uso definido estrechamente** como lo sería la función estructural; especialmente en aquellas obras donde **la forma y la estructura tiendan a ser una sola**. Esto se da en torres, puentes, techos para grandes espacios, y en edificios industriales donde el ingeniero es el responsable de la configuración.

Estas entrevistas nos dan un panorama de la realidad nacional en la práctica de la ingeniería estructural. Como resultado importante se desprende que la competencia estética directa por parte del ingeniero está muy limitada. Esto es un resultado natural si se toma en cuenta que la mayoría de las instituciones de formación de profesionales de ingeniería civil no

consideran en sus planes de estudios cursos exclusivos de arte y estética aplicados a las obras de ingeniería (sección 1.3.1.)

Por otra parte, la realidad nacional evidencia que hay muy pocas obras de gran escala; esto si se compara con las obras de ingeniería de países desarrollados (como por ejemplo las estudiadas en el capítulo 2).

Otra característica importante de la realidad nacional es que muchas obras, como los edificios (los cuales son pequeños en Costa Rica si se comparan con los rascacielos de otros países), implican **funciones** complejas y por lo tanto, el proceso de diseño requiere coordinación multidisciplinaria. En estos casos, es común en nuestro país que la determinación de la **forma** y su componente **estético** se dejen principalmente a los profesionales de arquitectura. Los ingenieros nacionales recomiendan una apropiada comunicación entre arquitectos e ingenieros durante el proceso de diseño de este tipo de obras.

No obstante, a pesar de las limitaciones, el panorama es alentador. El diseño estructural costarricense tiene la experiencia y el potencial para desplegar esperanzadores esfuerzos y crear obras de arte estructural.

#### **4.2. Ing. Franz Sauter Fabian.**

La información a cerca del Ing. Franz Sauter Fabian (1933-2003) se ha recopilado a través de entrevistas a ingenieros cercanos que trabajaron con él: el Ing. Ronald Steinvorth Sauter y el Ing. Alfredo González Fonseca.

El Ing. Ronald Steinvorth Sauter es ingeniero estructural del Grupo IECA S.A. Ingenieros Estructurales Consultores Asociados y además es sobrino del Ing. Franz Sauter Fabián. También es destacado pionero de la ingeniería estructural y sismorresistente de Costa Rica y Centroamérica. El Ing. Steinvorth trabajó con el Ing. Sauter durante 25 años. La

información presente se basa en una entrevista al Ing. Steinvorth (Ref. 30) y en una reseña biográfica familiar que escribió a cerca del Ing. Franz Sauter (Ref. 29).

El Ing. Alfredo González es profesor de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica y diseñador estructural de la empresa Franz Sauter & Asociados S.A. Servicios Integrados en Ingeniería y Arquitectura. El Ing. González ha hecho una recopilación de los aportes del Ing. Franz Sauter Fabián a la ingeniería estructural y sísmica en Costa Rica, la cual expuso en el X Congreso de Ingeniería Civil en el 2004 (Ref. 10).

El Ing. Ronald Steinvorth señala que al Ing. Franz Sauter sí le interesaba la parte estética del diseño de obras de ingeniería. El ingeniero Sauter se graduó de la Universidad de Costa Rica en 1956, después de esto fue invitado por el Dr. Fritz Leonhardt a trabajar en su prestigiosa oficina en Stuttgart, Alemania en 1957. El Dr. Leonhardt supo apreciar su enorme capacidad y su entusiasmo por las ciencias de la ingeniería, por su parte, el Ing. Sauter lo consideró su maestro y mantuvo su amistad hasta su muerte en 1999. Como se ha visto en el capítulo 1, el Dr. Leonhardt conservó el interés en el estudio del componente estético del diseño estructural durante al menos 50 años de su vida (Ref. 18).

El Ing. Sauter estudió nuevas técnicas y su conocimiento del concreto preesforzado le mereció ser socio fundador de la empresa Productos de Concreto (la cual pertenece actualmente al Grupo Holcim). Gracias a él se comenzaron a fabricar en el país las viguetas pretensadas de entepiso.

En 1963 partió a Tokio, Japón, donde obtuvo una especialidad en ingeniería sismorresistente. A su regreso, en 1964, fundó la empresa Franz Sauter & Asociados Ltda., pionera en el país en el campo de la ingeniería estructural y sismorresistente.

Fue un apasionado por el estudio de los terremotos, participó en la comisión que elaboró el primer Código Sísmico de Costa Rica en 1974 y fue miembro de su Comisión Permanente durante 31 años hasta culminar con el actual código vigente CSCR-2002 publicado pocos meses antes de su inesperado deceso.

Una de sus más notorias enseñanzas fue la utilización de muros de corte de concreto reforzado como elementos resistentes, con el fin de reducir los daños en las edificaciones sometidas a las fuerzas de un sismo. Además de las características sismorresistentes, el Ing. Sauter también se interesó por el aspecto estético de los muros; se preocupó por la contribución de los muros a mejorar la apariencia de las obras.

Por su parte, el Prof. Alfredo González apunta que el Ing. Franz Sauter hizo aportes importantes a los campos de la ingeniería estructural y sísmica. Estos fueron plasmados en sus artículos técnicos y en su ejercicio profesional. Desarrolló una filosofía del diseño sismorresistente congruente y racional; explicable a partir de las observaciones hechas de los daños causados por terremotos en diversas partes del mundo.

Sostuvo la necesidad de darle importancia principal a un adecuado concepto de estructuración y a sanos detalles constructivos; y evitar darle importancia excesiva al análisis numérico. Entre los principios básicos del diseño de estructuras que enfatizó se tienen: simetría, regularidad, continuidad y redundancia entre otros. De sus estudios, detectó errores de estructuración que en la práctica llevan al colapso o a daños serios en la estructura. Defendió una filosofía del diseño sismorresistente que minimice el daño secundario y las pérdidas económicas para el propietario; explicando en este sentido las ventajas y desventajas de estructuras rígidas y flexibles.

Con respecto a la parte estética, en una entrevista (Ref. 11), el Prof. González declara que el Ing. Franz Sauter insistió en trabajar en conjunto con el arquitecto. Este no sabe hasta qué punto pedirle a los materiales. De aquí la asesoría del ingeniero.

Don Franz Sauter insistía en que la estructura se viera. El Ing. González indica que algunos arquitectos dan efecto estético con materiales con base en yeso forrado, esto tapa la estructura. Por lo tanto, considera que al inicio se le deben hacer preguntas al arquitecto acerca de si le gusta el estilo moderno, si prefiere exponer la estructura, qué puede hacer y qué no. Luego se considera si se puede construir.

Además, para hacer un diseño que tome en cuenta la estética, se necesita mucho conocimiento de los materiales, que se sepa desde el diseño de la mezcla de concreto, el

diseño de la formaleta, cómo se hacen las juntas, los acabados de acero, el tratamiento de la soldadura, la pintura etc. En fin, dice que el ingeniero debe estar atento y percibir las necesidades del arquitecto y decidir si la obra se puede construir.

El Ing. Sauter Fabián contribuyó notablemente al desarrollo de la prefabricación y el preesfuerzo del concreto en nuestro país. También tuvo la capacidad de visualizar en este nuevo material su potencial artístico y creativo; tal y como lo manifestó él mismo:

“Se ha dicho que la prefabricación conduce por su necesaria tipificación de los elementos fabricados a una restricción de la libertad artística y creadora y que produce obras monótonas y faltas de espíritu. Este temor es sin fundamento en gran parte y podemos probar que la prefabricación no necesariamente conduce a una tipificación general.”<sup>(26)</sup>.

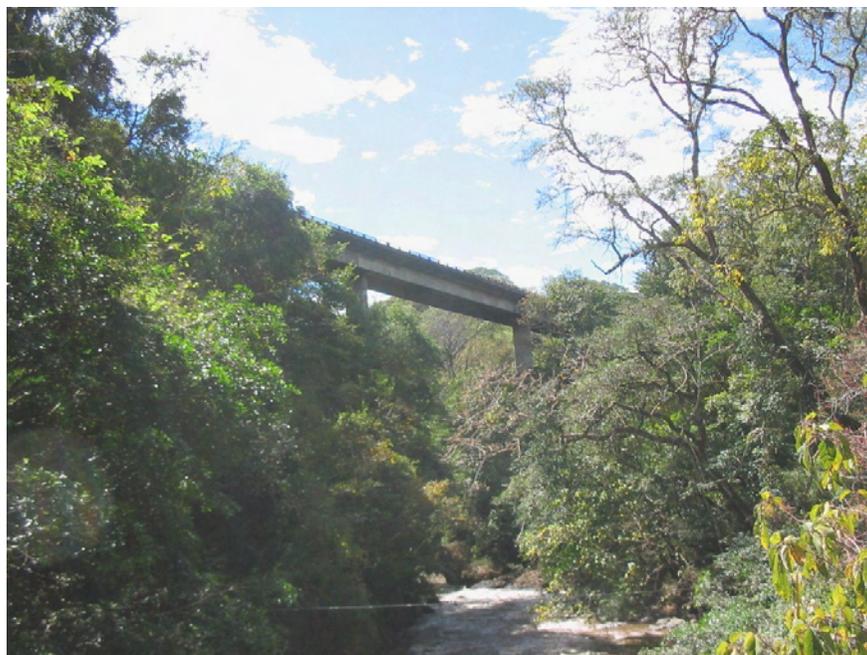


Fig. 4.1: Puente sobre el río Poás.

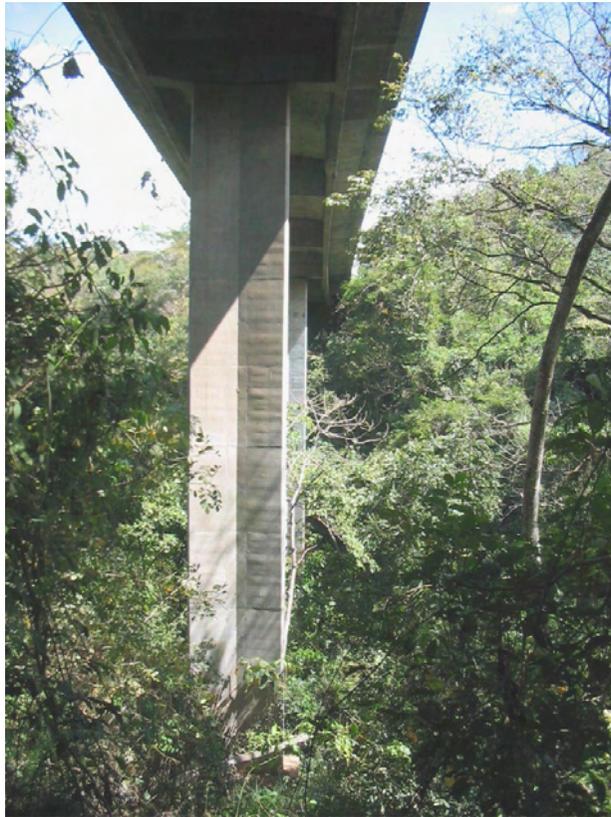


Fig. 4.1 (continuación): Puente sobre el río Poás.



Fig. 4.2: Puente sobre el río Rosales.



Fig. 4.2 (continuación): Puente sobre el río Rosales.

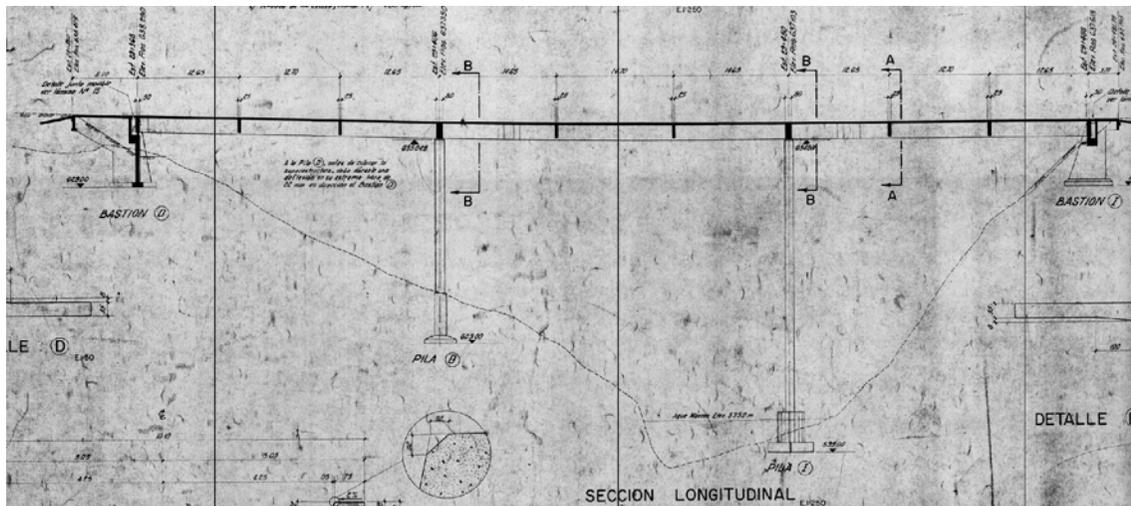


Fig. 4.3: Sección longitudinal del puente sobre el río Poás.

