

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**  
**FACULTAD DE ARQUITECTURA**  
**Asesor: Arq. Jorge Escobar**

The seal of the University of San Carlos of Guatemala is a circular emblem. It features a central figure of a man on a white horse, wearing a red and blue outfit, holding a staff. Above him is a golden crown with a cross. To the left and right are red lions and golden castles. The background is a green landscape with mountains. The Latin motto "CETERA RBIS CONSPICUA CAROLINA ACADEMIA COACTEMALENSIS INTER" is inscribed around the border.

**CONSIDERACIONES SOBRE EL DISEÑO  
ARQUITECTÓNICO CON ESTRUCTURAS DE ACERO.**

**Presentado por:**  
**DORMAN ORLANDO SILVA LIRA**  
**Al conferírsele el título de Arquitecto en el grado de Licenciatura**

**Marzo, 2006**

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE ARQUITECTURA**

**JUNTA DIRECTIVA**

<b>DECANO</b>	Arq. Carlos Enrique Valladares Cerezo
<b>VOCAL I</b>	Arq. Jorge Arturo González Peñate
<b>VOCAL II</b>	Arq. Raúl Estuardo Monterroso Juárez
<b>VOCAL III</b>	Arq. Jorge Escobar Ortiz
<b>VOCAL IV</b>	Br. José Manuel Barrios Recinos
<b>VOCAL V</b>	Br. Herberth Manuel Santizo Rodas
<b>SECRETARIO</b>	Arq. Alejandro Muñoz Calderón

**TRIBUNAL EXAMINADOR**

<b>EXAMINADOR I</b>	Arq. Everto Sandoval
<b>EXAMINADOR II</b>	Arq. Publio Rodríguez
<b>EXAMINADOR III</b>	Arq. Héctor Jiménez
<b>DECANO</b>	Arq. Carlos Enrique Valladares Cerezo
<b>SECRETARIO</b>	Arq. Alejandro Muñoz Calderón

Arq. Jorge Escobar Ortiz  
**CONSULTOR**

Dorman Orlando Silva Lira  
**SUSTENTANTE**



Marzo, 2006

## *Dedicatoria*

- Al Gran Arquitecto:** Jehová Dios  
*"Por supuesto, toda casa es construida por alguien, pero el que ha construido todas las cosas es Dios" (Hebreos 3:4)*
- A mis padres** Delma del Socorro Lira Castellón  
Orlando Guillermo Silva Chavarría  
*Quienes con su cariño y cuidado han sido un gran apoyo y magnífico ejemplo.*
- A mis hermanos** Pedro, Yasser y Delma Odalia  
*A quienes quiero y aprecio.*
- A toda mi familia** A mis abuelitos, tíos y primos.  
*En forma muy especial a mi tía Ethel María Lira, quien sin su ayuda me hubiera sido doblemente difícil terminar este trabajo.*
- A mi novia** Berly Ninet Estrada García  
*Quien fue un estímulo constante a lo largo de la realización de esta tesis.*
- A mis amigos** *A mis hermanos en la fe, a quienes han sido compañeros de trabajo, en especial a mi amigo y socio: Alejandro Solórzano*
- A todos los luchadores** *Dedicada a todos aquellos que se esfuerzan por cumplir sus sueños.*

## *Agradecimientos*

- Al pueblo de Guatemala** Que mediante sus impuestos contribuye a la formación universitaria.
- A la USAC** Cuyo sistema educativo permite brindar educación de calidad al menor costo.
- A la FARUSAC** Donde en sus aulas aprendí nuestro pasado histórico y a servir a mis semejantes con mi profesión
- A mi ASESOR** Arq. Jorge Escobar, quien me brindó su dirección y consejo para lograr un documento con mucha información práctica.
- A los profesionales** Ing. Gustavo Argüello Pasos  
Lic. Martín Arguello  
Ing. Jorge Enríquez
- A las empresas** APSA, Guatemala, C. A.  
DB RILEY INC, Worcester MA, USA

*“Con el hierro, apareció por vez primera en la historia de la arquitectura un material artificial de construcción. Pasó a través de una evolución cuyo ritmo se aceleró en el transcurso del siglo, y recibió un impulso decisivo cuando resultó que la locomotora, con la que se habían estado haciendo experimentos desde finales de la década de 1820, sólo podía ser utilizada sobre raíles de hierro. El raíl fue la primera unidad de construcción, el precursor de la viga. El hierro era evitado en las casas viviendas, y servía para arcadas, salas de exposición, estaciones de ferrocarril y otros edificios que cumplieran finalidades transitorias. Simultáneamente, se ampliaron las zonas arquitectónicas en las que se empleaba el vidrio, pero las condiciones sociales para su creciente utilización como material de construcción sólo surgieron un centenar de años más tarde. En Glasarchitektur de Scheerbart (1914), todavía apareció en el contexto de una Utopía.”*

Walter Benjamín  
Paris: Capital of the 19<sup>th</sup> Century, 1930

## INTRODUCCIÓN

ESTE trabajo tiene como propósito ofrecer tanto a alumnos como a profesores y profesionales de la arquitectura un documento que exponga las prácticas de la construcción con acero estructural, así como las consideraciones de diseño arquitectónico que hay que tomar al diseñar con tales estructuras.

Debido a la carencia de un código estructural sobre construcciones en acero en nuestro país, la construcción se norma por códigos extranjeros (usualmente el AISC 9th Edition o posterior<sup>1</sup>). Por tanto, todas las consideraciones técnicas, estarán basadas en estos estándares.

El aspecto técnico que involucra un proyecto de arquitectura en acero se expone de forma clara y precisa. El uso de cada elemento<sup>2</sup>, desde su análisis conceptual y estructural hasta su aplicación práctica, se muestra de manera sencilla por medio de descripciones gráficas y diagramas.

Por otro lado, el conocimiento de las técnicas constructivas con acero y una clara concepción estructural, provee un buen criterio para la configuración espacial, lo que llega a ser un paso adelante para mejorar los diseños arquitectónicos que usen el material (tanto en creatividad como en criterio estructural). Todo esto conforma una base cognitiva para lograr diseños económicos.

En estas páginas se encontrará desde una breve síntesis histórica del uso del hierro y acero en la construcción hasta las respuestas a las interrogantes más comunes en cuanto al diseño con acero, tanto desde el punto de vista arquitectónico así como de premisas estructurales.

El conocimiento del material, sus propiedades físicas y mecánicas explicadas en términos sencillos, así como una breve descripción del trabajo propio del taller y del departamento de diseño resultan en una mejor comprensión de todo el proceso que envuelve desde el diseño arquitectónico hasta la fabricación final de la obra. A su vez este conocimiento sienta una base para supervisar el proceso y montaje de una estructura por parte de un arquitecto.

Como aporte a la investigación se comenta cómo se desarrollan los procesos de planificación en una oficina de diseño, se presenta el predimensionado de un proyecto de mediana magnitud y se comenta lo que debe considerarse al integrar precios con estructuras de acero. Asimismo se ejemplifica el sistema de marcas y artículos (ítem) en la planificación.

El presente trabajo no tiene la intención de agotar un tema tan apasionante en el campo de la arquitectura y construcción, sino sencillamente contribuir a la difusión de conocimiento que genera realizar un buen diseño creativo con miras al beneficio de nuestra sociedad y servir de punto de partida para otros trabajos sobre el tema.

---

<sup>1</sup> Publicado por *American Institute of Steel Construction, Inc.*, 1 East Wacker Drive, Suite 3100, Chicago, Illinois 60601.

<sup>2</sup> Columnas, vigas, entrepisos, techos, uniones, etc.

## ÍNDICE

### CAPÍTULO I. CONCEPTUALIZACIÓN GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN

Marco temático	15
Planteamiento del problema	15
Justificación	18
Objetivos	19
Procedimiento de la investigación	19

### CAPÍTULO II. SÍNTESIS HISTÓRICA DE LA EVOLUCIÓN DEL ACERO COMO MATERIAL CONSTRUCTIVO

Evolución del Hierro	23
La Edad de Piedra y el uso primitivo de metales	23
Tipos de hornos primitivos	24
Primeras evidencias del uso del hierro	24
Técnicas constructivas disponibles en la revolución industrial	27
Caballeros de acero y damas de cristal	29
Fábricas de la modernidad.	35
Grandes logros de la arquitectura en acero	39
Crisis en los precios del acero	45

### CAPÍTULO III. LINEAMIENTOS GENERALES DE COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

Introducción	49
Cargas en estructuras	49
Reacciones	51
Recorridos de cargas	52
Esfuerzos internos	53
Comportamiento de los elementos estructurales	59
Conceptos de fuerzas y esfuerzos	60
Esfuerzos Normales Excéntricos	69
Efectos de la forma de la sección	71
Estructuras mixtas en acero	73
Seguridad y rotura en estructuras de acero	74
Tipos de colapsos	75
Inestabilidad por pandeo	78
Geometría estructural y comportamiento	81
Comportamiento de sistemas estructurales	82
Armaduras y entramados	83
Estructuras espaciales	89

Prevención de la inestabilidad por pandeo	90
---	----

### CAPÍTULO IV. GENERALIDADES TÉCNICAS SOBRE LA CONSTRUCCIÓN CON ACERO

Introducción	95
Perfiles de acero estructural	95
Características	99
Especificaciones	99
Propiedades físicas	101
Manuales de acero	102
Criterios de espaciamiento estructural	103
Columnas de acero	104
Vigas de acero	107
Uniones viga-columna	108
Uniones viga-vigueta	110
Marcos estructurales	111
Sistemas de vigas en un sentido	114
Sistemas de vigas en dos sentidos	114
Sistemas de marcos articulados	115
Sistemas de entresijos	119
Sistema de techos	125
Armaduras	130
Sistemas de reticulado espacial	135
Gráficas para diseños preliminares en acero	141

### CAPÍTULO V. INTEGRACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE ACERO CON EL DISEÑO ARQUITECTÓNICO

Introducción	147
Caso: Centre George Pompidou 1977	147
Caso: Gund Hall 1972	149
Caso: Sainsbury Center 1978	151
Caso: Crosby Kemper Arena 1974	152
Caso: Expo 70 Plaza Festiva	153
Caso: Jacob Javits 1980	154
Caso: Schultz Residence 1978	156
Caso: Guggenheim de Bilbao	158
Caso Guatemala: Marcos rígidos con apoyos articulados.	165
Caso Guatemala: Estructuras para centros comerciales	166
Caso Guatemala: Estructuras de grandes luces	168

Caso Guatemala: Estructuras para vivienda	168
Caso Guatemala: Ampliaciones de viviendas	173
Caso Guatemala: Edificios de Ofibodegas	174
Caso Guatemala: Pequeños edificios de oficinas	176

## **CAPITULO VI. CRITERIOS PARA EL DISEÑO ARQUITECTÓNICO CON ACERO**

Introducción	181
Los proyectos en acero	181
Algunas razones para el desarrollo de proyectos en acero	182
Selección del tipo de estructura	183
Criterios para el diseño arquitectónico	184
Ejemplo caso: proyecto Guatemala	188
Fuentes de información preliminar	192
Beneficios de las estructuras de acero	192
Espacios abiertos más amplios	193
Columnas más pequeñas	193
Se requiere un mínimo de paredes de carga	194
Flexibilidad de creatividad y diseño eficiente	194
Eficiencia para instalaciones adicionales	195
Facilidad de cambio, remodelación y renovación	196
Reducción del tiempo total de construcción	197
Reducción de costos y tiempo de construcción en cimientos	198
Tiempo ahorrado es dinero economizado	198
Protección de incendios	199
Desempeño superior en caso de movimientos sísmicos	199
El acero es un material durable	201
Las construcciones de acero son resistentes a todo tipo de clima	201
El acero como material reciclable	201
Objeciones típicas al uso de estructuras de acero	202
Sugerencias para mejorar la economía en estructuras de acero	206
Argumentos de materiales rivales	207
Ventajas del acero	210
Sobre la construcción del proyecto	211
Talleres de acero	212
Equipos y procedimientos del departamento de diseño	212
Escalas de dibujo	212
Líneas y tipos de letras	213
Sistema de proyecciones ortográficas	214
Orientación de vistas en el dibujo	215
Secciones	215
Vistas auxiliares	216
Líneas de corte	216

Líneas auxiliares que indican continuidad	216
Fabricación de proyectos	217
Estimación y Contratación	217
Costo por porción	217
Precio por libra	217
Precio por porcentaje	217
Costos por instalación	218
Costos por fabricación	218
Departamento de dibujo	220
Planos de montaje	221
Sistema de marcas, hojas índice y numeración de planos	221
Lista de materiales	224
Ejemplo de planificación	224

## **CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y BIBLIOGRAFÍA**

Conclusiones y recomendaciones	233
Bibliografía	235

I

## CONCEPTUALIZACIÓN GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN

Título: **CONSIDERACIONES SOBRE EL DISEÑO ARQUITECTÓNICO CON ESTRUCTURAS DE ACERO**

### a.- Marco Temático

Este proyecto de tesis pertenece al campo tecnológico-constructivo con serias implicaciones en áreas de diseño, planificación, construcción y administración de proyectos de arquitectura.

La tecnología constructiva relacionada a la industria del acero, tiene una finalidad práctica, no obstante el conocimiento del material y su configuración estructural, así como su lugar en la teoría de la arquitectura actual, genera una base cognoscitiva indispensable para el desarrollo óptimo de proyectos.

Resulta indispensable analizar la evolución de la técnica desde la antigüedad hasta nuestros días de una forma simplificada. Además resultará oportuno exponer criterios para el diseño y construcción de proyectos de arquitectura, sean éstos de carácter público o privados, orientados a sectores específicos de la sociedad guatemalteca.

Cómo profesionales involucrados en el ámbito de la construcción, resulta importante tomar en consideración un aspecto que muchas veces se pasa por alto: los *cambios* que obedeciendo a nuevas tendencias en el mercado mundial (tratados de libre comercio, apertura de mercados, etc.) originan necesidades espaciales adecuadas a la inversión, desarrollándose proyectos que por su complejidad originan un intercambio de técnicas, adquisición de maquinarias y sobre todo un entendimiento del proceso constructivo de proyectos de mediana y gran magnitud.

La presente investigación ahondará en las “**Consideraciones sobre el diseño arquitectónico con estructuras de acero**”. Abordando temas que se han dejado a un lado en la formación profesional del arquitecto, quedando éstos como una opción virtual en su vida profesional y que hace que se enfrente a sus primeros diseños (si se elige el acero como estructura) con poco o ningún conocimiento, relegando importantes decisiones a terceras personas. Es importante notar que éstas “terceras personas” pueden o no, tener un conocimiento científico del tema, considerando que muchos trabajos son realizados por herreros en lugar de profesionales de la ingeniería o arquitectos con experiencia en estas áreas.

### b.- Planteamiento del problema

*“La falta de divulgación e información sobre el desarrollo de proyectos de arquitectura a base de aceros estructurales, así como el desarrollo de la técnica nacional, influye directamente en el diseño arquitectónico, por lo que es necesario ahondar en el conocimiento de éstos para lograr propuestas eficientes y racionales.”*



La ciudad de Guatemala se ha convertido en las últimas décadas en una gran urbe (según estimaciones, creció de 400,000 a 2.4 millones habitantes en un período de treinta y ocho años<sup>1</sup>). La ciudad tradicional de antaño sintió la influencia del capitalismo o economía de libre mercado entre otras cosas, al ser escenario de la transformación y modernización de los métodos de construcción.

Este sistema económico introdujo en casi todas las formas de vida urbana sus principios racionalistas y eficientistas que responden a las leyes del mercado, de acumulación y reproducción de capital, el comienzo de una etapa 'industrial'. Estos cambios, no significarían necesariamente una mejora en las condiciones de vida de todos los habitantes de la ciudad.<sup>2</sup>

A pesar de los problemas sociales que originen, las leyes capitalistas se ven reflejadas en la ciudad no sólo en la búsqueda incansable del aprovechamiento máximo del suelo urbano, ya que este ha adquirido un alto valor económico de cambio, sino en la adquisición constante de tecnología por parte de la industria de la construcción guatemalteca la cual ha permitido en los últimos años un avance en el desarrollo de proyectos con estructuras metálicas cuyo fin es el producto construido en un menor tiempo y costo.

En medio de este empuje al desarrollo capitalista, se presenta en nuestro país "como en muchos países latinoamericanos la existencia de arquitectos que se separan de los patrones internacionales dominantes y que son más capaces de integrar cuestiones arquitectónicas tales como la adaptabilidad material al medio climático utilizando materiales autóctonos [o *nacionalmente*

<sup>1</sup>PLAN DE DESARROLLO METROPOLITANO, Op Cit. Capítulos 2 y 3. *Uso del Suelo y Medio Ambiente*. Basándonos en proyecciones geométricas institucionales

<sup>2</sup> *The Columbia History of the World* menciona 'la "industrialización ha ayudado a resolver muchos de los problemas físicos del hombre", también "ha contribuido a crear tensiones sociales de enorme gravedad y complejidad".

*disponibles*]<sup>3</sup>, la integración del progresivo crecimiento de cada edificio y la capacidad de expresión de elementos diferenciadores y culturalmente peculiares como el color y la ornamentación.<sup>4</sup> (cursivas del autor de esta tesis)

Igualmente conocido es el énfasis actual, "altamente útil para los países del tercer mundo, [...] de los *diversos caminos* de arquitectura bioclimática pensadas para construir con tecnologías y "*materiales locales*", según formas tradicionales, siguiendo presupuestos económicos modestos e integrándose ecológicamente al contexto y las condiciones climáticas."<sup>5</sup> (cursivas del autor de esta tesis)

Tener semejante panorama nacional, no implica ninguna forma de "desventaja", en sentido creativo, pues según el arquitecto, historiador y crítico de arquitectura Kenneth Frampton, se ha logrado "progreso tectónico [...] entre las directrices más humanistas de la profesión"<sup>6</sup>

Cómo parte integrante de la *tecnología de construcción local*, el acero puede ser usado para lograr "elementos diferenciadores y culturalmente peculiares" de la producción de arquitectura nacional. Sin embargo, muchas veces el desconocimiento de la técnica origina su propia marginalización. La posibilidad de un diseño adaptado o integrado con acero, también abarca conocer cómo usarlo.

Propuestas constructivas formales con acero en países desarrollados y del tercer mundo, involucran un conocimiento adecuado del

<sup>3</sup> Aunque el acero estructural no es producido por molinos locales, existe una considerable oferta y demanda por parte de la industria de la construcción. Los talleres nacionales asimismo tienen la capacidad de fabricar cualquier sección requerida en cualquier proyecto.

<sup>4</sup> DESPUES DEL MOVIMIENTO MODERNO. Arquitectura de la segunda mitad del siglo XX. Josep María Montaner. Gustavo Gili 1993. Página 135.

<sup>5</sup> Véase a este respecto, textos como el de Jean-Louis Izard y Alain Guyot, ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA, Editorial Gustavo Gili, S. A., Barcelona 1980.

<sup>6</sup> HISTORIA CRITICA DE LA ARQUITECTURA MODERNA, Prefacio a la tercera edición por Kenneth Frampton, Nueva York, 1991.

material para dar respuesta a las necesidades espaciales<sup>7</sup>. La elección del material obedece sin duda a sus enormes ventajas<sup>8</sup> (ventajas que varían desde lo puramente estético, funcional, y estructural hasta aquellas que responden a los principios racionalistas y eficientistas adecuado para la reproducción de capital).

En Guatemala han predominado las construcciones de concreto reforzado, sin embargo en los últimos años se ha comenzado a generar arquitectura donde el uso del acero como estructura principal es primordial. Centros comerciales, edificios que albergan desde actividades de oficinas, apartamentos, colegios, talleres, ofi-bodegas<sup>9</sup>, complejos industriales hasta hoteles de renombre y complejos turísticos ya son parte de nuestra arquitectura, aportando los espacios necesarios donde se generan actividades ligadas al desarrollo económico, cultural y social de nuestro país.

Sin embargo, la configuración espacial necesaria para el diseño de diferentes proyectos utilizando las ventajas de las estructuras de acero, es poco conocido. Algunos diseños de arquitectura generados por estudiantes en los cursos de diseño arquitectónico y hasta proyectos generados por algunos arquitectos, muestran en muchos casos una deficiente concepción del uso de las estructuras de acero.<sup>10</sup> Las razones por las que esta situación prevalece en el país son un poco difusas. Existen opiniones diversas y no comprobadas entre los profesionales. Algunos factores que se exponen son los siguientes: (1) El acero es un material caro e importado por lo que no es económico diseñar con estructuras de

<sup>7</sup> Véanse los ejemplos de las páginas 33 al 34.

<sup>8</sup> Véase el subtítulo “Beneficios de las estructuras de acero” en el Capítulo VI.

<sup>9</sup> *Ofi-bodega*: Término que se ha popularizado en nuestra sociedad para describir espacios que albergan bodegas y oficinas en proyectos de pequeña y mediana magnitud.

<sup>10</sup> “La mayoría de las propuestas recibidas para el concurso de vivienda popular organizado por el gobierno en este año (2004), que usan elementos de acero, tienen una deficiente propuesta del uso del material.” Observa el arquitecto Jorge Escobar, integrante de la comisión de evaluación de dicho concurso.

acero<sup>11</sup>. (2) Se ha limitado en algunos casos la participación del arquitecto al proponer la estructura a usar quedando esta a criterio en muchos casos de ingenieros civiles. (3) No se enseña o se enseña muy poco en los cursos universitarios de licenciatura y la literatura disponible no se encuentra en español.

Independiente de las razones que se expongan y aún siendo un producto importado, los proyectos diseñados en acero siguen siendo una opción que compite por precio localmente. De hecho, proyectos como centros comerciales que hacen uso de grandes áreas cubiertas son difíciles concebirlo sin el uso del acero.

Para estos proyectos, el arquitecto se encuentra sólo, muchas veces la guía que obtiene es de ingenieros civiles que pueden o no tener experiencia (los ingenieros civiles con maestrías en estructuras de acero son contados en nuestro medio), a sí como de talleres de herrería que no tienen un conocimiento técnico ni científico de las propiedades del acero. Esto implica directamente una deficiente propuesta del diseño arquitectónico, no sólo desde el punto de vista creativo sino estructural.

En muchos casos, el arquitecto desconoce criterios de selección del sistema estructural en acero a usar lo que genera una propuesta cara estructuralmente.

Esto ha originado que muchos de los proyectos arquitectónicos mencionados anteriormente sean planificados en el extranjero, pues su diseño estructural debe corresponder a especificaciones (generalmente extranjeras: americanas, alemanas o japonesas) Lo paradójico no obstante es que ya realizada la planificación en el exterior, el proyecto es cotizado y negociado con empresas nacionales las cuales tienen la maquinaria necesaria y el

<sup>11</sup> Hasta el mes de noviembre de 2003, el precio de la libra del acero oscilaba entre 0.20 y 0.25 centavos de dólar. Debido al alza en el mercado internacional producto de las grandes construcciones en China (represa Gran Garganta y otras), actualmente el precio por libra de acero oscila entre 0.35 a 0.45 centavos de dólar.

personal calificado para entender y construir lo requerido<sup>12</sup>. Es razonable por tanto que el arquitecto guatemalteco *actualizado* tenga conocimiento de lo que involucra diseñar espacios con estructura de acero.

### c.- Justificación

El conocimiento en términos sencillos de algunas consideraciones para el diseño de espacios con estructuras metálicas se convierte en una necesidad para los arquitectos pues vivimos en una sociedad cada vez más abierta a los mercados extranjeros. Sin que ello signifique una pérdida de nuestra capacidad de expresión sino por el contrario la extensión de la misma. Es importante hacer notar que en nuestro país existen empresas (generalmente ligadas al campo de la ingeniería civil) que cuentan con una capacidad instalada sorprendente y que ya han sido capaces de montar estructuras de edificios en cualquier país de Centroamérica, el sur de México o lugares distantes como Aruba (en las costas de Venezuela)<sup>13</sup>, lo cual sin duda resulta interesante no sólo desde el punto de vista de la competitividad, sino también de su transporte (generalmente se piensa que existen muchas limitantes en este sentido)

El ámbito de trabajo del arquitecto involucra pues responder a las necesidades espaciales de nuestra sociedad con diseños competitivos tanto en creatividad, funcionalidad y costos, en lo cual el acero como material constructivo, no puede pasarse por alto.

<sup>12</sup> Aceros Prefabricados, S. A. tiene capacidad para trabajar en procesos automatizados el desarrollo de un proyecto.

<sup>13</sup> Una empresa de capital nacional que se ha distinguido en este aspecto es Aceros Prefabricados, S. A. (APSA).

### d.- Antecedentes temáticos

En el medio nacional no existen antecedentes temáticos como tales. El presente trabajo de investigación, no tiene relación, ni es continuación de ningún trabajo previo.

Existen, sin embargo, gran cantidad de publicaciones que tratan la arquitectura con acero estructural, cuya información generalmente se encuentra en algún idioma extranjero. Cualquier referencia bibliográfica será correspondientemente identificada.

### e.- Delimitación de la investigación

#### i.- Delimitación temporal

Se realizará una breve síntesis histórica de cómo el hombre ha moldeado el hierro (acero) desde la época prehistórica hasta la actual y se destacarán algunos edificios que marcaron hito en el desarrollo de la técnica y mostraron una concepción espacial especialmente interesante. Finalmente, se comentará brevemente, las razones del incremento del precio del acero y algunas observaciones actuales de ejecutivos de la industria.

#### ii.- Delimitación espacial

Puesto que no se pretende tener una visión localizada de las propuestas arquitectónicas con acero, el presente estudio analizará edificios construidos en diferentes partes del mundo.

### f.- Propósito

Dar a conocer aspectos históricos y técnicos del desarrollo de la técnica a escala mundial y de la construcción en acero en Guatemala, orientado a proyectos de mediada y gran magnitud. Dar respuesta a las interrogantes más comunes en cuanto a la práctica de la construcción así como explicar el papel que desempeñan los principales participantes en el proceso de la construcción.

Finalmente, exponer los criterios a seguir y consideraciones a tomar en cuenta para lograr eficiencia en las propuestas con arquitectónicas con acero estructural.

### **g.- Objetivos**

#### **i.- Objetivo general**

Realizar un documento que contenga de manera sintetizada información sobre los criterios a seguir para lograr propuestas arquitectónicas competitivas usando el acero como estructura principal.

#### **ii.- Objetivos específicos**

1. Obtener y generar conocimiento fundamentado en conceptos, teorías y explicaciones concretas sobre el uso y la práctica de la construcción relacionada al desarrollo de proyectos con aceros estructurales.
2. Proponer criterios de diseño arquitectónico con aceros estructurales.
3. Mostrar los beneficios de construir con estructuras de acero comparado con otros materiales.
4. Proponer recomendaciones y sugerencias para lograr diseños económicos, funcionales y eficientes.
5. Mostrar las diferentes formas de presupuestar un proyecto realizado con estructura de acero.

### **h.- Procedimiento de la investigación**

En este apartado se expresan las actividades generales que se desarrollarán consecutivamente para culminar la presente tesis:

1. Se elaboró un referente teórico-conceptual sobre los temas a tratar, utilizando bibliografía especializada.
2. Muchas afirmaciones se basarán en entrevistas realizadas a ingenieros y arquitectos con experiencia en el campo de la construcción en acero así como a la experiencia personal en este campo.
3. Se mostrarán algunos edificios que marcaron un adelanto en la técnica de construcción del acero.
4. A través de bibliografía especializada se darán criterios de diseño de espacios con estructuras de acero.
5. Se construirá la explicación clara y específica de todos los componentes básicos de una estructura metálica.
6. En cada investigación de campo se utilizarán medios de grabación de audio y video como apoyo a la redacción final. Se utilizará una cámara canon eos elan Ile tipo reflex con objetivos 35-80 mm y 70-300 mm. Un dispositivo flash Speedlite 380EX, marca Canon. Filtros varios. Se utilizarán dibujos realizados en AutoCAD 2004 así como representaciones en 3 dimensiones realizadas en 3D Studio. Se realizará la redacción, graficación y presentación final del trabajo de tesis. Se utilizará Word 2003 como procesador de palabras.

II

**SÍNTESIS HISTÓRICA DE LA EVOLUCIÓN DEL ACERO  
COMO MATERIAL CONSTRUCTIVO**

**A.- EVOLUCIÓN DEL HIERRO**

**Introducción**

“**E**l acero estructural esta compuesto *casi enteramente de elementos de hierro*. Pequeñas proporciones de otros elementos, particularmente carbón y manganeso pueden también estar presentes para proveer dureza y ductilidad”.<sup>1</sup> Por tanto todo estudio sobre el origen del acero, involucra un examen histórico de la evolución del hierro como material.

Según el libro *History of Cast Iron in Architecture* por John Gloag & Derek Bridgwater, “[...] el hierro ha sido el material que más a influenciado la formación de la civilización”<sup>2</sup>. Esto no sólo nos lleva

<sup>1</sup> *Detailing for Steel Construction, 1983 by AISC ( cursivas propias)*

<sup>2</sup> Introducción, página I.

a pensar en la Edad de Hierro, cuando el hierro sustituyó al bronce en la fabricación de instrumentos y armas, sino a los grandes talleres de ensambles y producción en serie de la actualidad, las grandes obras de ingeniería y arquitectura, características del pasado siglo XX, y del nuestro. Pero ¿cómo descubrió el hombre el hierro? ¿Quiénes fueron los primeros en utilizar el material y fundirlo? ¿Cómo evolucionaron los hornos de fundición del metal en el transcurso de la historia de la civilización? ¿Cómo se originó lo la primera fundición del llamado “acero” y como se extendió su uso? Estas y otras preguntas se tratan en este capítulo.

**“El acero estructural esta compuesto casi enteramente de elementos de hierro. Pequeñas proporciones de otros elementos particularmente carbón y manganeso también pueden estar presentes”**  
*(Detailing for Steel Construction, 1983 by AISC).*

Según la publicación *Perspicacia para comprender las escrituras*, el hierro es “uno de los metales más antiguos conocidos por el hombre y es considerado en la actualidad como el más abundante, útil y barato<sup>3</sup> de todos. Ocupa el cuarto lugar entre los elementos que más abundan en la corteza terrestre, y se dice que alrededor de 90% del núcleo de la Tierra es hierro. [...] Tubal-caín, del IV milenio a. E. C., fue el primer hombre del que se sabe forjó y trabajo el hierro. (Génesis 4:22)”<sup>4</sup>.

**La Edad de Piedra y el uso primitivo de metales.**

Casi cerca del 4000 a. E. C<sup>5</sup>, casi todos las herramientas eran hechas de piedra. El período neolítico terminó cuando los metales

<sup>3</sup> Véase el subtítulo “Crisis en los precios de acero estructural” al final de este capítulo.

<sup>4</sup> Publicado por Watch Tower Bible and Tract Society of New York, Inc. International Bible Students Association. Brooklyn, New York, U.S.A. 1991. Volumen I, pag. 1140.

<sup>5</sup> En esta trabajo se ha preferido la expresión a. E.C. (antes de la Era Común) o E.C. (Era Común) porque es un término más exacto que A.C. (antes de Cristo) o D. C. (Después de Cristo).

comenzaron a usarse; pero más allá de esa era nadie puede decir exactamente cuando se tuvo conocimiento de cómo utilizar el metal. El hierro podía encontrarse en bruto, algunos investigadores señalan el posible origen en meteoritos. Este hierro podía haber sido tratado como una súper roca durísima y probablemente considerada como un regalo de los dioses. G. F. Zimmer da una amplia evidencia que prueba que los meteoritos podrían haber sido despostillados y los fragmentos usados por gente primitiva.<sup>6</sup>

### Tipos de hornos primitivos

No se sabe con certeza quienes descubrieron que el metal podía ser producido aplicando calor a ciertos minerales. Algunos sugieren que en los primeros incendios de bosques<sup>7</sup>, el hombre primitivo haya descubierto el metal fundido, lo haya usado y posteriormente haya aprendido a usar el fuego para producir herramientas avanzadas. Es más probable, sin embargo, como el profesor William Gowland apunta que el descubrimiento del metal “fue concebido en más de un lugar y en más de una manera sencilla.”<sup>8</sup> Sus orígenes se establecen entonces en los fuegos domésticos de la Edad Neolítica.



Ilustración II.1. Horno Primitivo.

El profesor W. Gowland apunta que en los hornos primitivos, se podrían haber encontrado algunos minerales como el carbonato u óxido, la casiterita, cerusita o mezclas de óxidos de hierros, que al caer accidentalmente dando lugar a la fundición.<sup>9</sup> Estos hornos primitivos pudieron evolucionar y esparcirse como parte integrante de una cultura por todo el mundo. Algunos hornos desarrollados se han encontrado en colinas, caracterizadas por corrientes de aire especialmente rápidas.

### Primeras evidencias del hierro en Egipto, Asiria, India, China, Europa y Gran Bretaña.

La Edad de Piedra, de Bronce y de Hierro, se traslapó en varias partes del mundo. La civilización Maya estaba todavía en el etapa Neolítica alrededor de 400 a E.C., cuando en Europa se había pasado de la edad de Bronce a la del hierro. Los británicos estaban usando implementos de piedra cuando a su tiempo los asirios, egipcios, griegos y chinos se familiarizaban con el hierro.

#### Egipto.

En el cementerio egipcio *El Gerseh*, se encontró un rosario primitivo de cerca del año 4000 a. E.C. Según Gowland, “ellos no consisten en mineral de hierro, sino de hidratos de óxido ferroso, el cual es el resultado de la herrumbre del forjado del hierro del cual fueron originalmente hechos.”<sup>10</sup>

En 1837, en la Gran Pirámide de Gizeh se descubrió una pieza de hierro que al parecer era una herramienta. La pieza fue datada como del 3100 a. E.C. y se encuentra en el Museo Británico.

<sup>6</sup> “The use of meteoric iron by primitive man”. By George Frederick Zimmer, A. M. Inst. C. E. *The Journal of the Iron and Steel Institute*. Vol. XCIV, 1916, p. 306

<sup>7</sup> Según la teoría clásica sobre la primera producción de hierro en el mundo, hubo una vez un incendio forestal en el monte Ida en la antigua Troya (actual Turquía) cerca del mar Egeo, el terreno supuestamente era muy rico en depósitos ferrosos y el calor del fuego produjo una forma primitiva de hierro a la que se le pudo dar forma por golpeteo.

<sup>8</sup> “Cooper and its alloys in early times,” by William Gowland, Assoc. R.S.M., F.R.S. Emeritus Profesor of Metallurgy at the Royal School of Mines. *Journal of the Institute of Metal*. Vol. VII, No. I, 1912, p. 24.

<sup>9</sup> Idem.

<sup>10</sup> Idem.

## Asiria.

En las ruinas de El Palacio de Sargón, Rey de Asiria (722 a. E.C.) Victor Place “encontró una bodega [...] de 160,000 kg. de hierro.” El descubrimiento consistía en “barras de hierro” listas para su transporte que habían sido olvidadas. La colección contenía artículos de hierro: cadenas, instrumentos para caballos, etc.<sup>11</sup> así que no sería irrazonable suponer que los asirios comenzaron a usar el hierro alrededor de 1500 ó 2000 a. E. C.”<sup>12</sup>

## India y China.

Son de los documentos chinos en lugar de las excavaciones arqueológicas de las cuales aprendemos cómo era el uso del material.

El profesor Panchaman Neogi concluye de ciertos pasajes del *Yajurveda Negro* que algunas formas de cañones de hierro o motores de guerra fueron usados entre el 2000 a. E. C. y el 1000 a. E. C.<sup>13</sup>

El Dr. Friedrich Hirt describe un estado federal en China que imponía impuestos sobre el hierro alrededor del 675 a. E. C.; pero que era conocido mucho antes.<sup>14</sup>

Investigadores americanos coinciden en que el hierro fundido tuvo su origen en China. Existe evidencia directa de que el hierro fundido fue producido en China alrededor del 502 a. E.C., y

<sup>11</sup> “*The Metals in Antiquity*”, by William Gowland, Assoc. R.S.M., F.R.S., F.S.A., Emeritus Professor of Metallurgy at the Royal School of Mines. *Journal of the Royal Anthropological Institute of Great Britain and Ireland*. Vol. XLII, 1912, p.281

<sup>12</sup> Idem.

<sup>13</sup> “*Iron in Ancient India*” Notas en un panfleto por Mr. Panchaman Neogi, Profesor de Química en el Rajshahi College. *Journal of the Royal Society of Arts*. Vol. LXIII, Nov. 27<sup>th</sup>, 1914, p. 43.

<sup>14</sup> “*The Ancient History of China*”, by Friedrich Hirth, Ph.D. Columbia University Press, 1923, p. 203.

suficiente evidencia que sugiere que la técnica del hierro fundido fue conocida 1000 años atrás.<sup>15</sup>

## Europa.

Es probable que los griegos fueran los primeros europeos en usar el hierro. Montelius sitúa la Edad de Hierro Griega en el 1400 a. E. C.<sup>16</sup> Homero, alrededor del 880 a. E. C. a menudo escribe del metal, y Aristóteles, alrededor del 380 a. E. C., describe con algunos detalles de las diferentes calidades de varios hierros y como el metal era obtenido de las minas. Virgilio escribe alrededor del 40 a. E. C. que los romanos tenían familiaridad con el acero y en *La Historia Natural* de Plinio se indica que alrededor del 70 E. C. los romanos tenían un completo conocimiento metalúrgico del hierro y sus minas. Asimismo se da un recuento de las principales localidades de extracción, las características de las minas, los métodos de extracción y de los métodos de endurecimiento por enfriamiento de agua y aceite para formar un primitivo tipo de acero.