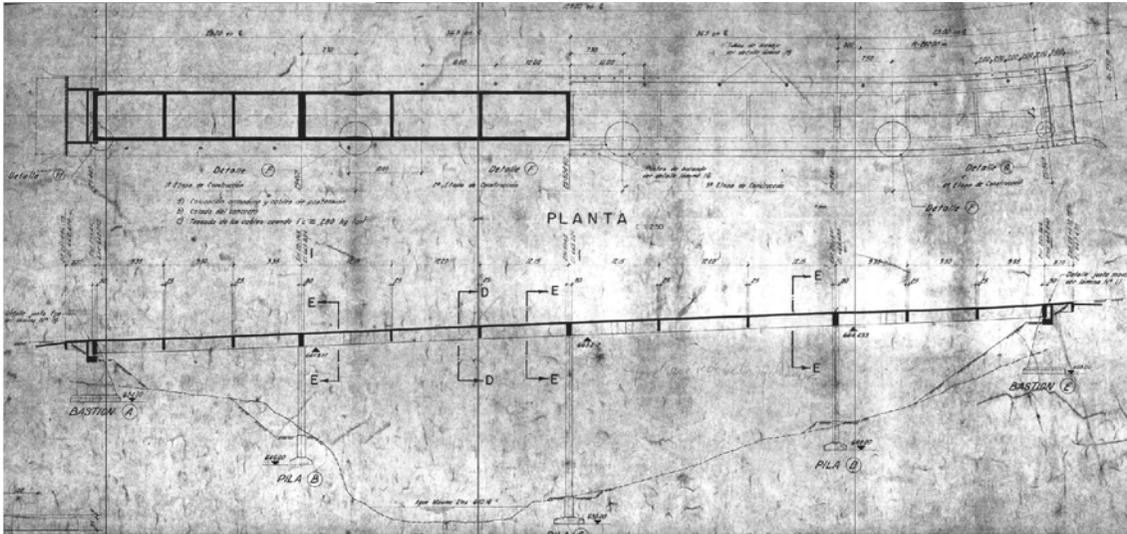


Fig. 4.4: Sección longitudinal del puente sobre el río Rosales.

En 1968, conjuntamente con el Dr. Leonhardt y Ulrich Meierhofer, diseñó los puentes Poás y Rosales sobre la carretera Bernardo Soto (ver Figs. 4.1 a 4.4). Estos puentes de concreto preesforzado son similares. Ambos tienen una forma visual simple, constan de pilas de concreto postensado y sobre ellas, vigas bastante eficientes, también de concreto postensado, con una altura de  $1/18$  de la luz.

El puente sobre el río Poás tiene una longitud de 120 m, con tres tramos de 38m, 44 m y 38 m.; las cuales se apoyan sobre dos pilas de 20 m y 35 m de altura. El puente sobre el río Rosales tiene una longitud de 129 m, con cuatro tramos de 28m, 36.5 m y 36.5 m. y 28 m; las cuales se apoyan sobre tres pilas de 12 m, 22 m y 14 m de altura.

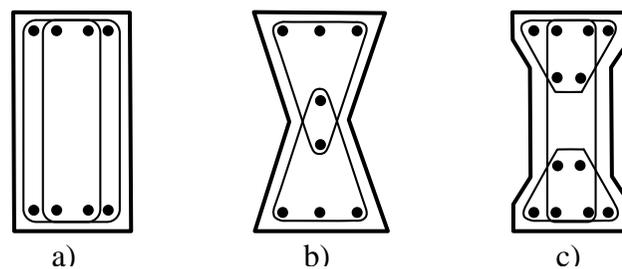


Fig. 4.5: Esquema de diferentes secciones de pilas.

Son interesantes las pilas altas estilizadas, la sección transversal se muestra en la Fig. 4.5b), esta es más eficiente y ofrece mayor variedad visual que una sección rectangular (Fig. 4.5a), pero es más fácil de construir que una pila con la forma mostrada en la Fig. 4.5c). Estas pilas cuentan con articulaciones en la parte superior para que no reciban ni transmitan esfuerzos de flexión a las vigas transversales (ver Fig. 4.2.-continuación-).

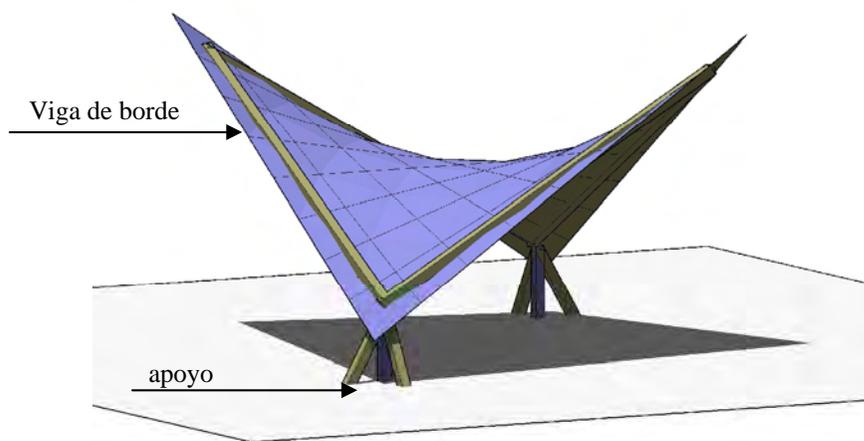


Fig. 4.6: Esquema del techo con forma de paraboloides hiperbólico diseñado para la Ciudad Universitaria de Honduras.

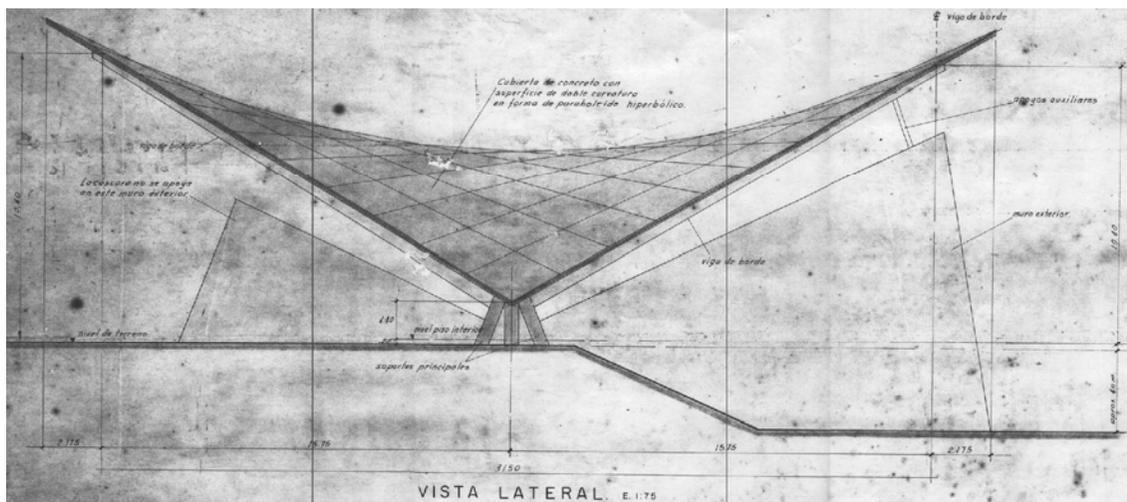


Fig. 4.7: Vista lateral del techo con forma de paraboloides hiperbólico.



El tramo central más largo del cascarón en voladizo debe reforzarse para soportar mayor tensión; aquí es importante el traslape de las varillas.

Es interesante notar que los planos de construcción constan de dos láminas, lo que refleja que se trata de una forma simple. Así, se tiene que esta forma es simple, eficiente y agradable.

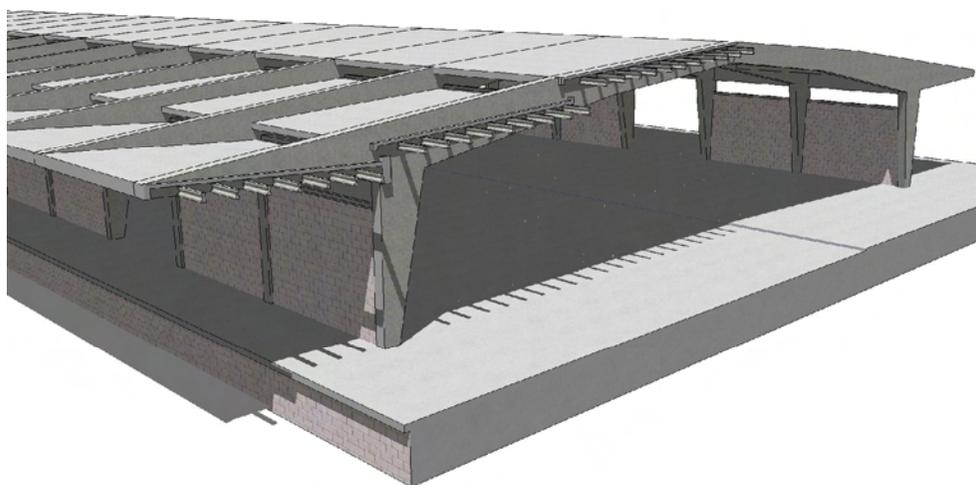


Fig. 4.9: Boceto de las bodegas de concreto preesforzado.



Fig. 4.10: Boceto de las bodegas de concreto preesforzado.

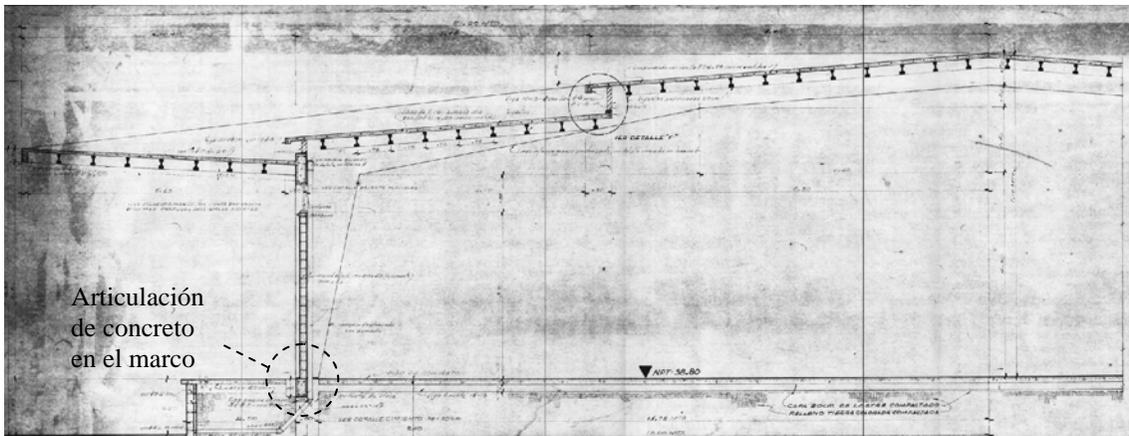


Fig. 4.11: Sección de las bodegas de concreto preesforzado.

Ya para alrededores de 1965 la empresa Franz Sauter y Asociados Ltda. hizo el diseño estructural de una bodega para Molinos de Costa Rica S. A. (ver Figs. 4.9 a 4.11). La luz de esta bodega es de 30 m, esto implica que la **función estructural** de la **forma** adquiere una importancia significativa.

El sistema estructural de esta bodega está basado en marcos de concreto donde se aplica la postensión. Están separados a cada 5 m. La cubierta se compone de una losa de concreto reforzado de 6 cm de espesor; la cual se soporta sobre viguetas de concreto pretensado.

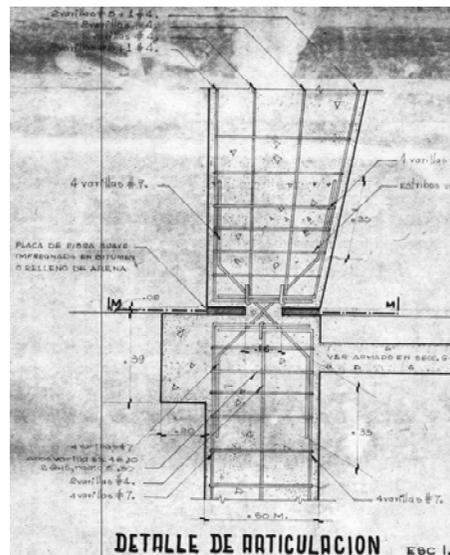


Fig. 4.12: Detalle de la articulación de los marcos de concreto preesforzado.

Un detalle interesante es la articulación de concreto reforzado en la base del marco (ver Fig. 4.12). Esto evita la transmisión de momentos a los cimientos, lo que reduce sus costos. Este detalle es similar al que aparece en la articulación de la parte superior de las pilas de los puentes Poás y Rosales.