Existe constancia que para los 1400 Alemania llevaba la delantera en la producción eficiente de hierro por medio del horno llamado: “El Arrinconado” [*the Stuckofen*]. Este era un horno pequeño construido de blocks y consistía en dos conos truncados colocados base a base. El frente de la chimenea era delgado, un muro temporal el cual era quebrado al final de la operación para permitir que el hierro fundido fuera removido. Como la eficiencia y el tamaño de los hornos crecieron, el mineral podía estar más en contacto con el combustible y el hierro podía llegar a estar más carburizado y en una condición más fluida.

<sup>15</sup> *The American Institute of Mining and Metallurgical Engineers* en Febrero de 1938, escrita por Maurice L. Pinel, Thomas T. Read and Thomas A. Wright, fue dedicada a este descubrimiento y titulada: “Composición y Microestructura de las Antiguas Fundiciones de Hierro” (Composition and Microstructure of Ancient Iron Casting).

<sup>16</sup> Extracto del documento de celebración de la Swedish archeologist Montelius, at 31<sup>st</sup> General Meeting of the German Anthropological Society at Halle. *The Journal of the Iron and Steel Institute*. Vol. LVIII, No. 2, 1900, p. 514.

## Gran Bretaña.

El hierro era conocido por los británicos hacia el 200 a. E.C. y quizás antes. En diferentes lugares se han encontrado remanentes de la época pre-romana, las barras de hierro hasta llegaron a ser usadas como monedas. Los soldados británicos tenían además carros de guerra jalados por caballos los cuales tenían elementos de hierro.

Para extraer el metal de las minas, R. A. Smith concluye que los británicos usaron “la chimenea baja sencilla”, similar al horno catalán de los pirineos, el cual se usa aún hoy. El origen de este horno pudo ser la región mediterránea del oriente de los pirineos o del nordeste de Italia, pero también pudo ser una modificación del horno usado para extraer estaño.<sup>17</sup>

Después de que Bretaña llegara a ser una provincia romana, la producción de acero se incrementó considerablemente. En Sussex y Gloucestershire, los trabajos de hierro británicos-romanos fueron tan extensos que se han encontrado grandes depósitos de escoria.

Los centros principales de la industria del hierro en la Inglaterra medieval fueron: Kent, Sussex, el Forrest of Dean, y Rockingham Forest en Northamptonshire; pero habían muchos otros de menos importancia donde pequeñas cantidades eran producidas, para suplir la demanda local (como ejemplo podrían citarse algunas grandes abadías de la época.)

Existían indudablemente muchas variaciones locales, pero el método usual de extraer metal de la mina es descrito por el profesor T. S. Ashton: “El mineral era primeramente molido en fragmentos y mezclado con una pequeña cantidad de marga y cal, la cual se aglutinaba y la masa era dividida en montoncitos los

cuales eran colocados en una fragua rodeada por carbón. La ráfaga se producía por medio de un fuelle de cuero, trabajados tanto por el método manual como por el poder del agua, el fuego se mantenía a temperatura moderada; el material se convertía en una pasta en lugar de una forma líquida, las impurezas eran removidas con martillazos ‘hasta –dice Sturtevant- que como el suero eran escurridas por la presión y como cuajada se convertía en queso’. Mucho calor y martilleo era necesario antes que el mineral era finalmente transformado en un forjado de hierro, listo para ser trabajado en implementos para el herrero. La calidad del material acabado era muy alta, la cantidad producida por cualquier fuerza era necesariamente pequeña y un considerable peso de hierro metálico era dejado atrás en las cenizas.”<sup>18</sup>

En los distritos más avanzados las mejoras se hacían eventualmente, un rudo tipo de horno estaba evolucionando. Descrito por J. Dearden, era construido por arcilla para formar un cilindro de 4'-00" alto por 18'-00" de diámetro. “En la base habían hoyos a través de los cuales pasaba una ráfaga de aire, soplada por los fuelles, o hasta por el viento mismo si era construido en una colina. Un fuego por carbón era encendido en la parte inferior del horno y se llenaba con capas de hierro-piedra y carbón. Después de muchas horas, se enfriaba y era demolido. Si el proceso había sido exitoso, un pastel de hierro de 30 a 60 libras era encontrado al fondo. El hierro tenía que ser recalentado y martillado para expulsar las piezas de carbón y ceniza que podría contener.”<sup>19</sup> Esto permitió naturalmente construir hornos de ladrillo o blocks para la mejora de los métodos de producción.

No se puede precisar cuándo se descubrió que el lingote de hierro era un producto muy útil. En la Edad Media, el comercio de hierro

<sup>17</sup> *A guide to the antiquities of the early iron age of central and western Europe.* By R. A. Smith. The British Museum, 1905, p. 4.

<sup>18</sup> *Iron and Steel in the Industrial Revolution*, by T. S. Ashton, M. A. University Press. Manchester and Longmans, Green & Co. 1924, p. 2.

<sup>19</sup> *Iron and Steel Today*, by John Dearden, B. Sc., A. M. I. Mech. E. Oxford University Press. 1943. P. 16.



en Alemania y España era más avanzado que en Inglaterra, tanto en cantidad como en producción.

### **B.- TÉCNICAS CONSTRUCTIVAS PREDISPONIBLES EN LA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL.**

La revolución industrial comenzó en el siglo XVIII, y cambió el mundo como pocas cosas lo habían hecho antes. En aquel tiempo convergieron en Inglaterra diversos factores necesarios para el progreso industrial, como fueron el conocimiento técnico, suficiente capital, disponibilidad de materias primas y la posibilidad de transportar éstas y los productos terminados a bajo costo. Estas circunstancias dieron comienzo a un aumento rápido y sin precedentes de la productividad.

Por otra parte, algunos sucesos anteriores prepararon el camino a la industrialización. Se empezó a utilizar como combustible el carbón, que era fácil de obtener en Inglaterra.

A partir de 1740 se produjo además un importante aumento de la población inglesa, por lo que la industria tuvo que hallar nuevos métodos de satisfacer la creciente demanda. El futuro radicaba, obviamente, en más y mejores máquinas. La banca suministró los fondos para crear nuevos negocios, y legiones de trabajadores inundaron las nuevas fábricas mecanizadas. Se legalizaron los sindicatos, que antes habían estado proscritos. Los trabajadores británicos, menos restringidos por la reglamentación de los gremios que los de la Europa continental, eran contratados a destajo, lo que añadió otro incentivo para encontrar mejores maneras de acelerar la producción.

Además, Inglaterra tenía una fuerza laboral bien preparada. El profesor Shepard B. Clough dice que "las universidades de Glasgow y Edimburgo no tuvieron rivales en las ramas de la investigación y experimentación científicas en las postrimerías del siglo XVIII".<sup>20</sup>

---

<sup>20</sup> De este modo, con Inglaterra a la cabeza, la revolución industrial se extendió por toda Europa y Estados Unidos, y continúa hasta este día en las naciones desarrolladas.

Para 1750, el movimiento *revolucionario* no sólo estaba cambiando la calidad de vida de Europa, sino la visión misma de la historia, una nueva visión movió a los arquitectos a cuestionar severamente los cánones clásicos de Vitrubio y a documentar las huellas del mundo antiguo a fin de establecer una base más objetiva sobre la que trabajar.

Los extraordinarios cambios técnicos que siguieron sugiere que las condiciones necesarias para la utilización de materiales como el acero en la construcción surgió en algún momento entre el desafío lanzado por Claude Perrault, el físico arquitecto de finales del siglo XVII, a la validez universal de las proporciones vitruvianas, y a la división definitiva entre la ingeniería y arquitectura que a veces se fecha en la fundación, en París, de la *École des Ponts et Chaussées*, la primera escuela de ingeniería, en 1747.

Muchos inventos se originaron posteriormente, por ejemplo, la energía rotativa del vapor y la estructura de hierro surgieron casi al mismo tiempo gracias a los esfuerzos independientes de tres hombres: James Watt, Abraham Darby y John Wilkinson. De éstos, el último fue el “maestro metalúrgico” de su tiempo, pues con su invento de la ‘maquina rectificadora de cilindros’ ayudó a Watt con su máquina de vapor en 1789. Wilkinson por su parte ayudo a Darby y a su arquitecto T. F. Pritchard, a diseñar y erigir el primer puente de hierro fundido, un tramo de 30.50m sobre el Severn, cerca de Coalbrookdate.

Thomas Telford comenzó su construcción de puentes con el realizado en Buidwas de 39.50m montado sobre el Severn. Su diseño exigió 176 toneladas en lugar de las 384 usadas por Pritchard.

Por otro lado en Francia, el libro de J. N. L. Durand, un profesor de arquitectura en la *École Polytechnique* (fundada en 1795) diseminó un sistema de elementos modulares de formas clásicas para: mercados, bibliotecas y cuarteles del imperio napoleónico. Este programa inspiró al alemán Schinkel quien al comienzo de su

carrera de arquitectura empezó a agregar complicados elementos metálicos a sus edificios neoclásicos para la ciudad de Berlín.

De forma independiente la técnica de la construcción colgante en hierro evolucionó. Un estudio de L. J. Vicat para la *École des Ponts et Chaussées* recomendó que todos los miembros en suspensión fuesen construidos a base de alambres en lugar de barras de hierro y con ese fin inventó un método para trefilar el cable en el mismo lugar de montaje. Un dispositivo similar fue empleado por el ingeniero norteamericano John Augustus Roebling que obtuvo su patente para la fabricación de cable metálico en 1842. Estos cables eran trenzados en espiral y fueron usados para los 487m del puente de Brooklyn, en Nueva York completado en 1883.



Ilustración II.2. J.A. y W. A. Roebling, el puente de Brooklyn, Nueva York, en construcción c. 1877.

En Inglaterra, con la virtual terminación de la estructura ferroviaria en 1860, la industria del acero entró en un período de hibernación que duró hasta finales de siglo. Pocas obras de ingenio y brillantes se lograron, pero entre ellas estaba el puente de Stephenson y Fairbairn terminado en 1852, sobre los estrechos de Menai. Aquí se usó planchas de hierro forjado y remachado. Se utilizó una especie de tubos blindados.

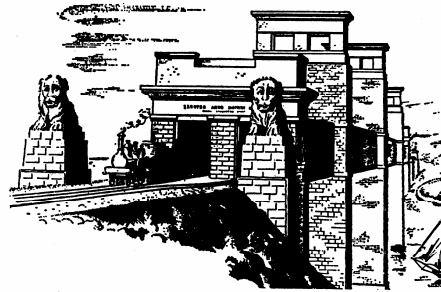


Ilustración II.3. Stephenson y Fairbairn, el puente tubular Britannia sobre los estrechos del Menai, 1852

Desde la primera viga de hierro colado (de 33 cm.) utilizada por Boulton y Watt en la fábrica de Salford, en Manchester 1801 se efectuó un esfuerzo continuo para mejorar la capacidad de luz. La sección típica del raíl se transformó en la viga estructural estándar de sección I. El raíl de hierro colado de Jessop de 1789 dio paso al raíl de sección T y luego al raíl de hierro forjado de Birkenshaw en 1820 y éste llevó al primer raíl americano, laminado en Gales en 1831. Éste último tenía el patín inferior más ancho que el superior. Los primeros intentos de transformar estos elementos en unos más resistentes los llevó a cabo Fairbairn en fechas tan tempranas como en 1839.

El primer laminado de una viga de hierro forjado de 17.8 cm de grosor se produjo hasta mediados del siglo (1850). Ya en 1854 el libro de Fairbairn *On the Application of Cast and Wrought Iron to Building Purposes*, presentó un sistema de hierro laminado de 40.6 cm que soportaban bóvedas aplanadas hechas con planchas de hierro, cubierto por hormigón. Éste sistema acercó a Fairbairn a los principios del hormigón armado.

### C.- CABALLEROS DE ACERO Y DAMAS DE CRISTAL

Fue para mediados del siglo XIX cuando la construcción con hierro colado y forjado era la técnica corriente para la construcción de centros urbanos de distribución: mercados, centros de ventas y arcadas. La Galérie d'Orléans construida en el Palais Royal por Fontaine en 1829, fue la primera arcada de bóveda acristalada. Construir con estos sistemas proporcionaba rapidez de montaje y la posibilidad de transportar "kits", por ventajas los países industrializados empezaron a exportar estructuras a todo el mundo.

La rápida expansión en el crecimiento urbano en 1840, alentó la a hombres como James Bogardus y Daniel Badger a inaugurar talleres de fundición en Nueva York. Una de las mejores obras de Bogarduos fue la Haughwout Building de Nueva York construido en 1859 según los diseños del arquitecto John P. Gaynor. Este edificio fue el primero que dispuso de un elevador cinco años antes que Elisha Graves Otis hiciera su histórica demostración del mismo en 1854.

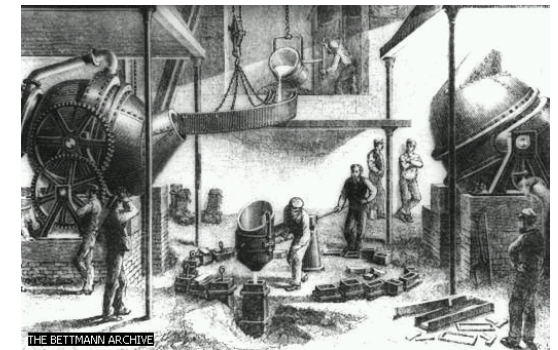


Ilustración II.4. Para convertir arrabio en acero con un convertidor Bessemer, hay que hacer pasar aire por el arrabio para quemar las impurezas. Este grabado muestra el proceso desarrollado por Henry Bessemer en 1855 y empleado hasta la década de 1950. Talleres similares fueron inaugurados en Nueva York

La estructura de acero más vidrio, cuyos atributos ambientales fueron exhaustivamente comentados por J. C. Loudon en su obra *Remarks on Hot Houses* (1817), tuvo pocas oportunidades de aplicarse al menos en Inglaterra hasta que fue anulado el impuesto de consumo sobre vidrio en 1845. Los primeros recintos importantes fueron las estaciones terminales de ferrocarril construidas en la segunda mitad del siglo XIX.

La construcción de terminales de ferrocarriles ofrecía un reto para los cánones recibidos de la arquitectura. Era muy difícil expresar y articular adecuadamente la comunicación entre el edificio principal y el cobertizo de los trenes. Esto quedó patente en el comentario que hizo el diseñador Léonce Reynaud en su *Traité d'architecture* (1850):

*“El arte no tiene el rápido progreso y la súbitas evoluciones de la industria, con el resultado de que la mayoría de los edificios hoy al servicio de los ferrocarriles dejan más o menos que desear en relación tanto con la forma como con la disposición. Algunas estaciones parecen tener la apropiada distribución, pero con las características de una construcción industrial o temporal más bien que las de un edificio destinado al uso público.”*

A diferencia de las estaciones de ferrocarriles, en los *edificios de exposiciones* el ingeniero reinaba con carácter supremo. El jardinero Joseph Paxtón tuvo carta blanca para proyectar y construir el *Crystal Palace* de acuerdo a un método para la fabricación de invernaderos que él había desarrollado de una rigurosa aplicación de los principios de Loudon. El Crystal Palace fue diseñado para la “Great Exhibition” de 1851 en el Hide Park de Londres.<sup>21</sup>

El edificio era un proceso de construcción puesto de manifiesto como sistema total, desde su concepción inicial, fabricación y traslado hasta su erección y desmantelado final. Sus dimensiones generales estaban estructuradas alrededor de un módulo básico de 2.44 m, montado en una jerarquía de luces que variaban desde los 7.31 m. hasta 21.95 m. Su realización apenas exigió cuatro

<sup>21</sup> Considerada la primera verdadera exposición internacional. Su propósito era “presentar al mundo las mercancías y procesos de fabricación británicos con el fin de estimular la demanda”. Sobre el éxito obtenido *The Enciclopedia Americana* dice: “No solo conocieron los británicos las excelentes artes y técnicas de otros pueblos, sino que los visitantes [...] llegaron a ser muy conscientes de la superioridad de las mercancías, maquinarias y técnicas de producción británicas. De inmediato, los pedidos de mercancías británicas se incrementaron notablemente”. Se puede ver una animación del edificio histórico en [www.iath.virginia.edu/london/model/animation.html#](http://www.iath.virginia.edu/london/model/animation.html#) publicada por *The Institute for Advanced Technology in the Humanities*, University of Virginia.



Ilustración 11.5. El Crystal Palace marcó un hito en la evolución de la arquitectura moderna. Se construyó para albergar la Exposición Universal de 1851, celebrada en Londres, según el proyecto de Joseph Paxton. Su estructura de hierro y vidrio albergó a más de 8.000 expositores y cerca de 8 millones de visitantes.



Ilustración 11.6. Interior del Crystal Palace. Joseph Paxton proyectó el Crystal Palace para albergar la Exposición Universal de 1851, celebrada en Londres. Su construcción, consistente en una estructura ligera de hierro colado y un cerramiento de cristal, fue pionera en el campo de la prefabricación, y marcó un hito decisivo en la evolución de la arquitectura moderna.

meses. Fue simplemente una cuestión de producción en serie y montaje sistemático.

El *Crystal Palace* generaba espectaculares perspectivas paralelas y oblicuas cuyas líneas se fundían en una diáfana neblina luminosa. Todo el edificio era de 93 000 m<sup>2</sup>, generó un problema climático sin precedente. Un sistema ajustable de persianas facilitaban la ventilación, pero el problema no quedó resuelto por lo que se utilizaron toldos de lona para sombrear el techo y baldaquinos de telas de fiesta para

sombrear los módulos de los expositores. En este edificio, la disposición regular de los componentes idénticos prestaba un carácter insólito, dado que Owen Jones, responsable de la pintura, dispuso que partes idénticas recibiesen el mismo color: los puntales, amarillo; las vigas, azul; los travesaños del techo, rojo. Los tres colores primarios, rojo, amarillo y azul se emplearon en la proporción cinco-tres-ocho, como había propuesto G. Field en su *“Chromatography”* de 1825.

El abandono británico del campo de la exposición internacional, tras

el triunfo del Crystal Palace en 1851 y una posterior exposición en 1862 fue explotado de inmediato por los franceses, quienes montaron cinco exposiciones de carácter internacional entre 1855 y 1900.

La idea detrás de organizar “La Gran Exposición Universal de 1889” de París fue que un evento de este nivel uniría a varias naciones para un comercio más estable y libre. Era más bien un acto de fe en la técnica humana. Esta gran feria fue una oportunidad de mostrar nuevos materiales y formas de construcción o aplicar éstas a las salas de exhibición.



Ilustración II.7. *Galerie des Machines* interior, París 1889, del “Le Journal Illustré”, no. 22, Junio 1889

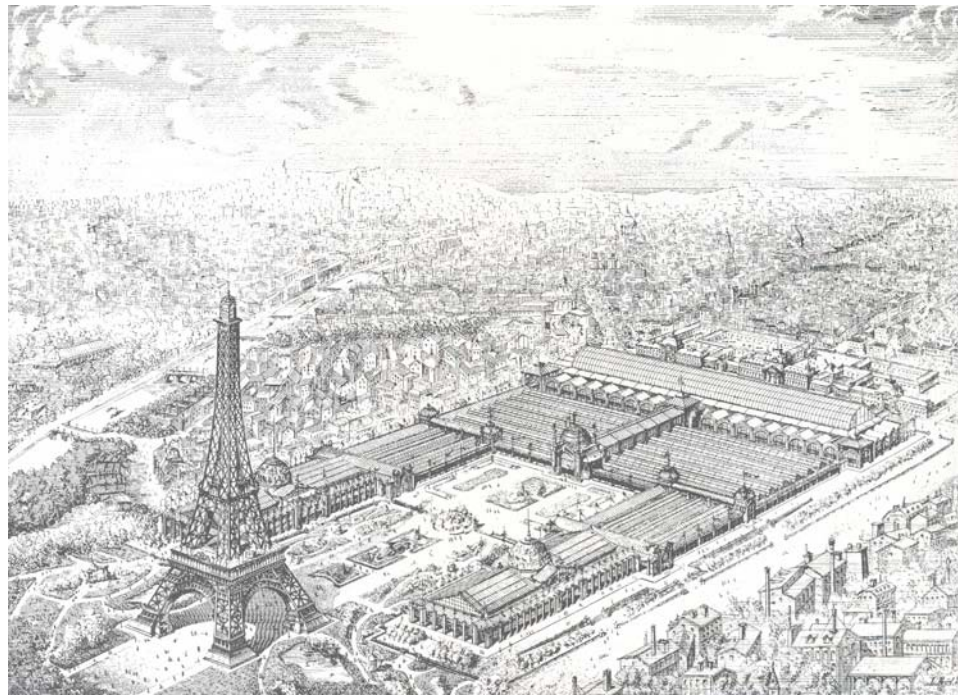


Ilustración II.8. Exhibición Mundial de 1889, Vista de pájaro del Palacio sobre el Campo de Marte. Tomado del “Le Génie Civile”, 2 de abril de 1889.

Para la “La Gran Exposición Universal de 1889” se erigió en el Campo de Marte un edificio de exposiciones en forma de U. Las naves laterales estaban destinadas al arte y la “Gran Galería” a la industria en general<sup>21</sup>. Inmediatamente se encontraba la “sala de máquinas” (*Galerie des Machines*<sup>22</sup>), y enfrente de la parte abierta del patio se erigió la torre Eiffel<sup>23</sup>. Junto a ésta última, la nave de máquinas era la obra más espectacular de la exposición. Con una longitud de 43.50 y un arco de 107 m, cubría sin apoyos una superficie de 46000 m<sup>2</sup>, a los que se añadían dos naves laterales de 20 m de ancho. La Construcción estaba formada por tres arcos de tres puntos de articulación; su perfil de caja realizado con armadura, tenía un tamaño de 3.50 x 0.75 m. Al contrario del Crystal Palace esta era una verdadera obra de ingeniería, construida totalmente de acero. Los componentes estaban sólidamente remachados en caliente. La estática del conjunto había sido calculada científicamente. El carácter técnico permitió prescindir de los ornamentos habituales en los edificios. Solamente los cristales iban provistos de ornamentos de color azul.

Por otro lado, la idea de una torre de esta altura estaba en el ambiente. En Inglaterra y los Estados Unidos, los talleres de acero habían construido monumentos que excedían la ‘mágica’ altura de 1000 pies (aprox. 300 m) Sin embargo, por muchos años, torres más altas que el Obelisco a Washington (1848-1885, 169 m) parecían un sueño utópico, hasta que la industrialización y el desarrollo de la red de trenes dio una nueva generación de ingenieros educados en la Ecole Polytechnique, la École des Ponts et Chaussées o la Ecole Centrale. Dos de estos ingenieros: Emile Nougier (École des Mines) y Maurice Koechlin (École

<sup>21</sup> Según Kenneth Frampton en su libro “Historia Crítica de la Arquitectura Moderna”: “El joven Gustave Eiffel trabajó con el ingeniero J. B. Krantz en este edificio construido para la exposición de 1867. Esta colaboración no sólo reveló la sensibilidad de Eiffel, sino su capacidad como ingeniero, ya que fue en la “Galerie des Machines”, con su luz de 107 m que pudo verificar la validez de los módulos de elasticidad propuestos por Thomas Young en 1807.”

<sup>22</sup> Diseñada por el arquitecto C. L. F. Dutert.

<sup>23</sup> Diseñada en colaboración con los ingenieros Nougier y Koechling y el arquitecto Stephen Sauvestre.

Polytechnique) merecen el crédito de haber iniciado el plan para construir una torre de 1000 pies en París. Su diseño consistía en un número de dibujos de fecha 1884. Estos ingenieros fueron empleados en la oficina de Gustave Eiffel.

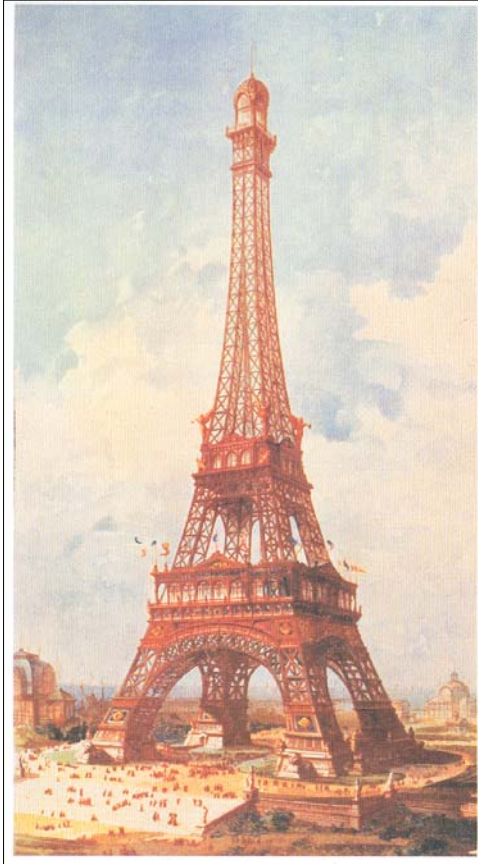


Ilustración II.9. Torre Eiffel del libro: "Galerie des Machines", dibujo de la monografía por J. Alphand. Ferdinand Dutert & Victor Contamin.



**Ilustración II.10.**  
**Palacio de cristal de Londres tras la reconstrucción, Sydenham, 1854.**

Aunque el concurso para la construcción de los edificios de la Exposición Universal de Londres de 1851 lo había ganado el francés Hector Horeau, el comité de exposición optó por un edificio desmontable, de elementos reutilizables, recogiendo para ello ofertas de varias firmas constructoras. Joseph Paxton, trabajó con *Fox & Henderson* y recibió la adjudicación. Utilizando elementos prefabricados en serie, que se acoplaban en la misma obra, surgió así el famoso palacio de cristal de la "Great Exhibition of the Works of Industry of all Nations" en el Hyde Park de Londres. La nave transversal del centro fue cubierta con una bóveda de medio punto para poder conservar varios olmos que había allí. En la reconstrucción de Sydenham se introdujeron numerosas modificaciones y la nave longitudinal fue provista también de una bóveda de medio punto.



**Ilustración II.11.**  
**Casa de las palmeras en el jardín real botánico de Kew/Surrey 1844-1848.**

Las plantas exóticas de los jardines reales fueron cubiertas con esta obra prodigiosa de hierro y cristal, de 110 metros de longitud. Doce calderas llevaban agua caliente por una red de tuberías, manteniendo una temperatura interior de 27° en invierno. Pilares huecos de hierro y canalones en la base de piedra recogían el agua de lluvia conduciéndola a un depósito subterráneo. Un tren de vagonetas para el transporte de carbón, un extractor de humos y las conducciones de agua de lluvia fueron instalados en un túnel, que desembocaba a una distancia aceptable en la chimenea y la torre de agua, en forma de campanario.



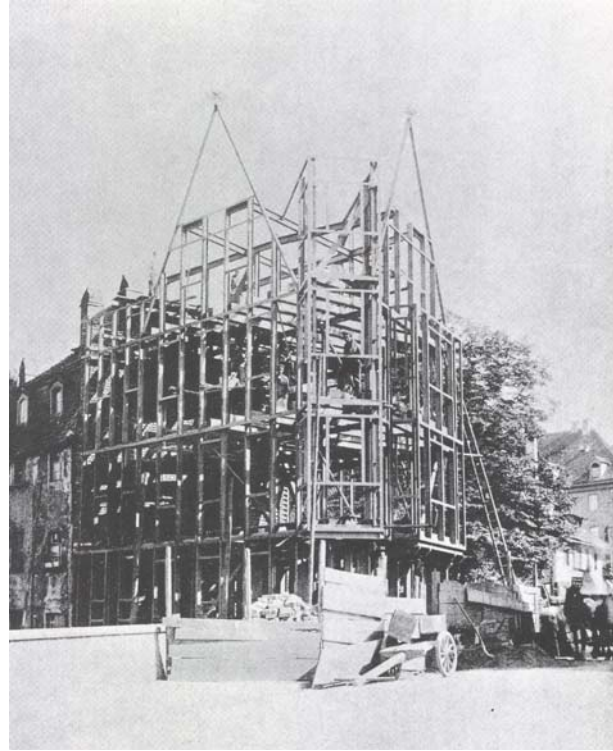
**Ilustración II.12.**  
**Nave del mercado de Berlín 1865-1868**

Las columnas de fundición soportan las seis naves del edificio, con un total de 5,300 metros cuadrados de superficie. En sus condiciones higiénicas, este mercado representaba un enorme progreso: agua corriente en las pilas de los puestos de pescado, servicios higiénicos e iluminación de gas. Pero a nivel económico, esta institución fue un fracaso. Tras la quiebra de la empresa promotora, el edificio fue convertido en circo en 1874, pasando en 1919 a ser el Gran Teatro de Max Reinhardt merced a las reformas de Hans Poelzig. Las paredes exteriores recibieron un monumental revestimiento del tipo "Rabitz" (revestimiento con malla metálica), y el espacio interior un opulento y expresivo bosque de estalactitas arrancadas en 1938 por los obreros del "Frente alemán del trabajo" para construir una "logía para el Führer". Hasta 1980, el "Friedrichstadtpalast" era todavía un objeto de exhibición en la República Democrática Alemana.



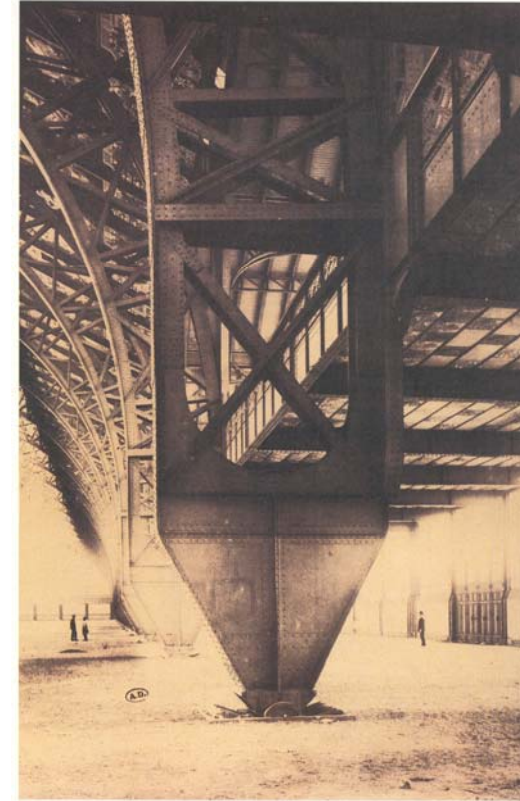
**Ilustración II.13.**  
**Naves del mercado central de París, 1854-1857, ampliado en 1860-1866. (Victor Baltard y Félix Callet)**

Otra nave comenzaba en 1851, una combinación poco afortunada de arquitectura en piedra y hierro construida seguramente por iniciativa de Napoleón III, fue derribada antes de su terminación. El nuevo prefecto municipal, George-Eugene Haussman, declaró que deseaba para París mercados de hierro y cristal. Baltard, con Hittorf el más importante colaborador de Haussman en materia de arquitectura, presentó un nuevo proyecto, que también fue realizado.



**Ilustración II.14.**  
**Casa de viviendas en el "Trödelmarkt" de Nuremberg, 1883. (Maschinenbau-Actien-Gesellschaft Nürnberg, W. Hecht (arq.))**

Vista durante las obras. La sorprendente estructura de hierro está lista para murar, los ladrillos de alto horno para ello ya han llegado a la obra. Los tirantes diagonales quedaban tras la superficie de la fachada.



**Ilustración II.15. Nave de máquinas de la Exposición Universal de París, 1887-1889.**

La Nave de máquinas era el edificio más espectacular de la Exposición Universal de 1889. Con una longitud de 420 metros, una altura de 43.50 y un arco de 115 metros, cubría sin apoyos una superficie de 46,000 metros cuadrados, a los que se añadían dos naves laterales de 20 metros de anchura. La construcción estaba formada por arcos de tres puntos de articulación; su perfil de caja, realizado como armadura, tenía un tamaño de 3.50 x 0.75 ,metros.



## D.- FÁBRICAS DE LA MODERNIDAD.

### *Inicios del desarrollo de rascacielos. La Escuela de Chicago.*

En virtud de una disposición de 1785 del Congreso norteamericano, el entonces territorio de los Estados Unidos fue dividido en cuadrados regulares. Esto originó cambios en las concepciones de diseño. Los argumentos principales eran la eficiencia y economía a través de un diseño racional.

El crecimiento desmedido que tuvo la ciudad de Chicago, obligó a que las casas se aproximaran unas a otras. A partir de 1855 se recibían en Chicago componentes de fachadas de hierro fundido fabricados por Daniel Badger en Nueva York, pero la mayoría de las casas seguía siendo de madera. El riesgo que ello conllevaba quedó claro en el gran incendio de 1871, que destruyó gran parte de Chicago. En otro siniestro semejante, ocurrido en 1874, se redoblaron los esfuerzos por construir edificios a prueba de fuego. Dado que los edificios de hierro se habían mostrado muy sensibles al fuego, se dio preferencia a la acreditada construcción en piedra, relegándose los experimentos a un segundo plano.

En 1890 había en Chicago numerosos edificios elevados que, aunque tenían sólo ocho o nueve pisos, ya podían llamarse "rascacielos". Con la altura crecieron las ventajas de la construcción de hierro. Los cimientos tenían que soportar menos carga y ello contribuía a la explotación de las plantas bajas. Esto dio lugar a la invención de la estructura de acero protegida del fuego, la técnica de cimientos resistentes y el nuevo ascensor de seguridad de Elisha Otis contribuyeron enormemente.

En 1877, James McLaughlin dio a la estructura de hierro de un centro comercial una figura que pronto sería típica en los grandes edificios comerciales de toda Norteamérica. Muchos arquitectos de Chicago, entre ellos Louis Sullivan intentaron concebir una forma estética de construcción. En su libro "The Tall Office Building Artistically Considered" (Consideraciones artísticas del

edificio alto), resumió sus ideas sobre edificios de oficinas. Para ello su obra tenía tres apartados que describían la función del edificio: la planta baja estaba destinada a viviendas y al acceso a los pisos superiores. Le sigue un número indefinido de pisos iguales con oficinas, y un cuadrulado uniforme de ventanas y pilares constituye la fachada. El piso superior, destaca como ático de cierre. Un rascacielo entra así en el ideal típico de base, fuste y capitel.

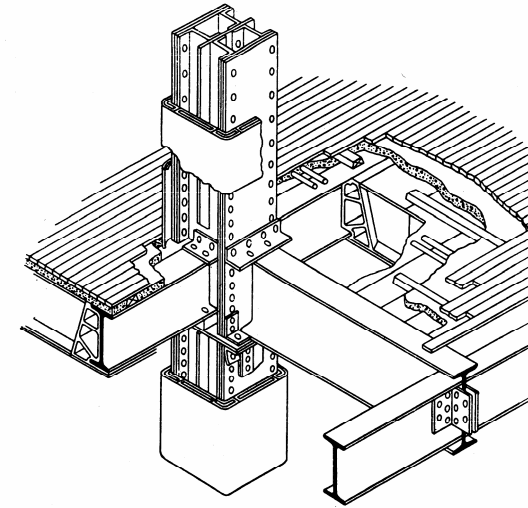


Ilustración II.16. William LeBaron Jenney. Fair Store en Chicago, Illinois, 1890-1891. Dibujo Esquemático de la construcción resistente al fuego. Los puntales de hierro iban cubiertos de hormigón, y el ensamble, relleno de ladrillos huecos, de las vigas superiores, se cubría con una capa de hormigón. Las conducciones de gas iban instaladas allí.

Los Grandes edificios surgieron muy aprisa. Equipos de trabajo levantaban las grandes estructuras de acero en las que Chicago y Nueva York establecían nuevas marcas. Las calles se volvían cada vez más oscuras.

A diferencia de Francia y Estados Unidos, donde Auguste Perret y Frank L. Wright relacionaban los nuevos caminos con la claridad racional en la forma de diseñar, en Alemania muy poco se desarrolló antes de la primera guerra mundial. Aún el destacado Peter Behrens mostraba en sus obras una clara

inclinación hacia lo serio y lo grave, como se observa en su trabajo para el arqueólogo Theodor Wiegand en Berlín o en la embajada de San Petersburgo. Los 'valores' que predominaban en la arquitectura alemana eran "solidez, integridad y sencillez", estos

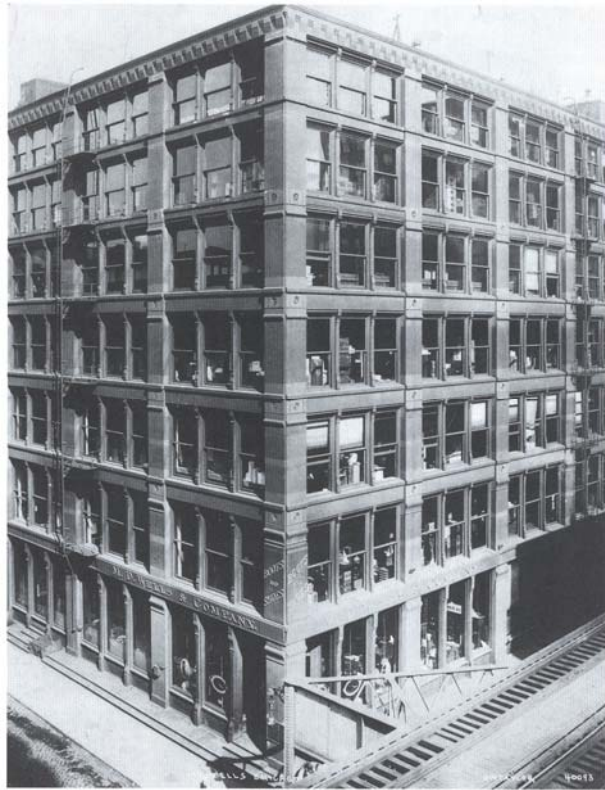
‘valores’ podían más que el afán de descubrir y experimentar. Las innovaciones quedaron limitadas al sector industrial. El escritor Walter Müller-Wulcrowsky comentó: *“Es ante todo la potencia de la moderna vida industrial la que puede atraer a nuevas personalidades creadoras y hacerlas desplegar su talento.”*<sup>23</sup>

La primera organización alemana que tuvo una actitud más abierta fue la Deutscher Werkbund (Federación alemana del trabajo) fundada en 1907 por doce artistas y doce fabricantes, con el fin de mejorar la forma y calidad de los productos de consumo. En aquel tiempo, existía cierta insatisfacción laboral debido al trabajo mecanizado, por tanto el objetivo de la Deutscher Werkbund, incorporar a la producción industrial la satisfacción que crea la elaboración manual de productos de calidad.<sup>24</sup>

Los arquitectos eran conscientes que en la construcción de fábricas existía cierta jerarquía en la *forma*: los procesos de construcción ya estaban dados así como las condiciones estáticas de la fábrica. La pretensión por tanto era de darle al edificio más que una cubierta, darle “una digna vestimenta” según palabras de Walter Gropius en 1913. Darle “luz, aire y pulcritud”, y la impresión de una “liberación” –hablando en sentido industrial- de la estupidez del trabajo en la fábrica: “así trabajará con más alegría en la consecución de grandes empresas comunes, donde su lugar de trabajo, forjado por artistas, se corresponde con el sentimiento de belleza innato en cada uno, actuando de forma estimulante sobre la monotonía del trabajo mecánico.