Otra característica importante de esta solución estructural es la colocación de la losa de concreto de la cubierta y sus viguetas a diferentes niveles de la altura del marco (ver Figs. 4.9 y 4.11). Esto trae varios beneficios, por un lado, aumenta la estabilidad lateral en el sentido longitudinal de la bodega y además permite la entrada de aire y luz por el techo hacia el gran espacio interior.

Por otro lado, los diferentes planos de cubierta, con posiciones e inclinaciones diferentes, introducen variedad en la forma volumétrica (ver Fig. 4.9). Es práctica usual que los marcos queden tapados por la cubierta. En esta bodega los marcos quedan expuestos por encima de la bodega en ciertos tramos; estas partes salientes contrastan por su forma con los planos de la cubierta logrando un interés visual en esta área.

Se puede concluir que esta bodega es un buen ejemplo de libertad creadora en obras de prefabricación.



Fig. 4.13: Cerchas con armaduras tipo vierendeel de la plaza de comidas de Multiplaza del Este.

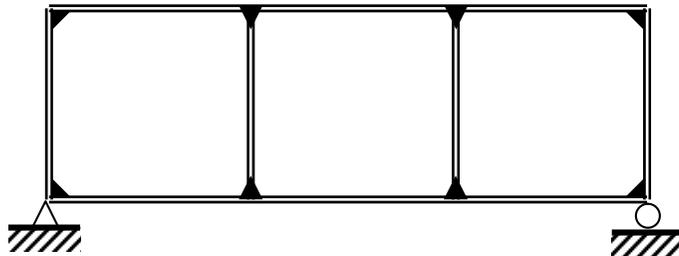


Fig. 4.14: Esquema de armadura tipo vierendeel.

Como ejemplo de obras diseñadas por la empresa Franz Sauter & Asociados S.A. en las cuales se puede mostrar la colaboración entre ingenieros y arquitectos para la creación de una estructura con apariencia agradable, tenemos los techos de la plaza de comidas de Multiplaza del Este (ver Fig. 4.13).

Estos techos tienen forma transversal de diente de sierra, están formados por cerchas con armaduras tipo vierendeel (ver Fig. 4.14), las cuales tienen la característica de no poseer arriostres, por lo cual sus uniones se diseñan para resistir momento. Aquí la cercha se

vuelve parte de la composición, permite la entrada de la luz; para dar el efecto estético el arquitecto quiso obviar los elementos diagonales.



Fig. 4.15: Techo con forma de abanico de la plaza de restaurantes de Multiplaza de Escazú.

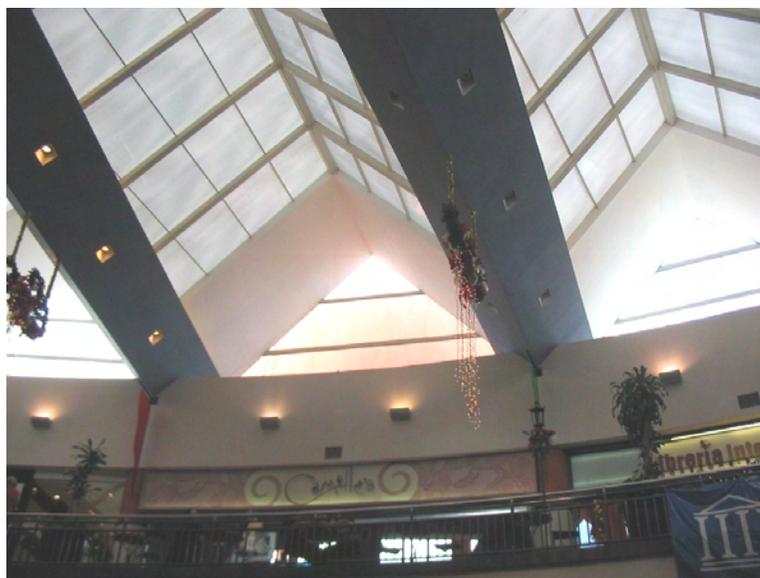


Fig. 4.16: Detalle del techo con forma de abanico de la plaza de restaurantes de Multiplaza de Escazú.

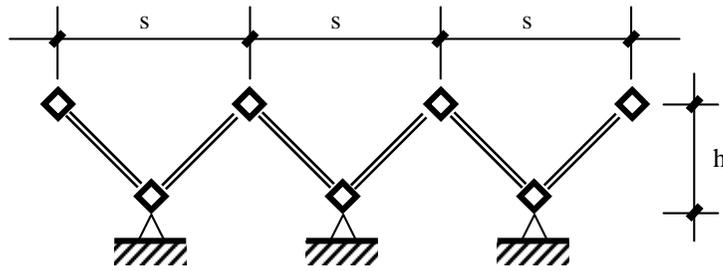


Fig. 4.17: Esquema de la sección del techo con forma de abanico.

En la cuarta etapa de Multiplaza de Escazú, los techos de la Plaza de Comidas también se componen de armaduras tipo vierendeel; pero en esta ocasión se disponen en forma de abanico (ver Figs. 4.15 a 4.17). Esta configuración introduce variedad en la composición y difiere de las soluciones monótonas usuales con cerchas iguales colocadas longitudinalmente en forma paralela. La disposición plegada de estas cerchas da rigidez al techo porque aumenta su inercia. Esta idea es análoga al abanico de papel, el cual adquiere rigidez con los pliegues (ver Fig. 4.18).

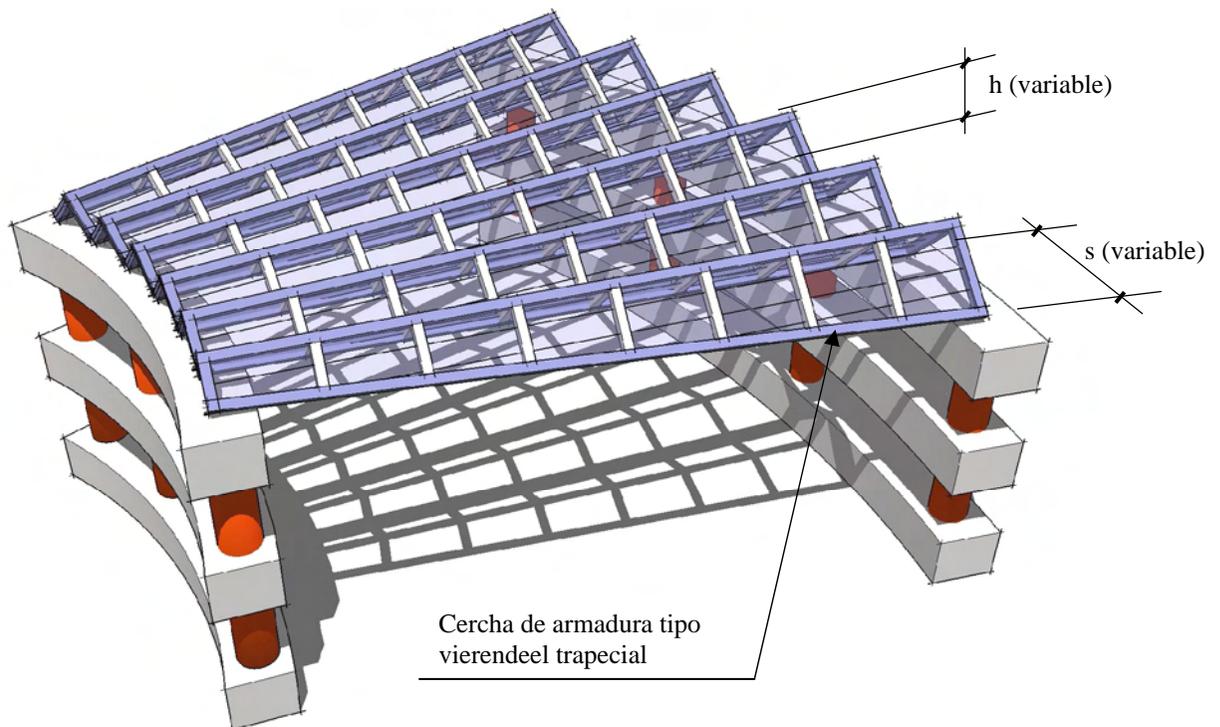


Fig. 4.18: Boceto del techo con forma de abanico.

Por la disposición radial (ver Figs. 4.17 y 4.18), conforme el abanico se abre, la separación horizontal  $s$  de las cerchas aumenta, por lo cual, la estructura se vuelve más eficiente si se aumenta también la altura  $h$ ; esto da como consecuencia que las armaduras vierendeel no sean rectangulares, sino mas bien con forma de trapecio, esta inclinación ayuda también al desagüe de las aguas pluviales del techo.

Por medio de las obras ilustradas se ha mostrado que el Ing. Franz Sauter mantuvo un interés conciente por el componente estético en el diseño de sus obras. Además de interesarse profundamente por el diseño sismorresistente, también se interesó en la apariencia.

Cultivó el interés estético tanto en aquellas obras donde el ingeniero estructural es el que define la forma, como en aquellas donde trabaja como parte de un equipo multidisciplinario. En este último caso procuraba una debida comunicación con los arquitectos.

### **4.3. Ing. Juan Carlos Ortiz.**

El Ing. Juan Carlos Ortiz es diseñador estructural y contratista de estructuras metálicas Metálica Proyectos en Acero. Es un ingeniero que ha trabajado con arquitectos nacionales reconocidos por sus ideas innovadoras en las que la estructura adquiere una importancia especial, como el Arq. Víctor Cañas.

El Ing. Ortiz se destaca como un ingeniero estructural que ha desarrollado el gusto estético en sus trabajos; varios de los proyectos, en los cuales ha participado como ingeniero estructural y contratista de estructuras metálicas, han sido distinguidos con premios de certámenes de Arquitectura (Ref. 2).

En una entrevista (Ref. 22), el Ing. Ortiz reconoce que la parte estética la dirige el arquitecto pero con ayuda del ingeniero. Explicó que la configuración de la obra la hace el arquitecto

pero que debe existir una negociación con el ingeniero. Es decir, ha trabajado en obras que implican funciones arquitectónicas y por lo tanto, es el arquitecto quien define la forma; pero su tarea es la de colaborar en la puesta en práctica de las ideas estéticas propuestas por el arquitecto.

Manifiesta que ha habido un auge por mostrar las estructuras. Dice que hay cosas que el arquitecto no maneja como uniones soldadas, atornilladas, anclajes. El arquitecto plantea y él decide, por ejemplo, una viga de 30 cm ó 50 cm, un tubo de 76 mm x 76 mm (3" x 3"), o un perfil dado; o el arquitecto dice que quiere una barra, etc.; se trata entonces de un entendimiento.

Otra característica importante es que de esa negociación con los arquitectos se aprende a conocer lo que les gusta y lo que no les gusta. Indica que es posible que algunos ingenieros no se atrevan a hacer ciertos detalles por miedo a que "se vayan a caer".

Afirma que el tener conocimiento de cómo funcionan los materiales y el querer hacer las cosas muy prácticas ayuda a bajar los costos. Es de la opinión de que si se le paga a un ingeniero es para seguridad, para que haga cosas factibles y aceptables y que sea más barata. Por ejemplo, no tiene sentido en contratar un ingeniero si pretende una casa de habitación de bloques de gran espesor, como de 20 cm y muy reforzada con barras de acero #4.

Una idea muy importante e interesante en el pensamiento del Ingeniero Ortiz es que en la práctica profesional se debe tener un interés lúdico; tiene que gustarle al ingeniero lo que hace. Si está interesado en la estética le tienen que gustar los temas de la arquitectura moderna. Manifiesta que hay trabajos muy rentables en los cuales no ha querido participar, simplemente porque el tipo de obra no le gusta en lo personal.



Fig. 4.19: Fotografías del Centro Creativo.

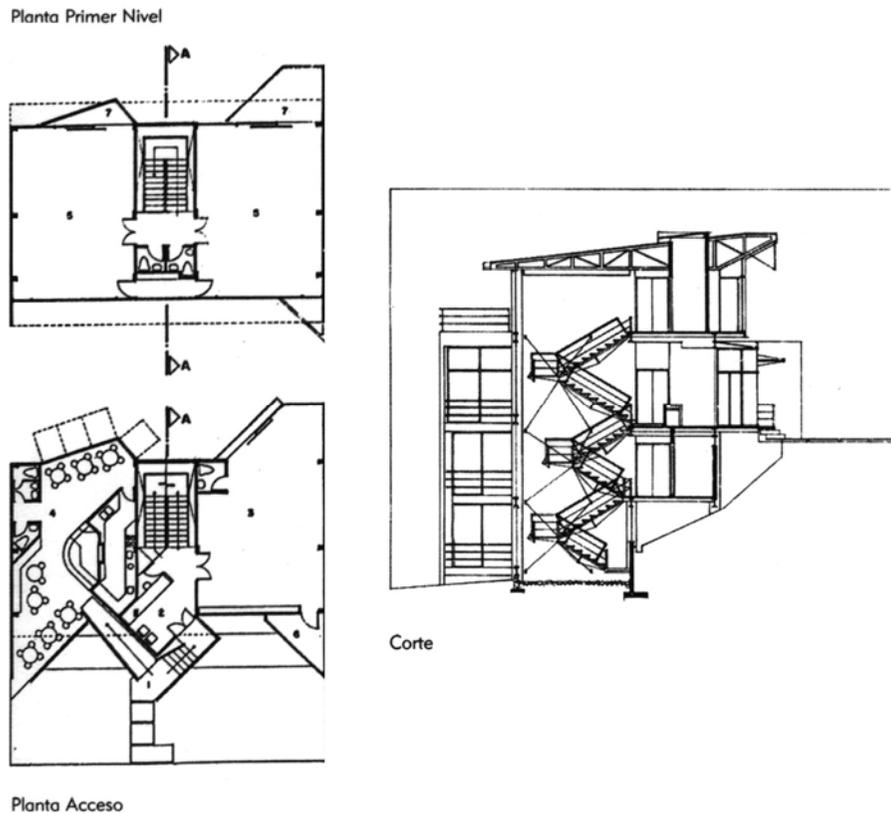


Fig. 4.20: Planta de acceso, planta del primer nivel y corte del Centro Creativo.