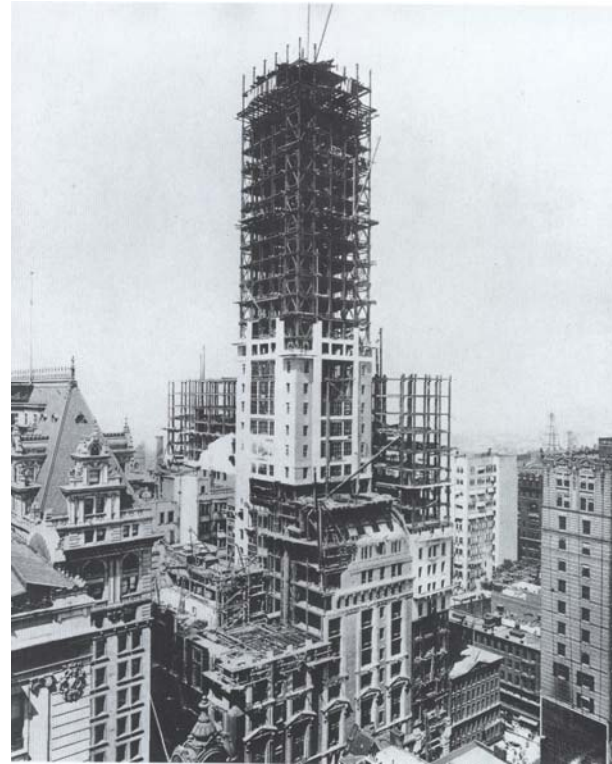
<sup>23</sup> Extracto tomado del libro “Arquitectura del Siglo XX”, por Peter Gössel y Gabriele Leuthäuser, página 91

<sup>24</sup> La revista “Der Industriebau” dijo que muchos fabricantes “admiten que una colaboración artística en la construcción de las instalaciones puede producir algo de lo que la industria actual no puede prescindir: una publicidad del más noble rango.” Para el escritor Julios Posener esto tenía un doble sentido: “Por una parte, la obra tiene naturalmente que impresionar, que hacer propaganda de sí misma y por otra, y tal vez la más importante, ha de hacer propaganda hacia adentro, ha de impresionar a los empleados”, que deberían sentirse parte de la misma, y orgullosos de estar en ella. Idem página 91 y 94.



**Ilustración II.17.**  
**Leiter Building en Chicago, Illinois, 1879.**  
*William LeBaron Jenney.*  
*Foto Taylor / The Art Institute of Chicago*

En este edificio, los puntales de hierro tras los pilares de ladrillo sostenían las vigas de madera de los techos en cada piso. Los delgados soportes entre las ventanas era de hierro forjado, y se apoyaban en antepechos de piedra. Dado que la construcción no tenía trabazones resistentes a la tracción, no puede hablarse de una obra de armazón. Es interesante la falta de decoración de toda la fachada. En 1888 se añadieron dos pisos más al edificio, estado que muestra la fotografía. En primer plano, a la derecha, se ven los rieles del "Elevated", el ferrocarril elevado que recorre el interior de la ciudad y que dio nombre al centro comercial de Chicago, el "Loop".



**Ilustración II.18.**  
**Singer Building en Nueva York, 1906-1908**  
*Ernest Flagg.*  
*Foto tomada de: History of the Singer Building Construction.*

La *Singer Manufacturing Company* declaró con orgullo su edificio de oficinas como "el edificio más alto del mundo". Con sus 612 pies de altura, superaba al monumento de Washington, al City Hall de Filadelfia, a la catedral de Colonia y a las pirámides de Gizeh. De la torre Eiffel no se dijo nada. El viejo edificio de 1897 se integró en la nueva obra, siendo asimismo ampliado. En la torre se aprecia claramente el arriostramiento para contraventeo: refuerzos diagonales en las esquinas. Para los cimientos del edificio se utilizaron unas cajas hundidas por procedimientos neumáticos, que producían una sobrepresión y debían evitar la presencia de agua al excavar.



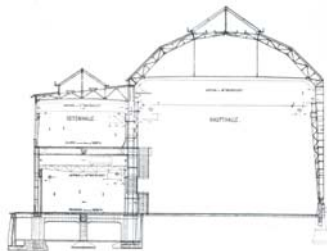
**Ilustración II.19.**  
**Perfil urbano de Nueva York, en 1914**  
*Foto Joseph P. Day / New York Historical Society*

En segundo término, el Singer Building de Ernest Flagg y el Woolworth Building de Cass Gilbert (1911-1913); en primer término, el Adams Building.



**Ilustración II.20 & II.21.**  
**Nave de Montaje de la Fábrica de Turbinas AEG en Berlín, 1908-1909.**  
*Peter Behrens (arq.), Karl Bernhard (ing.)*  
*Bildarchiv Foto Marburg*

La estructura, compuesta por arcos de triple articulación con cables tensores, tiene una altura de casi 25 metros. En el frente lateral, los apoyos aparecen en el exterior, y entre ellos retroceden un poco las grandes superficies acristaladas. El frente del frontón está flanqueado por



dos pilones que se van estrechando. El frontón poligonal con la inscripción de la empresa parece descansar en el ventanal central. En realidad estos elementos de apariencia poderosa

y maciza son sólo un fino revestimiento de hormigón, sostenido por una malla de acero. Son elementos sin función portante alguna. Las finas listas de hierro en las ranuras de los pilones y la fina estructura de metal del tímpano indican lo artificioso de los medios empleados.



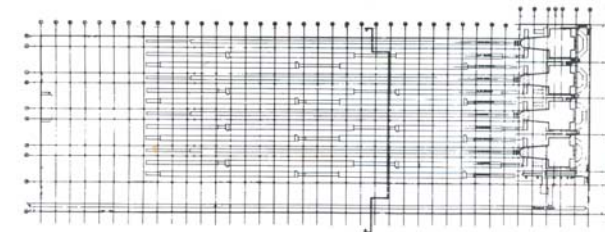
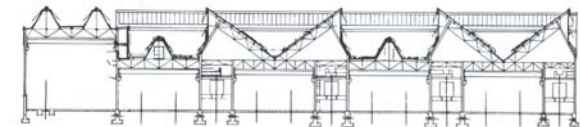
**Ilustración II.22.**  
**Fábrica de hormas del calzado Fagus en Alfeld/Leine, 1910-1914.**  
*Walter Gropius, Adolf Meyer y Eduard Werner*  
*Foto Klaus Frahm*

La construcción industrial fue para Gropius, después de abandonar la oficina de Behrens, su campo de principal actividad, consiguiendo plasmar convincentemente sus ideas en su primer encargo de construcción de la Fagus, una fábrica de hormas de calzado. El aspecto artístico de todo el complejo fue elaborado por Gropius. Nótese las proporciones de la fotografía la fachada oeste.



**Ilustración II.23 & II.24.**  
**Fábrica de cristal de la factoría Ford en Dearborn, Michigan, 1924.**  
 Albert Kahn  
 Archivo Albert Kahn Associates

La fábrica, dedicada a la elaboración de cristal plano, se componía de cuatro hornos para fundición, a los que se acopaba una larga nave. Aquí se enfriaba el cristal en bandas transportadoras, y era finalmente lijado y pulido. Hasta su elaboración final, cada cristal recorría tres veces la totalidad de la nave. Característica en Kahn era la ordenación simétrica de las naves, con amplias aberturas en los cristales para desviar el calor.



**Sección transversal y planta.**

## E.- GRANDES LOGROS DE LA ARQUITECTURA EN ACERO

### ***Cambios en las formulaciones arquitectónicas y orientación actual.***

Con las vanguardias del principio del siglo y su posterior expansión en un movimiento de alcance internacional, la arquitectura –la cultura y el arte en general- dieron un salto sin precedente, en muchos aspectos gracias al desarrollo de la técnica de la construcción de acero (la cual afectó directa e indirectamente). Aquello que desde mediados del siglo XIX se estaba buscando con ansiedad, una nueva arquitectura para la sociedad industrial, pudo alcanzarse a plenitud. En muy pocos años, se produjo un cambio radical, se pasó del agotado, anacrónico y académico lenguaje del *Beaux-Arts*, incapaz de generar tanto una arquitectura como una nueva ciudad -incapaz al mismo tiempo, de resolver los problemas tecnológicos, formales, higiénicos y sociales relacionados con la arquitectura- hacia una arquitectura tendente a la abstracción, formalmente pura y plásticamente transparente, resuelta de manera pulcra, técnicamente avanzada, sin ornamentos y añadidos adicionales. Se abrió el más amplio campo de experimentación formal, social y tecnológica. A partir de las primeras revisiones de los años cuarenta y cincuenta, tras la crisis de principios de los años sesenta, se entra en una época de propuestas operativas y metodológicas que en los años ochenta desembocan en la amplia orilla de la dispersión.

El campo de la arquitectura desde la década de los 70 se ha caracterizado por una multitud de experimentos abiertos hacia múltiples direcciones, en ocasiones han sabido romper dicotomías establecidas: obras preocupadas por la técnica, pero a la vez pensadas de manera singular y adaptables al contexto.

Si las formas arquitectónicas de los años sesenta diseñadas por Rossi, Venturi, Archigram, Eisenman, etc. Son “monotemáticas” y “coherentes”, los arquitectos representantes de los años 80's y 90's, muestran una visión más híbrida, contradictoria y de

conceptos diversos. Sus proyectos muestran una multitud de tendencias: minimalismo, hedonismo posmoderno, referencias vernáculas, tecnología, comunicación, figuración, artisticidad, etc. A todo lo anterior se puede agregar la propia individualidad.

Los arquitectos más jóvenes van abandonando la confianza en las metodologías y van predominando actitudes eclécticas con referencias fragmentarias fuera de su contexto. Se nutren de imágenes inconexas dentro de una cultura visual, en la que cada vez predominan más los mecanismos de transculturación.<sup>25</sup>

Todo lo anterior se destaca en el panorama arquitectónico mundial en proyectos que demuestran su incoherente mezcla de referencias heterogéneas –tipologías, imágenes, materiales, poéticas- que se contradicen por desconocer los autores las diversas implicaciones y raíces de cada tipo.

Al llegar al final del siglo XX, los problemas básicos de la arquitectura siguen siendo similares a los de todo el siglo. Uno de los más trascendentales es el de ajustar en cada momento la arquitectura a las posibilidades tecnológicas. Cada obra de arquitectura debe resolver siempre un problema técnico; convertirse en materia, delimitar espacios sólidamente adecuados para el hombre, resolver la piel de cubrición y protección y, sobre todo, saber integrarse al entorno.

*La correcta identificación de cada edificio con la solución estructural, de cubierta, de cerramientos, acabados interiores e instalaciones técnicas sigue siendo una de las claves de la arquitectura: Así como su respuesta al ambiente circundante. La arquitectura debe saber aprovechar todas sus disponibilidades tecnológicas actuales.*

<sup>25</sup> Hoy por hoy, cualquier estudiante de arquitectura o profesional puede encontrar un caudal de información sobre cualquier tipo de proyectos de arquitectura a través de Internet, cuyos conceptos pueden influir en los diseños propuestos.

En defensa del desarrollo de una arquitectura más experimental vienen los argumentos que se desprenderán de un análisis de la evolución de los materiales a lo largo de la historia: de la madera y la piedra, a los plásticos y las aleaciones pasando por el ladrillo, el hormigón y el acero. Es indudable que con los siglos se han ido produciendo unas transformaciones de directrices muy claras. Los materiales cada vez están formados por componentes de menor tamaño -desde hace tiempo son de estructura molecular-, cada vez pueden ser más ligeros, más transparentes, más flexibles, más cálidos, etc; La mayoría de los objetos de diseñados industrialmente van desarrollando estas tendencias. Los objetos cada día son menores, más fácilmente transportables, más inteligentes, más suaves, transparentes, plegables y manejables. La arquitectura también podría seguir esta tendencia hacia la ligereza, dinamicidad, transparencia y otros tipos de posibilidades generadas por los nuevos materiales. En cambio, paradójicamente, parece que la arquitectura, en muchos casos, no quiere abandonar su concepción tradicional de ser un espacio claramente protegido y seguro, de formas sólidas y convencionales, con una apariencia inequívocamente opaca y rígida, y con un tratamiento lleno de ornamentos y referencias simbólicas relacionadas con una anacrónica pretensión de monumentalidad. Al mismo tiempo se comprueba, también, que los recientes avances tecnológicos alteran e invalidan la relación esquemática y lineal que el mismo Movimiento Moderno había establecido entre forma y función. Así, por ejemplo grande ya no implica poderoso y las prestaciones y cualidades de muchos objetos no se manifiestan de manera convencional en su forma. Objetos de altas prestaciones pueden ser ahora minúsculos y ligeros.

La arquitectura del siglo XX se despidió con un sentimiento de insatisfacción. Tubo en sus manos un enorme caudal de posibilidades y sin embargo no fue capaz de mejorar ni el entorno ni la ciudad. Al contrario, el entorno natural y construido cada día están más degradados, tal como ha sido señalado, desde Rousseau y Diderot hasta Heidegger, *los mecanismos y el impulso*

*de la civilización mecánica han ido alejando al hombre de una posible situación de plenitud personal y de felicidad colectiva.*<sup>26</sup>

La opción totalizadora de la tecnología y la capacidad de transformación del hombre han de conjugarse con la reflexión histórica, la conciencia del valor de los símbolos, y el respeto por el entorno. Ahí estriba el gran reto de la arquitectura actual, saber progresar utilizando todas las disponibilidades de la tecno-ciencia sin olvidar la memoria. Otorgarle a cada una su papel sin caer ni en mitificaciones mecánicas ni en fundamentalismos historicistas. En la capacidad de la propia arquitectura de saber acomodar la pesada herencia de su tradición dentro de las posibilidades futuras de la tecno-ciencia y, a la inversa, en la capacidad de saber progresar sin olvidar el caudal de esfuerzo humano acumulado radica uno de los retos más importantes de nuestro presente.

Nota: Los edificios presentados a continuación han sido seleccionados para ilustrar el uso del acero en la realización de obras arquitectónicas de reconocida calidad.

<sup>26</sup> Véase la nota del pie de página #2 de la página 1 del capítulo anterior.



**Ilustración II.25.**  
**Casa para Edith Farnsworth, Illinois. 1946-1951.**  
*Ludwing Mies van der Rohe*  
*Foto Hedrich-Blessing*

Ocho columnas de acero pintadas de blanco soportan las plataformas del techo y del suelo, y elevan la casa por encima del terreno, propenso a inundaciones. A la casa le precede una plataforma desplazada lateralmente. Los amplios escalones comunican los dos niveles. El interior, limitado de arriba abajo por planchas de cristal, queda dividido sólo por un núcleo de maderas nobles que contiene la cocina y los sanitarios. Un armario separa el dormitorio de estar.

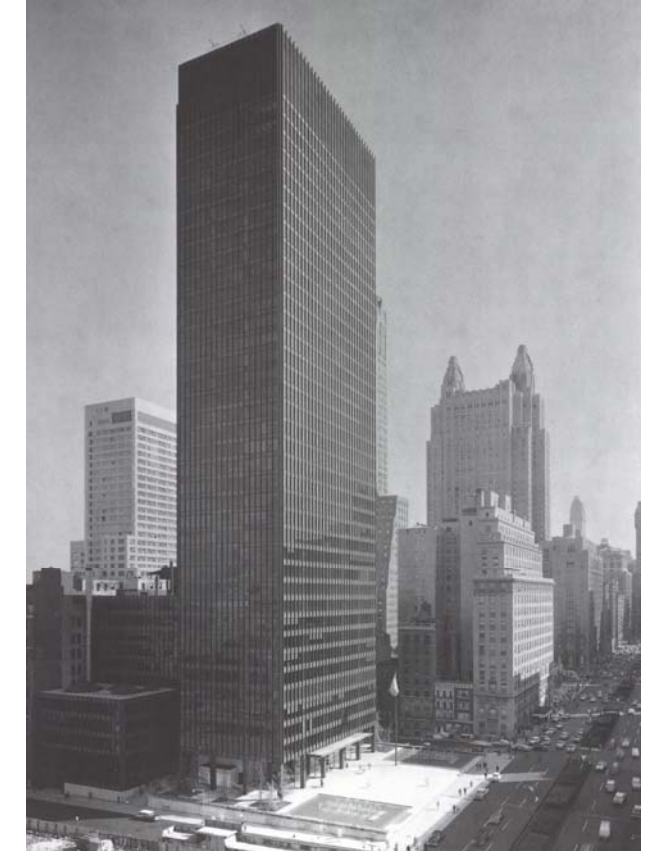
Nótese la simplicidad en la proyección del espacio a través de la esbelta estructura. A pesar que el diseño de viviendas unifamiliares puede resultar costoso<sup>1</sup> en este sistema de marcos, este proyecto resultó adecuado debido a la distribución adecuada del espacio.

<sup>1</sup> Véase el tema “Estructuras para viviendas” en el Capítulo V.



**Ilustración II.26.**  
**“Glass House”, casa del arquitecto, New Canaan, Connecticut, 1949.**  
*Philip Johnson*  
*Foto Norman McGrath*

Materiales livianos y transparencia caracterizan esta casa. Igual que Mies, Philip Jonson desarrolló una estética a base del acero, cristal, ladrillo que reflejaba artísticamente en la superficie la estructura del edificio, obligatoriamente cubierta. Para ello dio especial importancia a los elementos de unión y a los remates. Aquí Philip Jonson aplicó su fantasía al pabellón, cuyo interior tenía que estar libre de apoyos y que en su forma original tenía que aparecer equilibrando el paisaje como un espacio flotante de luz entre los cristales.



**Ilustración II.27.**  
**Seagram Building, Nueva York, 1954-1958.**  
*Mies van der Rohe & Philip Jonson.*  
*Foto Ezra Stoller/Esto.*

El edificio resultó distinto a cualquier anterior rascacielo de Nueva York. Se logró un espacio urbano abierto que, sin embargo, resultó árido y desmantelado, sirviendo sólo para guardar distancia conveniente y poder apreciar la elevación del edificio. Los perfiles estructurales se empotraron en la superficie de cristal resaltados por líneas de sombra. Los perfiles no fueron productos industriales en serie, sino se fabricaron especialmente en bronce. El patín se reforzó para darles mayor efecto óptico. Las ventanas van de piso a cielo. La fachada recibe una marcada verticalidad, proporcionando una imagen del principio de construcción.



**Ilustración II.28.**  
**The Atheneum, New Harmony, Indiana, 1975-1979**  
 Richard Meier  
 Foto Ezra Stoller/Esto

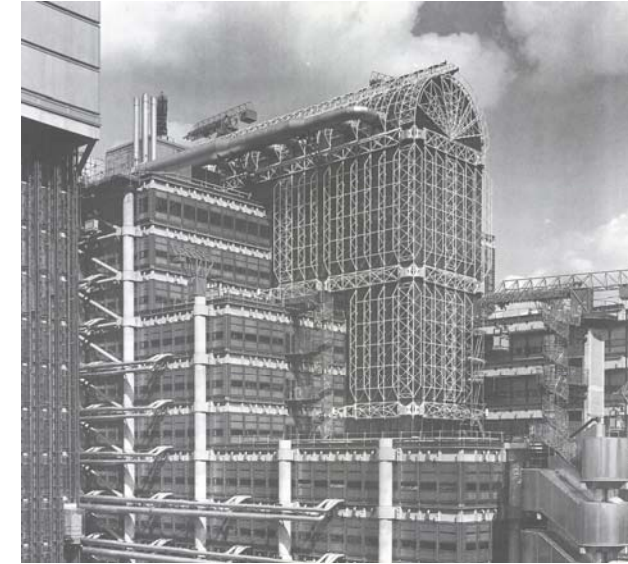
El edificio posee claras líneas de relación con el puerto fluvial, la ciudad y el aparcamiento. La estructura básica va paralela al plano de la ciudad, siendo cortada aquella en un ángulo de 5° por una larga escalera de rampa, que apunta en dirección a los edificios históricos. El giro de los ejes prosigue en el interior, como la superposición de dos sistemas de referencias. Un gran segmento de pared sobre la entrada de la parte oeste se dobla 45°, situándose perpendicularmente al camino que viene del aparcamiento. Un elemento pronunciado responde al curso del río. Las numerosas rampas y escaleras subrayan el carácter de pasadizo del edificio y dan acceso a diversos miradores. Las barandas de acero junto con las planchas de edificio, esmaltadas en blanco, sugieren la cubierta de un buque. Sin embargo el conjunto no favorece esa asociación, ya que el edificio es muy cristalino, y en la dinámica, abierto a muchas direcciones.



**Ilustración II.29.**  
**Centre Pompidou en París, 1971-1977**  
 Renzo Piano & Richard Rogers  
 Foto Antonio Martinelli

El esqueleto externo de la construcción portante domina todo el conjunto. De las columnas verticales penden brazos transversales, fabricados por Krupp. Los tensores en cruz están seis metros por delante de esos apoyos. Vigas de entramado a la distancia de 13 metros permiten cubrir sin pilares 48 metros cada una, dándole una extrema flexibilidad a los interiores. Los colores nacionales franceses empleados acentúan el escalonamiento hacia abajo.

En el capítulo V, se presentan algunos detalles de la superestructura del edificio. Es interesante que la realización del Pompidou se diera en una área histórica de París y que el proyecto fuera propuesto en acero, teniendo otras consideraciones estéticas. Este tipo de intervenciones son por supuesto polémicas, pero no son imposibles. Esto muestra que el acero se ha usado aún en contextos históricos.



**Ilustración II.30.**  
**Central de Lloyd's en Londres, 1979-1986**  
 Richard Rogers & Partners  
 Foto Klaus Frahm

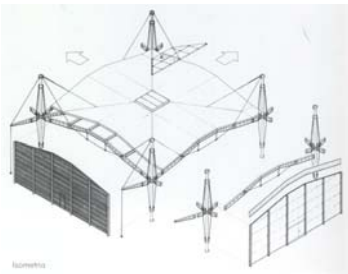
En Lloyd's se pasa una parte de los contratos de seguro a un gran número de compañías, que asumen una parte del riesgo. Este sistema exige la llamada "sala de firmar" enorme espacio en el que trabajan hasta 10,000 personas. El nuevo edificio quería ser consecuente con la constante expansión del ramo, y tenía que poder ampliarse. La solución se encontró en un alto patio de luces, en el que desembocan los pisos. En los pisos no utilizados hasta ahora hay oficinas, que en caso de necesidad pueden convertirse en galerías abiertas.





**Ilustración II.31 & II.32**  
**Distribuidora Renault en Swindon / Wiltshire, 1981-1983.**  
*Foster Associates (arq.), Ove Arup and Partners (ing.)*  
 Foto Richard Davies

La larga nave se compone de 42 unidades iguales de 24 metros de longitud, cuyos techos cuelgan de mástiles de acero de 16 metros, pintados en amarillo Renault. Todas las funciones –central de distribución, centro de ordenadores, sala de exposición, centro de adiestramiento técnico y restaurante, con un total de 10,000 metros cuadrados- están reunidos bajo un solo techo. El diseño primitivo preveía elementos de cubrimiento con apoyos centrales tensados; la fachada era la delimitación del espacio. Pero cuando la construcción se trocó en un almacén con paredes exteriores situadas más atrás de los apoyos, entonces



apareció la dinámica de la concepción. El edificio aparece como una adicción de cubiertas aunque la estática fue resuelta de otra forma.



**Ilustración II.33.**  
**Edificio central del Hongkong and Shanghai Banking Corporation, Hongkong, 1979-1986.**  
*Foster Associates (arq.), Ove Arup and Partners (ing.)*

La nueva concepción renuncia al clásico modelo con un núcleo central y una membrana como fachada. El edificio lo soportan ocho mástiles de cuatro tubos cada uno. En los pisos 11, 20, 28, 35 y 41, los marcos rígidos dividen el edificio. De ellos cuelgan los pisos. A los lados están 139 módulos para aseos, instalaciones técnicas y escaleras y ascensores.



**Ilustración II.34.**  
**Hysolar-Forschungsinstitut der Universität Stuttgart, 1987.**  
*Behnisch & Partner; F. Stepper, A. Ehrhardt.*  
 Foto Klaus Frahm

Este es un ejemplo típico del traslado del centro de gravedad de la arquitectura, de una visión utópica a una hermenéutica referida a si misma. Algunos consideran que las manipulaciones realizadas por los arquitectos son concebibles en tanto que la herencia cultural también esté presente en el observador.

Desde el punto de vista técnico, este ejemplo muestra la flexibilidad de la estructura de acero y su capacidad de adaptarse a conceptos de arquitectura 'desordenados'. Por supuesto la producción de este tipo de proyectos tiene una rigurosa planificación.



**Ilustración II.35.**  
**Hysolar-Forschungsinstitut der Universität Stuttgart, 1987.**

*Behnisch & Partner; F. Stepper, A. Ehrhardt.  
Foto Klaus Frahm*

Acá se investigan nuevas tecnologías sobre la base del hidrógeno obtenido mediante la energía solar. El carácter del edificio debía corresponder al trabajo experimental e innovador que se da en él. El resultado tiene algo de “orden arquitectónico experimental”, e incluso una parte de las plataformas fueron improvisación.

Este proyecto como el anterior muestran lo flexible que puede resultar el diseño con estructuras de acero. El capítulo V de este trabajo contiene información sobre el desarrollo del Guggenheim de Bilbao, uno de los proyectos más complejos del pasado siglo XX.



**Ilustración II.36.**  
**Cité des Sciences et de l'Industrie. Parc de la Villette en París, 1982-1990.**

*Bernard Tschumi  
Foto Peter Gössel*

La estrategia del arquitecto Tschumi fue la de “un edificio discontinuo, un conjunto fragmentado en una porción de mojones que se esparcen por todo el terreno”. Existen galerías cubiertas a lo largo de los ejes principales de caminos serpenteantes que llegan a los edificios o “folies” rojos. Los objetos arquitectónicos no son aquí solamente los edificios, sino también los espacios intermedios, de acuerdo con el sentido de la “poesía” concreta. Los “folies” o pabellones de Tschumi pueden interpretarse como aportación a la discusión sobre posibles transformaciones de la arquitectura en un sistema propio de puntos, líneas y superficies.

Nótese el protagonismo de la estructura de acero y la concepción de un espacio liviano.



**Ilustración II.37.**  
**Complejo fabril Funder Werk 3 en St. Veit / Glan, 1988-1989.**

*Coop Himmelblau  
Foto Gerald Zugmann*

La central energética con las “chimeneas danzantes”, - debido a que no están paralelas entre sí-, está separada de la nave de producción, comunicándose con ella a través de un puente. El acceso para camiones que se encuentra debajo está cubierto por un tejado plano.

Este proyecto ilustra la influencia de la arquitectura en un proyecto netamente industrial.

**CRISIS EN LOS PRECIOS DEL ACERO<sup>27</sup>****Incremento a los costos de producción de acero estructural**

“El acero es un producto clave de la industria siderúrgica y su producción ha sido considerada tradicionalmente como un indicador representativo de la potencialidad económica industrial. Los países tendieron a incrementar su capacidad de producción al amparo de las favorables condiciones que se dieron en las tres décadas posteriores a la Segunda Guerra Mundial, en cuyo transcurso se registró la incorporación de nuevos países productores. El estancamiento de la actividad económica a comienzos de la década de 1970 provocó una contracción en la demanda que dio lugar a una importante crisis industrial y obligó a cerrar muchas plantas obsoletas. Esta crisis estuvo además asociada al desarrollo de nuevas técnicas de producción (miniacerías, horno eléctrico) que han dado lugar a importantes transformaciones del sector. Fruto de este proceso y de la creciente globalización de la actividad económica, ha tenido lugar un importante proceso de concentración empresarial, mediante fusiones y compras de empresas, y la aparición de grandes grupos internacionales, un proceso importante en el caso europeo. Aunque las mayores acerías siguen siendo las de los viejos países industrializados (Japón, Europa occidental, Estados Unidos), en los veinte últimos años del siglo XX se ha producido un importante despegue de la producción siderúrgica en países como Corea del Sur, China e India.”<sup>28</sup>

Después de más de una década de estabilidad de precios, este “despegue” de la producción de acero ha originado una inflación sin precedente en los costos de producción de acero afectando a la industria de la construcción a niveles globales. Actualmente, los

<sup>27</sup> Información basada en artículos publicados en la revista “The Construction Weekly ENR, Engineering News-Record” del 22 de Marzo de 2004. Una publicación de McGraw-Hill Companies.

<sup>28</sup> La Enciclopedia. Volumen 1. *Salvat Editores*. En esta enciclopedia puede encontrarse además un resumen de los métodos de fundición del acero.

precios han alcanzado los más altos picos desde la década de los 70.

Tanto en Estados Unidos como en Guatemala, los precios han tenido una variación desde el 20% al 60%. Las compañías locales que trabajan con precios cerrados han tenido serios problemas económicos.

Actualmente, los contratistas siguen ofertando a precio cerrado y se pide un anticipo que cubra si no todo, la mayor cantidad de acero posible.

*“Hay preocupación general que la inflación del precio del acero empuje la inflación general de otros productos.”* Dice Karl Almstead, vicepresidente de la Corporación Turner en Nueva York.

Sin embargo, el economista John Mothersole del Global Insights en Washintong, D.C. tiene un punto de vista positivo al decir: *“Aunque los precios de este artículo han explotado, la inflación en general se han mantenido estable, las fuerzas anti-inflación se mantienen fuertes”*.

**Razones del incremento del precio del acero.**

La ola en los precios de acero fue activada cuando los molinos ataron los precios directamente a los precios volátiles de la chatarra que habían aumentado un 88% durante los dos años anteriores. La gran demanda de China se cita como culpable principal del aumento en el precio de la chatarra. “China aumentó su capacidad de acero por 38 millones de toneladas en 2003, o aproximadamente 1/3 de la producción total de acero en Estados Unidos.” Dice el gerente general de Nucor-Yamato Steel Co., Joe Stratman.

“Mientras China maneja el bus, hay muchos pasajeros” dice Joe Rutkowski, vice-presidente ejecutivo de Nucor. De manera similar al alza de la chatarra, otros costos se han triplicado.

China también rompió el mercado desviando las exportaciones de coque<sup>29</sup> para su consumo doméstico, al mismo tiempo un incendio en la mayor mina de coque en Estados Unidos originó una severa escasez obligando a los molinos integrados a aumentar la cantidad de chatarra que ellos usan en sus fusiones de un 10 a un 25% dice John Anton analista de Acero para Global Insights

Anton predice que la chatarra y los precios de acero retrocederán a mediados del año. La producción de coque en Estados Unidos deberá regresar a su línea normal este verano. Para el próximo año los precios se establecerán alrededor de los \$367.00 la tonelada y se mantendrán. Sin embargo, a largo plazo los precios tenderán a subir de manera cíclica.<sup>30</sup>

<sup>29</sup>“ Coque: carbón poroso, residuo de la calcinación de la hulla en la fabricación del gas.” Pequeño Larousse en color por Ramón García-Pelayo y Gross.

<sup>30</sup> Al momento de imprimir este trabajo, la tonelada de acero oscila entre US\$600 (acero plano) y US\$750.00 (acero de molino)

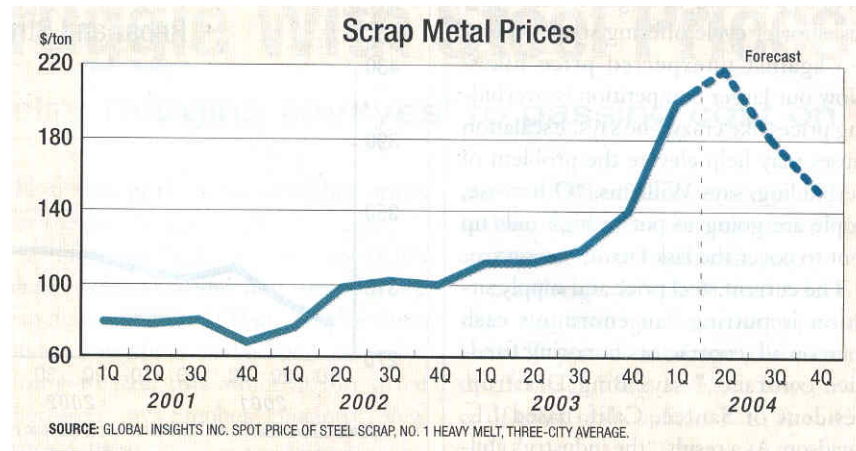


Ilustración II.38 Aumentos de Precios en Chatarra.



Ilustración II.39 Aumentos de Precios en Acero Estructural

### III

## LINEAMIENTOS GENERALES DE COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

### Introducción

**P**ara entender apropiadamente cómo podemos configurar espacios usando estructuras de acero, es necesario tener un conocimiento general de estructuras y su aplicación teórica en el desarrollo de proyectos en acero. Este capítulo pretende repasar algunos conceptos importantes y a su vez mostrar un análisis conceptual por medio de descripciones y diagramas sin usar matemáticas. Los conceptos se introducen aplicándolos primero a estructuras sencillas y luego se profundizan aplicándolos a estructuras más complejas, luego se formulan conceptos matemáticos básicos y se dan algunos ejemplos.

### A. CARGAS EN ESTRUCTURAS

Por su origen pueden ser:

1. *Cargas naturales*: fuerzas debido a la gravedad, el viento, la lluvia, empujes de tierra, empujes de agua, terremotos, temperatura y movimientos del terreno.
2. *Sobrecargas de uso*: estas cargas aparecen porque el edificio y la estructura se han diseñado para un uso específico. Estas cargas pueden ser elegidas en el diseño y pueden además ser verticales u horizontales.
3. *Cargas accidentales*: estas cargas provienen de conceptos de seguridad, por ejemplo al decidir que cierta estructura sea capaz de resistir accidentes entonces existirán elementos diseñados especialmente con ese fin. Situaciones accidentales pueden aparecer en estaciones de buses, de trenes o en las escolleras de un puerto.

Por consideraciones de diseño pueden ser:

1. *Cargas vivas*: Es la carga ocasionada por las personas, el mobiliario, el equipo, los materiales almacenados, divisiones, etc., en un edificio. La carga viva a utilizar en los cálculos dependerá por tanto del tipo y utilización del edificio. Los reglamentos de construcción tienen diferentes requisitos para las cargas vivas mínimas.
2. *Cargas Muertas*: Está constituida por los materiales usados en la construcción (como los pisos, muros y columnas).

La función principal de una estructura es transferir cargas. Aunque puede considerarse que cada carga o conjunto de cargas actúa de forma independiente, los edificios están normalmente cargados con una combinación de varios tipos de cargas. Como el edificio debe soportar cualquiera de estas combinaciones, es normal tener en

cuenta un conjunto de combinaciones que se llaman hipótesis de carga.

El único tipo de carga que aparece siempre es la carga gravitatoria natural. Esto es, el efecto de la gravedad en el edificio construido, a esta carga deben ser sumadas todas las demás cargas. Todas las demás cargas anteriormente expuestas pueden actuar o no en cualquier momento. Por lo tanto pueden actuar una variedad sin fin de combinaciones. Por ejemplo:

1. **Hipótesis I.** Carga gravitatoria natural + sobrecarga de uso en todas las plantas.
2. **Hipótesis II.** Carga gravitatoria natural + viento en una determinada estructura.
3. **Hipótesis III.** Carga gravitatoria natural + sobrecarga de usos gravitatorios en algunos pisos + carga de temperatura.

Sin embargo, el propósito de estudiar estas hipótesis de carga no es encontrar todos los casos posibles sino asegurarse de que la estructura pueda soportar con seguridad todas las hipótesis de carga. Esto aparentemente contradictorio significa que sólo deben tenerse en cuenta las hipótesis de carga que producen los efectos mayores sobre la estructura. En otras palabras, sólo la *peor hipótesis* de carga tiene interés.

Esto presenta dos dificultades:

1. Una hipótesis de carga puede producir el máximo efecto en una parte de la estructura, mientras que otra hipótesis de carga puede producir el máximo efecto en otra parte de la estructura, por lo tanto puede haber más de una hipótesis de carga pésima.

2. Cómo encontrar la peor hipótesis de carga sin tener que probar cada una de las hipótesis de carga posibles.

Desgraciadamente no hay ningún proceso automático para estas dificultades, aunque las normas técnicas pueden darnos una orientación.

Para edificios es usual el considerar:

1. Cargas gravitatorias naturales + máxima sobrecarga de uso.
2. Cargas gravitatorias naturales + carga de viento
3. Cargas gravitatorias naturales + carga de viento perpendicular a la dirección.

- Habitualmente, pero no siempre, la suma de la carga gravitatoria natural y la máxima sobrecarga de uso da la peor carga vertical.
- La combinación de la carga gravitatoria natural y la máxima carga de viento da usualmente la peor carga horizontal.

Puede parecer sorprendente que sólo se elijan dos direcciones para el cálculo de la carga de viento, porque, después de todo, el viento sopla en cualquier dirección. Si se ha decidido una carga máxima de viento, no por el viento por supuesto, éste puede actuar en cualquier dirección. Pero si la estructura del edificio es lo suficientemente fuerte para soportar separadamente la carga de viento en dos direcciones perpendiculares, todos los otros casos de carga de viento pueden ser considerados como una proporción más pequeña de esas cargas máximas.

El mismo principio de combinaciones de carga se aplica a todos los edificios.

### i. Reacciones

La tercera ley de Newton establece: *“toda acción está acompañada de una reacción igual y de sentido contrario.”* Esto significa que en un edificio el peso empuja hacia abajo una fuerza igual a la que el suelo empuja hacia arriba, esta última es la reacción. Comprender este principio es fundamental para comprender cómo las estructuras soportan las cargas.

Aunque es verdad que la carga y la reacción actúan en el punto de aplicación de la carga, una estructura transfiere la carga a otro punto. Debido a la ley de Newton, la suma de las cargas debe ser igual a la suma de las reacciones. Planteando el equilibrio de fuerzas verticales en una viga de dos vanos tenemos:

$$P1 + P2 + P3 + P4 = R1 + R2 + R3$$

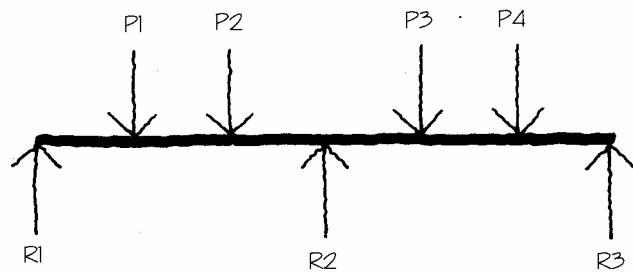


Ilustración III.1

No solamente hay reacciones verticales, sino que en determinadas configuraciones pudieran haber horizontales, y también de momento. Un momento es el producto de la fuerza por la distancia. Los momentos de reacción actúan en reacción opuesta al producido por la fuerza del viento x altura:

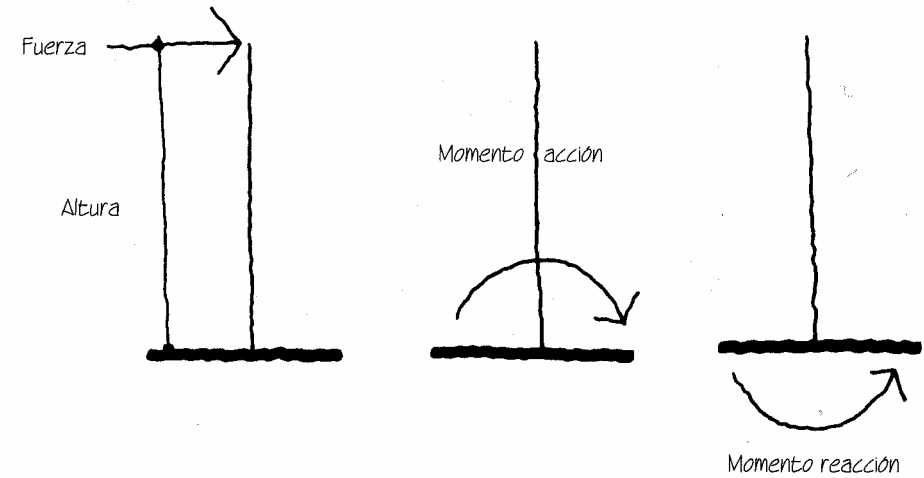


Ilustración III.2

Muchas estructuras necesitan más de un tipo de reacción. Si tomamos el ejemplo del viento soplando sobre un cartel, el soporte produce reacción vertical y horizontal y momento de reacción. Estas resisten el peso propio, la carga de viento y el momento de viento.

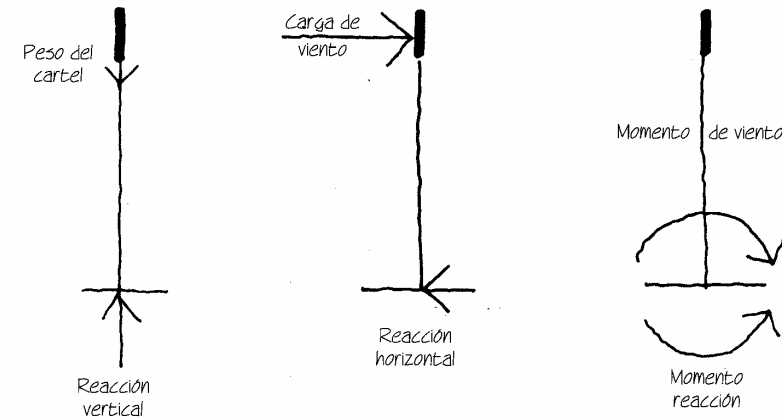


Ilustración III.3

## ii. Recorridos de cargas

Consiste en la secuencia de cargas y reacciones a lo largo de los elementos estructurales. La reacción de un elemento puede ser la carga del elemento siguiente.

Hay que hacer notar dos observaciones sobre los recorridos de cargas:

1. La primera observación es que todas las cargas pueden y deben tener un recorrido de cargas desde su punto de aplicación hasta el apoyo final. Estos recorridos deben ser identificados por el diseñador de la estructura para todas las cargas y todos los casos de carga:
2. La segunda observación es que, como la función de una estructura es transferir cargas, el recorrido de cargas es la estructura para cada carga. De modo que la respuesta a la pregunta ¿qué es la estructura? puede variar para cada carga. Para las cargas P2 y P6 la estructura es diferente.

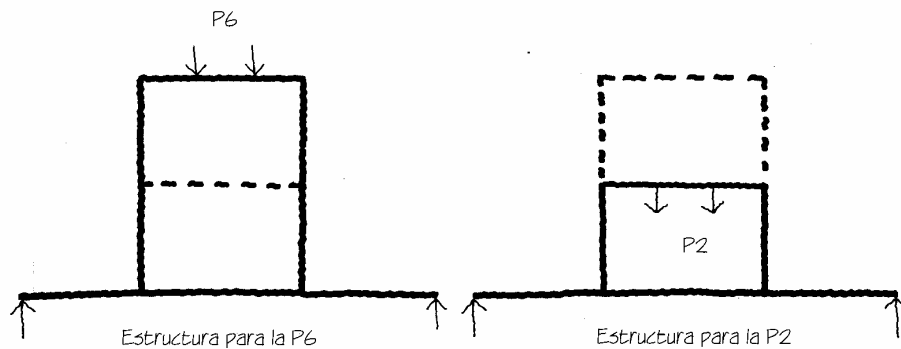


Ilustración III.4

La identificación de recorridos de cargas verticales para muchos edificios es relativamente simple. Sin embargo, para edificios sencillos como viviendas puede ser complejo.

El recorrido de cargas es necesario para cargas verticales y horizontales. Veamos el siguiente ejemplo:

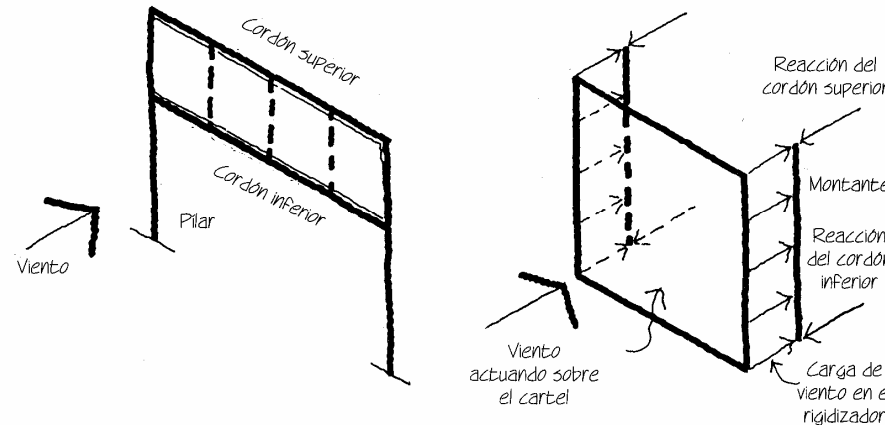


Ilustración III.5

La máxima carga de viento está producida por el viento actuando perpendicularmente al cartel. Es decir, no tendremos en cuenta el efecto del viento en los cordones y pilares. El cartel se apoya horizontalmente en los montantes verticales y éstos trabajan como cargas verticales que se apoyan en el cordón superior y en el cordón inferior.

Las reacciones de los montantes se transforman en cargas horizontales que actúan sobre los cordones superior e inferior. Estos cordones trabajan como vigas horizontales apoyadas en los pilares.

Las reacciones de los cordones superior e inferior actúan como cargas en los pilares, que su vez trabajan como voladizos verticales empotrados en el suelo.

En este caso el recorrido de cargas es toda la estructura. (Véase Ilustración III.6)



Aún en edificios sencillos, los recorridos de cargas verticales no son los mismos que los de las cargas horizontales. Como el recorrido de cargas es la estructura, esto significa que normalmente existen distintas estructuras para resistir las cargas verticales y las cargas horizontales. (Véase Ilustración III.7)

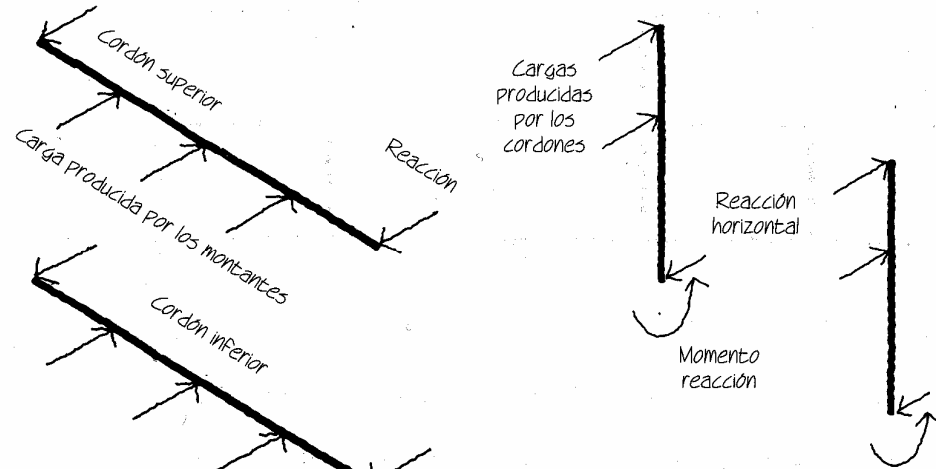


Ilustración III.6

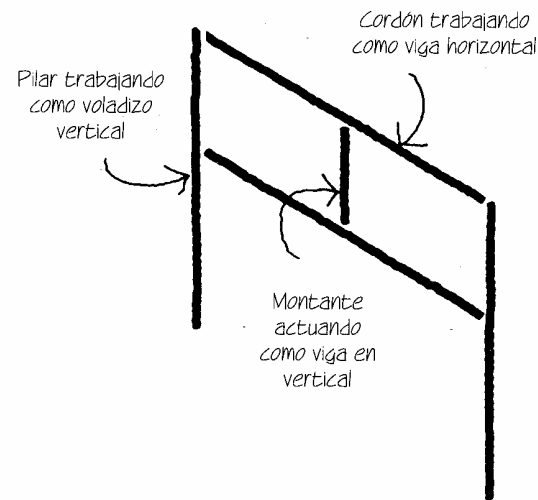


Ilustración III.7

## B. ESFUERZOS INTERNOS

La estructura transfiere las cargas por medio de esfuerzos, es decir, fuerzas que están dentro de la estructura, y estos esfuerzos producen tensiones en el material estructural.

La estructura también se deforma bajo el efecto de las cargas, y la magnitud de la deformación depende de la rigidez de la estructura.

### i.- Un marco simple

En la estructura conocida como marco, los diagramas pueden ser dibujados, viendo lo que ocurre en la estructura cuando está cargada.

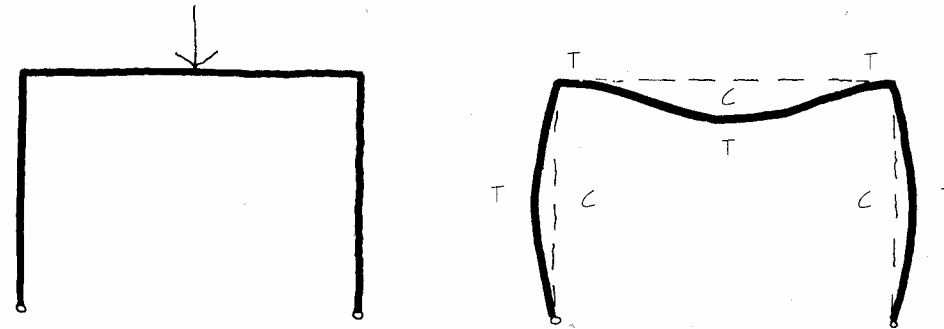


Ilustración III.8

Aquí, aunque la carga sólo es vertical, existen reacciones horizontales. Esto ocurre porque de otra forma los pilares se desplazarían en horizontal en sus apoyos.

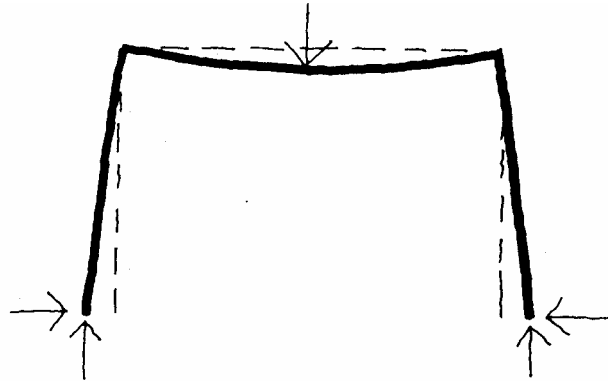


Ilustración III.9

La deformada (Ilustración III.8) muestra qué fibras del dintel y de los pilares están en tracción y en compresión. Si utilizamos esto como guía, se pueden dibujar los diagramas de momentos.

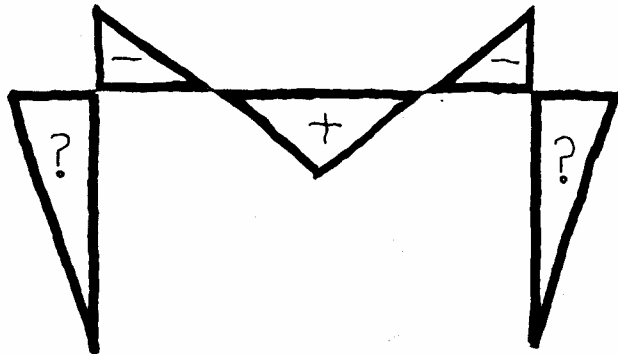


Ilustración III.10

El diagrama de momentos se dibuja en el lado de las fibras de tracción de los pilares y el dintel. Para indicar los momentos, se utiliza la convención de signos tanto para la viga como para las columnas.

No solamente habrá momentos flectores en el marco, sino que además existirán esfuerzos cortantes y esfuerzos normales, es decir, tracciones o compresiones. Existen esfuerzos normales en los pilares debido a las reacciones del dintel y esfuerzos normales en el dintel debido a la reacción horizontal.

También se puede dibujar un diagrama de cortantes. Como el que aparece a continuación.

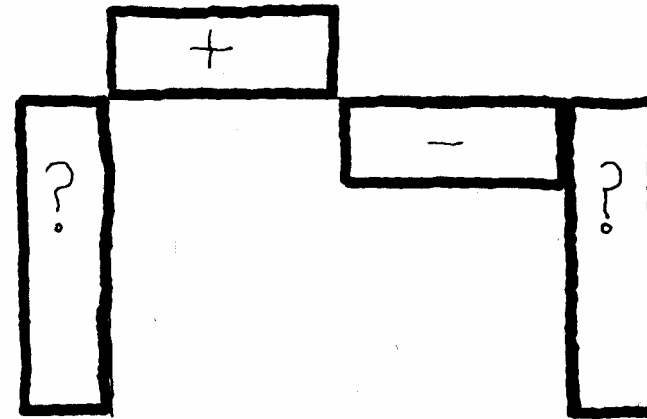


Ilustración III.11

Se puede obtener un conocimiento más profundo de cómo los esfuerzos internos actúan en la estructura, suponiendo que las distintas partes que componen la estructura son "cuerpos libres". En el caso del marco los "cuerpos libres" son la viga y los dos pilares.

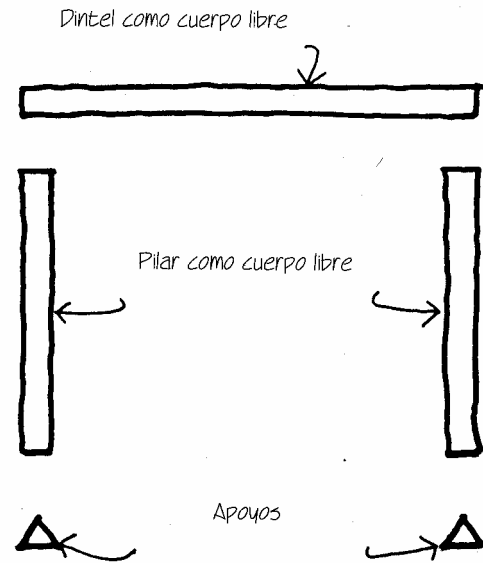


Ilustración III.12

Las fuerzas que actúan en estos cuerpos libres para mantener el equilibrio se muestran en la Ilustración III.13

Es más fácil comprender el significado de estas fuerzas, examinando por separado los esfuerzos debidos a la carga horizontal y los esfuerzos debidos a la reacción horizontal de los pilares.

El efecto de la carga vertical  $W$  está equilibrado por las fuerzas en los apoyos de la viga  $P_v$ . Éstas a su vez producen esfuerzos iguales a  $P_v$  en la parte superior de los pilares, que a su vez están equilibrados por esfuerzos, también iguales a  $P_v$ , en la parte inferior de los pilares. Estos esfuerzos están equilibrados por fuerzas en los apoyos, que a su vez están equilibrados por las reacciones (Ilustración III.14).

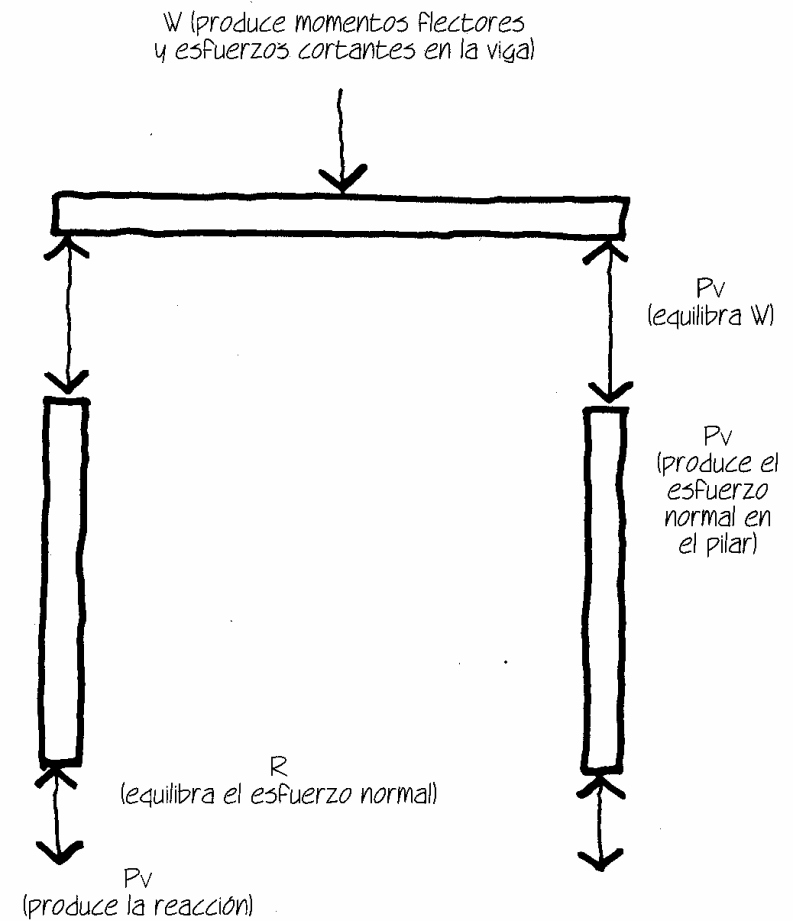


Ilustración III.13

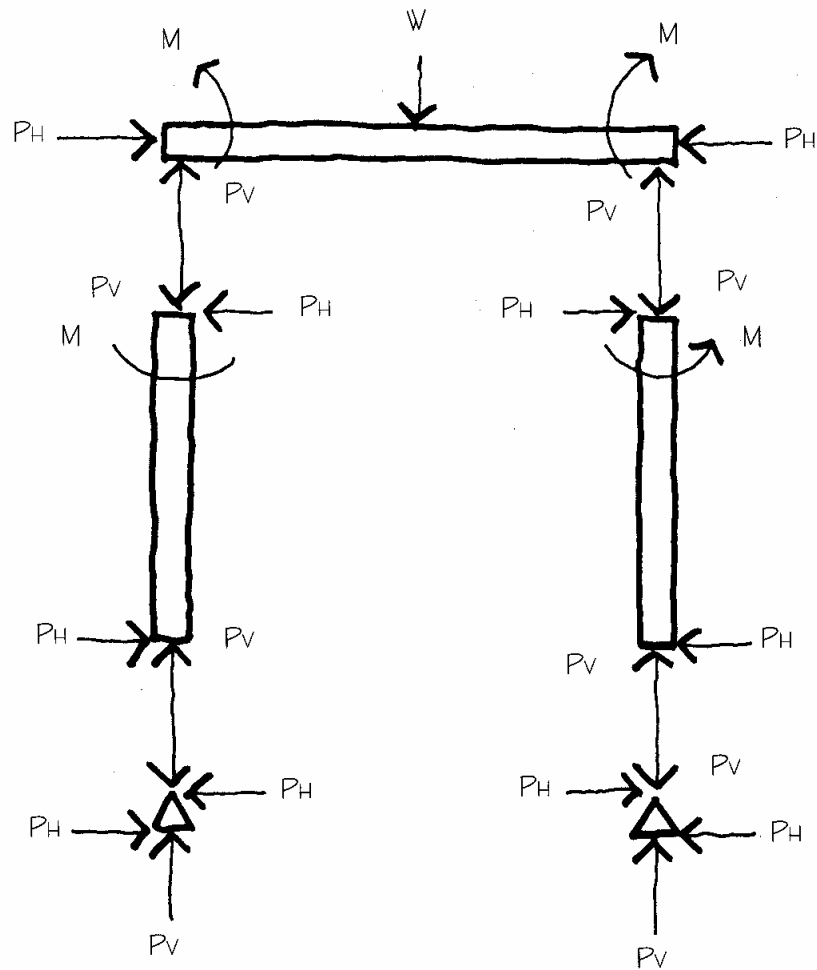


Ilustración III.14

Está clara la razón de la existencia de  $M$  y  $P_H$ : aparece porque el nudo entre el dintel y los pilares es rígido, esto es, la unión se mantiene en ángulo recto antes y después de deformarse. Debido a la carga vertical  $W$ , el dintel flecha y sus extremos giran. Para mantener este ángulo recto, los pilares intentan desplazarse hacia afuera como mostraba la Ilustración III.9 (si esto ocurriese,  $M$  y  $P_H$  no existirían). Pero la unión de la parte inferior de los pilares con los apoyos impide el movimiento horizontal y esto hace que los pilares

trabajen a flexión. En otras palabras tenemos que  $\sum F_v = 0$  y  $\sum F_h = 0$  (Sumatoria de fuerzas verticales y horizontales = 0).

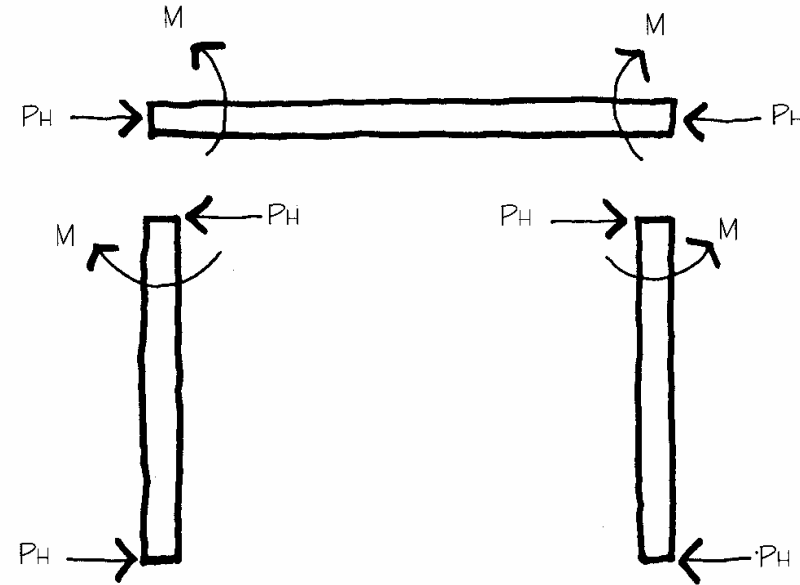


Ilustración III.15

Los diagramas de momentos, cortantes y normales pueden también ser divididos entre los producidos por la carga vertical  $W$  y los producidos por la reacción horizontal de los pilares. En el primer caso, es el efecto de la carga vertical sin reacción horizontal en la base de los pilares.

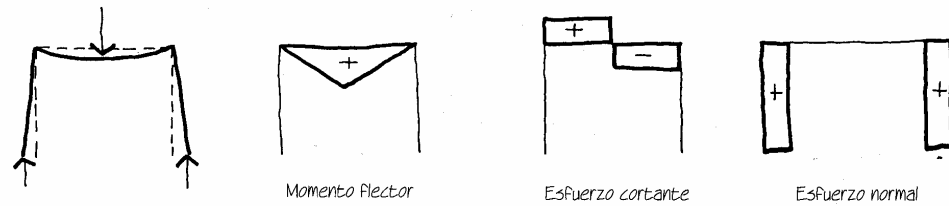


Ilustración III.16

En el segundo caso, es el efecto de desplazar las dos partes inferiores de los pilares a la vez.

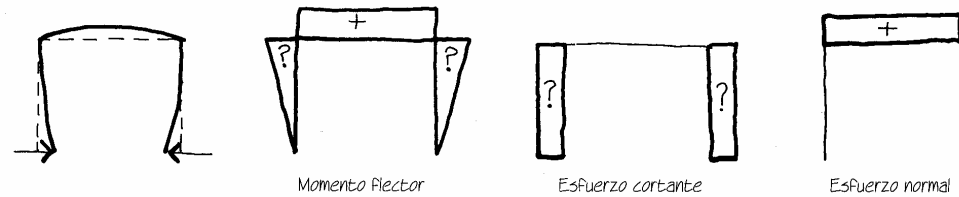


Ilustración III.17

Como los dos efectos ocurren a la vez, podemos combinar dos diagramas para obtener el efecto debido a los dos casos.

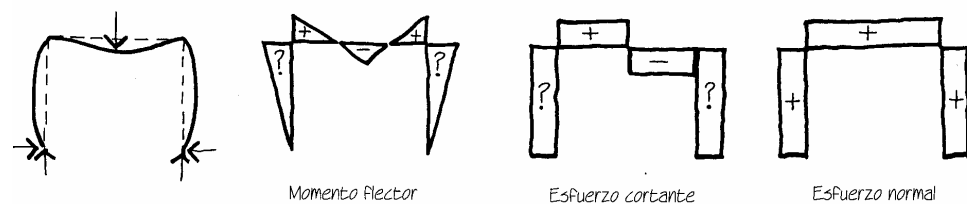


Ilustración III.18

Con este conjunto de diagramas, además de la magnitud de todos los esfuerzos, se obtiene la información de cómo se comporta una estructura bajo cualquier tipo de carga.

Para mostrar cómo los esfuerzos internos nos permiten comprender cómo se transporta la carga, vamos a volver a estudiar el ejemplo del cartel cargado con el viento.<sup>1</sup>

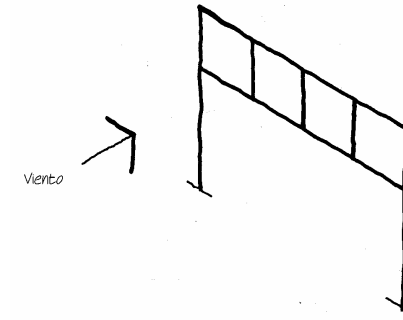


Ilustración III.19

El cartel en sí es un elemento *bidimensional*<sup>2</sup> que estaría soportado por los cordones, los montantes y los pilares. Vamos a suponer que sólo se apoya en los montantes y los pilares (despreciaremos los cordones). Como éstos son paralelos, trabajará en una sola dirección.

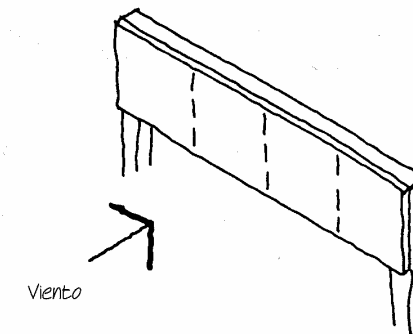


Ilustración III.20

<sup>1</sup> El mismo principio aplicaría para forros metálicos en bodegas industriales. Sin embargo, la aplicación puede extenderse a edificios en arquitectura. Nótese la estructuración y forros usada para el Museo Guggenheim de Bilbao, en el capítulo V de este trabajo.

<sup>2</sup> Véase la sección: Elementos estructurales en la parte C. Comportamiento de los elementos estructurales.

Los momentos flectores y esfuerzos cortantes varían a lo largo de la longitud del cartel, pero son constantes a lo largo de su altura.

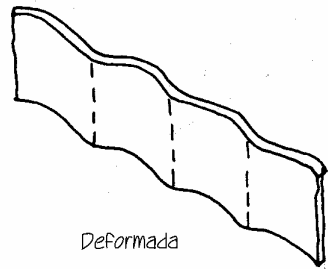


Ilustración III.21

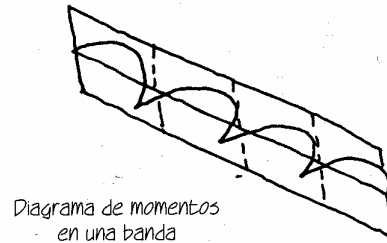


Ilustración III.22

Pero es más claro dibujarlo si lo vemos desde arriba, tal como aparece en la Ilustración III.23

Las reacciones del cartel son las cargas que actúan sobre los montantes, y éstos actúan como vigas apoyadas en los cordones. Podemos dibujar los diagramas de momentos y cortantes de un montante cualquiera.

Las reacciones de los extremos de los montantes actúan como tres cargas puntuales en los cordones superior e inferior. Éstos trabajan como vigas apoyadas en los dos pilares; por lo que podemos dibujar los diagramas de momentos y cortantes de los cordones.

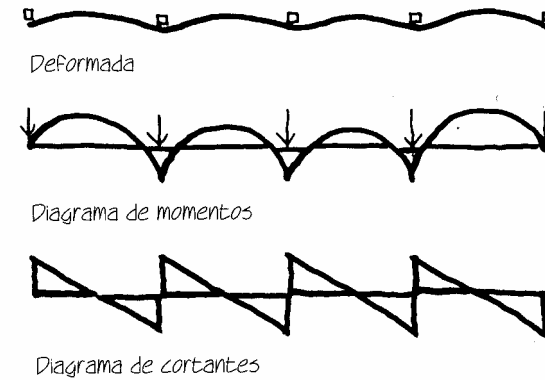


Ilustración III.23

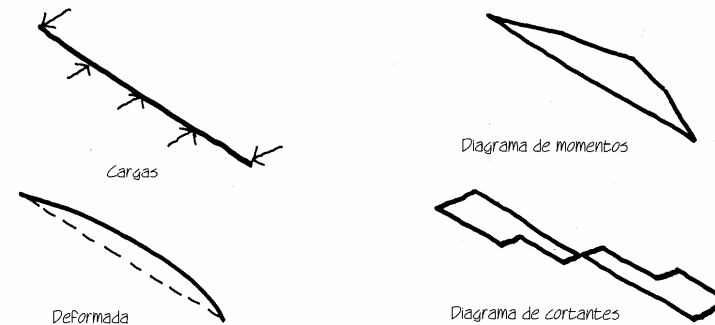


Ilustración III.24

Los pilares trabajan como voladizos soportando las reacciones de los montantes más la carga que les transmite el cartel. Se pueden ahora dibujar los diagramas de momentos y normales de un pilar.

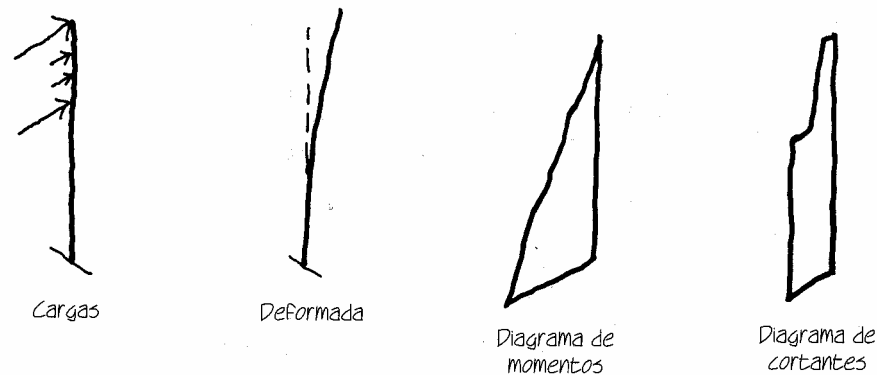


Ilustración III.25

Vemos que cada parte del recorrido de cargas transfiere éstas mediante algún tipo de esfuerzo interno, que pueden ser momentos flectores, esfuerzos cortantes o esfuerzos normales o bien alguna combinación de los tres. La estructura no es sólo el recorrido de cargas sino que, como ésta es una secuencia de esfuerzos internos, el recorrido de cargas trabaja como una estructura.

*La aptitud más importante que debe desarrollarse para diseñar estructuras con éxito es la capacidad de predecir el comportamiento estructural del recorrido de cargas.* Cuando se proyecta una estructura deben ser definidos los esfuerzos internos del recorrido de cada una de las cargas como parte de dicho proyecto. Cuanto más compleja sea la estructura proyectada, más difícil será predecir el comportamiento estructural de los recorridos de cargas. En estructuras muy complejas puede ser difícil incluso identificar los recorridos de cargas. Debido a esto, pueden aparecer problemas graves en el proceso de diseño si se proyectan complejas estructuras con recorridos de cargas impredecibles. Un ejemplo notable de esto fue el diseño y cálculo estructural de la opera de Sydney, en la cual se tuvieron que proyectar trece esquemas estructurales diferentes antes de encontrar un diseño adecuado; esto costó seis años y una escandalosa y probablemente desconocida cantidad de dinero. Contrario a este ejemplo fue el desarrollo de la compleja geometría estructural del Guggenheim de Bilbao realizada

toda en acero<sup>3</sup> lográndose que sus 3,900 toneladas tuvieran un costo comparable a un proyecto tradicional. En nuestro país, muchas veces es más sabio proyectar estructuras sencillas y por tanto fácilmente predecibles, a no ser que se disponga de mucho tiempo durante el proceso de diseño para poder realizar las inevitables modificaciones.

### C.- COMPORTAMIENTO DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES

El conocimiento en detalle del recorrido de las cargas permite aclarar cómo las partes de que se compone una estructura, resiste los esfuerzos internos.

Este conocimiento también nos sirve para orientar la mejor configuración o forma estructural que debe tomar cada parte del recorrido de cargas. La elección de la forma estructural general para cualquier estructura es una de las tareas básicas del diseñador arquitectónico, pero antes de entender el comportamiento global de las estructuras debemos tener claro el comportamiento de estructuras muy simples. Considerar las estructuras como ensamblajes de elementos nos puede ayudar.

#### i. Elementos estructurales

Por "conveniencia" de ingeniería estructural se supone que los elementos estructurales son de una dimensión, de dos dimensiones o de tres dimensiones. Puede suponerse que el elemento básico es un bloque rectangular, cuyos lados tienen de dimensiones A, B y C.

Si las tres dimensiones son aproximadamente de la misma magnitud, el elemento es un elemento de tres dimensiones. Ejemplos de elementos de tres dimensiones son escasos en las estructuras de edificios modernos pero son frecuentes en los edificios antiguos, como en los contrafuertes de los muros o en gruesas cúpulas de piedra.

<sup>3</sup> Véase el subtítulo "Guggenheim de Bilbao" en el Capítulo V de este trabajo.

Si una de las dimensiones, por ejemplo la C, es pequeña comparada con las dimensiones A y B, el elemento es un elemento de dos dimensiones.

Muchas de las partes que componen las estructuras de edificación modernas son elementos de dos dimensiones como forros o cubiertas de láminas.

Si dos de las dimensiones del elemento básico, por ejemplo la B y la C, son pequeñas comparadas con la dimensión A, el elemento es un elemento de una dimensión.