En las Figs. 4.19 y 4.20 se muestra el Centro Creativo, el cual es una de las obras representativas del Arq. Víctor Cañas. En este proyecto participó en el cálculo estructural el Ing. Juan Carlos Ortiz. El Centro Creativo obtuvo el Gran Premio de la IV Bial de Arquitectura y Urbanismo de Costa Rica en 1998 (Ref. 2). Se considera que este centro tiene una de las más bellas escaleras construidas en el país. La escalera se apropia del paisaje y lo incorpora por medio de vidrio transparente y espejo. Se consigue un efecto innovador cuando el espejo refleja la escalera sostenida por tensores.

Estos mismos conceptos se retomaron en los Apartamentos Freund (Fig. 4.21), también del Arq. Cañas y con diseño estructural del Ing. Ortiz. En este proyecto destaca claramente la escalera por sus tensores y su liviandad. Los cables se tensan en un marco de acero diseñado para este propósito y en unas basas en el piso, a diferencia del Centro Creativo donde se conectan los descansos con los entrepisos.



Fig. 4.21: Fotografía de los Apartamentos Freund.

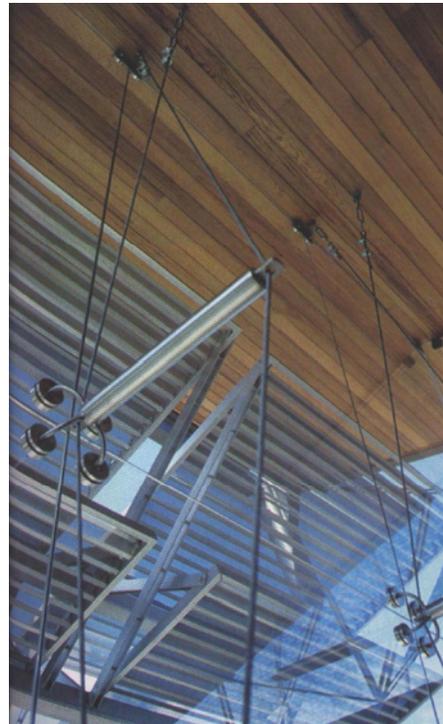
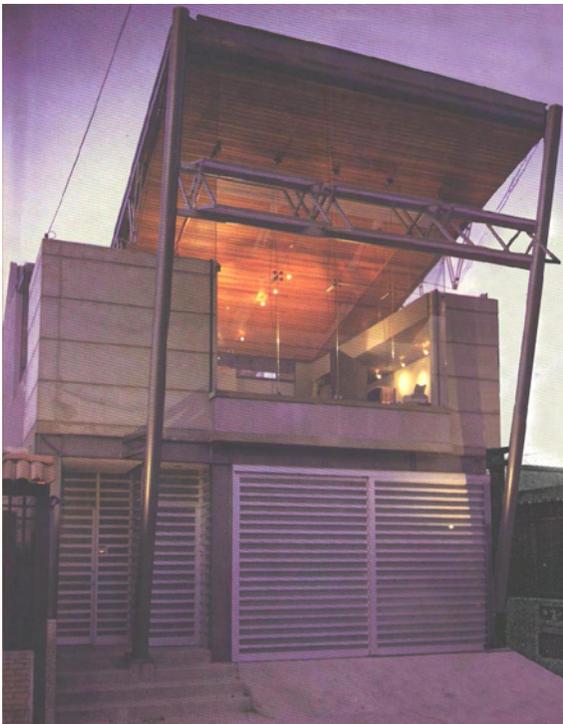


Fig. 4.22: Fotografías del edificio Elmizú.



Fig. 4.22 (continuación): Fotografías del edificio Elmizú.

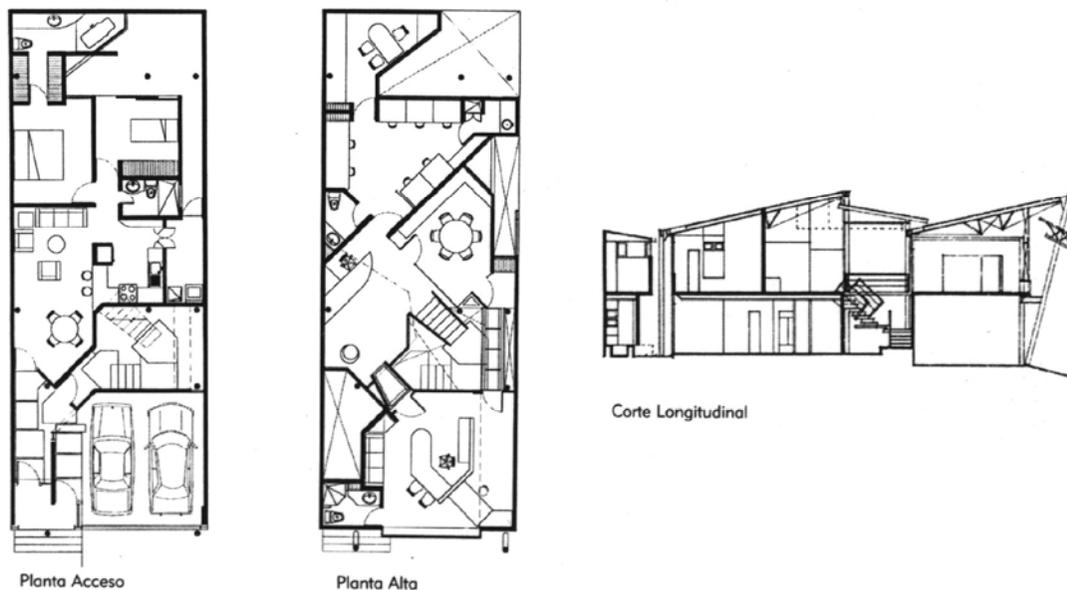


Fig. 4.23: Planta de acceso, planta alta y corte longitudinal del edificio Elmizú.

El edificio Elmizú (ver Figs. 4.22 y 4.23) fue diseñado por el Arq. Víctor Cañas. En este proyecto participó en el cálculo estructural el Ing. Juan Carlos Ortiz. Se ubica en una zona de viviendas de un piso muy similares entre ellas, por lo que contrasta con su contexto. Constituye la remodelación y ampliación de una casa existente, donde el cliente necesitaba dividir el uso en un apartamento en planta baja y oficinas para un ingeniero en metalurgia en la planta alta.

El cliente solicitó al arquitecto un diseño moderno donde se mostrara la estructura. Esta obra obtuvo el I Premio Categoría Diseño Arquitectónico de la I Trienal de Arquitectura de Panamá, Centroamérica y el Caribe en el año 2002 (Ref. 2).

Las oficinas del segundo nivel se apoyan sobre la construcción previa. Para no sobrecargar la cimentación de la casa original, se diseñó la estructura de la cubierta separada del entrepiso y se empleó columnas tubulares de acero que soportan una cubierta liviana parece flotar sobre las oficinas.

Como se ha visto, el Ing. Juan Carlos Ortiz se ha distinguido como un ingeniero quien, además de interesarse por el componente estético del diseño estructural, también tiene la

habilidad de sintonizar con la visión estética del arquitecto, le facilita su más libre expresión y le ayuda a plasmar sus ideas.

#### **4.4. Ing. Carlos Fernández.**

El Ing. Carlos Fernández es profesor de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica y diseñador de la empresa Holcim (Costa Rica) S.A., dedicada al diseño de productos de concreto.

Con respecto al tema de la competencia estética del ingeniero estructural en Costa Rica, el Prof. Fernández hace la diferencia entre los tipos de estructuras (Ref. 8): por un lado se tienen casas y edificios donde no le interesa la parte estética al ingeniero civil; esto debido a que hay una participación interdisciplinaria en el diseño y es el arquitecto el director de la orquesta.

Por otra parte, en infraestructuras como puentes, muelles y puertos, considera que no hay conciencia de lo que implica la estética; en el 99% de las obras de infraestructura interesa más la funcionalidad, la seguridad estructural y la economía y se deja de lado la parte estética. Por ejemplo, en algunas grandes bodegas de supermercados se busca la economía y la funcionalidad; en obras posteriores se utiliza la misma forma, es decir las hacen iguales, lo cual va en detrimento de la estética y de los alrededores.

En el caso de los puentes, participa un grupo interdisciplinario compuesto por ingenieros de suelos, hidráulicos y estructurales. Reconoce que la estructura se expone sin cosméticos, la belleza es la propia de la estructura. El arquitecto no aparece, es el ingeniero estructural quien define cómo será el puente.

El Prof. Fernández es del criterio de que la parte estética del diseño estructural del puente es más “al sentimiento” de las personas, “al gusto” del ingeniero estructural; admite que los ingenieros aquí en Costa Rica no están entrenados para la parte estética.

Señala que hay un paradigma, que afirma que el costo de la estética es un 25% del costo de la obra; por lo tanto, los que toman las decisiones no se preocupan por la parte estética. Asevera que esto es falso, porque ellos han logrado hacer bellas estructuras con análisis y diseño detallado, optimizando dimensiones.

De su experiencia profesional, el Prof. Fernández reconoce que el diseño representa apenas el 3% del costo de la obra total; por lo tanto, conviene invertir más tiempo en el diseño. Ha observado que los diseñadores todavía siguen usando las mismas secciones convencionales de concreto; esto a pesar de que ahora se pueden utilizar concretos con resistencias de hasta  $f'c = 800 \text{ kg/cm}^2$ .

Es interesante notar que estas recomendaciones, surgidas de la práctica profesional del Ing. Fernández, coinciden con las afirmaciones del Prof. Billington (sección 1.3.5.) acerca de la importancia de utilizar más tiempo durante la etapa del diseño conceptual, en virtud del costo relativamente bajo de esta etapa y los grandes ahorros de recursos que se podrían alcanzar en posteriores etapas de construcción y operación de la obra.

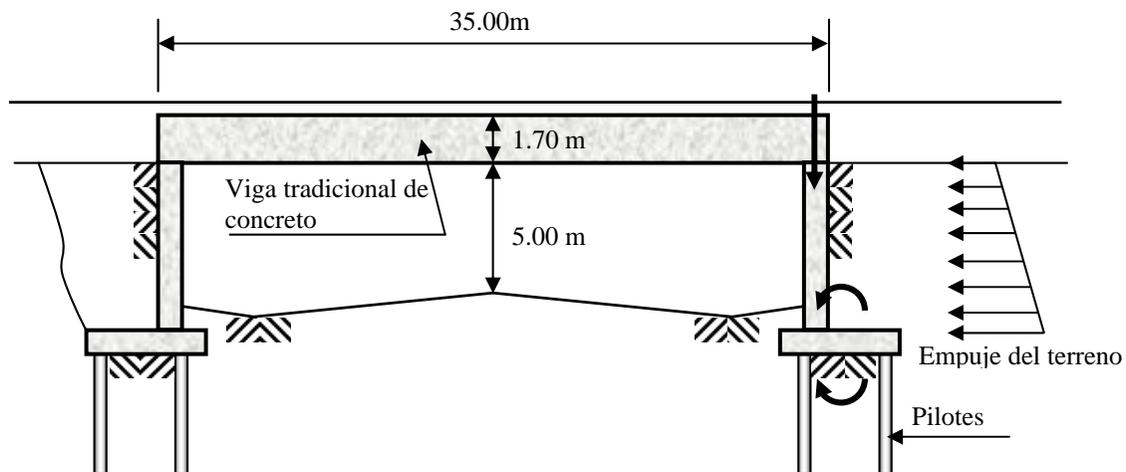


Fig. 4.24.: Esquema, sin escala, de la solución tradicional de un puente de viga de concreto y pilotes para contrarrestar el momento actuante del terreno.

Por ejemplo, para el puente de acceso a la empresa Intel sobre la autopista General Cañas, con un diseño convencional y con una luz de 36 m, se estimaron vigas de 1.70 m de altura (ver Fig. 4.24); sin embargo, al invertir más tiempo y mejorar el diseño conceptual, el Ing. Fernández logró vigas con secciones menores de 1.03 m y una luz más larga de 46 m (ver Fig. 4.25).