Los elementos de una dimensión se usan abundantemente en casi todos los edificios; podemos citar como ejemplos las vigas I, barras, costaneras, cables y pilares. Utilizando el concepto de elemento, las estructuras pueden ser concebidas como ensamblajes de elementos. Se pueden encontrar ejemplos en estructuras tradicionales igual que en estructuras modernas.

En nuestros días las estructuras son frecuentemente concebidas y diseñadas como ensamblajes de elementos estructurales. Es decir, el comportamiento estructural puede ser cuantificado estudiando el comportamiento estructural de cada elemento estructural en cada recorrido de cargas.

## ii. Conceptos de fuerzas y esfuerzos.<sup>4</sup>

Cualquiera de los elementos que forman el recorrido de cargas de una estructura debe ser lo suficientemente fuerte para resistir los esfuerzos internos producidos por las cargas. Esto implica la necesidad de tener una información detallada sobre el comportamiento estructural de los distintos materiales de los elementos estructurales. A continuación examinaremos de forma

<sup>4</sup> Los conceptos que se describen a continuación son tomados del libro: Ingeniería Simplificada para arquitectos y constructores de Harry Parker. Editorial LIMUSA, México. 1981.

resumida los conceptos que se utilizan para conseguir esta información.

**ii.1.- Fuerzas:** Una fuerza puede definirse como aquello que produce un movimiento, una presión o una tracción. En la rama de construcción sólo nos interesan las fuerzas en equilibrio, o sea en reposo. Ahora bien, si una fuerza está en reposo, esto se debe a la acción de alguna o algunas otras fuerzas que así la mantienen. La Estática es la ciencia que estudia los cuerpos en reposo. Imaginemos una columna de acero que soporta cierta carga, cuya dirección, debido a la acción de la gravedad, es hacia abajo; la columna transmite esta carga hacia abajo a la zapata. La presión resultante en ésta, con dirección hacia arriba, se llama reacción y es de igual magnitud que la carga. Las dos fuerzas tienen dirección opuesta, la misma línea de acción y son iguales en magnitud. Las unidades de fuerza son libras, kilogramos, etc.; se utiliza también con frecuencia la palabra kip o ton que significa 1000 libras o 1000 kilogramos. Puede decirse entonces 30 kips, o bien 30,000 lb, 100 ton o bien 100,000 kg.

**ii.2.- Esfuerzos directos:** Supongamos que la carga que actúa sobre una columna de acero es de 50,000 Kg. y que el área de su sección transversal es 50 cm<sup>2</sup>; por tanto cada centímetro cuadrado de acero resiste 50,000 entre 50, o sea 1,000 kg. En este caso el esfuerzo unitario en la columna es de 1,000 Kg. por centímetro cuadrado. *El esfuerzo en un cuerpo es la resistencia interna que presenta a la acción de una fuerza externa.* La fuerza total sobre la columna es de 50,000 kg., mientras que el esfuerzo (fuerza por unidad de área) es de 1,000 kilogramos por centímetro cuadrado. Los tres tipos de fuerzas o esfuerzos que nos interesan son: tensión, compresión y cortante. El esfuerzo ocasionado por la tendencia de una fuerza a torcer una barra se denomina *torción*, pero no se presenta con mucha frecuencia en la construcción. A menos que se indique lo contrario, supondremos que todas las fuerzas son axiales y que los esfuerzos están distribuidos uniformemente sobre la sección transversal del cuerpo en estudio.



Llamemos  $P$  a la carga o fuerza externa,  $A$  al área de la sección transversal y  $f$  al esfuerzo unitario; es obvio que al dividir la carga entre el área de la sección obtendremos el esfuerzo unitario, lo que puede expresarse como sigue:

$$f = P/A \quad \text{o bien} \quad P = Af \quad \text{o bien} \quad A = P/f$$

**ii.3.- Deformación:** Siempre que una fuerza actúa sobre un cuerpo, ocasiona en éste un cambio de forma o de tamaño; dicho cambio se llama deformación. Independientemente de la magnitud de la fuerza, la deformación siempre está presente, aunque a menudo es tan pequeña que resulta difícil medirla, aun con los instrumentos más delicados. En el diseño de estructuras, con frecuencia se necesita saber cuál será la deformación que tendrán ciertos miembros; por ejemplo, el tamaño de un larguero de piso puede ser suficiente para soportar con seguridad cierta carga, pero puede deflexionarse a tal grado que el piso vibre o que se agriete el aplanado de yeso que tiene debajo.

**ii.4.- Tensión:** Cuando una fuerza actúa sobre un cuerpo de modo que éste tiende a alargarse, se le denomina fuerza de tensión o de tracción; estos esfuerzos se llaman esfuerzos de tensión.

**ii.5.- Compresión:** Cuando la fuerza que actúa sobre un cuerpo tiende a acortarlo se le llama fuerza de compresión y los esfuerzos que se presentan en el cuerpo se llaman esfuerzos de compresión.

**ii.6.- Cortante:** Existe un esfuerzo cortante cuando dos fuerzas actúan sobre un cuerpo en direcciones opuestas, pero en diferentes líneas de acción; ejemplo de ello son dos fuerzas que actúan como tijeras y tienden a cortar un cuerpo.

**ii.7.- Flexión:** Un ejemplo de flexión es cuando una viga libremente apoyada tiene una carga concentrada  $P$  en el centro. Los esfuerzos no están distribuidos por igual en toda la sección transversal.

**ii.8.- Ley de Hooke:** En el siglo XVII, en Inglaterra, vivió un caballero llamado Robert Hooke, matemático y físico. Como resultado de sus experimentos con resortes de reloj, desarrolló la teoría de que “los esfuerzos son directamente proporcionales a las deformaciones” o dicho en otras palabras que si una fuerza produce cierta deformación, una fuerza de magnitud doble producirá el doble de deformación. Esta ley de la Física es de primordial importancia, aunque es válida hasta cierto límite.

**ii.9.- Límite elástico:** Supongamos que en una máquina para realizar pruebas de tensión, se coloca una barra de acero estructural con un área transversal de 1 plg<sup>2</sup>. Se mide su longitud con precisión y se le aplica una fuerza de tensión de 5,000 lb, después de lo cual se mide nuevamente la barra encontrándose que la barra se ha alargado en cierta medida, la cual denominaremos  $X$  pl. Al aplicar otras 5,000 lb, notaremos que el alargamiento es igual a  $2 \times X$ , o sea el doble del anotado después de las primeras 5,000 lb; si continuamos la prueba veremos que por cada 5,000 lb la longitud de la barra aumentará en la misma medida que cuando se aplicaron las primeras 5,000, es decir, las deformaciones son directamente proporcionales a los esfuerzos. Hasta aquí la *Ley de Hooke* ha probado su validez; pero al llegar al punto en que se han aplicado 36,000 lb, la longitud aumenta más de las  $X$  pulgadas por cada 5,000 lb adicionales. Este esfuerzo unitario de unas 36,000 lb/plg<sup>2</sup>, que varía según la muestra, se llama límite elástico y puede definirse como el esfuerzo unitario después del cual las deformaciones aumentan con más rapidez que las cargas aplicadas.

Otro fenómeno que se puede observar nuevamente es el siguiente: si realizamos la prueba descubriremos que, al quitar de la barra cualquier carga aplicada que sea menor que el límite elástico, la barra recuperará su longitud original; pero si el esfuerzo unitario es mayor que el límite elástico, encontraremos que al remover la carga la longitud de la barra ha aumentado en forma permanente. Esta deformación se llama deformación permanente. El hecho mencionado nos permite definir el límite elástico de otra manera: es

el esfuerzo unitario después del cual el material no recupera su longitud original después de eliminar la carga aplicada.

*Punto de fluencia.* Es otro término que también se utiliza para estas pruebas. Durante dichas pruebas, se encuentra que en algunos materiales como el acero, las deformaciones aumentan sin que haya incremento alguno en los esfuerzos; el esfuerzo unitario en el que se produce esta deformación se lo llama punto de fluencia. Aunque el punto de fluencia es ligeramente mayor que el límite elástico, es casi idéntico al límite elástico.

**ii.10.- Resistencia última o esfuerzo de ruptura:** Cuando se aplica una carga de magnitud suficiente a un espécimen de prueba, ocurre la ruptura; el esfuerzo unitario que existe en la barra precisamente antes de romperse se llama *resistencia última*.

**ii.11.- Factor de seguridad:** El factor de seguridad es un término que se utiliza mucho en la ingeniería y es importante conocer exactamente lo que significa; imaginemos que una barra de acero que forma parte de una armadura, tiene un esfuerzo real de tensión de 9,600 lb/plg<sup>2</sup> y que la resistencia última del material es de 48,000 lb/plg<sup>2</sup>. *El factor de seguridad es la relación entre la resistencia última del material y el esfuerzo unitario;* en este caso, será igual a 5, o sea el cociente de la división 48,000 entre 9,600. En otras palabras, el factor de seguridad será el número que resulte de dividir la resistencia última del material entre el esfuerzo unitario.

**ii.12.- Esfuerzo unitario de trabajo:** El esfuerzo unitario de trabajo o esfuerzo unitario permisible es el que se utiliza en el diseño de los miembros estructurales y se especifica como el esfuerzo máximo permisible en un miembro. Los esfuerzos unitarios de trabajo siempre deben estar inferiores al límite elástico.

El esfuerzo permisible de tensión del acero A-36 es de 22,000 lb/plg<sup>2</sup>, el esfuerzo permisible por cortante en las almas de vigas y armaduras es de 14,500 lb/plg<sup>2</sup>.

**ii.13.- Módulo de elasticidad:** Supongamos que una varilla de acero con sección transversal de 1 plg<sup>2</sup>, se coloca en una máquina de pruebas y se le aplica una fuerza de tensión de 1,000 lb. Su longitud aumentará y, aunque no podremos apreciarlo a simple vista, la deformación podrá medirse mediante instrumentos científicos. Si aplicamos la misma fuerza a una pieza de madera que tenga dimensiones idénticas a las de la varilla de acero, encontraremos que la deformación es mayor, probablemente 20 veces más grande. El número que representa el grado de rigidez de un material se conoce como módulo de elasticidad. El módulo de elasticidad de un material es el cociente de la división del esfuerzo unitario entre la deformación unitaria.

$$E = f/s$$

Utilizando los conceptos de recorrido de cargas, esfuerzo interno y tensión máxima podemos definir las etapas principales del proceso de diseño de estructuras. Una vez se ha identificado la razón de la existencia de la estructura el proceso puede ser el siguiente:

Fase 1. Elegir la forma estructural y el material o materiales.

Fase b. Identificar las cargas que debe soportar la estructura.

Fase 3. Encontrar los esfuerzos internos en los recorridos de cargas para cada caso de carga.

Fase 4. Comprobar que cada tramo de los recorridos de carga no está sobre-esforzado.

Los detalles del proceso del diseño de estructuras serán examinados más adelante, pero ahora podemos definir las bases principales de ese proceso. Esto nos da el esquema básico que permite entender el comportamiento global de las estructuras. La observación más importante sobre el valor de las tensiones es que éstas pueden ser alteradas sin necesidad de alterar el esfuerzo interno. Cuando

estamos en la fase 4 del proceso de diseño, podemos encontrar alguna parte del recorrido de cargas sobre-esforzado. Si esto ocurre, puede ser conveniente alterar la forma de la estructura localmente, modificando la geometría de la sección, de forma que se reduzcan las tensiones a valores por debajo de su valor admisible.

De modo que el trabajo consistirá en proyectar una estructura que pueda soportar las cargas a lo largo de los recorridos de cargas con tensiones "confortables" en cualquier punto. Dependiendo del material que se use, el valor de las tensiones confortables puede variar. Por ejemplo, como el acero es más fuerte que la madera, la tensión admisible (confortable) para el acero es más alta que para la madera. Así que, de una manera un tanto grosera, las estructuras de madera tendrán elementos estructurales más grandes que las estructuras de acero si transportan la misma carga a lo largo del mismo recorrido de cargas.

Como es normalmente poco práctico conseguir estructuras satisfactorias por tanteos o ensayando la estructura completa, el método moderno es calcular el valor de las tensiones en cada recorrido de cargas y comprobar que todas las tensiones están dentro de los límites admisibles. Para que esto sea un método factible en lugar de un proyecto de investigación, deben realizarse muchas hipótesis simplificadoras.

Estas hipótesis permiten utilizar lo que normalmente se conoce como *Teoría de Ingeniería* para calcular las tensiones. Algunas de estas versan sobre la *naturaleza* del material con el que se construyen las estructuras, éstas son:

- Que el material es isótropo. Es decir, que el comportamiento mecánico del material es el mismo en cualquier dirección.
- Que el material es linealmente elástico. Un material elástico es aquel que después de deformarse bajo las cargas vuelve a un estado exactamente igual al inicial si se retiran las cargas. Si

el material elástico se deforma en una proporción exacta a la carga que se le aplica, es linealmente elástico.

También existen hipótesis sobre la *geometría* de la estructura, éstas son:

- Que la estructura es homogénea. Es decir, que no hay grieta, fracturas, agujeros o cualquier otra discontinuidad en las estructuras.
- Que las deformaciones de la estructura cargada son pequeñas. Es decir, que utilizar para los cálculos que determinan su comportamiento estructural geometría inicial no conduce a errores significativos. Esto no puede aplicarse a estructuras muy flexibles, piénsese por ejemplo en una cuerda de tender ropa.
- Que las secciones planas se mantienen planas después de la deformación. Esta sentencia un tanto críptica significa que si ciertas partes de la estructura eran planas antes de estar cargadas, se mantendrán planas una vez cargadas. Se va a explicar de forma más completa en este capítulo.

La *teoría de Ingeniería* se usa en casi todos los cálculos de estructuras porque conduce a distribuciones de tensiones sencillas en los elementos estructurales cuándo éstos están sometidos a momentos flectores, esfuerzos cortantes y esfuerzos normales.

### iii.- Tensiones normales

Una estructura con cargas normales a su sección tiene esfuerzos normales y éstos producen tensiones normales a lo largo del elemento. Esto quiero decir que si la sección es una sección plana, entonces después de la que la estructura haya sido cargada, seguirá siendo plana.

Todos los puntos de la sección se deforman la misma cantidad, es decir existe una distribución de tensiones constante o uniforme (carga / unidad de superficie).

El hecho de que las tensiones sean constantes en un pilar cargado con cargas normales nos da una relación muy sencilla entre esfuerzo interno y tensión, esto es:

Tensión normal = (Esfuerzo normal) x (por el área de la sección)

Esto significa que para un esfuerzo dado, la tensión puede variarse aumentando o disminuyendo el área de la sección del pilar.

La hipótesis de que las secciones se mantienen planas también puede orientarnos sobre si el elemento estructural debe ser considerado como de una, dos o tres dimensiones.

En la siguiente figura tenemos tres columnas sometidas a la misma carga puntual:

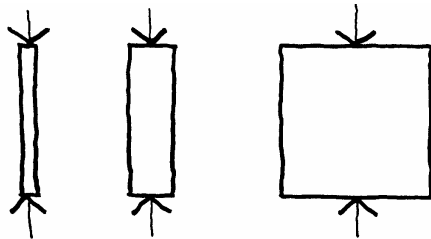


Ilustración III.26

Luego en la siguiente figura tenemos la parte en tensión de las tres columnas. Las tensiones se abren hacia fuera a aproximadamente 60°. Esto indica que para la columna más ancha, la sección no se mantiene plana.

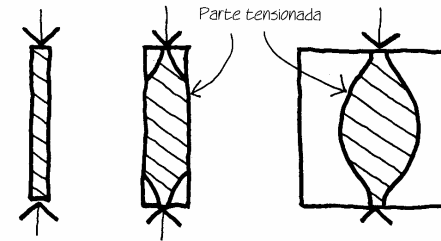


Ilustración III.27

Esto nos revela una "orientación" de si los elementos son de una, dos o tres dimensiones. En la figura anterior, los primeros dos pilares pueden ser considerados como de una dimensión debido a que su distribución de tensión es sencilla. En el pilar más ancho sin embargo, se debe suponer que es un elemento de dos dimensiones.

Este efecto se puede experimentar tirando de hojas de papel cada vez más anchas. La parte tensionada del papel quedará tirante, las partes no tensionadas quedarán flojas.

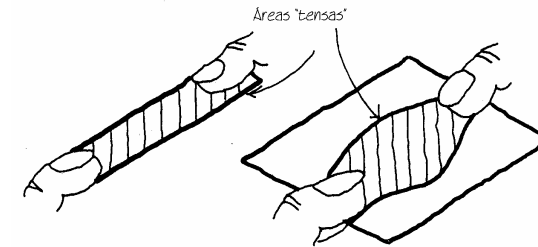


Ilustración III.28

#### iv.- Tensiones de flexión

Cuando las partes del recorrido de cargas cubren un vano, vigas y losas, los elementos tendrán esfuerzos internos de flexión y momentos.

Las caras superior e inferior de estos elementos se volverán curvas, aunque una sección plana seguirá plana.

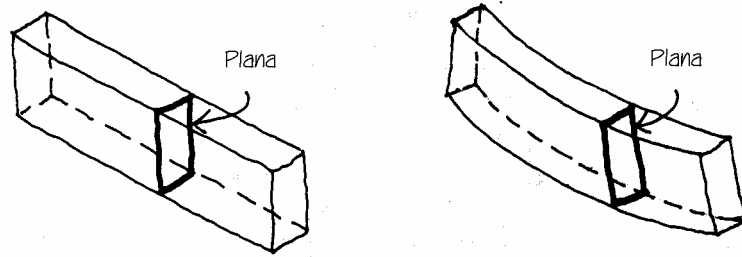


Ilustración III.29

La máxima compresión está en la parte de arriba de la rebanada, la máxima tracción está en la parte de abajo de la rebanada, y en CD, el eje en que cambian de signo las tensiones, no hay ni tracción ni compresión. Utilizando esta información podemos dibujar el diagrama de distribución de tensiones de una sección de la viga en vista lateral.

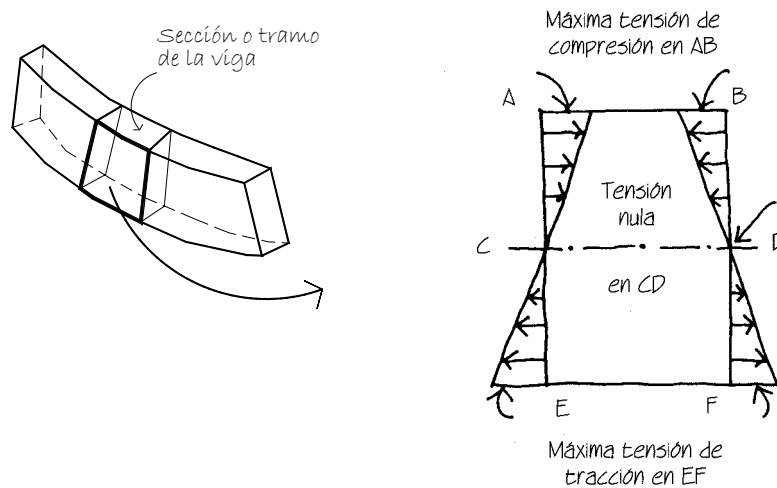


Ilustración III.30

Si además suponemos que estas tensiones producidas por el momento flector no varían en el ancho de la viga, podemos dibujar el diagrama de la distribución de tensiones en tres dimensiones.

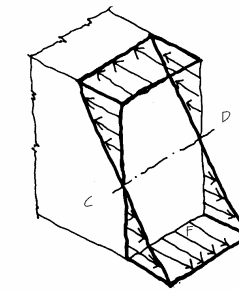


Ilustración III.31

Esta distribución de tensiones basada en la elasticidad lineal y en que las secciones se mantienen planas se utiliza abundantemente en Ingeniería Estructural. Se puede analizar como dividida en dos partes una distribución triangular de tensiones de compresión, y una distribución triangular de tensiones de tracción.

Los tres aspectos que hemos estudiado de la viga se pueden ligar de forma lógica con los conceptos que hemos ido examinando; realmente hemos dado tres pasos:

Paso 1. Liga el concepto del momento solicitando la viga con el de las secciones planas manteniéndose planas y el de los lados de la rebanada girando.

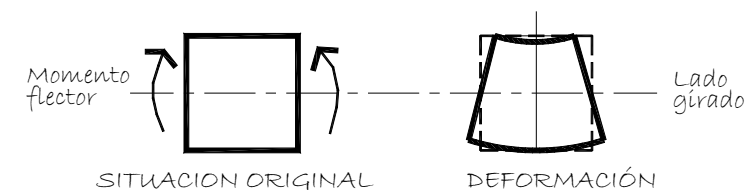


Ilustración III.32

Paso 2. Liga la deformación de la rebanada producida por el giro de los lados con las ideas de elasticidad lineal y distribución de tensiones.

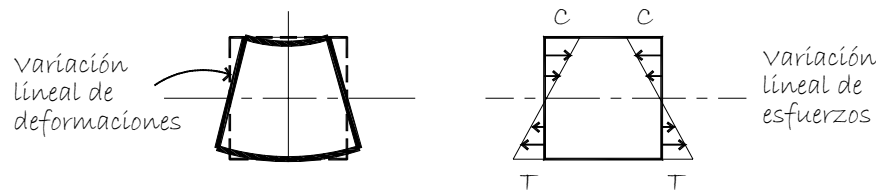


Ilustración III.33

Paso 3. Aquí utilizamos el concepto de que si un esfuerzo produce una distribución de tensiones, entonces donde hay una distribución de tensiones debe aparecer un esfuerzo que es la resultante de esas tensiones y esta resultante debe aparecer en el centro de gravedad de la distribución de tensiones.

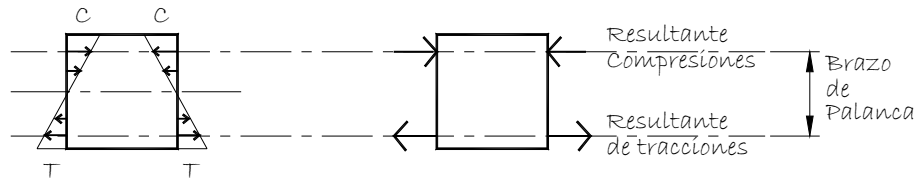


Ilustración III.34

En esta figura llamamos a la distancia entre la "resultante de compresiones" y la "resultante de tracciones", brazo de palanca. Recordando que un momento es el producto de la fuerza por la distancia, las resultantes de tracción y compresión "producen" el momento flector. Aquí, de una manera un tanto desconcertante, la fuerza puede ser a la vez la resultante de tracciones o de compresiones y la distancia es el brazo de palanca.

La primera conclusión es:

- La magnitud de la resultante de compresiones debe ser igual a la magnitud de la resultante de tracciones.

En segundo lugar, para que exista equilibrio el momento debe ser igual al producto de la fuerza por la distancia.

La segunda conclusión es:

- La magnitud del producto de la resultante de compresiones por el brazo de palanca debe ser igual a la magnitud del producto de la resultante de tracciones por el brazo de palanca, que a su vez debe ser igual al momento flector.

El valor del momento flector está "definido" por la posición del elemento estructural en el recorrido de cargas y el valor de las cargas que el recorrido de cargas debe transferir. Por lo tanto, podemos deducir de la segunda conclusión que si hacemos mayor el brazo de palanca la resultante de compresiones (o de tracciones) se hará más pequeña y viceversa.

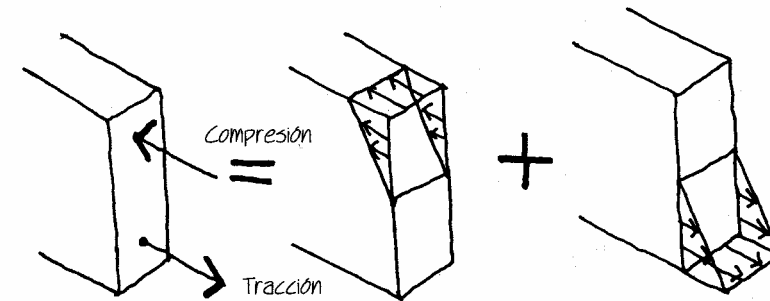


Ilustración III.35

Todos los esfuerzos de compresión (fuerza por unidad de superficie) en la parte superior de la viga deben sumar la resultante de compresiones, y todas las tensiones de tracción en la parte inferior de la viga deben sumar la resultante de tracciones. Variando el canto y por tanto el brazo de palanca, el valor de las resultantes de tracción y compresión puede ser alterado, lo que significa que el valor de las

tensiones puede ser alterado. Esto sólo es cierto si el ancho no se altera. El valor de las tensiones puede también ser alterado variando el ancho porque éste altera el área. Por lo tanto el valor de las tensiones puede ser alterado variando el canto o el ancho.

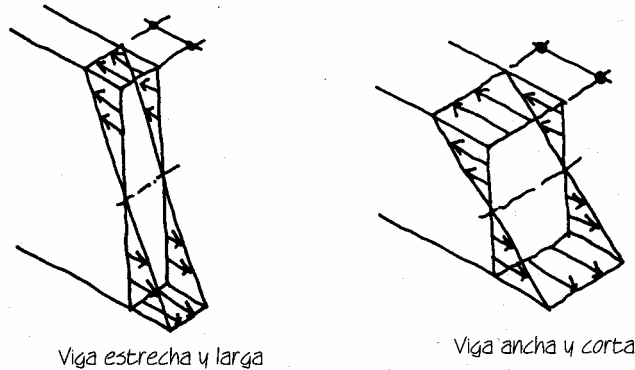


Ilustración III.36

A diferencia de los elementos cargados con esfuerzos normales, que tienen la misma tensión en toda la sección, las vigas solicitadas por momentos tienen tensiones variables con un valor máximo arriba y abajo. Como todos los materiales estructurales tienen un valor máximo utilizable de la tensión, las vigas rectangulares y macizas (vigas de concreto reforzado) como la de la Ilustración III.36 están infra-tensionadas en toda la sección excepto en las partes superior e inferior.<sup>5</sup>

Una de las metas del diseño estructural es conseguir que todas las partes de la estructura estén tensionadas con el valor máximo utilizable del material que se está usando. Es una meta interesante salvo que nos conduzca a estructuras de geometría que son costosas de construir.

<sup>5</sup> Por esta razón, las secciones WF son muy eficientes debido a que la compresión máxima y la tensión máxima son absorbidas por el patín y el alma absorbe el esfuerzo de cortante. Para más información véase la página 56.

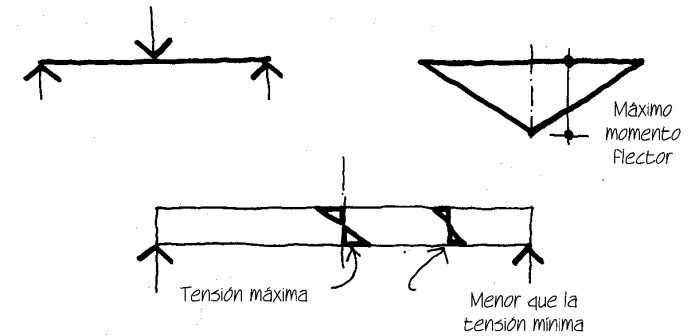


Ilustración III.37

No sólo puede ser desperdiciado el material a lo largo del canto de la viga, sino que también puede ser desperdiciado a lo largo de su longitud.

Supongamos una viga de sección rectangular y canto constante; que soporta una carga puntual en un vano. El valor del momento flector varía a lo largo de la viga.

En esta estructura tan sencilla la tensión máxima aparece sólo en un sitio, donde el momento flector es un máximo. Prácticamente todo el resto de la viga tiene tensiones de flexión menores del máximo. Esto contrasta fuertemente con el comportamiento del pilar cargado en punta. En éste la totalidad de la sección, y a lo largo de toda su longitud, trabaja con la tensión máxima y por lo tanto no se desperdicia en ningún punto del material estructural.

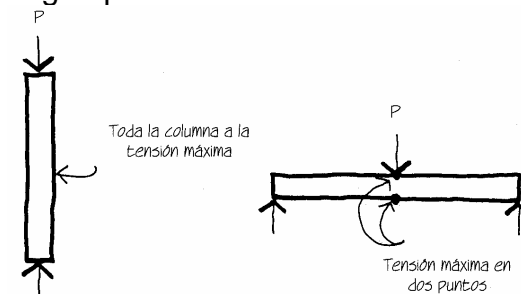


Figura c.38

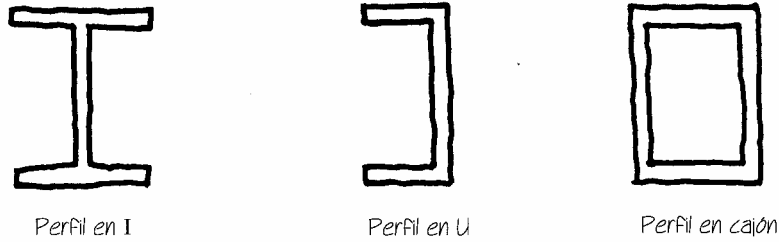


Ilustración III.39

La economía en estos detalles dependerá del material estructural que se utilice ya que cada material tiene un método de construcción distinto, sin embargo, el uso de acero puede significar un ahorro en costo o velocidad de construcción, por ejemplo, se pueden usar otras formas como tubos redondos, vigas WF, canales o angulares.

Para entender por qué las secciones de la Ilustración III.39 son "eficientes a flexión" podemos comparar el funcionamiento de una sección en ' WF ' con otra en ' + ' que tenga el mismo canto y la misma área.

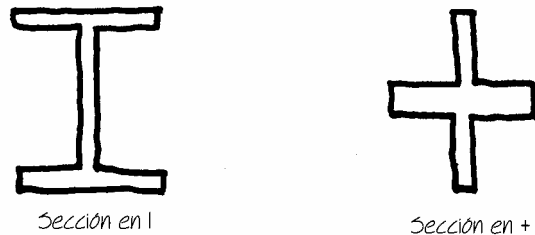


Ilustración III.40

Como las secciones planas se mantienen planas después de la deformación, si suponemos que las dos secciones tienen la misma tensión máxima utilizable, el alzado lateral de las dos distribuciones de tensiones será igual a la Ilustración III.41 para las dos secciones.

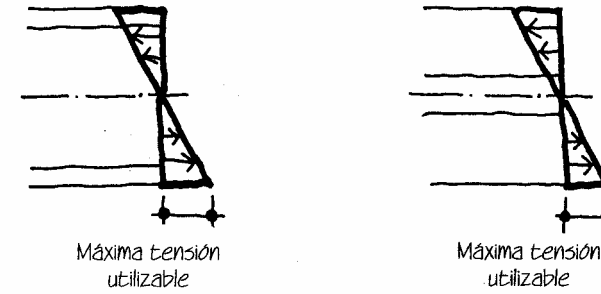


Ilustración III.41

Sin embargo, si se dibuja un diagrama tridimensional como el de la Ilustración III.42 para las dos secciones, aparecen diferencias drásticas entre los dos diagramas. En los dos casos se presenta la compresión máxima y la tensión máxima en el extremo superior e inferior de la sección, sin embargo la sección WF distribuye los esfuerzos de manera más eficiente que la sección +.

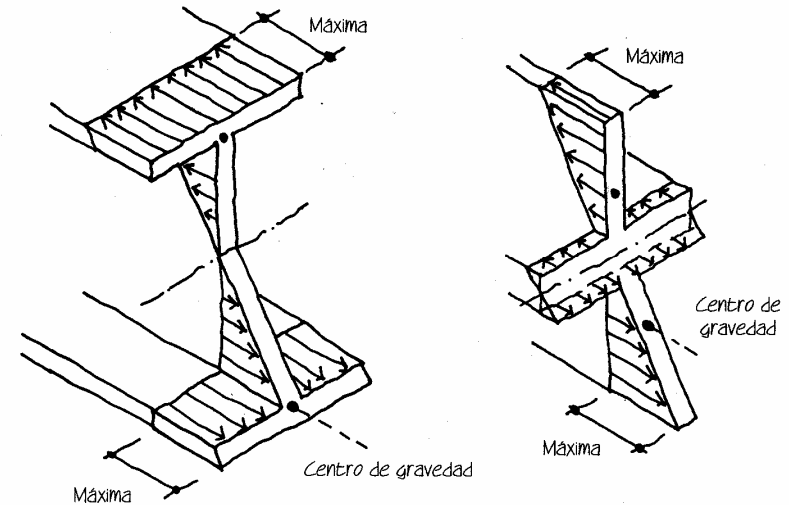


Ilustración III.42



El máximo momento flector que una viga con una determinada sección puede soportar viene dado por:

*El producto de la resultante de compresiones por el brazo de la palanca.*

Si elegimos secciones eficientes conseguimos utilizar más material trabajando a la tensión máxima utilizable, o con valores próximos a ésta. Pero como el valor del momento flector varía a lo largo de la longitud de la viga, podemos conseguir tensiones máximas en puntos de la viga que no sean el de máximo momento, reduciendo a lo largo de la viga el ancho o el canto de la viga.

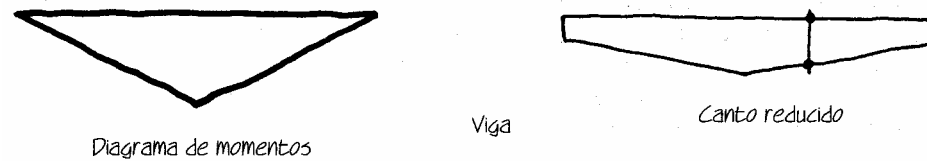


Ilustración III.43

Si reducimos el canto, reducimos el brazo de palanca de forma que las resultantes de compresiones y de tracciones sean mayores cuando el momento es más pequeño. Si reducimos el ancho reducimos el área de tensiones para las resultantes de tracción y compresión y por tanto aumentamos las tensiones.

Construir una viga con una sección en ' WF ' en la que variamos el canto o el ancho a lo largo de su longitud para mantener las tensiones de flexión altas allí donde el valor del momento flector se reduce, permite una utilización mucho más eficiente del material que la que conseguiríamos utilizando una sección rectangular maciza con canto y ancho constantes en concreto.

Este es el principio que usamos cuando diseñamos marcos en naves industriales a 2 aguas.

Tomemos como ejemplo el siguiente marco rígido cuyos puntos de apoyo están articulados. El momento en cualquier punto en el marco está determinado por la diferencia de este con la forma óptima de un arco (una parábola en este caso). Mientras más lejos se encuentren los puntos de la parábola con el marco, mayor será el momento y más peraltados serán las secciones. Donde la parábola se interseccione con el marco el momento será 0, debido a esto podemos utilizar uniones articuladas, sin embargo, es conveniente utilizar platinas gruesas como apoyos.

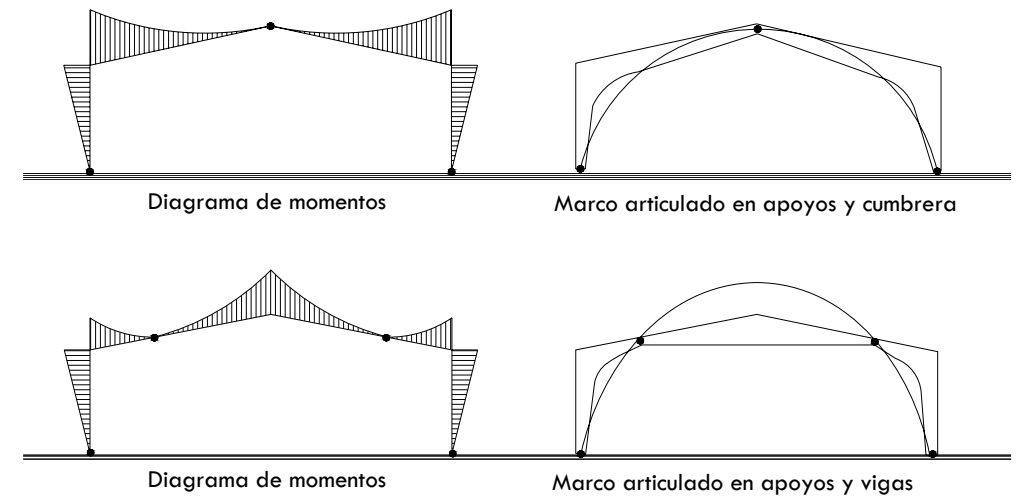


Ilustración III.44

### v.- Esfuerzos Normales Excéntricos

Por otro lado, los esfuerzos normales pueden actuar excéntricamente. Si un elemento estructural soporta a la vez un esfuerzo normal y un momento, podemos estudiarlo también como si soportase un solo esfuerzo normal desplazado una distancia  $e$  del centro de gravedad de las tensiones uniformes. A la inversa, si se aplica una carga en un elemento estructural en un punto excéntrico del centro de gravedad, esto puede ser considerado como

equivalente a que la estructura sufre una carga, más un momento. Esto nos da una relación muy sencilla entre esfuerzo normal y momento:

*Momento Flector = Esfuerzo normal por excentricidad.*

O:

*Excentricidad = Momento flector dividido por esfuerzo normal.*

Supongamos que una viga se apoya en un muro como en la Ilustración III.45. Para que el muro tenga sólo tensiones normales uniformes debidas a la reacción de la viga, ésta debe apoyarse exactamente en el centro de gravedad de las tensiones uniformes.

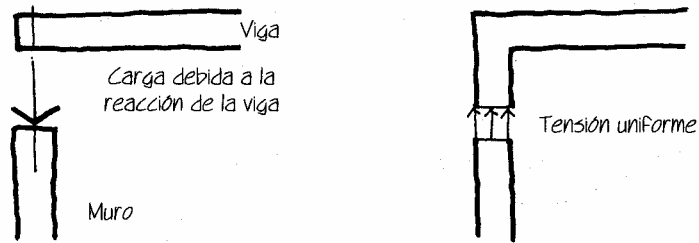


Ilustración III.45

Esto es normalmente imposible en una estructura real a no ser que se tomen medidas muy precisas para que ocurra. Por lo tanto, la reacción de la viga estará aplicada en el muro con alguna excentricidad. Es decir, el muro está cargado con una carga axial y un momento flector.

En la Ilustración III.46, la excentricidad está dentro del espesor del muro, pero esto puede no ser siempre el caso. ¿Qué ocurre en la base del muro de un jardín, o de cualquier otro muro aislado, cuando sopla el viento? La carga axial está producida por el peso propio del muro y el momento está producido por el viento soplando en dirección horizontal sobre el muro.

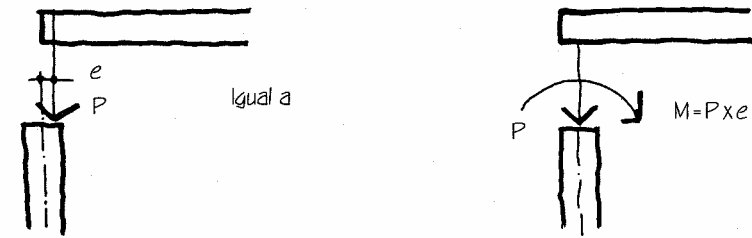


Ilustración III.46

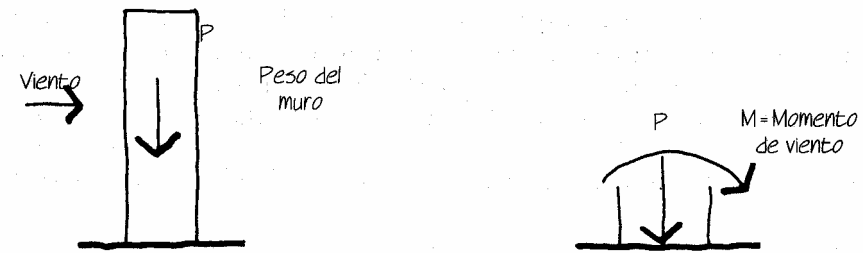


Ilustración III.47

Aquí la excentricidad puede tener cualquier valor dependiendo de los valores relativos del esfuerzo normal producido por el peso del muro y del momento producido por el viento.

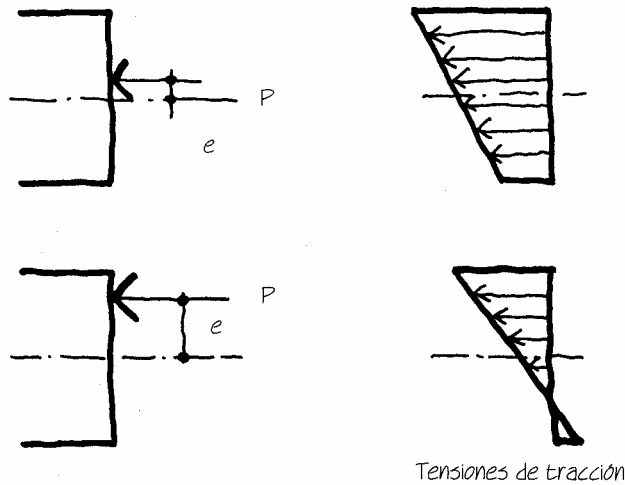


Ilustración III.48

En secciones rectangulares, si queremos que en la sección sólo existan esfuerzos de compresión, la excentricidad debe estar dentro del tercio medio de la sección.

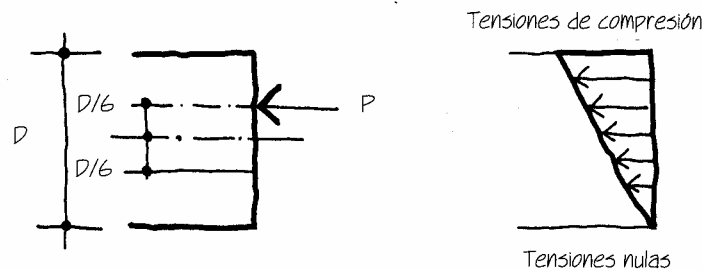


Ilustración III.49

Esto tiene consecuencias muy importantes en estructuras formadas por materiales que no pueden soportar tensiones de tracción significativas, como la mampostería, la piedra y el hormigón armado. En estructuras formadas por esos materiales los esfuerzos normales deben ser "mantenidos" dentro de la parte central de la sección o de

lo contrario ésta se fisurará o colapsará. Por eso las chimeneas o los muros de ladrillo vuelcan algunas veces con vientos fuertes.

Esta forma de combinar tensiones permite comprobar fácilmente si las tensiones están por debajo de la tensión admisible del material. Esto significa que en todas las partes del recorrido de cargas puede comprobarse si el elemento estructural es lo suficientemente fuerte, lo que es muy importante para el diseño de estructuras.

#### vi.- Efecto de la forma de la sección.

Si aplicamos una carga simétrica a los siguientes perfiles tendremos que mientras el perfil WF no presenta torsión, la sección C intenta torcionar, la razón se debe a que la sección no es simétrica respecto a un eje vertical.

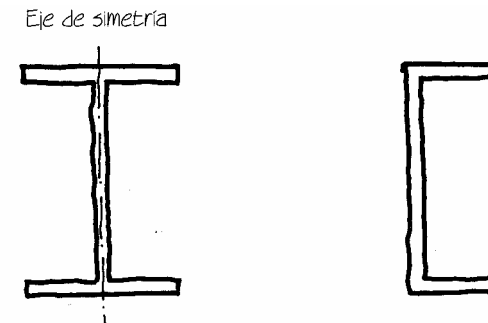


Ilustración III.50

De forma general, el efecto de la forma de la sección del elemento estructural actúa junto al tipo de carga para producir distintos tipos de comportamiento estructural. Este comportamiento estructural puede llegar a ser extremadamente complicado para elementos de forma cualquiera. Lo importante es saber que produce un comportamiento simple o complejo.

En elementos con carga axial, para que todos sus puntos tengan la misma tensión, es decir, tengan distribución uniforme de tensiones, debe ser aplicada la carga en un punto determinado. A este punto se le ha llamado centro de gravedad de la sección o centro de áreas.

Este punto es aquel en que se equilibra la distribución uniforme de tensiones. Para aclarar este concepto imaginemos una plataforma en forma de T que soporta un grupo de personas del mismo peso espaciada uniformemente en su superficie.

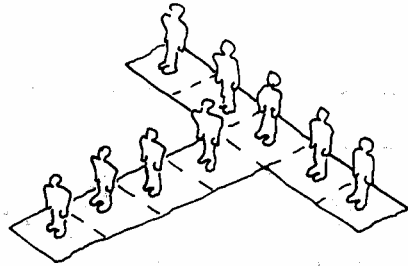


Ilustración III.51

Se supone que ese grupo representa una distribución uniforme de tensiones. Pero ¿dónde está el punto de equilibrio? Al contrario de lo que ocurría con el columpio, este punto debe encontrarse en dos dimensiones. Se pueden dibujar dos diagramas: uno a lo largo de la T, otro a través de ella.

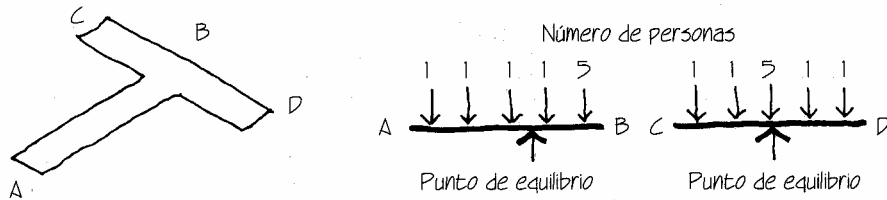


Ilustración III.52

En la dirección AB el punto de equilibrio estará más cerca de B que de A, pero en la dirección CD la carga es simétrica, por lo que el punto de equilibrio está en el punto medio entre C y D. Los puntos de equilibrios son en realidad líneas y el centro de áreas es el punto de intersección de esas líneas. (Ilustración III.85)

Si la carga axial se aplica en el centro de áreas, se producirá una distribución uniforme de tensiones. Si se utiliza otra forma de sección (o plataforma) el centro de áreas, se desplazará. Las líneas de equilibrio deben coincidir con los ejes de simetría, por lo que en

secciones con dos ejes de simetría el centro de áreas debe estar en la intersección de los dos ejes. (Véase Ilustración III.55)

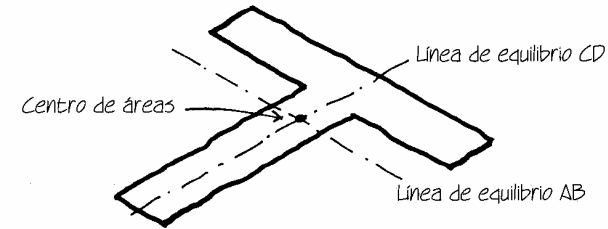
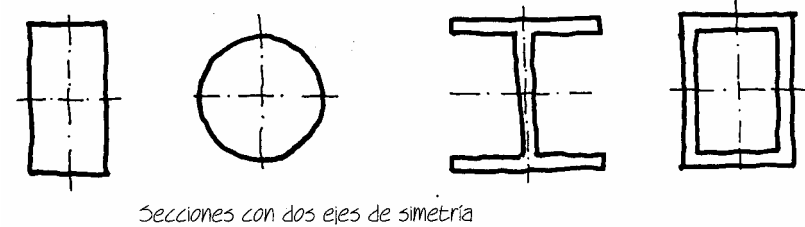
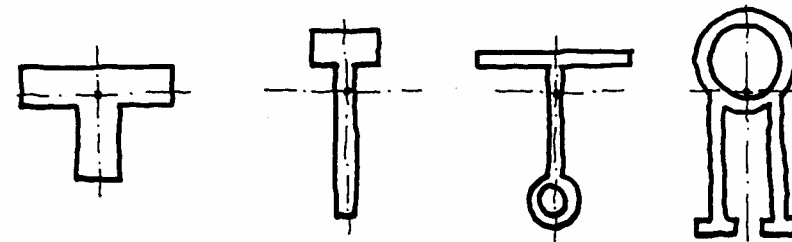


Ilustración III.53



Secciones con dos ejes de simetría

Ilustración III.54



Secciones con sólo un eje de simetría

Ilustración III.55

Y si no hay ejes de simetría el centro de áreas sólo puede obtenerse basándose en cálculos.<sup>6</sup>

<sup>6</sup> Para las propiedades físicas de las formas tradicionales de aceros, El "Manual of Steel Construction. Allowable Stress Design. Ninth Edition," contiene entre otras características esta información.

**vii.- Estructuras mixtas en acero**

Aunque el hormigón armado es la construcción mixta más usada, también se pueden combinar perfiles laminados de acero y hormigón armado para formar elementos estructurales. Este tipo de construcción se usa frecuentemente en vigas donde la estructura de piso, un elemento estructural de hormigón de dos dimensiones, se usa como parte de las vigas principales.

Para conseguir que trabajen conjuntamente, la losa se une con la parte superior de las vigas por lo que se conoce como conectores o *Nelson Stud*. Estas piezas son de acero, tienen frecuentemente forma de clavija y están soldadas a la parte superior de la viga.

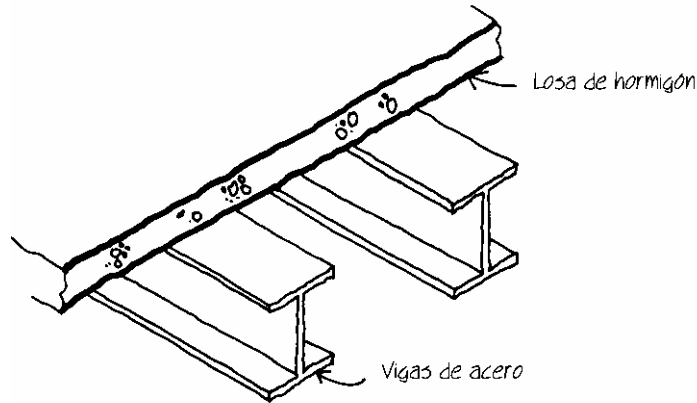


Ilustración III.56

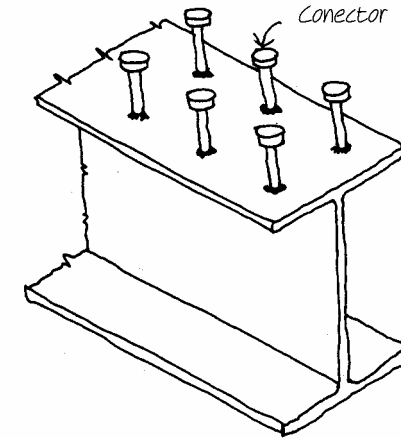


Ilustración III.57  
Conectores o *Nelson Stud* en una Viga

El hormigón se vierte alrededor de los conectores y éstos impiden que la losa y la parte de la viga tengan entre sí movimientos relativos. Esto permite que aparezcan tensiones tangenciales y esfuerzos rasantes entre la losa y la viga.

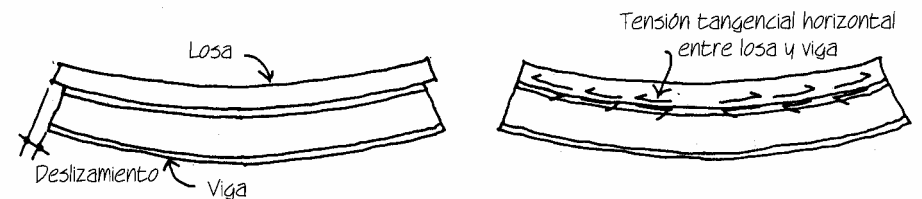


Ilustración III.58

Ahora la estructura de piso es la viga y la losa de hormigón. Añadiendo los conectores transformamos la losa en parte del ala de la viga que trabaja a compresión.

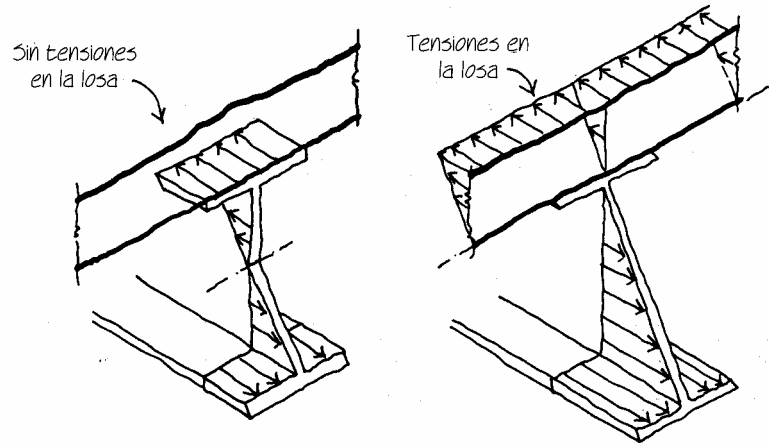


Ilustración III.59

### viii.- Resumen

En esta sección hemos visto cómo trabajan los elementos estructurales cuando forman parte de un recorrido de cargas. Hemos definido este comportamiento por la distribución de tensiones en cada punto del elemento. Estas tensiones están producidas por los esfuerzos internos, de normal, momento y cortante.

Parte del arte de diseñar estructuras es saber predecir la distribución de tensiones en cada elemento cuando trabaja como parte de un recorrido (o recorridos) de cargas. La exactitud de esa predicción debe variar dependiendo de la etapa del proceso de diseño en el que nos encontremos. Por ejemplo, puede no ser necesario conocer las

***Lo que es importante es comprender que el diseño de estructuras no es el resultado de un proceso lógico, sino el de un conocimiento imaginativo.***

**(“Estructuras de Edificación”, Malcom Millais.)**

dimensiones exactas de los elementos en las etapas preliminares. Sin embargo, debe estar claro que los tipos de elementos proyectados, láminas, placas, vigas en I, etc., deben efectivamente trabajar como una parte del recorrido de cargas. Esto se aclara si las distribuciones de tensiones se conocen en principio. Por ejemplo, si se utilizan muros de carga en niveles distintos y se cruzan entre sí, puede ocurrir que no trabaje todo el muro (ver Ilustración III.30.)

*Lo que es importante es comprender que el diseño de estructuras no es el resultado de un proceso lógico, sino el de un conocimiento imaginativo.* Para que este conocimiento dé buenos resultados, debe ser capaz de descubrir cómo se va a comportar la estructura proyectada.

### E.- SEGURIDAD Y ROTURA EN LAS ESTRUCTURAS DE ACERO.

El objetivo principal del diseño de estructuras, es que éstas sean resistentes y seguras. Esto parece sencillo, sin embargo, tiene dificultades que si no son resueltas existe la posibilidad de rotura.

#### i. Conceptos básicos de seguridad

Cuando diseñamos un edificio con fines industriales, de oficinas o hasta una vivienda unifamiliar, no sólo estamos dispuestos a resolver su necesidad espacial, sino que estamos preocupados por el tipo de estructura que tendrá. Necesitamos estructuras que sean seguras y que sea prácticamente desconocido la pérdida de vidas humanas debido a ellas. Para resolver estas cuestiones es útil el análisis estadístico.

Para obtener resultados, necesitamos conocer y hasta cierto grado controlar el uso que tendrá la edificación.

Otras cargas importantes están fuera de nuestro control, por ejemplo la lluvia o el viento. Estas cargas nunca podrán ser “conocidas”, pero las podemos estimar mediante el análisis estadístico de los hechos pasados.<sup>7</sup>

Llevar a cabo estos estudios es una tarea de gran envergadura. En nuestro país generalmente tomamos el Código de San Francisco para casos de terremotos, las normas ACI y los códigos de aceros publicados por el AISC, otros datos necesarios se pueden conseguir ya normalizados.

La idea de dimensionar la estructura puede ser definida como algo que liga las cargas previstas que va a soportar la estructura con la resistencia de la estructura y el coeficiente de seguridad.

Esto puede realizarse de tres formas:

- Dimensionado elástico (o con tensión admisible.)
- Dimensionado en rotura (o plástico.)
- Dimensionado por estados límite.

Básicamente estos tres métodos implican encontrar un criterio de dimensionado<sup>8</sup>.

<sup>7</sup> El primer paso es trazar un histograma de datos (para fenómenos naturales el recuento mínimo de datos es sobre un período de 20 años). Luego transformamos las líneas quebradas del histograma en una línea curva uniendo el punto medio de cada escalón, esta función matemática se llama: densidad probabilística. A partir de la densidad probabilística se puede obtener la media y la desviación típica. Sumando o restando la desviación típica a la media estadística, se puede encontrar una relación entre la media, un cierto número de desviaciones típicas y un porcentaje de población.

Este tipo de análisis se puede utilizar para decidir que cargas debe transportar una estructura y lo resistente que debe ser. Este es el método usado para analizar la capacidad de carga de los blocks de construcción.

<sup>8</sup> Si se desea mayor información puede consultarse el libro Estructuras de Edificación por Malcom Millais, © 1997, Celeste Ediciones, S. A.

## ii. Tipos de colapsos de estructuras

Para que las estructuras colapsen bajo una carga, deben transformarse en mecanismos. Es decir, la estructura se mueve produciendo un gran desplazamiento antes de terminar descansando en un estado de colapso. Por ejemplo, si un marco tiene cuatro articulaciones y se le somete a una carga horizontal, las articulaciones empezarán a girar y la estructura empezará a colapsar desplazándose a un lado. Cuando el marco haya colapsado dejará de ser un mecanismo porque ya no puede seguir desplazándose.

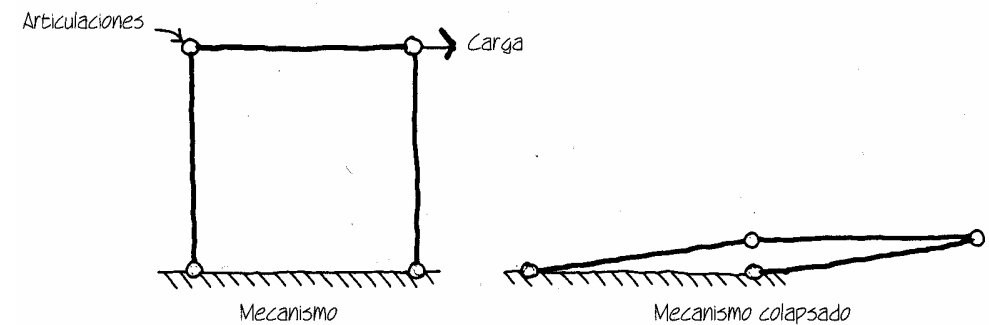


Ilustración III.60

En este ejemplo, el marco de cuatro articulaciones no es una estructura sino un mecanismo. Para que las estructuras colapsen deben transformarse en mecanismos. Esto puede ocurrir de forma brusca o gradualmente. El colapso súbito puede compararse con la rotura brusca de los materiales frágiles y el colapso gradual con la fase plástica de los materiales elástico-plásticos.

Un colapso brusco puede aparecer debido a dos razones:

- *El material estructural es frágil.*
- *La estructura pierde su estabilidad global.*

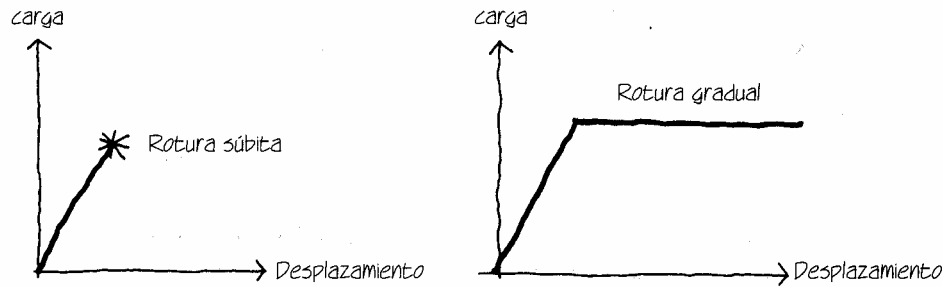


Ilustración III.61

Los materiales dúctiles como el acero pueden volverse frágiles; esto puede ocurrir debido aun alto número de procesos de carga y descarga repetidos o a sobrecargas altas actuando con temperaturas bajas. Se evitan estos problemas predeterminando estos comportamientos estructurales.

### iii. Comportamiento plástico

Para que las estructuras colapsen "gradualmente", deben comportarse plásticamente en algún punto del recorrido de cargas, y este comportamiento plástico es el que hará que la estructura se transforme en un mecanismo. Para darnos cuenta de cómo ocurre esto, podemos estudiar otra vez una viga.

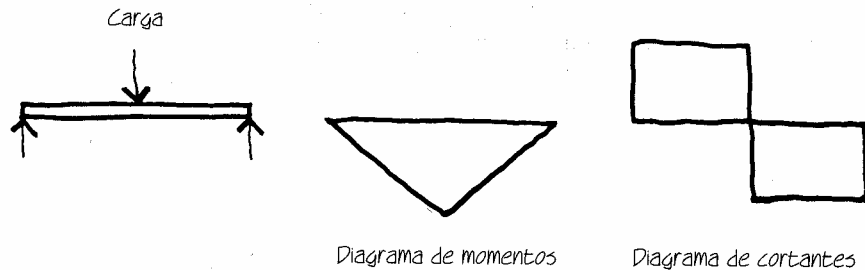


Ilustración III.62

Hemos visto que hay dos puntos de tensión máxima en las caras superior e inferior de la viga y en el punto de momento máximo.

A medida que se aumenta la carga de la viga la tensión en esos puntos alcanzará la máxima tensión elástica y se le suele llamar *límite elástico*.

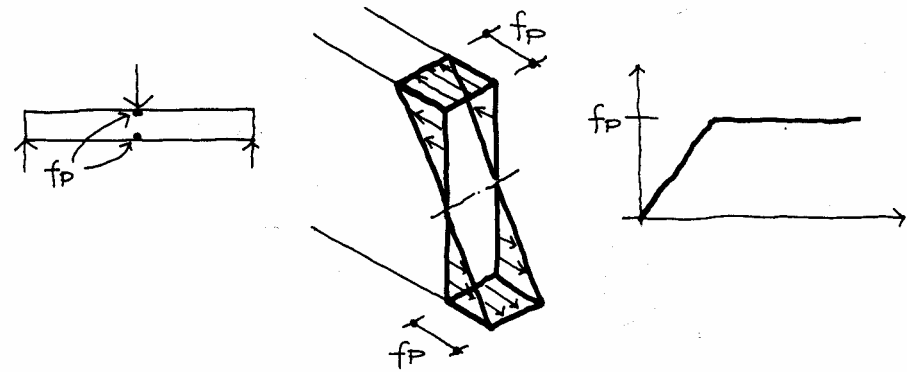


Ilustración III.63

La tensión  $f_p$  (fuerza por unidad de superficie) es la tensión a partir de la cual el material empieza a comportarse plásticamente. A medida que se aumenta la carga el punto se transforma en una zona de tensiones plásticas. Esta zona aparece cuando los puntos adyacentes al punto de tensiones máximas de la viga llegan al límite elástico y se vuelven plásticos.

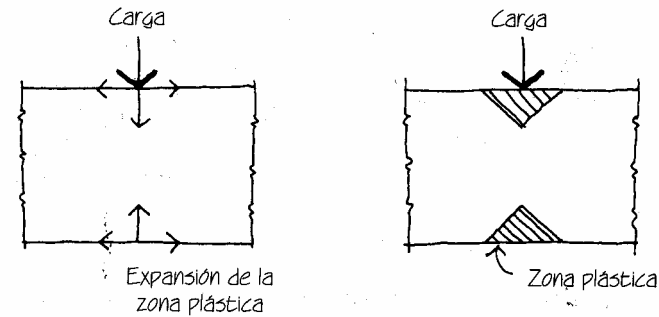


Ilustración III.64

Como la tensión no puede ser mayor que el límite elástico, la distribución de tensiones en la zona plástica se vuelve distinta de la que aparece en la Ilustración III.36.



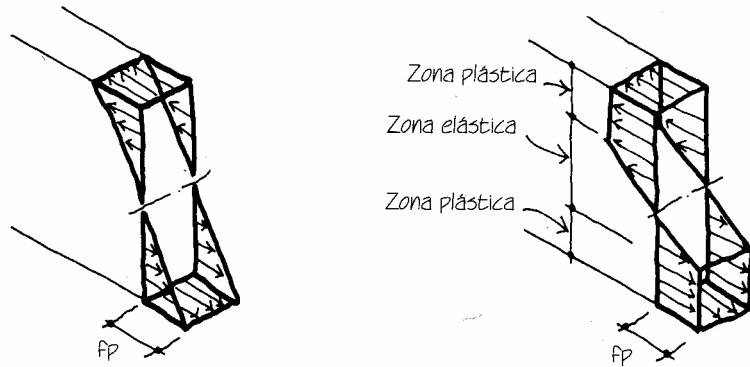


Ilustración III.65

A medida que aumentamos la carga, aumenta la profundidad de la zona plástica, hasta que la viga alcanza la plastificación total.

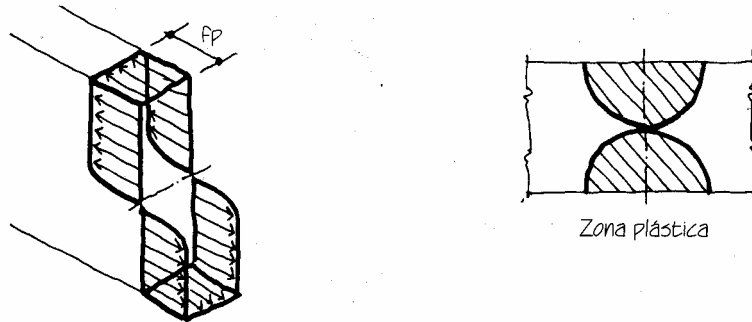


Ilustración III.66

Cuando se alcanza la plastificación completa la viga ya no puede ser cargada más y se forma una rótula plástica. La viga colapsa gradualmente y se transforma en un mecanismo que gira alrededor de la rótula plástica.<sup>9</sup>

<sup>9</sup> Esto nos ayuda a comprender dónde se hace necesario reforzar una viga, cuando se cambia el uso del espacio (por ejemplo: las remodelaciones).

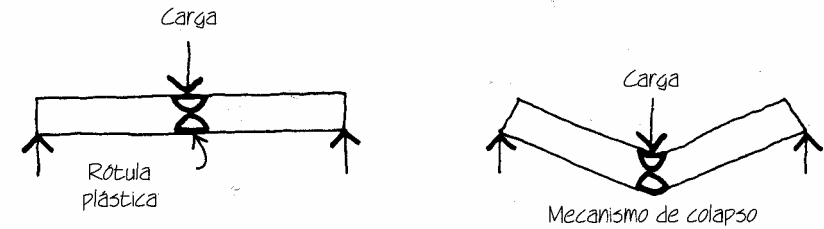


Ilustración III.67

Al momento que aparece en la rótula plástica se le llama *momento plástico*. La relación entre el momento elástico,  $M_e$ , es decir, el momento elástico cuyas dos tensiones máximas son el límite elástico y el momento plástico,  $M_p$ , varía con la forma de la sección.

Lo que ha ocurrido es que un fallo local en un elemento del recorrido de cargas ha transformado la estructura en un mecanismo plástico. La predicción de este mecanismo plástico es la base del método de cálculo en rotura. En una viga aislada el comportamiento elástico permite predecir directamente cómo se formará el mecanismo plástico.

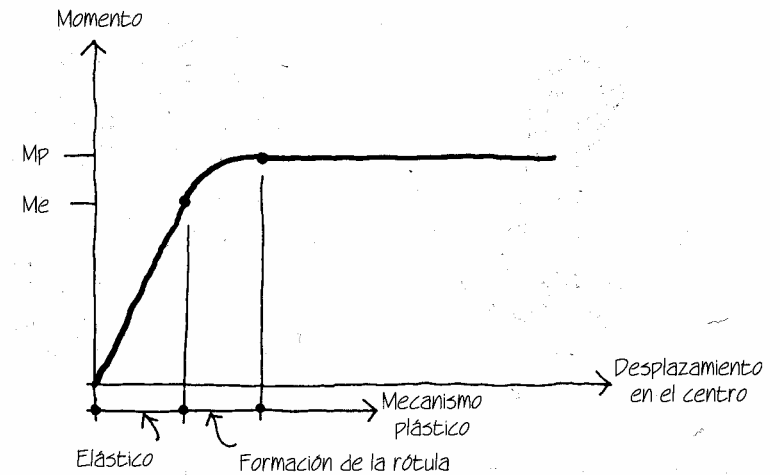


Ilustración III.68

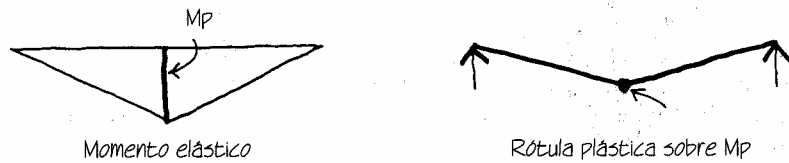


Ilustración III.69

En estructuras ligeramente más complicadas, como una viga de dos vanos, la formación de una sola rótula plástica no transforma la estructura en un mecanismo. En este caso la primera rótula plástica se forma en el soporte central, pero la estructura todavía no es un mecanismo.

#### iv. Inestabilidad por pandeo

Cuando un elemento estructural unidimensional y recto se carga aplicando dos fuerzas en sus extremos, o bien se alarga o bien se aplasta. Si el material es linealmente elástico / perfectamente plástico, el elemento se deforma elásticamente a medida que se aumenta la carga, hasta que se alcanza el límite elástico. El elemento se vuelve íntegramente plástico y se deforma sin límite bajo la carga de colapso. Como la distribución de tensiones normales bajo carga axial se supone que es uniforme, toda la sección se vuelve plástica bajo la carga de colapso.

El elemento se rompe con la carga de colapso por un alargamiento o aplastamiento "sin fin". Esto es siempre cierto en los elementos a tracción, pero en los elementos a compresión sólo es cierto para un cierto tipo de elementos. Esto ocurre porque en los elementos comprimidos pueden aparecer una pérdida de la estabilidad global producida por su propio peso. Imaginemos dos pilares de la misma sección, el mismo material y uno de ellos "corto" (grosso) y el otro "largo" (esbelto). Lo que les diferencia en su longitud, y esto no alterará el valor de su carga de colapso  $P_p$  (Ilustración III.122), ya que los dos resisten las cargas axiales con una distribución de

tensiones uniforme. Como la sección y el material son los mismos en los dos pilares, se volverán "plásticos" bajo la misma carga.

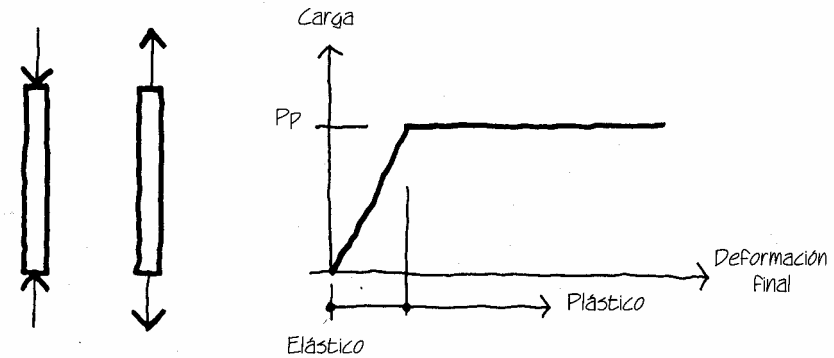


Ilustración III.70

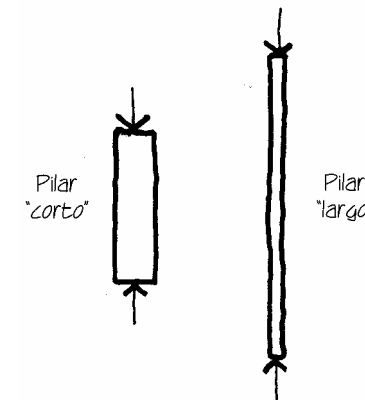


Ilustración III.71

Si hacemos un sencillo experimento con una chapa esbelta a la que comprimimos con una carga, nos daremos cuenta de que a medida que aumentamos la carga la chapa empieza a flectar, es decir, empieza a trabajar a flexión.

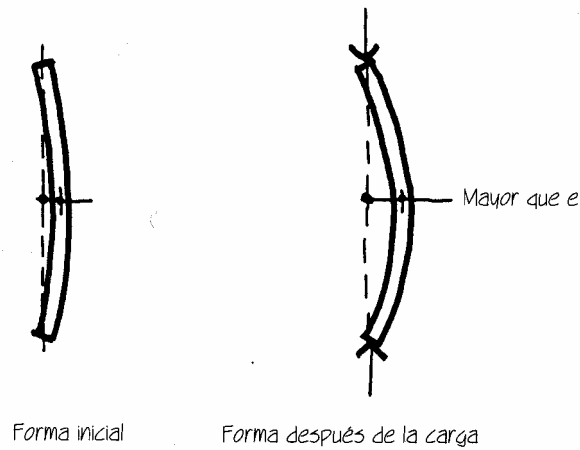


Ilustración III.72

En el caso de una carga excéntrica como la de la Ilustración III.64, la excentricidad  $e$  se mantiene constante por mucho que se aumente la carga axial  $P$ , y se cumple la teoría de ingeniería. En una columna imperfecta, a medida que la carga axial aumenta la dimensión  $e$  aumenta y por tanto el momento  $M = P \times e$  también aumenta: Si hubiésemos utilizado la teoría de ingeniería para calcular la columna, el momento flector que soporta la columna sería siempre  $P \times e$ , donde  $e$  es la imperfección inicial. A medida que aumenta la carga axial se ignora el aumento de  $e$  y el momento aumentaría en proporción directa a la carga.

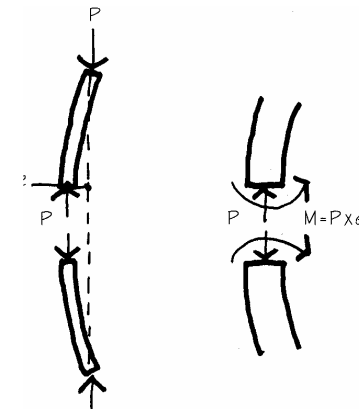


Ilustración III.73

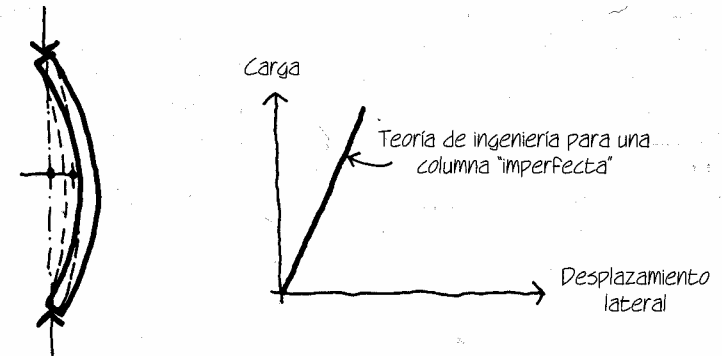


Ilustración III.74

Si tenemos en cuenta el efecto del aumento de  $e$  a medida que la carga se incrementa, el comportamiento carga / desplazamiento no está representado por una recta, sino por una curva. A medida que la carga axial alcanza el valor de la carga de pandeo de Euler ( $F_E$ , la carga crítica), la curva se confunde con la línea horizontal de la Ilustración III.125.