Fig. 4.25: Solución del puente con concreto preesforzado con miembros esbeltos y forma de arco. Con esta configuración se evitan los empujes del terreno y mejora la apariencia.

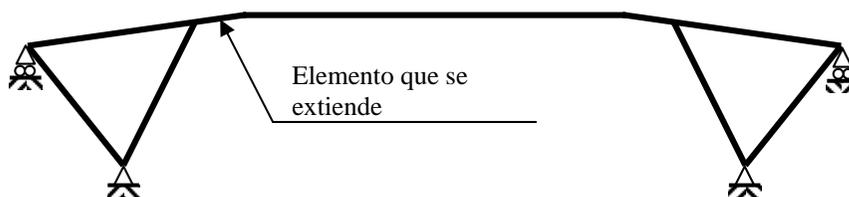


Fig. 4.26: Esquema de la solución del puente de acceso a Intel por la autopista General Cañas.

Otro problema interesante es el del empuje de tierra sobre los bastiones en la solución original (ver Fig. 4.24). La altura libre del puente es de 5 m, lo cual provoca un momento actuante sobre las fundaciones que debe ser resistido por medio de pilotes dado que el suelo es de baja capacidad. Esto provocaría que la hincas de los pilotes ocasionara problemas de tránsito en la autopista y la reducción del flujo vehicular.

Con la solución que se propuso (ver Figs. 4.25 y 4.26) se evita este problema, se le puede dar al terreno una pendiente que evita el empuje de la tierra y además, el tiempo de

construcción se redujo en aproximadamente un 50 %, tardó 8 semanas (el plazo de ejecución era de 15 semanas).

La esbeltez del puente mejora notablemente la visibilidad. Se utilizaron 9 vigas pequeñas en lugar de las 5 vigas proyectadas inicialmente, con esto la losa del tablero se vuelve más delgada y pesa menos. El volumen del concreto se redujo entre un 20% y 30%.

Las pilas inclinadas dan un efecto de mayor variedad y dinamismo en la composición visual. En el puente sobre el río Colorado de la carretera Bernardo Soto, también fueron utilizadas pilas inclinadas, este puente fue diseñado por T. Y. Lin, reconocido a nivel mundial por sus diseños innovadores y pionero en el uso de concreto preesforzado y acero en puentes <sup>(14)</sup>.

Además de las propiedades visuales, las pilas inclinadas también permiten aprovechar el efecto de las vigas continuas y así reducir notablemente los momentos positivos y por lo tanto disminuir la altura de las vigas. Una desventaja es que la continuidad implica un análisis más caro, pero de todas maneras conviene utilizar más tiempo en el diseño. Por ejemplo, el ingeniero Fernández señala que un mes más de análisis cuesta entre \$8 000 ó \$10 000, pero se puede ganar un mes en el sitio, unos \$50 000.

Por lo anterior, se puede decir que se está ante un diseño donde se ilustran muy bien los componentes del esquema conceptual del diseño estructural: *firmeza, servicio, economía, deleite, materiales, configuración, dimensionamiento y detallado y tecnología constructiva.*



Fig. 4.27: Puente de concreto preesforzado, carretera radial a Desamparados, con 98 m de largo.

En el puente de la carretera radial a Desamparados (Fig. 4.27), el Ing. Fernández utilizó una configuración similar al puente de acceso a Intel. También está compuesto por nueve vigas prefabricadas. Se diseñaron pilas inclinadas construidas con marcos de sección variable. Esta forma es eficiente para la mayor escala de este puente y la condición de apoyo articulado de las pilas.

Este puente tiene 98 m de largo. Los elementos prefabricados del tramo central se redujeron a 37 m al extender las vigas de ambos extremos de las pilas hacia el centro en 3.5 m a cada lado (ver Fig. 4.26). Así, la pieza central se vuelve más liviana y simplifica su montaje.

Otra obra interesante diseñada por el Ing. Fernández, a cargo del grupo de ingenieros de la empresa Holcim (Costa Rica) S.A., es el gimnasio del Polideportivo de Cartago. La edificación se inauguró para los Juegos Deportivos Nacionales de Cartago, en 1998.

Este gimnasio es el más grande de Centroamérica y justamente por sus grandes dimensiones (50 m X 70 m de luz libre y 22.5 m de altura) se convierte en una obra adecuada para este estudio, porque es una edificación costarricense donde el ingeniero directamente toma el mando en el diseño de la forma visual, es decir, el ingeniero es el responsable de la configuración y, por lo tanto, de la estética.

El Ing. Luis Jiménez Soto es Investigador Senior de la empresa Holcim; tuvo una importante participación en el equipo diseñador de este gimnasio. El Ing. Jiménez señala que la idea que genera la forma estructural no sale de golpe, no es instantánea, sino, que más bien es el resultado de una serie de acontecimientos que se suceden progresivamente y se encadenan (Ref. 17).

Para el caso de este gimnasio la forma estructural surgió a partir de la experiencia en el diseño y construcción de bodegas y otros gimnasios para anteriores versiones de los Juegos Nacionales. También aportaron ideas la propuesta inicial del arquitecto así como la investigación en un libro de texto de un autor reconocido.

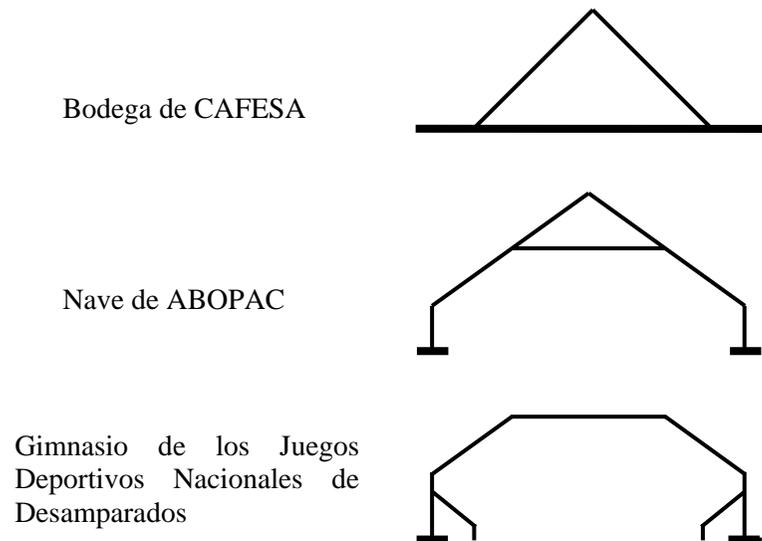


Fig. 4.28: Esquema, sin escala, de estructuras anteriores que colaboraron en la generación de la forma del gimnasio de los Juegos Deportivos Nacionales de Cartago, 1998.

En el esquema de la Fig. 4.28 se muestra la evolución de la forma estructural hasta llegar al gimnasio de Cartago. En un inicio, la Compañía Costarricense del Café S.A., CAFESA, solicitó un gran espacio para almacenar en Puntarenas. Se les hizo el diseño de una bodega con estructura triangular. Posteriormente, Abonos del Pacífico S.A., ABOPAC, solicitó algo parecido; la variación consistió en el elemento horizontal de la nave. Ya para el gimnasio de los Juegos Deportivos Nacionales de Desamparados (Fig. 4.29), se le añadieron graderías y se generó una sección transversal semejante a la del gimnasio de Cartago (Figs. 4.30 y 4.32).



Fig. 4.29: Gimnasio de los Juegos Deportivos Nacionales de Desamparados.



Fig. 4.30: Gimnasio de los Juegos Deportivos Nacionales de Cartago.

Entre los elementos nuevos en el gimnasio de Cartago, con respecto al de Desamparados, se destacan los ductos estructurales en las cuatro esquinas y la configuración tridimensional de la estructura.

Con respecto a los ductos, estos fueron conservados del proyecto inicial propuesto por el arquitecto (Fig. 4.31). También, con anterioridad fueron utilizados elementos similares para los Juegos Deportivos Nacionales de Turrialba. Estos ductos se aprovechan a manera de muros estructurales que ayudan al concepto del techo; así como a rigidizar la estructura, lo cual fue necesario porque el terreno está compuesto por estratos blandos producto de erupciones volcánicas y la cercanía de una quebrada. Los ductos también se aprovecharon para crear espacios arquitectónicos en su interior.

La configuración tridimensional de la estructura es algo novedoso e interesante; esto porque es usual encontrar en el país proyectos de grandes espacios cubiertos (bodegas) con soluciones bidimensionales, es decir, una serie de secciones transversales iguales que se repiten longitudinalmente. Una configuración espacial tridimensional es más difícil de analizar, pero otorga mayor variedad y hacen más interesante la composición.

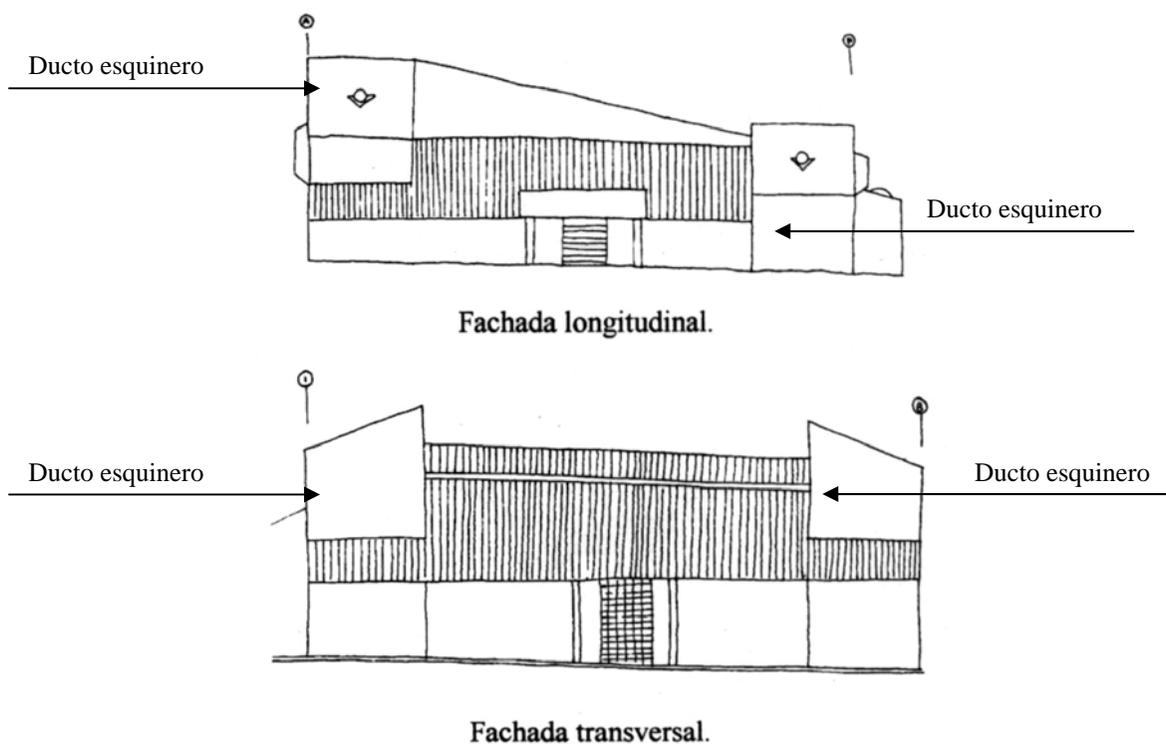
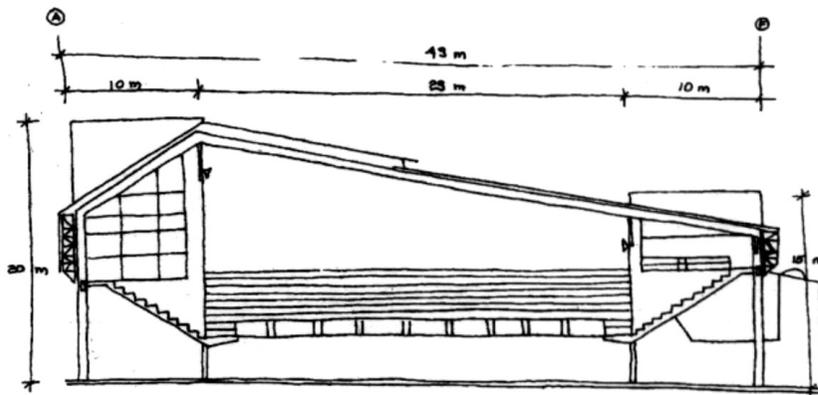
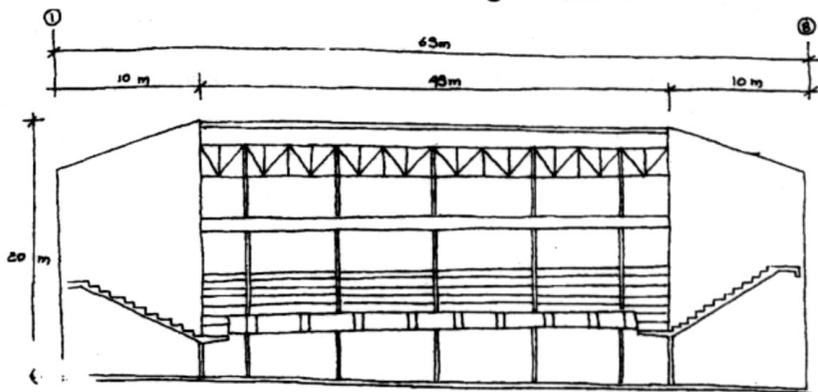


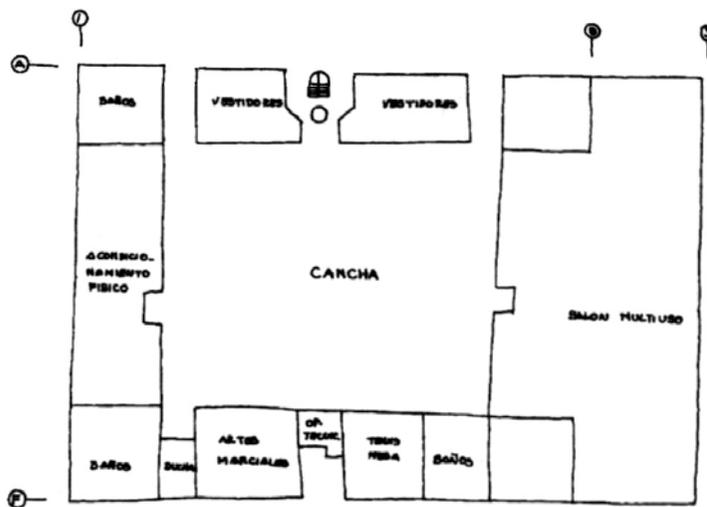
Fig. 4.31: Geometría inicial propuesta para el Gimnasio de los Juegos Deportivos Nacionales de Cartago.