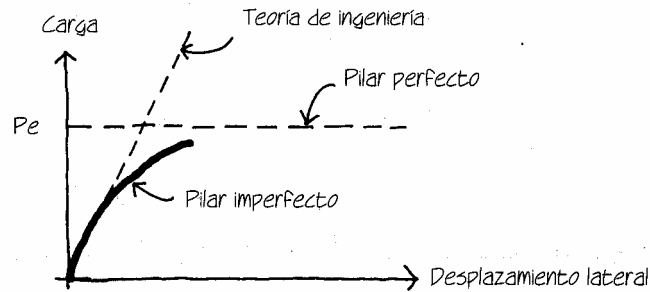


Ilustración III.75

La esbeltez de un pilar depende de su longitud, del material estructural y de la forma de la sección. Como el efecto que produce el pandeo es un momento flector, cuanto mejor comportamiento tenga el pilar a flexión menos esbelto será. A diferencia de la viga que trabaja en la dirección de la carga, un pilar puede pandear en cualquier dirección, por lo tanto los pilares que resisten bien la flexión en cualquier dirección son los menos esbeltos. Por la misma razón que preferimos la sección en I a la sección en + en las vigas, los pilares con sección tubular circular son los menos esbeltos y los que tienen sección en + los más esbeltos. Los ingenieros del siglo XIX no tuvieron esto en cuenta, porque usaron con frecuencia secciones en +. A medida que el pilar se hace más esbelto, se reduce la carga crítica PE.

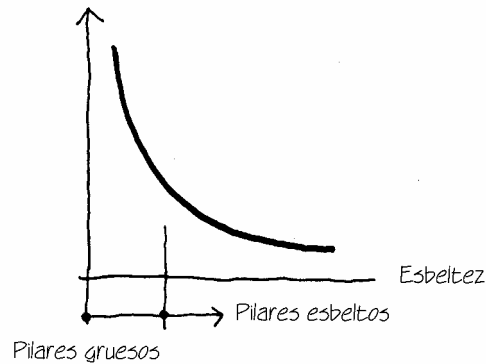


Ilustración III.76

En esta figura aparece el punto del eje de esbelteces donde el pilar pasa de ser grueso a ser esbelto. En una columna gruesa se puede ignorar el efecto del pandeo y se puede utilizar la teoría de ingeniería para predecir su comportamiento. Como se explicará más adelante, esta distinción se puede hacer porque las columnas gruesas rompen con cargas muy por debajo de su carga crítica. Los pilares que pueden trabajar como voladizos y los que tienen en su longitud una reacción al movimiento lateral tienen deformadas (por pandeos distintos como se puede ver en el pilar de la Ilustración III.93.

En el voladizo la esbeltez se calculará con una longitud  $2H$ , mientras que el pilar con coacciones en tres puntos se calcula con una longitud de  $H/3$ , seis veces menor.<sup>10</sup>

Por lo tanto, dependiendo de cómo esté unida la columna al resto, puede ser gruesa o esbelta. Para estar seguros de que se sigue la

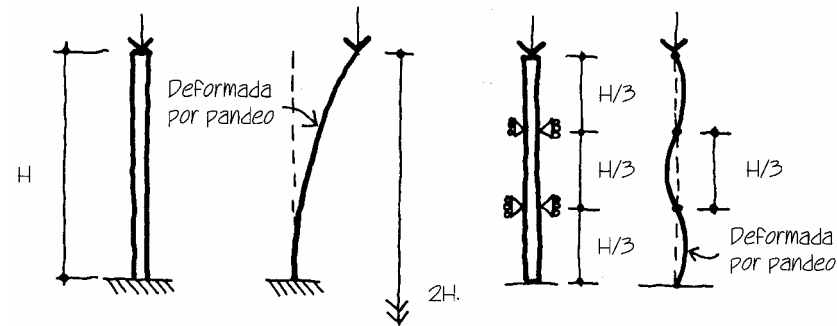


Ilustración III.77

teoría apropiada deben ser respondidas las siguientes preguntas para todas las partes de las estructuras que están comprimidas:

- ¿Cuál es la deformada por pandeo?
- ¿La estructura es esbelta?

<sup>10</sup> Debido a esto, es común diseñar elementos utilizando elementos como arriostres.

Y, como ocurre con muchas de las cuestiones de ingeniería, éstas son más fáciles de plantear que de responder.

Cuando se utilizan secciones eficaces a flexión, las alas y el alma que están sometidas a flexión pueden tener una deformación por pandeo en parte del elemento; a este fenómeno se le suele llamar pandeo local.

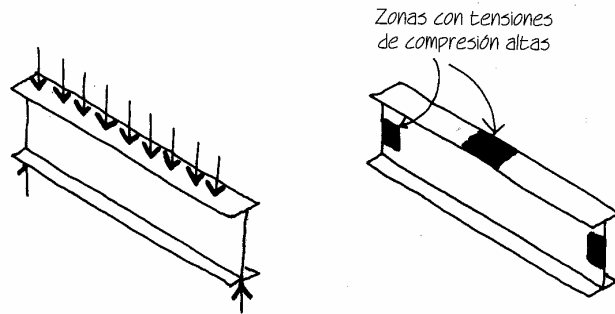


Ilustración III.78

Por lo tanto el ala superior o el alma pueden pandear localmente en esas zonas de tensiones de compresión altas.

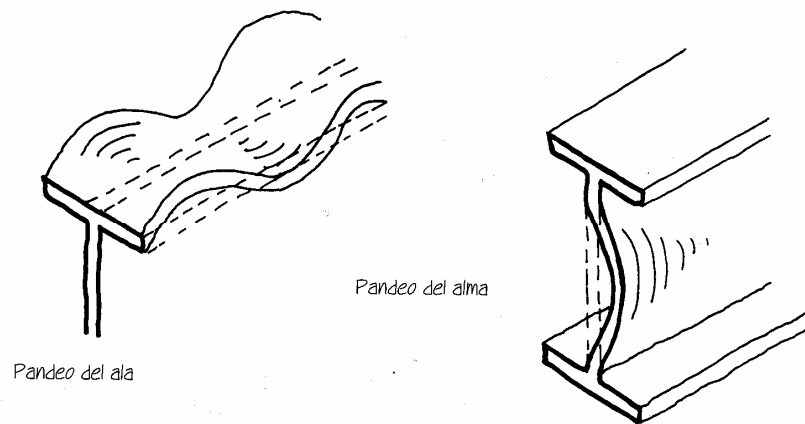


Ilustración III.79

## F.- GEOMETRÍA ESTRUCTURAL Y COMPORTAMIENTO

Se puede considerar una estructura como un ensamblaje de elementos y estos elementos pueden ser de una, dos o tres dimensiones. Cada elemento tiene un tipo especial de comportamiento estructural, dependiendo de la carga y su localización en la estructura. Este comportamiento puede verse afectado por la esbeltez de las partes de la estructura que tengan carga axial, y esto puede producir inestabilidad.

El comportamiento estructural de cualquier estructura depende de una serie de factores, a saber:

- La forma de la estructura.
- El tipo de carga que soporta la estructura.
- La esbeltez de la estructura.

Para poder concebir estructuras el diseñador de estructuras debe ser capaz de comprender las consecuencias a que pueden dar lugar la geometría y el ensamblaje de estructuras. Esto se puede conseguir sabiendo cómo se puede cambiar la geometría de la estructura y comprendiendo el comportamiento global de las distintas combinaciones que se pueden realizar con los elementos.

### i. Geometría de las estructuras

Para que las estructuras puedan ocupar el espacio del mundo real deben tener una configuración o forma. No sólo tiene geometría la estructura como un todo, sino que cada parte de la estructura debe tener una configuración o forma.

Es interesante hacer una distinción entre geometría definida y geometría orgánica. Geometría definida significa aquella cuya forma se puede expresar matemáticamente. Por ejemplo, rectángulos, círculos, elipses, etc. Por tanto la forma exacta puede ser determinada por medio, de cálculos matemáticos. Esto la diferencia

de la geometría orgánica. Se puede crear dibujando o modelando la estructura sin trabas matemáticas. El valor numérico de las dimensiones de esta geometría se puede obtener, si es necesario, midiendo el dibujo o el modelo.

Los edificios que han producido las civilizaciones, han tenido una geometría definida precisa. Las investigaciones han aclarado la asombrosa exactitud de la geometría de las antiguas pirámides egipcias o de los templos clásicos griegos. En realidad la mayoría de los secretos de los canteros que construyeron las grandes catedrales góticas eran reglas geométricas.

Existen evidentes ventajas para una sociedad civilizada en usar geometría definida. Esto se debe a que la civilización utiliza extensas líneas de comunicación y es más fácil comunicar una geometría definida que una geometría orgánica. La mayoría de las estructuras de los edificios utilizados en las civilizaciones están basadas en formas rectas y existen razones prácticas y económicas para construirlas así. Debido a la falta de habilidad de los diseñadores, se utiliza muy poco el vasto repertorio de formas que no son rectas pero que sí tienen base matemática, De nuevo, como el análisis de las estructuras no rectas, es difícil, y por tanto laborioso y caro, y los calculistas prefieren geometrías rectilíneas.

## ii. El comportamiento de los sistemas estructurales

Las siguientes cinco estructuras diferentes, todas soportando la misma luz, nos dan un repertorio básico de tipos estructurales.

1. Una viga.
2. Un cable.
3. Un cable con un codal comprimido.
4. Dos codales inclinados con un cable recto.
5. Dos codales inclinados.

Las estructuras 3 y 4 son armaduras y son la versión más sencilla. Podemos ahora comparar cómo contrarrestan el momento flector y el esfuerzo cortante estas cinco estructuras.

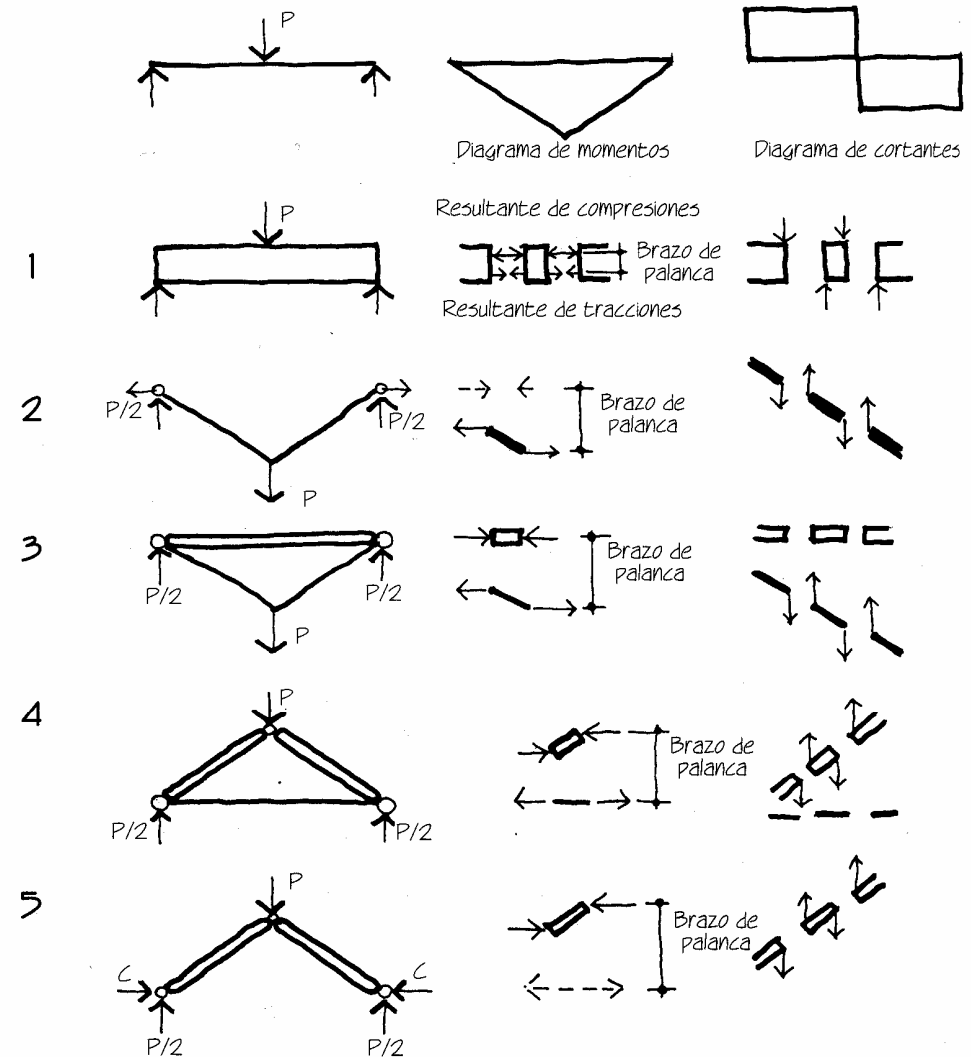


Ilustración III.80

### iii. Armaduras y entramados<sup>11</sup>

Estas armaduras se usan mucho y se pueden ver en todo tipo de edificios, particularmente como estructuras de cubierta. Como en las armaduras básicas, las barras inclinadas soportan el esfuerzo cortante y son también parte de las resultantes que tracción o compresión que producen los momentos, mientras que las barras horizontales soportan sólo las resultantes de tracciones. Esto se puede comprobar si estudiamos los esfuerzos de una armadura tipo A.

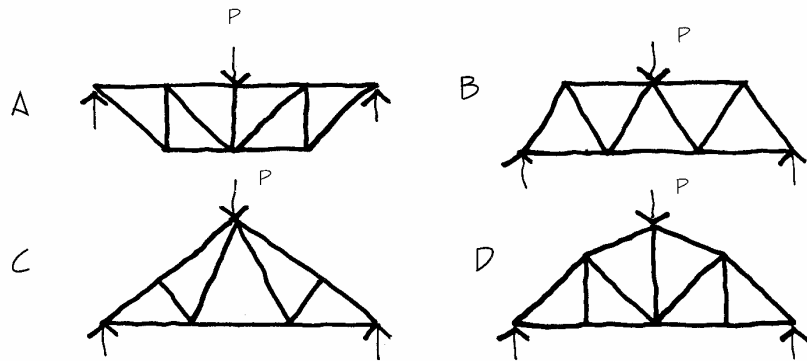


Ilustración III.81

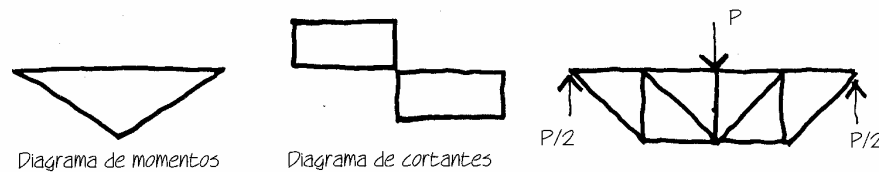


Ilustración III.82

Si se da un corte a la armadura, una rebanada debe estar en equilibrio con el momento flector y el esfuerzo cortante.

<sup>11</sup> Véase "Conformación de armaduras en acero" en el capítulo siguiente.

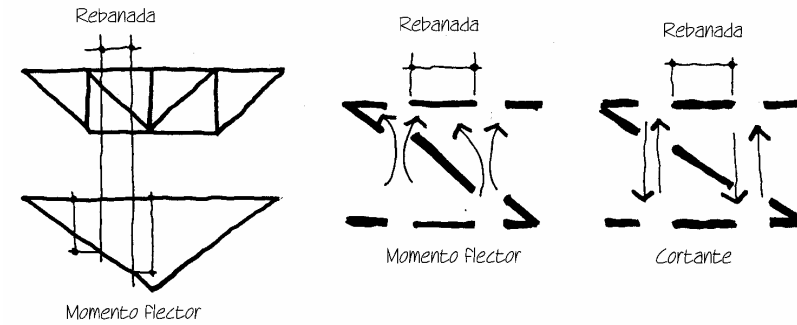


Ilustración III.83

De las tres barras cortadas en la rebanada, sólo la barra inclinada tiene una componente vertical y por tanto puede contrarrestar el cortante.

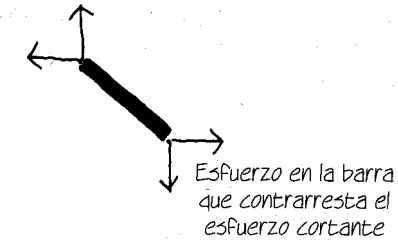


Ilustración III.84

Los esfuerzos en los cordones superior e inferior sólo contribuyen a producir las resultantes de tracción y compresión, pero también contribuye a ello la barra inclinada. Por lo tanto, existen tres resultantes de tracción o compresión.

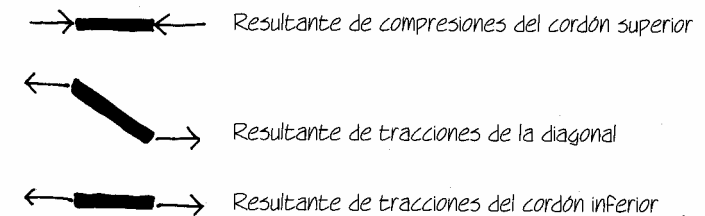


Ilustración III.85

Como los esfuerzos de las barras no varían a lo largo de su longitud, el incremento de momento de  $M1$  a  $M2$  está contrarrestado por el incremento de brazo de la palanca que tienen las distintas alturas de la componente horizontal de la tracción en la diagonal al ser cortada en las secciones sucesivas. (Véase Ilustración III.86)

Vemos que el cordón superior está comprimido y que el cordón inferior y el diagonal están traccionados. Es relativamente fácil descubrir la distribución completa de compresiones y tracciones en armaduras sencillas como ésta. (Véase Ilustración III.87)

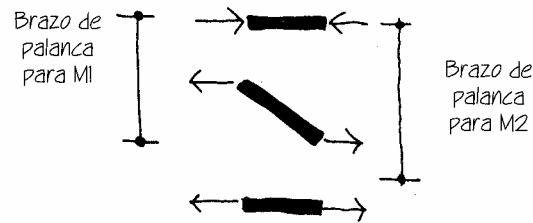


Ilustración III.86

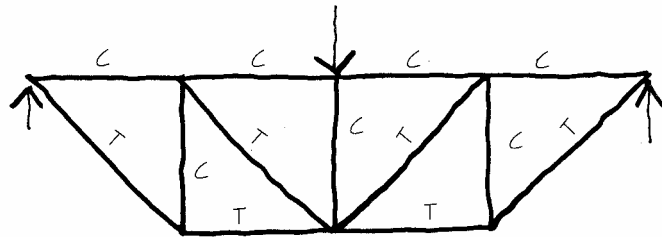


Ilustración III.87

De nuevo, podemos considerar los esfuerzos en las barras como los recorridos de las tensiones principales. Como la armadura se parece más a una viga, los recorridos de tensiones son también como los de una viga.

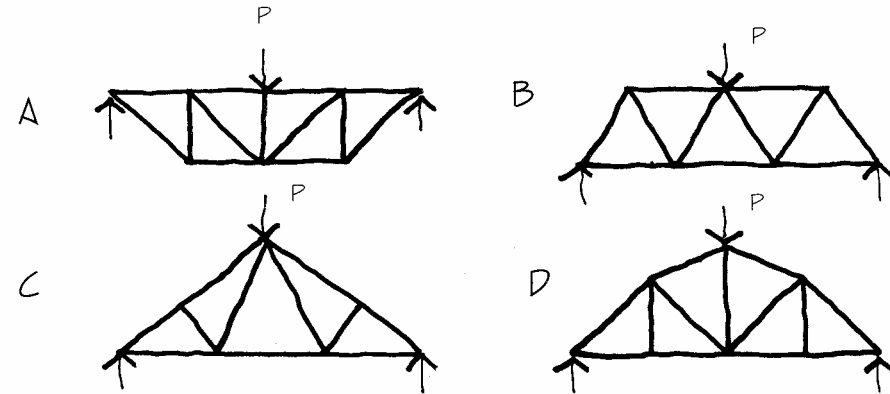


Ilustración III.88  
Armaduras donde existe estabilidad global.

A veces es más conveniente, por razones prácticas, apoyar estas armaduras en el nivel del cordón inferior.

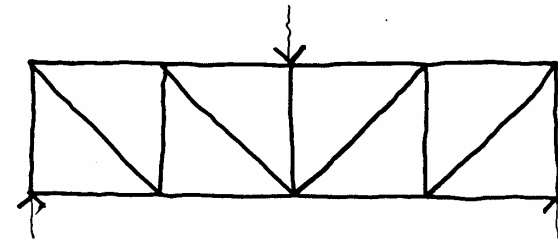


Ilustración III.89

La configuración no se altera, pero las nuevas barras verticales trabajan a compresión, básicamente transfiriendo exactamente la reacción. Las nuevas barras horizontales no trabajan.

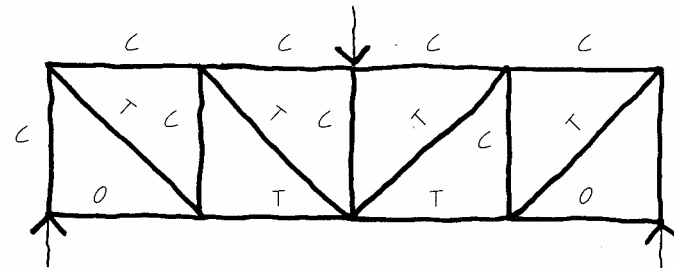


Ilustración III.90



Esto se puede alterar si cambiamos la dirección de los diagonales.

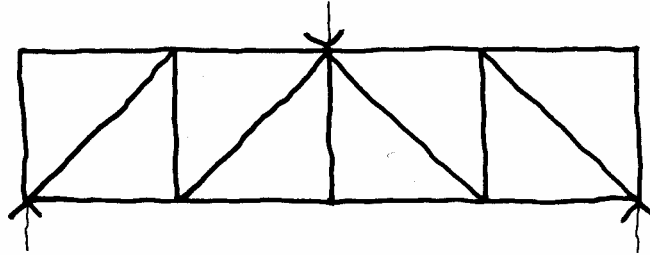


Ilustración III.91

La distribución de los esfuerzos es similar en los cordones, pero ahora los esfuerzos de los diagonales pasan de ser tracciones a ser compresiones y viceversa en los montantes.

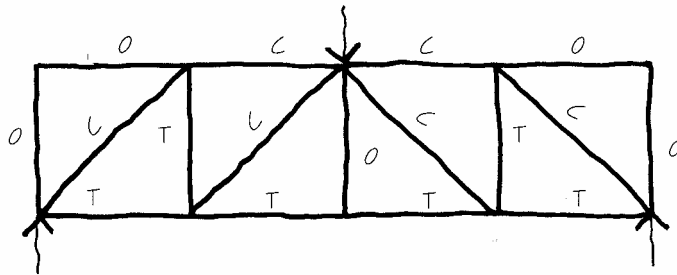


Ilustración III.92

Esto nos demuestra que el diseñador de estructuras puede cambiar, hasta cierto punto, la distribución de esfuerzos, eligiendo una configuración estructural determinada. Pero en cualquier caso la armadura debe ser capaz de producir esfuerzos verticales para resistir el cortante y un par de fuerzas para contrarrestar el momento. Esto implica que los cordones superior o inferior deben trabajar siempre a compresión y a tracción respectivamente.

Las armaduras tienen esfuerzos normales en las barras, mientras que una viga tiene esfuerzos cortantes y de momento. Como hemos visto, existen similitudes entre el trabajo estructural de una armadura y el de una viga, pero físicamente son bastante diferentes. Es sin embargo posible transformar una en otra físicamente. Supongamos

que una viga tiene pequeños orificios que la atraviesan y que una armadura tiene barras más gruesas y nudos grandes.



Ilustración III.93

Estas dos estructuras no parecen semejantes y parece razonable esperar que la viga trabaje como viga y armadura como armadura. En las zonas alrededor de los pequeños orificios de la viga se producirá una ligera alteración en las tensiones y en las zonas alrededor de los nudos de la armadura se puede alterar la dirección de los esfuerzos. Pero el comportamiento global continuará siendo semejante al de una viga o una armadura. Sin embargo, si aumentamos el tamaño de los orificios de la viga y hacemos las barras de la armadura más gruesas, el comportamiento puede cambiar.

Las dos estructuras deben soportar momentos flectores y esfuerzos cortantes, pero las distribuciones de tensiones ya no son ni la de una viga ni la de una armadura. Los orificios grandes de la viga pueden



Ilustración III.94

invalidar las hipótesis que habíamos asumido. Las barras gruesas y los nudos grandes nos indican que las barras de la armadura han dejado de soportar sólo esfuerzos de tracción o compresión y que los nudos ya no se pueden suponer articulados. Si hacemos los orificios de la viga cuadrados o quitamos los diagonales de la armadura, las dos estructuras se transforman en una sola la viga de montantes.

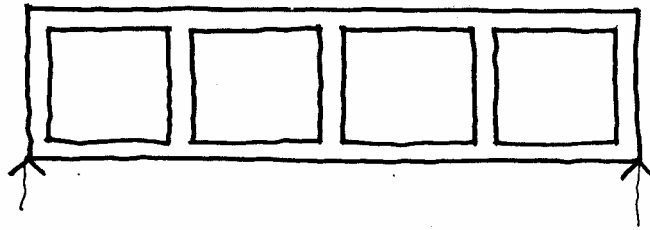


Ilustración III.95

Pero ¿cómo puede soportar los momentos y cortantes globales esta estructura que no parece ni una viga ni una armadura? De nuevo podemos cortar una rebanada de la estructura.

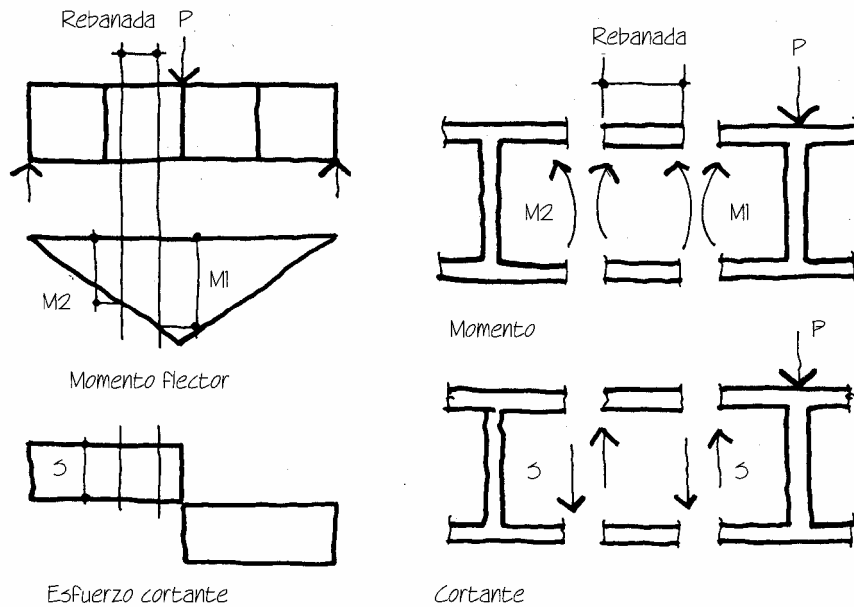


Ilustración III.96

Ahora el cordón superior e inferior deben contrarrestar  $M_1$  y  $M_2$  con resultantes de tracción y compresión y además los esfuerzos cortantes.

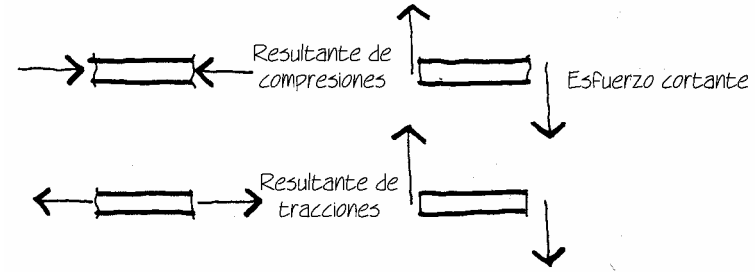


Ilustración III.97

Puede parecer que éstos son los únicos esfuerzos que actúan en la estructura, pero los cordones superiores e inferiores, al transportar esfuerzos cortantes, están también sometidos a momentos flectores y esto está lejos de parecer evidente-. En una armadura con diagonales las barras pueden estar unidas entre sí por articulaciones. A éstos se les llama nudos articulados. Sin embargo, si la viga de montantes tuviese nudos articulados sería un mecanismo y colapsaría.

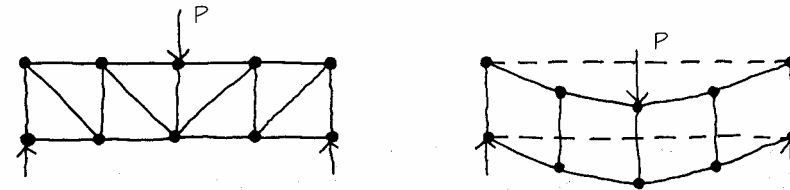


Ilustración III.98

Si los nudos de la viga de montantes tienen uniones rígidas, la estructura no colapsa. El colapso ha sido evitado por la rigidez de los nudos, que impiden que cada recuadro de la viga se pliegue transformándose en un rombo, pero para que esto ocurra las barras unidas entre sí por nudos rígidos deben trabajar a flexión.

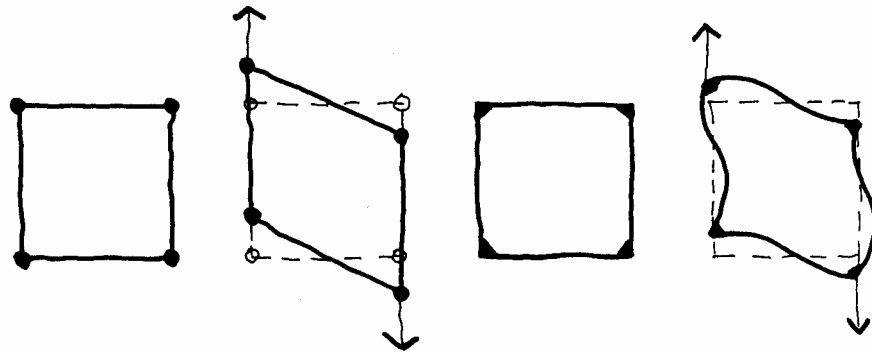


Ilustración III.99

Cada barra tiene una deformada en forma de S, con el momento máximo en los extremos y momento nulo en el centro.

Si dibujamos el momento en la cara traccionada de cada barra, obtenemos un diagrama de momentos bastante extraño para cada recuadro.

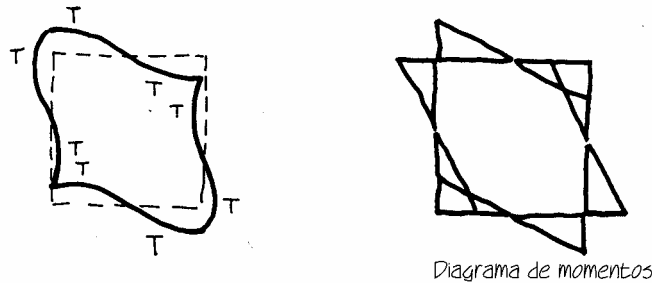


Ilustración III.100

No sólo existen momentos en todas las barras de cada recuadro, sino que también existen esfuerzos cortantes (horizontales) en los montantes.

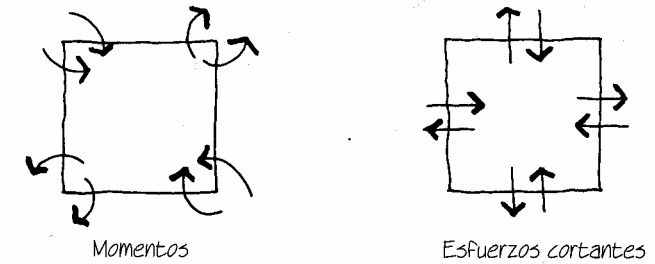


Ilustración III.101

Este fenómeno no nos debe sorprender demasiado porque es semejante al de los esfuerzos cortantes horizontales que aparecían en una viga.

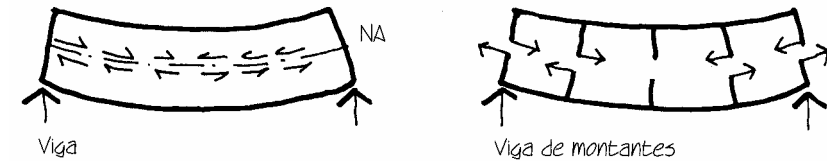


Ilustración III.102

Los momentos flectores a lo largo de la viga son una secuencia de para un solo recuadro. Para mayor claridad hemos dividido el diagrama de momentos en uno para los cordones y otro para los montantes.

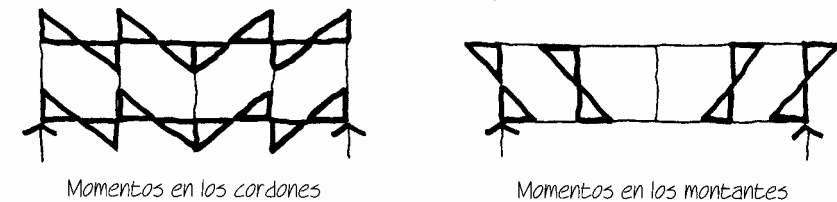


Ilustración III.103

En la celosía se contrarrestaba la diferencia del valor de los momentos a un lado y otro de cada rebanada por la variación del brazo de palanca. El brazo de palanca variaba porque variaba la posición del esfuerzo diagonal. En la viga de montantes esto se

consigue variando el valor de los momentos que soportan los cordones. Las compresiones y tracciones son constantes en los cordones y contrarrestarán exactamente el momento global en el punto de momento nulo que aparece en el centro de su longitud.

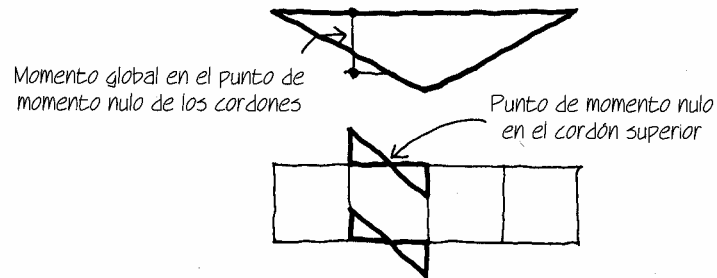


Ilustración III.104

En cada recuadro el momento global es la suma del momento producido por las tracciones y compresiones más o menos los momentos de los cordones.

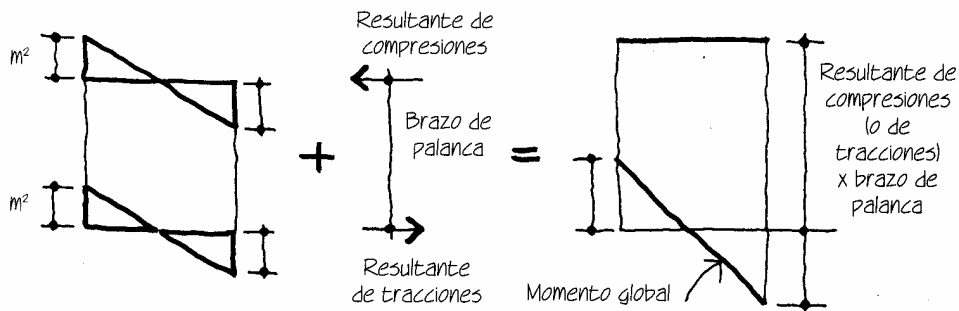


Ilustración III.105

El trabajo de la viga de montantes con momentos flectores actuando en los nudos rígidos que unen las barras, es decir, como entramado, se utiliza mucho en ingeniería estructural.

Se pueden distinguir tres tipos de estructuras, vigas, armaduras y entramados. Cada tipo contrarresta el momento y cortante global.

Las vigas, por medio de esfuerzos internos de momento y cortantes; las armaduras, por medio de esfuerzos internos de tracción o compresión, y los entramados, por esfuerzos internos de tracción, compresión, momento y cortante. Si en algún punto del recorrido de cargas se debe soportar un momento y un cortante global, se puede utilizar para ello cualquiera de estos tipos de estructura. Por ejemplo los pilares que soportaban el cartel de la Ilustración III.5 pueden ser tipo viga, celosía o entramado. (Véase Ilustración III.143)

O de nuevo el pórtico (ver Ilustración III.16), aunque sea en sí un entramado, puede ser también tipo viga, tipo armadura o tipo entramado. (Véase Ilustración III.144)

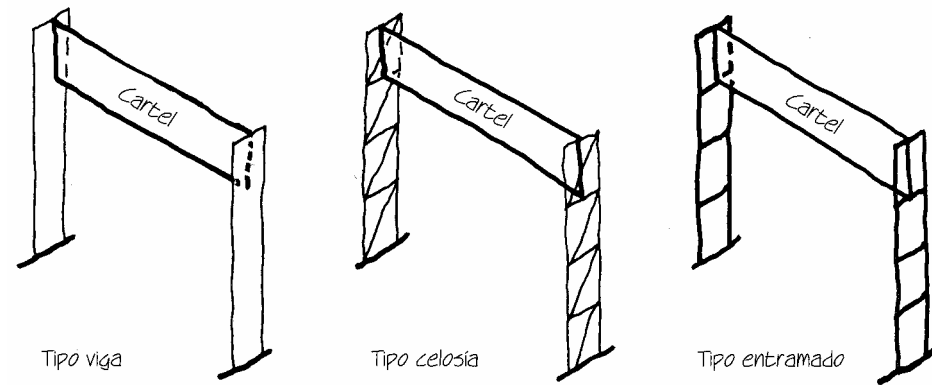


Ilustración III.106

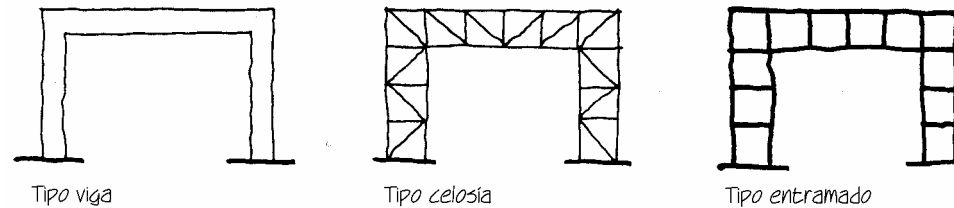


Ilustración III.107

Los tipos se pueden mezclar para hacer un pórtico con pilares tipo viga y viga tipo celosía, o cualquier otra mezcla.