Sección Longitudinal

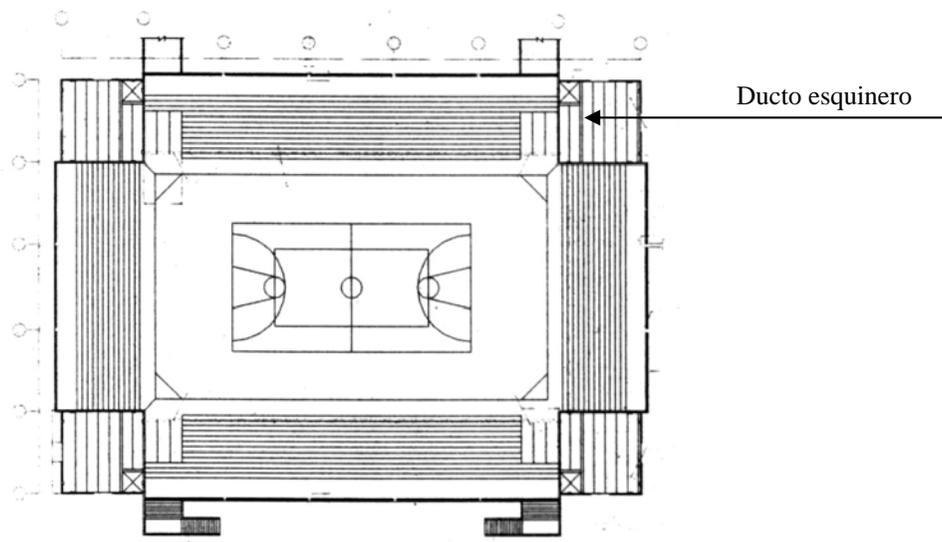


Sección Trasversal

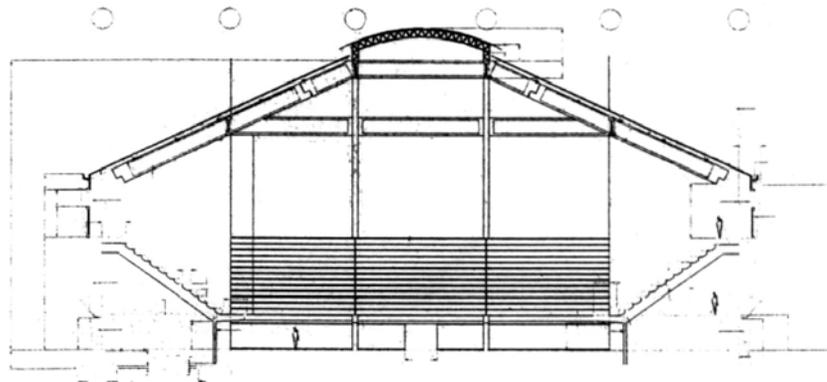


Planta de distribución

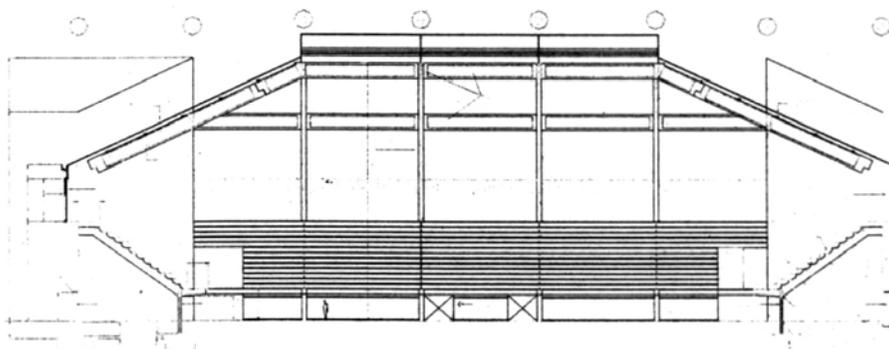
Fig. 4.31 (continuación): Geometría inicial propuesta para el Gimnasio de los Juegos Deportivos Nacionales de Cartago.



**Planta de Distribución nivel gradería**



**Sección transversal.**



**Sección Longitudinal.**

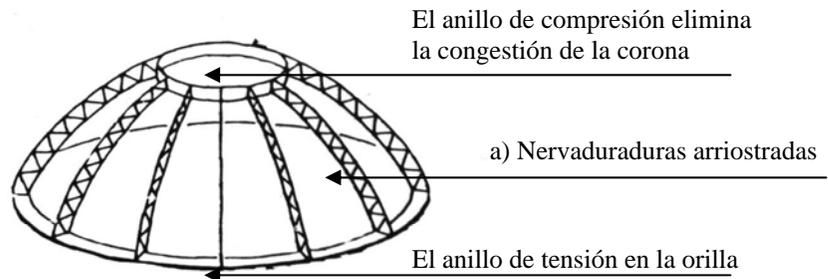
Fig. 4.32: Geometría final del Gimnasio de los Juegos Deportivos Nacionales de Cartago.

Para la transmisión de cargas verticales el problema principal era el techo, por cuanto se precisaba de luces de 50 y 70 m libres, lo cual requería vigas de 2.5 m de altura con aproximadamente 14 torones de 12.7 mm (½”). Con esto en mente, se pensó en realizar una cuadrícula de vigas que permitieran emular en cierto grado el comportamiento de un domo o cascarón como se ilustra en la Fig. 4.33. Así, el efecto de arco y el efecto de los anillos horizontales permitió bajar la altura de las vigas a 1.02 m. Este concepto del efecto de domo fue tomado de un libro de texto acerca de conceptos estructurales del Prof. T. Y. Lin (Ref. 19).

a) Nervaduras arriostradas



b) Anillo de compresión en la corona del domo



b) Corte del domo

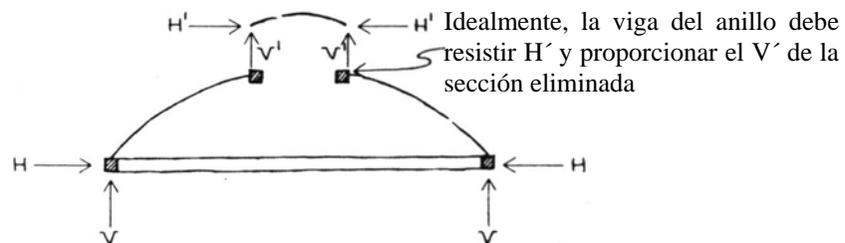


Fig. 4.33: Concepto de Domo. (Según T. Y. Lin, Ref. 18)

Las obras del Ing. Fernández dan a conocer su interés por el problema estético del diseño estructural. En sus diseños se ha preocupado por ofrecer soluciones creativas que contrastan con soluciones tradicionales.

En sus obras también se ilustra cómo las nuevas formas surgen de la experiencia en el diseño y construcción de edificaciones anteriores. Como se reconoció en el capítulo 2, muchas de las grandes obras del arte estructural fueron posibles gracias a la experiencia previa de sus diseñadores.

Se ha mostrado cómo una mayor dedicación durante la etapa de diseño conceptual, puede incidir favorablemente en los *componentes* del diseño estructural, tales como estética, economía, eficiencia, facilidad constructiva, etc.

También se reconoce la carencia de preparación y la falta de conciencia de los ingenieros con respecto a la parte estética del diseño estructural en nuestro país. Pero, además se reconoce que en infraestructuras como puentes, muelles y puertos, es el ingeniero estructural el que debe definir la forma.

Por lo expuesto en este capítulo se puede concluir que la experiencia de los diseñadores nacionales confirma, al igual que la historia del arte estructural lo hace, que el factor estético es un *componente* fundamental al igual que los otros *componentes* del *Esquema Conceptual del Diseño Estructural*.

La experiencia en el diseño estructural de los ingenieros que se han señalado confirma que es posible y conveniente dedicar más recursos a la etapa conceptual del diseño con el fin de mejorar los procedimientos constructivos, la eficiencia, materiales adecuados y por supuesto, la estética.

## CAPÍTULO V

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIÓN



## CAPÍTULO V

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIÓN

### 5.1 Conclusiones.

- La práctica de la ingeniería civil demuestra que la parte estética del diseño estructural es competencia del ingeniero civil, por lo menos en aquellas obras en las cuales su estructura es un componente fundamental y van a estar expuestas y van a ser observadas por el público espectador. El ingeniero tiene un compromiso con la sociedad, sus obras tienen un impacto social y debe ofrecer siempre las mejores soluciones.
- Los diferentes artistas estructurales de la historia del arte estructural demostraron con su ejercicio profesional, sus obras y su vida que el componente estético tiene una importancia principal en el diseño estructural, al igual que los demás componentes de la *intención* y la *materialidad*.
- El arte estructural es una nueva manifestación de arte, el cual es principalmente practicado por ingenieros estructurales. Con el arte estructural es posible alcanzar *expresión* y *simbolismo* y además del factor *utilitario*, también tiene un factor *lúdico*.
- Hay diferencias importantes entre arte arquitectónico y arte estructural. En el arte estructural la forma y la estructura tienden a ser una sola, esto se da en obras tales como puentes, grandes espacios cubiertos, grandes torres, etc. donde la *función* primordial es restringida a la *función estructural*. En otros tipos de obras donde son primordiales otras *funciones arquitectónicas* como trabajo, cobijo, reunión o culto predomina la obra arquitectónica.

- El ingeniero estructural es el responsable de la forma estructural y por lo tanto está obligado a tomar el mando en el proceso de diseño en obras de su competencia. No puede delegar la responsabilidad de la estética en el proceso de creación de la forma a otros que no tengan la debida preparación con respecto a los *componentes* del diseño estructural.
- Es conveniente invertir recursos en la etapa del diseño conceptual de la obra. Los diseñadores, tanto nacionales como extranjeros, indican a través de su experiencia que un mayor cuidado en el diseño conceptual ayuda a disminuir los costos totales de la obra y además, esta etapa es fundamental para determinar las propiedades estéticas del diseño.
- El ingeniero civil está en desventaja a la hora de enfrentar el problema estético del diseño estructural. Esto se debe a que no recibe en su educación profesional cursos de arte y estética aplicados al diseño de obras de ingeniería civil.
- Para ayudar a enfrentar este problema, varios ingenieros civiles estudiosos del tema afirman que los principios del diseño y la composición del arte son útiles y aplicables al proceso de diseño estructural. A pesar de que estos principios no son suficientes por sí mismos para la creación de la forma estructural; tratan de conocimientos que pueden ayudar al ingeniero civil a abordar el problema estético.
- Los conceptos de diseño y composición artística enunciados en este trabajo pueden servir de consulta para una introducción del estudio del componente estético del diseño estructural.
- Varios diseñadores estructurales nacionales se han preocupado por ofrecer soluciones estéticas en aquellas obras donde el ingeniero es el responsable de la forma. También se han comprometido con la estética en aquellas edificaciones donde el ingeniero colabora con el arquitecto. Varias obras estructurales de ingenieros costarricenses son consistentes con esta preocupación estética.

## **5.2 Recomendación.**

Se recomienda la creación de cursos o talleres en los cuales se trate el tema de la Estética Estructural, que ofrezcan al estudiante de ingeniería civil la posibilidad de estudiar los principios del diseño y la composición del arte y aplicarlos en el diseño de obras de ingeniería civil. Esta preparación ayudaría al futuro profesional a enfrentar el problema estético del diseño estructural y de paso, también le ayudaría a desarrollar su potencial creativo. Como consecuencia, se le ofrecería a la sociedad costarricense profesionales que se preocupen y estén entrenados en el diseño de obras de ingeniería estructural más agradables al público.

## REFERENCIAS

1. Alexander, Christopher: "Notes on the syntesis of form". 14ª impresión, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, E.E.U.U., 1997.
2. Barahona Ortega, Luis Diego: "Víctor Cañas", Líneas: Colección de Arquitectura Latinoamericana, San José, Costa Rica, 2002.
3. Billington, David P.: "The education of structural engineers and relationship of architecture to structural art" Tomado de: Structural Engineering World Wide, paper reference: P307-2, 8 pp, Universidad de Princeton, E.E.U.U., 1983.
4. Billington, David P.: "The tower and the bridge: the new art of structural engineering" Basic Books, Inc., Publishers, Nueva York, E.E.U.U., 1983.
5. Calatrava, Santiago: "Santiago Calatrava, Conversaciones con estudiantes". Princeton Architectural Press, Estados Unidos, 1997.
6. Edwards, Betty: "Aprender a dibujar con el lado derecho del cerebro, un método garantizado", Editorial Hermann Blume, Madrid, España, 1984.
7. Farré, Luis: "Estética", Editorial Difusión, calle Herrera 541, Buenos Aires, Argentina, 1950.
8. Fernández, Carlos: Entrevista, comunicación personal efectuada el 05 de noviembre de 2004.
9. Ferrater Mora, José: "Diccionario de Filosofía", Editorial ARIEL, S.A., Barcelona, 1994.
10. González Fonseca, Alfredo: "Aportes del Ingeniero Franz Sauter Fabian". Resumen de su exposición en el X Congreso de Ingeniería Civil, San José Costa Rica, septiembre, 2004.
11. González Fonseca, Alfredo: Entrevista, comunicación personal efectuada el 15 de noviembre de 2004.
12. Gottemoeller, Frederick: "Bridgescape, the art of designing bridges", John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, Estados Unidos, 1998.
13. Gutiérrez, Jorge A.: "Notes on the Seismic Adequacy of Vernacular Buildings", Conferencia Magistral (Keynote Paper) 5011, Proceedings of the 13ª World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canadá, 1 a 6 de agosto del 2003.

14. Institución de Ingenieros Civiles (The Institution of Civil Engineers): “The aesthetic aspect of civil engineering design”, una serie de 6 lecturas. 3ª reimpresión, William Clowes and Sons, Limited. Londres, Gran Bretaña, 1975.
15. Instituto Estadounidense del Concreto (ACI, por sus siglas en inglés), comité 124: Estética del concreto: “Esthetics in concrete bridge design” actas de los simposios de las convenciones del ACI en Seattle, Washington el 12 y 13 / Nov. / 1987 y en Orlando, Florida el 24 / Mar. / 1988, EEUU.
16. Jiménez Matarrita, Alexánder: “El imposible país de los filósofos”, 2<sup>da</sup> edición, Ediciones Perro Azul, San José, Costa Rica, 2002, p.46.
17. Jiménez Soto, Luis: Entrevista, comunicación personal efectuada el 16 de diciembre de 2004.
18. Leonhardt, Fritz: “Puentes. Estética y Diseño”, Presses Polytechniques Romandes, 1986.
19. Lin, T. Y. y Stotesbury, Sidney D.: “Structural Concepts and Systems for Architects and Engineers”, Editorial John Wiley & Sons, Nueva York, Estados Unidos, 1981.
20. Meli, Roberto: “Diseño Estructural”, Editorial Limusa S.A de C.V., México, 1989.
21. Moia, José Luis: “Cómo se proyecta una vivienda”, Ediciones G. Gili, S.A. de C.V., México, 1987.
22. Ortiz, Juan Carlos: Entrevista, comunicación personal efectuada el 11 de noviembre de 2004.
23. Parramón Visaló, José María: “Así se compone un cuadro”, 14ª edición, Parramón Ediciones S. A., Barcelona, España, 1986.
24. Read, Herbert: “El significado del arte”, Editorial Magisterio Español S. A., España, 1973.
25. Sarria Molina, Alberto: “Introducción a la ingeniería civil”, Editorial MacGraw-Hill Interamericana S.A., Bogotá, Colombia, 1999.
26. Sauter, Franz: “Realizaciones y futuro de la prefabricación”, Asociación de Hormigón Armado de Centroamérica y Panamá, publicación especial No. 2, San José, Costa Rica, octubre, 1967.
27. Scott, Robert Gillam: “Fundamentos del Diseño”, 6ª reimpresión, Editorial Limusa S. A. México D. F., México, 1998.

28. Schlaich, Jörg: "Developing structural understanding or teaching conceptual design of structures" Tomado de: Structural Engineering World Wide, paper reference: P307-2, 10 pp Universität Stuttgart, Alemania, 1998.
29. Steinvorth Sauter, Ronald: "Ing. Franz Sauter Fabian (1933-2003)". Reseña biográfica familiar acerca del Ing. Franz Sauter, facilitada en una entrevista personal, junio, 2004.
30. Steinvorth Sauter, Ronald: Entrevista, comunicación personal efectuada el 12 de noviembre de 2004.
31. Tzonis, Alexander: "Santiago Calatrava, The Poetics of Movement", Universe Publishing, Nueva York, Estados Unidos, 1999.
32. Vargas Benavides, Jorge Manuel: "Historia del Arte. Sinopsis Elemental. Resumen de Características Principales", Sinopsis del curso de Historia del Arte, Escuela de Artes Plásticas, U.C.R., San Pedro de Montes de Oca, 1986.
33. Vitruvio, Marco Lucio: "Los 10 libros de Arquitectura"Obras Maestras, Editorial Iberia S. A., Barcelona, España, 1970.
34. Asociación de Ingeniería Estructural de California (SEAOC por sus siglas en inglés): "Proceso de Diseño Sísmico Basado en el Desempeño" Comité Visión 2000, California, EE. UU., 1995.

## LISTA DE ILUSTRACIONES

### CAPÍTULO I

Portada del capítulo: Torre Eiffel (<http://www.birkbinnard.com/europeweb/images/Eiffel%20Tower.jpg>).

- 1.1: Esquema del conjunto Forma-Contexto (Según Gutiérrez, Ref.13).
- 1.2: Tetraedro de la Intención (Según Gutiérrez, Ref.13).
- 1.3: Tetraedro de la Materialidad (Según Gutiérrez, Ref.13).
- 1.4: “Stella Octangula” (Según Gutiérrez, Ref.13).
- 1.5: Síntesis forma-contexto (Según Gutiérrez, Ref.13).
- 1.6: Proceso de diseño sísmico basado en el desempeño (Visión 2000, Ref. 34).
- 1.7: Esquema del estudio del componente estético del diseño estructural (el autor).

### CAPÍTULO II

Portada del capítulo: Torre Eiffel

(<http://www.bgsu.edu/colleges/technology/faculty/guidera/eiffel.jpg>).

- 2.1: Maquetas de obras de arte estructural, museo de la universidad de Princeton (<http://www.princeton.edu/~paw/>).
- 2.2: Efecto de la función y la escala (en autor).
- 2.3: Restaurante del balneario Kursaal, Pier Luigi Nervi (<http://www.grupponline.it/losviluppo.html>).
- 2.4: Restaurante del balneario Kursaal, Pier Luigi Nervi (<http://space.quipo.it/kursaal/discoteca.html#>).
- 2.5: Puente Felsenau, Cristian Menn ([www.structurae.net/structures/](http://www.structurae.net/structures/)).
- 2.6: Puente Verrazano, Othmar Ammann ([www.structurae.net/structures/](http://www.structurae.net/structures/), fotos: Nicolas Janberg).
- 2.7: Pequeño palacio de los Deportes, Pier Luigi Nervi (exterior: [www.structurae.net/structures/](http://www.structurae.net/structures/), foto: Nicolas Janberg; interior: <http://www.digischool.nl/ckv2/ckv3/kunstentechniek1/nervi/>).
- 2.8: Puente de hierro (“Iron Bridge”), Abraham Darby III ([www.structurae.net/structures/](http://www.structurae.net/structures/), foto: Prof. Michael Littman).
- 2.9: Puente Craigellachie, Thomas Telford ([http://europeforvisitors.com/europe/images/scotland\\_bridge\\_craigellachie.jpg](http://europeforvisitors.com/europe/images/scotland_bridge_craigellachie.jpg)).
- 2.10: Proyecto del puente de Londres, Tomas Telford (<http://www.oldlondonbridge.com/newbridge.shtml>).
- 2.11: Puente sobre el estrecho de Menai, Tomas Telford ([www.structurae.net/structures/](http://www.structurae.net/structures/), foto: Marianne Gerber).
- 2.12: Puente Britannia, Robert Stephenson ([www.structurae.net/structures/](http://www.structurae.net/structures/), colección privada de Jochem Hollestelle).
- 2.13: Puente Saltash, Isambard Kingdom Brunel ([www.structurae.net/structures/](http://www.structurae.net/structures/), foto: Vincent Le Quééré).
- 2.14: Torre Eiffel, Gustave Eiffel ([www.structurae.net/structures/](http://www.structurae.net/structures/), foto: Nicolas Janberg).
- 2.15: Puente Doña María, Gustave Eiffel ([http://www.bernd-nebel.de/bruecken/2\\_pioniere/eiffel/bilder/eiffel\\_2.JPG](http://www.bernd-nebel.de/bruecken/2_pioniere/eiffel/bilder/eiffel_2.JPG)).
- 2.16: Viaducto de Garabit, Gustave Eiffel ([www.structurae.net/structures/](http://www.structurae.net/structures/), foto: Erich Baumgartner).

- 2.17: Puente de Cincinnati, John Augustus Roebling ([www.structurae.net/structures/](http://www.structurae.net/structures/); fuente original: <http://memory.loc.gov/cgi-bin/>).
- 2.18: Puente de Brooklyn, John Augustus Roebling ([www.structurae.net/structures/](http://www.structurae.net/structures/); fuente original: <http://memory.loc.gov/cgi-bin/>).
- 2.19: Primer edificio Leiter, William Le Baron Jenney ([www.structurae.net/structures/](http://www.structurae.net/structures/); fuente original: <http://memory.loc.gov/cgi-bin/>).
- 2.20: Edificio Home Insurance, William Le Baron Jenney ([http://www.pbs.org/wgbh/buildingbig/wonder/structure/homeinsurance1\\_skyscraper.html](http://www.pbs.org/wgbh/buildingbig/wonder/structure/homeinsurance1_skyscraper.html)).
- 2.21: Puente sobre el río Misisipí, James Buchanan Eads ([www.structurae.net/structures/](http://www.structurae.net/structures/); foto: Keith Belk).
- 2.22: Puente Hell Gate, Gustav Lindenthal ([www.structurae.net/structures/](http://www.structurae.net/structures/); fuente original: <http://memory.loc.gov/cgi-bin/>).
- 2.23: Puente Staufacher, Robert Maillart ([http://www.vitruvio.ch/galleryfriends/bignardi/g\\_stauffacher\\_01.htm](http://www.vitruvio.ch/galleryfriends/bignardi/g_stauffacher_01.htm)).
- 2.24: Puente Zuoz, Robert Maillart ([http://www.princetonartmuseum.org/Bridges/engineers\\_3.html#](http://www.princetonartmuseum.org/Bridges/engineers_3.html#)).
- 2.25: Puente Tavanasa, Robert Maillart ([http://dgcwww.epfl.ch/guide\\_des\\_ponts/ingenieurs/maillart/tavanasa.htm](http://dgcwww.epfl.ch/guide_des_ponts/ingenieurs/maillart/tavanasa.htm)).
- 2.26: Puente Salginatobel, Robert Maillart ([www.structurae.net/structures/](http://www.structurae.net/structures/); foto: Eugenio Pedrazzini; continuación: <http://twiki.org/cgi-bin/view/Salgina/ImagesOfTheSalginatobelBridge>; foto: Tiefbauamt Graubünden)
- 2.27: Puente Schwandbach, Robert Maillart ([www.structurae.net/structures/](http://www.structurae.net/structures/)).
- 2.28: Bodega Giesshübel, Robert Maillart ([http://www.pym.de/photo\\_maillart\\_e.html](http://www.pym.de/photo_maillart_e.html)).
- 2.29: Bodega Magazzini Generali, Robert Maillart (<http://www.archinform.net/medien/00004503.htm?ID=T10TJnRNjJYDEWV>).
- 2.30: Gran Palacio de los Deportes, Pier Luigi Nervi (exterior: [www.structurae.net/structures/](http://www.structurae.net/structures/), foto: Nicolas Janberg; interior: <http://www.monolithic.com/thedome/thinshells/pic12.html>).
- 2.31: Hipódromo de La Zarzuela, Eduardo Torroja ([www.structurae.net/structures/](http://www.structurae.net/structures/)).
- 2.32: Pabellón de Rayos Cósmicos, Félix Candela ([http://www.anc-d.fukui-u.ac.jp/~ishikawa/Aloss/page/Candela\\_Work.htm](http://www.anc-d.fukui-u.ac.jp/~ishikawa/Aloss/page/Candela_Work.htm)).
- 2.33: Restaurante Los Manatiales, Félix Candela ([http://www.anc-d.fukui-u.ac.jp/~ishikawa/Aloss/page/Candela\\_Work.htm](http://www.anc-d.fukui-u.ac.jp/~ishikawa/Aloss/page/Candela_Work.htm)).
- 2.34: Torre Sears, Fazlur Khan ([www.structurae.net/structures/](http://www.structurae.net/structures/), foto: Nicolas Janberg).
- 2.35: Centro John Hancock, Fazlur Khan ([www.structurae.net/structures/](http://www.structurae.net/structures/), foto: Nicolas Janberg).
- 2.36: Armadura tridimensional desplegable, Santiago Calatrava (<http://web.mit.edu/civenv/Calatrava/>).
- 2.37: Planetario del Centro de Ciencia de Valencia, Santiago Calatrava (Tzonis, Ref. 31).
- 2.38: Puente del Puente del Alamillo, Santiago Calatrava ([www.Calatrava.info](http://www.Calatrava.info)).
- 2.39: Estación de Lucerna, Santiago Calatrava (Tzonis, Ref. 31).
- 2.40: Estación ferroviaria de Estadelhofen, Santiago Calatrava (Tzonis, Ref. 31).
- 2.41: Estudio basado en la forma de un árbol, Santiago Calatrava (<http://web.mit.edu/civenv/Calatrava/>).
- 2.42: Plaza BCE, Santiago Calatrava ([www.Calatrava.info](http://www.Calatrava.info)).
- 2.43: Estudio Plástico basado en el ojo humano, Santiago Calatrava (<http://web.mit.edu/civenv/Calatrava/>).
- 2.44: Estación ferroviaria en el aeropuerto de Lyon, Santiago Calatrava (<http://web.mit.edu/civenv/Calatrava/>; continuación: [www.Calatrava.info](http://www.Calatrava.info)).
- 2.45: Estudio plástico basado en la columna vertebral humana, Santiago Calatrava (<http://web.mit.edu/civenv/Calatrava/>).
- 2.46: Edificio del Torso Rotado, Santiago Calatrava ([www.Calatrava.info](http://www.Calatrava.info)).

- 2.47: Estudio plástico del puente del Alamillo, Santiago Calatrava (<http://web.mit.edu/civenv/Calatrava/>; continuación: Tzonis, Ref. 31 y <http://web.mit.edu/civenv/Calatrava/>).
- 2.48: Puente La Devesa, Santiago Calatrava (<http://web.mit.edu/civenv/Calatrava/>).
- 2.49: Boceto del puente La Devesa, Santiago Calatrava (Calatrava, Ref. 5).
- 2.50: Pabellón de Kuwait, Santiago Calatrava (Tzonis, Ref. 31).
- 2.51: Estudio plástico del pabellón de Kuwait, Santiago Calatrava (Tzonis, Ref. 31).
- 2.52: Pabellón de Kuwait, Santiago Calatrava (Tzonis, Ref. 31).
- 2.53: Pabellón Quadracci, del Museo de Arte de Milwaukee, Santiago Calatrava ([www. Calatrava.info](http://www.Calatrava.info); foto: Jim Brozek).
- 2.54: Pabellón Quadracci, del Museo de Arte de Milwaukee, Santiago Calatrava ([www. Calatrava.info](http://www.Calatrava.info); fotos: Jason Pogo y Jim Brozek).

### CAPÍTULO III

- Portada del capítulo: Torre Eiffel (<http://www.ce.udel.edu/faculty/chajes/photos/eiffel.jpg>).
- 3.1: Líneas diversas (el autor).
- 3.2: a) Escultura de Umberto Boccioni, Formas únicas de continuidad en el espacio (<http://digilander.libero.it/giagia/formeuniche.htm>).  
b) Santiago Calatrava, estación de Lucerna (Tzonis, Ref. 31).
- 3.3: Poder expresivo de las líneas (basado en “Composición Artística”, J. de S´Agaró, editorial LEDA, Barcelona, España, 1980.)
- 3.4: Proyecto de un puente atirantado, Santiago Calatrava (<http://web.mit.edu/civenv/Calatrava/>).
- 3.5: Escala de valores tonales (el autor).
- 3.6: Elementos plásticos tridimensionales (basado en Scott, Ref. 27).
- 3.7: Ejemplo de casos extremos de Unidad y Variedad (el autor).
- 3.8: Puente Lusitania, Santiago Calatrava, ([www. Calatrava.info](http://www.Calatrava.info)).
- 3.9: Tres tipos diferentes de arcos (basado en The Institution of Civil Engineers, Ref. 14).
- 3.10: Tres tipos diferentes de proporciones (el autor).
- 3.11: tres tipos diferentes de dividir un rectángulo (basado en Parramón, Ref.23).
- 3.12: Equilibrio simétrico y asimétrico (basado en Parramón, Ref.23).
- 3.13: Pabellón de Rayos Cósmicos, Félix Candela ([http://www.anc-d.fukui-u.ac.jp/~ishikawa/Aloss/page/Candela\\_Work.htm](http://www.anc-d.fukui-u.ac.jp/~ishikawa/Aloss/page/Candela_Work.htm)).
- 3.14: Ejemplo de equilibrio asimétrico de masas (el autor).
- 3.15: Diagrama de equilibrio asimétrico tridimensional (basado en Moia, Ref. 21).
- 3.16: Puente del Alamillo, Santiago Calatrava ([www. Calatrava.info](http://www.Calatrava.info));  
Torre Eiffel, Gustave Eiffel ([www.structurae.net/structures/](http://www.structurae.net/structures/), foto: Nicolas Janberg).
- 3.17: Puente de Clifton, Isambard Kingdom Brunel (enciclopedia Microsoft Encarta).
- 3.18: a) Plaza BCE, Santiago Calatrava ([www. Calatrava.info](http://www.Calatrava.info));  
b) Puente Salginatobel, Robert Maillart([http://www.anc-d.fukui-u.ac.jp/~ishikawa/Aloss/data/Maillart/Catalog/SIginatobel\\_Brucke.htm](http://www.anc-d.fukui-u.ac.jp/~ishikawa/Aloss/data/Maillart/Catalog/SIginatobel_Brucke.htm)).
- 3.19: Ejemplos de líneas y el ritmo (el autor).
- 3.20: Ejemplo de ritmo en los arcos (enciclopedia Microsoft Encarta).
- 3.21: Templo de Santa Mónica, Félix Candela ([http://www.anc-d.fukui-u.ac.jp/~ishikawa/Aloss/page/Candela\\_Work.htm](http://www.anc-d.fukui-u.ac.jp/~ishikawa/Aloss/page/Candela_Work.htm)).
- 3.22: Restaurante Los Manantiales, Félix Candela ([http://www.anc-d.fukui-u.ac.jp/~ishikawa/Aloss/page/Candela\\_Work.htm](http://www.anc-d.fukui-u.ac.jp/~ishikawa/Aloss/page/Candela_Work.htm)).

- 3.23: Iglesia de San José Obrero, Félix Candela ([http://www.anc-d.fukui-u.ac.jp/~ishikawa/Aloss/page/Candela\\_Work.htm](http://www.anc-d.fukui-u.ac.jp/~ishikawa/Aloss/page/Candela_Work.htm)).
- 3.24: Descomposición de un haz de luz blanca (basado en Moia, Ref. 21).
- 3.25: Colores Luz Primarios y Secundarios (el autor).
- 3.26: Colores Primarios Pigmentarios (el autor).
- 3.27: Colores Pigmento Primarios y Secundarios (el autor).
- 3.28: Colores Pigmento Primarios y Secundarios (el autor).
- 3.29: El círculo cromático (el autor).
- 3.30: El círculo cromático con colores terciarios y la gama de matices (el autor).
- 3.31: Contraste y mezcla de colores complementarios (el autor).
- 3.32: Representación del Modelo HSB (basado en Moia, Ref. 21).
- 3.33: Representación del Modelo HSB (el autor).
- 3.34: Efecto de la luz, la sombra, y los objetos cercanos sobre el color (el autor).
- 3.35: Ejemplo de armonía monocromática (el autor).
- 3.36: Ejemplo de armonía por colores análogos (el autor).
- 3.37: Ejemplo de contraste excesivo de colores complementarios (el autor).
- 3.38: Ejemplo de armonía por colores complementarios (el autor).
- 3.39: Contraste y armonía de colores complementarios (el autor).
- 3.40: Planta de Distribución del ejemplo de un puente (el autor).
- 3.41: Esquema de la elevación principal del puente (el autor).
- 3.42: Sección de las barandas y planta de la pila central (el autor).
- 3.43: Vista de la pila propuesta (el autor).
- 3.44: Solución monótona (el autor).
- 3.45: perspectiva de la solución propuesta (el autor).

## CAPÍTULO IV

Portada del capítulo: Torre Eiffel

([http://college.hmco.com/history/west/mosaic/chapter14/images/eiffel\\_tower.jpg](http://college.hmco.com/history/west/mosaic/chapter14/images/eiffel_tower.jpg) foto: Allyson Dunn.).

- 4.1: Puente sobre el río Poás (foto: el autor).
- 4.1: Puente sobre el río Poás (foto: el autor).
- 4.2: Puente sobre el río Rosales (foto: el autor).
- 4.2: Puente sobre el río Rosales (foto: el autor).
- 4.3: Sección longitudinal del puente sobre el río Poás (cortesía: Franz Sauter & Asociados S.A.)
- 4.4: Sección longitudinal del puente sobre el río Rosales (cortesía: Franz Sauter & Asociados S.A.)
- 4.5: Diferentes secciones de pilas (basado en esquema del Ing. Alfredo González).
- 4.6: Esquema de paraboloides hiperbólicos (el autor).
- 4.7: Vista lateral del paraboloides hiperbólicos (cortesía: Franz Sauter & Asociados S.A.)
- 4.8: Planta de refuerzo del paraboloides hiperbólicos (cortesía: Franz Sauter & Asociados S.A.)
- 4.9: Boceto de las bodegas de concreto preesforzado (el autor).
- 4.10: Boceto de las bodegas de concreto preesforzado (el autor).
- 4.11: Sección de las bodegas de concreto preesforzado (cortesía: Franz Sauter & Asociados S.A.)
- 4.12: Detalle de articulación (cortesía: Franz Sauter & Asociados S.A.)
- 4.13: Cerchas con armaduras vierendeel, Multiplaza del Este (foto: el autor).
- 4.14: Armadura tipo vierendeel (basado en esquema del Ing. Alfredo González).
- 4.15: Techo con forma de abanico, Multiplaza de Escazú (foto: el autor).

- 4.16: Detalle del techo con forma de abanico, Multiplaza de Escazú (foto: el autor).
- 4.17: Sección del techo con forma de abanico (basado en esquema del Ing. Alfredo González).
- 4.18: Boceto del techo con forma de abanico (el autor).
- 4.19: Centro Creativo (Barahona, Ref. 2, fotos: Mike Blum y Víctor Cañas, cortesía del editor).
- 4.20: Plantas y corte del Centro Creativo (Barahona, Ref. 2, cortesía del editor).
- 4.21: Apartamentos Freund (Barahona, Ref. 2, foto: Víctor Cañas, cortesía del editor).
- 4.22: Edificio Elmizú (Barahona, Ref. 2, fotos: Carlos Jinesta, Richard May, Víctor Cañas; cortesía del editor).
- 4.23: Plantas y corte longitudinal del edificio Elmizú (Barahona, Ref. 2, cortesía del editor).
- 4.24.: Solución tradicional de un puente de viga de concreto y pilotes (basado en esquema del Ing. Carlos Fernández).
- 4.25: Solución del puente con concreto preesforzado (foto: el autor).
- 4.26: Solución del puente de acceso a Intel (basado en esquema del Ing. Carlos Fernández).
- 4.27: Puente de concreto preesforzado, radial a Desamparados (foto: el autor).
- 4.28: Generación de la forma del polideportivo de Cartago (basado en esquema del Ing. Luis Jiménez Soto).
- 4.29: Gimnasio de los Juegos Deportivos Nacionales de Desamparados (fotos: el autor).
- 4.30: Gimnasio de los Juegos Deportivos Nacionales de Cartago (fotos: el autor).
- 4.31: Geometría propuesta para el del polideportivo de Cartago (cortesía Holcim Costa Rica S.A.)
- 4.32: Geometría final del polideportivo de Cartago (cortesía Holcim Costa Rica S.A.)
- 4.33: Concepto de Domo. (Según T. Y. Lin, Ref. 19).

## CAPÍTULO V

Portada del capítulo: Torre Eiffel (<http://www.siue.edu/STUDYABROAD/Eiffel%20Tower.JPG>).