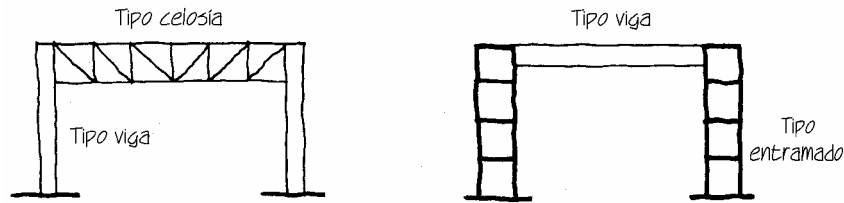


Ilustración III.108

Todos estos marcos son lo mismo, es decir, todos tienen que soportar la carga por medio de momentos y cortantes globales. Cuando la parte de la estructura sea tipo viga, por medio de esfuerzos internos de momento y cortantes, cuando sea tipo armadura, por esfuerzos internos de tracción y compresión, y cuando sea tipo entramado, por medio del trabajo de entramado. Aún más, un elemento estructural puede ser una mezcla de dos tipos estructurales.

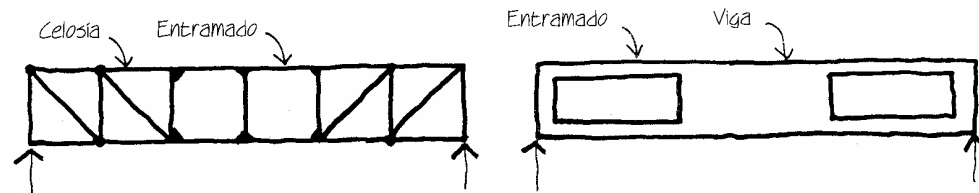


Ilustración III.109

Utilizando estas mezclas el ingeniero estructural puede utilizar una gran variedad de sistemas estructurales.

#### iv. Estructuras espaciales<sup>12</sup>

Las estructuras tipo viga, tipo armadura, entramado o funicular pueden tener dos dimensiones o tres dimensiones. Los principios básicos de los distintos tipos de comportamiento siguen siendo aplicables en tres dimensiones. Ahora, la estructura tiene momentos y cortantes globales actuando en dos direcciones, en lugar de en una. Esto se puede aclarar esquemáticamente con una estructura de planta rectangular apoyada en las esquinas.

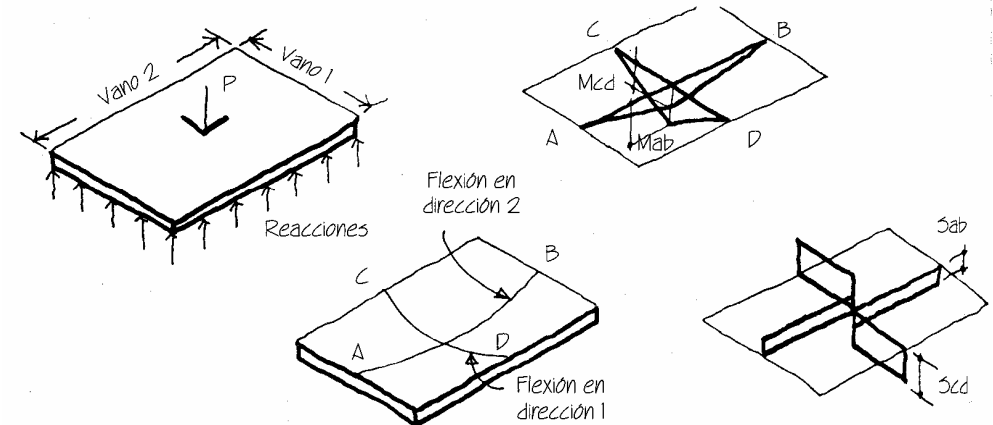


Ilustración III.110

Este comportamiento estructural es típico de las losas. El esquema básico de comportamiento continúa siendo el mismo cuando se utilizan estructuras espaciales. Veamos los siguientes cinco tipos de estructuras que están soportadas por sus esquinas.

<sup>12</sup> Véase en el capítulo IV el tema "Reticulado Espacial".

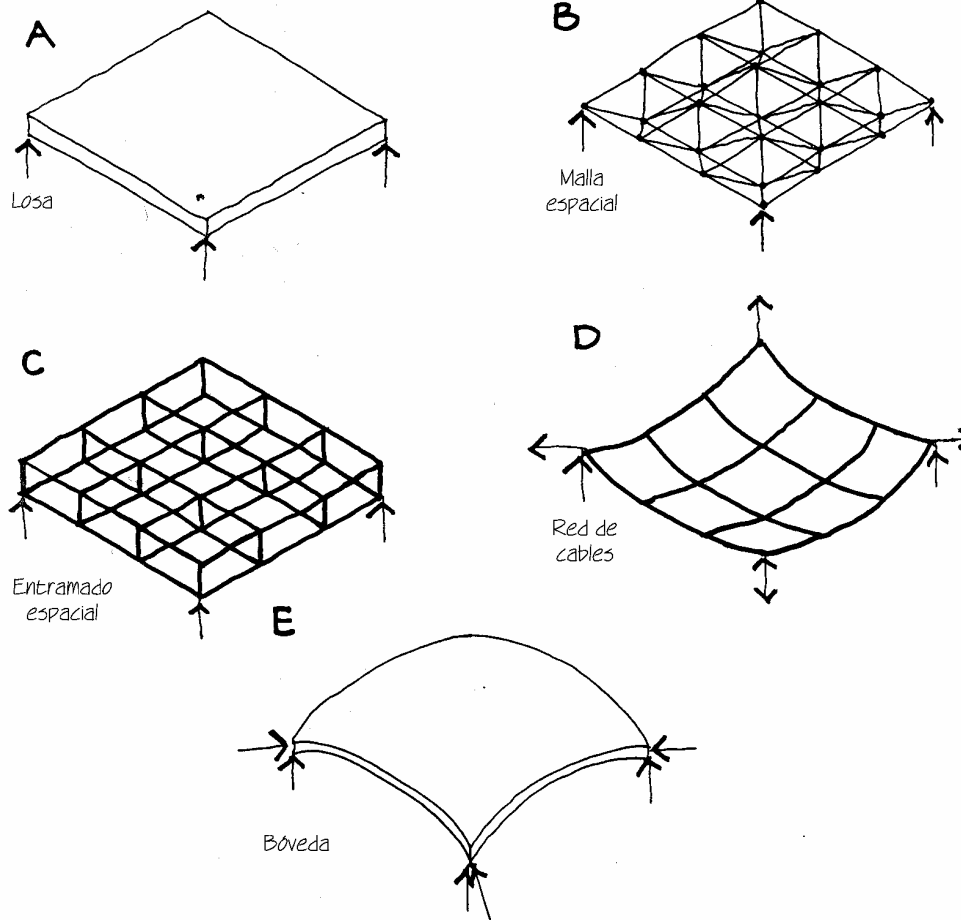


Ilustración III.111

La armadura de tres dimensiones se suele conocer por malla espacial, el sistema de cables por red de cables y la superficie curva por lámina o bóveda. Las estructuras D y E son funiculares, por lo que habrá que darles distinta forma para cada tipo de carga si se quieren evitar los esfuerzos cortantes y de momento.

El trabajo de cada tipo de estructura es el mismo de los tipos bidimensionales. La losa resiste las cargas mediante momentos y esfuerzos cortantes como una viga, La malla espacial, mediante tracciones y compresiones en las barras, los cordones superior e inferior resistirán los pares de fuerzas producidos por los momentos, los diagonales el esfuerzo cortante y parte de la flexión. Las barras del entramado de tres dimensiones soportarán compresiones y reacciones además de esfuerzos cortantes y momentos debido a sus uniones rígidas. La red de cables sólo soportará tracciones y su forma variará si varía el tipo de carga. La lámina es la red de cables "invertida". En el supuesto de que los cables tengan forma funicular, las cargas se resistirán únicamente mediante compresiones. Como ocurre con las estructuras funiculares de dos dimensiones, los apoyos de la red de cables y de la lámina deben ser capaces de soportar reacciones horizontales además de las verticales.

La serie de estructuras que se pueden derivar de estos tres tipos básicos es prácticamente sin límite. No sólo se puede variar el sistema estructural, sino que cada parte de la estructura puede ser de uno de los distintos tipos.

#### v. Prevención de la inestabilidad por pandeo

Aun si la concepción del sistema estructural está basada en un conocimiento de su comportamiento estructural, la estructura puede ser esbelta y propensa a iniciar un proceso de colapso por pandeo. El diseño de estructuras consiste en parte en darle, a la estructura la rigidez necesaria contra estos colapsos inducidos por el pandeo. El diseñador debe asegurarse de que las partes de la estructura que trabajan a compresión tienen estructuras rigidizadoras que mantienen la esbeltez dentro de límites razonables. Podemos aclarar este punto con el ejemplo de una viga con sección en U.

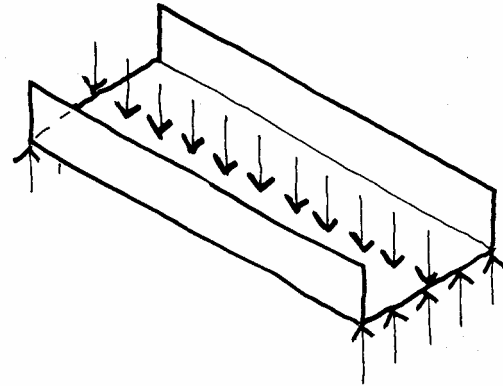


Ilustración III.112

La estructura debe resistir el momento global debido a la carga. Como es una estructura tipo viga, este momento producirá tensiones normales de tracción y compresión, y ésta actuará en la parte superior de la estructura.

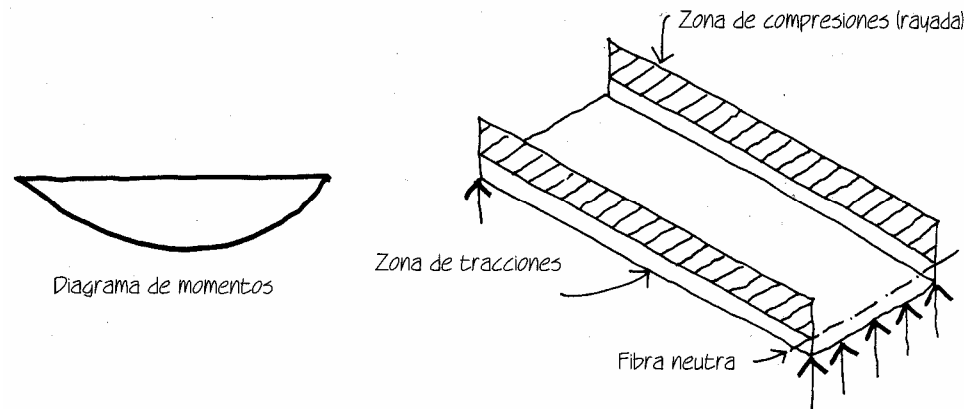


Ilustración III.113

Si la zona de compresiones es esbelta, pandeará lateralmente iniciando un colapso. Para prevenirlo esta parte superior de la estructura debe tener rigidez lateral. Esta rigidización puede hacerse continua o discreta. La rigidización continua se puede conseguir colocando en la parte superior rigidizadores continuos o haciendo la unión entre la parte vertical y la parte horizontal rígida.

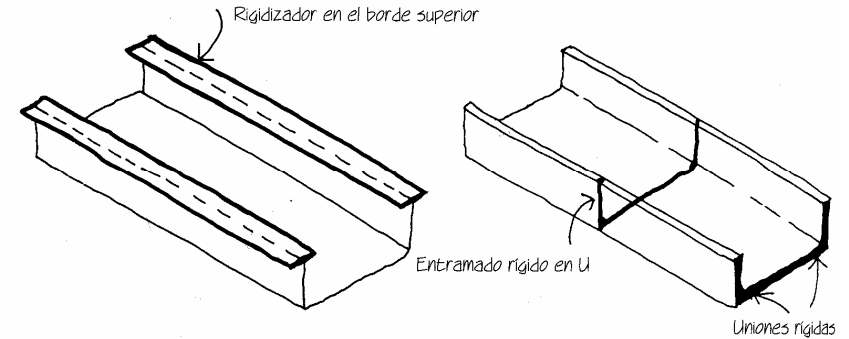


Ilustración III.114

El rigidizador superior impide que la parte vertical de la estructura pandee lateralmente, al actuar como una viga que trabaje en horizontal. Las uniones rígidas impiden que las partes verticales pandeen, ya que para que esto se produjese la "U" tendría, que abrirse o cerrarse y esta acción la resisten los momentos flectores que actúan en las uniones rígidas.

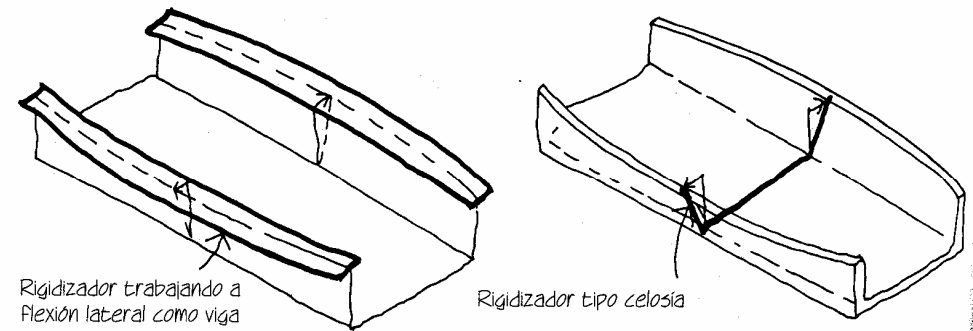


Ilustración III.115

Una alternativa a esa solución es añadir a la estructura rigidizantes aislados que producen coacciones laterales en los puntos en los que se colocan.

De nuevo estos rigidizantes pueden ser tipo viga o tipo armadura.

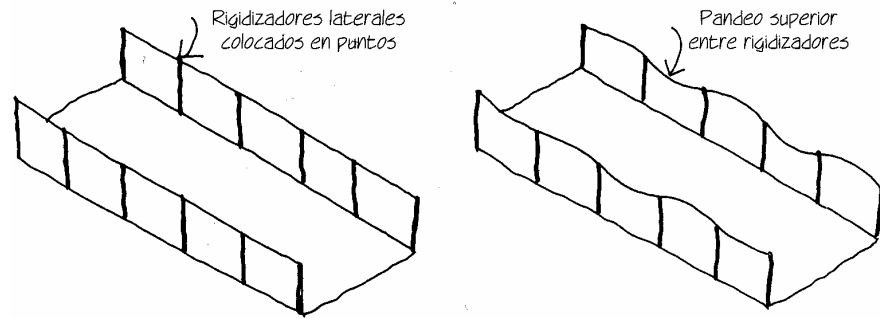


Ilustración III.116

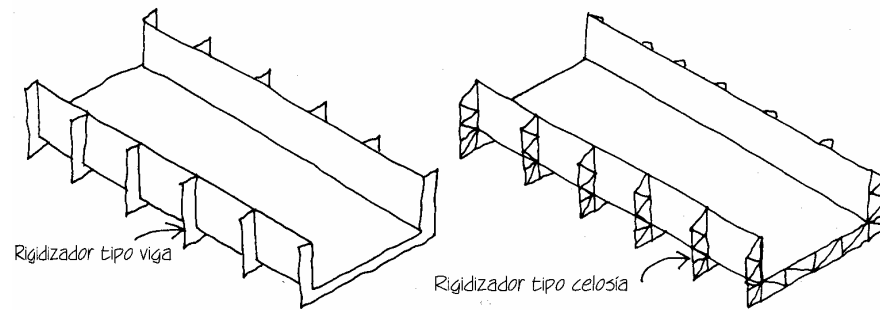


Ilustración III.117

Los rigidizadores aislados producen la rigidez necesaria del mismo modo que los rigidizadores continuos, pero en puntos aislados. Esto demuestra que si el esquema estructural era una estructura en forma de "U", aquél puede estar incompleto como esquema si no le añadimos los rigidizadores contra el pandeo. El diseñador puede elegir la forma de rigidizar una estructura contra el inicio del colapso por pandeo, pero debe formar parte del esquema inicial, más que ser algo que se añade en un estado posterior para "que la estructura funcione". Si el diseñador de estructuras no es capaz de concebir la estructura sabiendo dónde se necesita rigidizar, el diseño puede quedar prácticamente invalidado. Se pueden necesitar cambios radicales en el diseño original, cuando se llega a la etapa del dimensionado en detalle con resultados desafortunados para el esquema inicial.

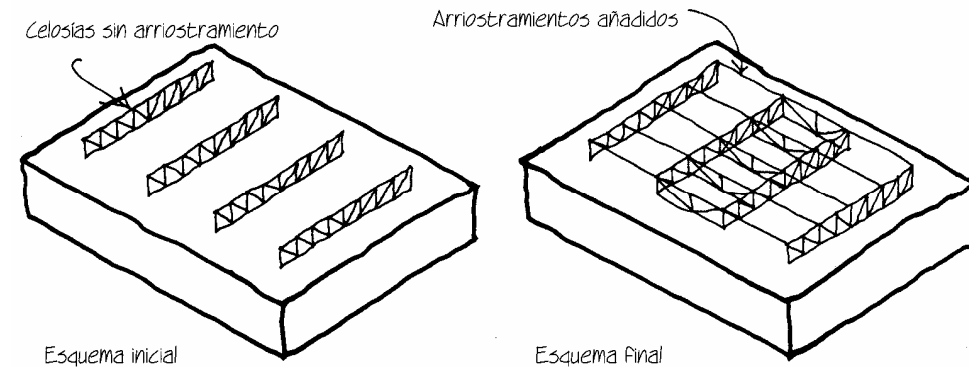


Ilustración III.118

Si utilizamos todos los conceptos que hemos desarrollado es posible entender cómo se comportan las estructuras bajo las cargas. Este conocimiento no nos da ninguna información cuantitativa sobre las estructuras. No nos permite resolver cuestiones como el tamaño de los elementos estructurales; esta información sólo se puede obtener mediante el cálculo numérico.

Como las estructuras están dentro de edificios, no es normalmente posible darse cuenta de cómo trabaja la estructura sin información adicional como dibujos o memorias escritas. Si se puede obtener esta información, normalmente de revistas técnicas, podemos utilizar esos conceptos para comprender cómo trabaja una estructura de edificación en particular. Estudiar el comportamiento de estructuras realizadas da al diseñador sin experiencia una visión importante de cómo se construyen y diseñan las estructuras de edificación. Como existe una variedad tan enorme de estructuras posibles, este estudio no significa que todos los diseños sean copias serviles, pero quizá una "buena" copia sea mejor que una "innovación" mal concebida.



## IV GENERALIDADES TÉCNICAS SOBRE LA CONSTRUCCIÓN CON ACERO

### Introducción

Después de haber considerado conceptos básicos que intervienen en nuestra comprensión de los sistemas estructurales en el capítulo anterior, es necesario analizarlos desde la óptica de la *construcción*, para así asociar el conocimiento teórico con la manera práctica de resolver problemas de construcción lo que fortalecerá nuestro criterio para formular proyectos arquitectónicos con claridad conceptual y a la vez, interesantes.

En este capítulo analizaremos la gran variedad de elementos o formas estructurales de acero, asimismo cada componente del edificio (columnas, vigas, uniones, entrepisos, canales, etc.) desde el punto de vista constructivo. Este análisis consistirá en mostrar a

través de gráficas y comentarios así como referencias de conceptos implícitos explicados anteriormente, el cómo y porqué de cada componente y de las configuraciones espaciales típicas, la forma correcta de las uniones en acero, los tipos de entrepisos y algunas recomendaciones a considerar en la etapa del diseño arquitectónico.

### A.- PERFILES DE ACERO ESTRUCTURAL

El lugar donde se fabrican proyectos con aceros estructurales se llama "Taller de Fabricación" o sencillamente "Taller"<sup>1</sup>. El taller no produce el acero, es decir, no lo procesa desde la materia prima, este procedimiento se lleva a cabo en los "molinos"<sup>2</sup> de acero. Estos molinos<sup>3</sup>, envían su producto en una gran variedad de formas estándares, normalizadas por los códigos de acero. Este tipo de acero se conoce con el término en inglés "plain material", es decir, acero ordinario o acero negro.

La mayor parte del acero negro, se clasifica dentro de los siguientes grupos básicos:

- 1) **American Standard Beams (S)**<sup>4</sup>. Vigas americanas estándar o la tradicional viga "I"
- 2) **American Standard Channels (C)**. Canales americanos estándar
- 3) **Miscellaneous Channels (MC)**. Canales Misceláneos. Éstos son en forma de C, pero se consideran especiales.

<sup>1</sup> El término en inglés es "Fabrication Shop".

<sup>2</sup> Debido a que el procedimiento involucra un rolamiento del acero para formar láminas y piezas, estos molinos reciben el nombre inglés de "rolling mills".

<sup>3</sup> En Guatemala no existen molinos que trabajen aceros estructurales para construcción, por lo que los mismos se importan de países como Estados Unidos, Canadá, Rusia, China, Japón, etc.

<sup>4</sup> Al contrario de traducir los nombres de cada elemento, se ha preferido mostrarlos tal como se llaman en inglés. La razón para esto es que la nomenclatura proviene de su nombre inglés, además es útil porque tanto en libros, planos, en el lenguaje comercial y en los programas de computadoras usan esta misma nomenclatura. La traducción que sigue al nombre en inglés puede utilizarse simplemente como referencia.

**4) Wide Flange Shapes (W ó WF).** Vigas tipo "I" patín ancho. Se usan para columnas o vigas.

**5) Miscellaneous Shapes (M).** Vigas Misceláneas. Estas son similares en apariencia a las W, pero son un poco más livianas.

**6) Structural Tees (ST, WT, MT).** Tees Estructurales. Éstas son hechas por medio de dividir una sección S, W o M. Usualmente éstas se dividen a lo largo y por la mitad del alma. Existen formas "tees" que son acabadas por el molino, sin embargo, es muy frecuente que los fabricantes corten las respectivas secciones para formar "tees" en los talleres.

**7) Angles (L).** Angulares. consisten en dos "brazos" de igual o desigual ancho e igual espesor. Los brazos están a ángulos de 90 grados uno del otro.

**8) Plates (PL) Placas y Flat Bars (FLT) Barras planas.** son piezas rectangulares que vienen en diferentes espesores. Las barras usualmente tienen un máximo de 6 u 8 pulgadas<sup>5</sup> de ancho, dependiendo del espesor; las placas oscilan entre un ancho de 8 hasta 200 pulgadas, dependiendo del espesor y límites de longitud.

Para desarrollar proyectos arquitectónicos, realizar planos constructivos o dibujos de taller (Shops Drawings), es necesario comprender claramente como son todas las secciones y formas en que el acero es rolado.

<sup>5</sup> La tradición de construcción americana está dada en el sistema inglés (pies y pulgadas), con la publicación del último código del AISC, "Load & Resistance Factor Design", que es posible conseguir tanto en sistema inglés como métrico, esto empieza a cambiar (The Navy, Air Force y The Coast Guard ya han convertido sus sistemas de medición al métrico. El Departamento de Estado y la Nasa requieren diseños y datos métricos.) En el presente documento hemos optado por continuar la tradición americana debido a que en nuestro país los operarios de talleres están acostumbrados a ella. En algunos casos, sin embargo se requerirán ambos sistemas de unidades.

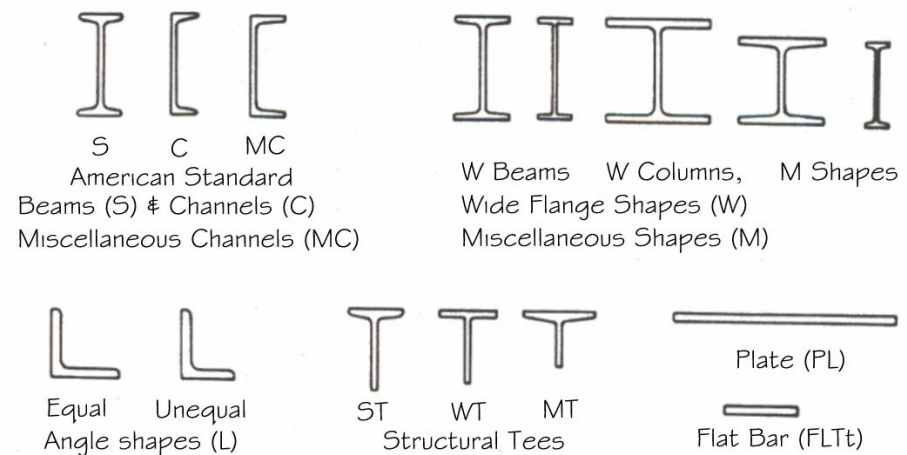


Ilustración IV. 1  
Algunas secciones típicas de acero

En la figura anterior, se muestran algunas secciones típicas de acero ordinario o negro. Nótese que las secciones S, C y MC tienen patines (flanges) con inclinación y que las secciones W carecen de esta, siendo la parte exterior como interior del patín paralelas entre sí. Las secciones tipo M, pueden ser de ambos tipos: con o sin inclinación dependiendo de la sección particular que se trate. Para conocer todos estos detalles particulares de los elementos en acero se debe consultar el manual del productor. Todos los materiales que se usan en la construcción en acero, se encuentran detallados en la Part 1 del AISC Manual of Steel Construction. En el manual se pueden encontrar: tamaños, pesos por pie, dimensiones y propiedades, así como la disponibilidad del productor principal.

En nuestro país, algunas empresas tienen un listado de las características de los productos que importan los cuales son copia de la información de códigos americanos.

Como un estándar internacional, existe un sistema para nombrar, dibujar y listar todos los materiales que se usan para construir un edificio o cierta parte de él<sup>6</sup>. La manera correcta de nombrar todos estos materiales se muestra en las tablas de las páginas siguientes.<sup>7</sup> La información se ha puesto en inglés con el objetivo de familiarizar a los lectores con los nombres y términos descritos. En la práctica profesional muchos de estos términos son usados y nombrados por su nombre inglés.

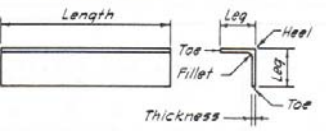
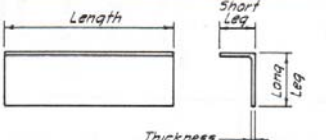
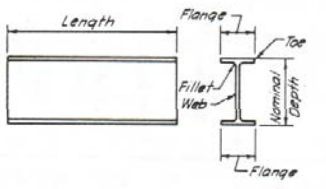
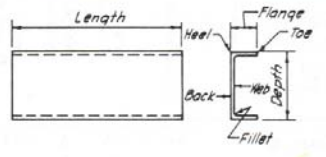
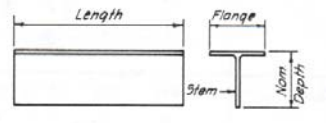
Group	Example of billing on detail drawings	Conventional way of showing on detail drawings and identification of major component parts	Remarks
EQUAL LEG ANGLES	L 3½ x 3½ x ¼ x 5'-6" ↑     ↑     ↑     ↑ Leg Width in inches     Leg Width in inches     Thickness in inches     Length in ft. and in.		On details made to scale of 1" = 1'-0" or smaller, do not show rounded off toes of angles or interior fillet between legs. Bill long leg of unequal leg angles first. Exaggerate leg thickness to suit.
UNEQUAL LEG ANGLES	L 6 x 4 x ¾ x 10'-3" ↑     ↑     ↑     ↑ Long Leg in inches     Short Leg in inches     Thickness in inches     Length in ft. and in.		
WIDE-FLANGE BEAMS & COLS. AM. STD. BEAMS MISC. SHAPES BEARING PILES	W27 X 94 x 26'-10" S15 X 50 x 16'-3½" M 8 X 18.5 x 9'-3" HP12 X 74 x 20'-3" ↑     ↑     ↑     ↑ Group Symbol and Nominal Depth in inches     Wgt. per ft. in pounds     Length in ft. and in.		On details made to scale of 1" = 1'-0" or smaller, do not show rounded off toes of flanges or interior fillets between web and flanges. Do not show flange slope for channels or beams with sloping flanges. Exaggerate web and flange thickness to suit.
AM. STD. CHANNELS MISC. CHANNELS	C10 X 15.3 x 18'-8" MC13 X 31.8 x 9'-0" ↑     ↑     ↑     ↑ Group Symbol and Nominal Depth in inches     Wgt. per ft. in pounds     Length in ft. and in.		
STRUCTURAL TEES: W SHAPES S SHAPES M SHAPES	WT18 X 150 x 34'-6" ST 6 X 17.5 x 8'-3" MT 4 X 3.25 x 9'-0" ↑     ↑     ↑     ↑ Group Symbol and Nominal Depth in inches     Wgt. per ft. in pounds     Length in ft. and in.		

Ilustración IV.2

<sup>6</sup> Las partes grandes que pueden ser construidas en taller, se fabrican en taller y luego se montan en la obra. Para esto es necesario un plano de taller (el cual contendrá todas las piezas detalladas) y un plano de montaje el cual indicará cómo la grúa montara la pieza y los lugares en que se atornillará o soldará. Véase capítulo VI. Construcción del Proyecto.

<sup>7</sup> Pueden haber variaciones cuando se requiere una pieza con un detalle particular se produzca en lugar de una convencional, estas piezas deberán estar descritas detalladamente en los planos. Las tablas que aparecen a continuación fueron tomadas del libro: *Detailing for Steel Construction*, 1983 por AISC.

CAPÍTULO IV. GENERALIDADES TÉCNICAS SOBRE LA CONSTRUCCIÓN CON ACERO

Group	Example of billing on detail drawings	Conventional way of showing on detail drawings and identification of major component parts	Remarks
RAILS	40# ASCE Rail x 30'-0 104# Beth. Rail x 16'-0 105# USS Rail x 21'-0 ↑ Wgt. per yd. in pounds ↑ Profile Type ↑ Group Symbol ↑ Length in ft. and in.		On details made to scale of 1" = 1'-0 or less, show profile about as shown herein, disregarding all rounded corners, fillets, curved and sloping surfaces.
PLATES: PLAIN-SHEARED PLAIN-UNIVERSAL MILL RAISED PATTERN	PL 3/8 x 62 1/2 x 9'-3 UM PL 1/2 x 14 x 18'-11 PL 3/16 x 31 x 10'-0 (*) ↑ Producer's Designation ↑ Group Symbol ↑ Thickness in inches ↑ Width in inches ↑ Length in ft. and in.		On details made to scale of 1" = 1'-0 or less, exaggerate thickness of plates and bars to suit. See Manual Part 6, under "AISI Standard Nomenclature for Flat Rolled Carbon Steel" for size classification of bars & plates; see the discussion in Manual Part 1 on "Bars and Plates Product Availability" for general information.
FLAT BARS	Flt 4 1/2 x 1/2 x 7'-2 ↑ Group Symbol ↑ Width in inches ↑ Thickness in inches ↑ Length in ft. and in.		
SQUARE BARS	Bar 1 1/2 x 13'-4 ↑ Group Symbol ↑ Size in inches ↑ Convention for "Square" ↑ Length in ft. and in.		
ROUND BARS	Bar 1 1/2 Ø x 12'-6 ↑ Group Symbol ↑ Size in inches ↑ Convention for "Round" ↑ Length in ft. and in.		

\* Designations of raised pattern floor plates vary; consult manufacturers' catalogs.

Ilustración IV.3

Group	Example of billing on detail drawings	Conventional way of showing on detail drawings and identification of major component parts	Remarks
PIPES	Pipe 3 Std. x 8'-6 Pipe 3 X-Strong x 8'-6 Pipe 3 XX-Strong x 8'-6 ↑ Group Symbol ↑ Nominal Diameter in inches ↑ Weight Type ↑ Length in ft. and in.		See Pipe, Manual Part 1, for actual diameter and wall thickness.
TUBES: SQUARE TUBES: RECTANGULAR	TS 4 x 4 x .375 x 9'-1 ↑ Group Symbol ↑ Width in inches ↑ Wall Thickness in inches ↑ Length in ft. and in.		Wall thickness may be shown as a fractional dimension.
TUBES: CIRCULAR	TS 3 OD x .250 x 9'-1 ↑ Group Symbol ↑ Outside Diameter in inches ↑ Wall Thickness in inches ↑ Length in ft. and in.		

Ilustración IV.4

## i.- Características

El acero, es producido en una amplia variedad de configuraciones (secciones) así como de dureza (grados), lo cual permite una máxima flexibilidad de diseño. Comparado con otros materiales, la producción de acero *ha sido* relativamente barata<sup>8</sup>, en Guatemala se tiene otra percepción a este respecto<sup>9</sup>. Se dice que el acero "es el más fuerte, más versátil y más económico material de la industria de construcción"<sup>10</sup>.

La calidad y dimensiones de los elementos de acero son uniformes y su durabilidad no resulta afectada por la manipulación de las piezas en el transporte, además se puede controlar su corrosión atmosférica debido a la exposición (por ejemplo, incrementando su espesor).

El acero también posee únicas cualidades que se adaptan a la demanda de la construcción, por ejemplo, el acero puede alearse para obtener dureza, ductilidad o gran resistencia. Asimismo, las

<sup>8</sup> "Globalmente, el sector de acero está muy fragmentado: Cinco de los más grandes productores de acero representan sólo el 15% del total de producción. La Organización para la Cooperación Económica y Desarrollo dice que el 12% de la producción anual de cerca de 850 millones de toneladas por año excede a la demanda, lo que ocasiona una baja en los precios". La anterior fue una cita textual de un artículo publicado en Internet por Gina McColl el año 2003, sin embargo para 2004 debido a la demanda de acero de los grandes proyectos de construcción en China, el precio del acero se disparó hasta alcanzar los US\$0.50 la libra. Actualmente (2006) el precio oscila en US\$0.35 Si se desea más información de este fenómeno, véase la revista "ENR Engineering News-Record del 22 de marzo del 2004, páginas 24 a 30. (Véanse además las páginas 33 y 34 de este trabajo)

<sup>9</sup> Guatemala no produce acero estructural, lo que obliga a las empresas constructoras a importarlo. Algunas empresas compran acero de segunda (aunque este acero puede cumplir con las normas ASTM en cuanto a su tipo, sus secciones pueden estar fuera de norma lo que obliga al ingeniero estructural a calcular sus propiedades. Actualmente en Guatemala el precio por libra de acero instalada oscila entre US\$0.95 a US\$1.30 La variación obedece a factores como: dificultad de construcción (piezas muy elaboradas), transporte o dificultad de instalación.

<sup>10</sup> *Detailing for Steel Construction*, by AISC. Páginas 1-2.

piezas de acero pueden trabajarse en forma rápida y exacta en un taller convencional.

## ii.- Especificaciones

El acero estructural está compuesto casi enteramente de elementos de hierro, sin embargo, deberá contener pequeñas proporciones de carbón y manganeso para obtener resistencia y ductilidad. Si incrementamos el contenido de carbón, el acero se vuelve muy resistente y duro. Si bajamos el contenido de carbón, el acero se volverá suave, más dúctil y menos resistente. El acero estándar para fabricar puentes y edificios contiene aproximadamente 1/4 de 1% de carbón además de pequeñas cantidades de otros elementos permitidos por la especificación de acero particular.

Todo el acero producido está elaborado de acuerdo a especificaciones que estipulan en detalle tanto los elementos químicos como mecánicos necesarios. Las especificaciones estándares para el acero estructural son establecidas por *The American Society for Testing and Materials (ASTM)*. Los comités de esta sociedad están integrados por: representantes de los productores de acero, consumidores, público interesado y divulgadores interesados en mantener la información al día de manera aceptable para su comprensión y uso. Es recomendable que el profesional posea las normas del ASTM para una completa información de todos los aceros estructurales.

De igual importancia es la norma *ASTM A6, Specification for General Requirements for Standard Rolled Steel Plates, Shapes, Sheet Piling, and Bars for Structural Use*, la cual cubre en detalle aspectos de la práctica en molinos de acero y donde se encuentran detalladas las tolerancias aplicadas a la producción de piezas.

Las especificaciones ASTM para edificios y puentes reconocen varios grados de acero para propósitos estructurales. El ASTM enlista una descripción de estos aceros junto a sus propiedades de tensión y niveles de resistencia. En la tabla 1 localizada en la parte 1

del Manual<sup>11</sup>, sirve como referencia rápida para determinar la disponibilidad de secciones, placas y barras por tipo de acero, la designación ASTM y el mínimo rendimiento al esfuerzo.

Para secciones estructurales, la tabla 2 de la sección 1 del Manual<sup>12</sup>, lista cinco grupos de tamaños referidas por las variaciones de las *ASTM specifications* (llamadas comúnmente: *Specs*)

A continuación se encuentra un repaso de la información contenida en la tabla 1.

- a) **ASTM A36.** Acero carbón, con un mínimo de resistencia de 36 klb/plg<sup>2</sup><sup>13</sup> para todos los grupos de secciones y placas arriba de 8 pulgadas de espesor. Placas y barras debajo de 8 pulgadas de espesor, tienen una resistencia mínima de 32 klb/plg<sup>2</sup>.
- b) **ASTM A529.** Acero carbón, con un mínimo de resistencia de 42 klb/plg<sup>2</sup>, pero está limitado al Grupo 1 de secciones y placas de 1/2 pulgadas de espesor y menos.
- c) **ASTM A441.** Acero de alta resistencia y baja aleación. Tiene tres grados de resistencia mínima para aceros tipo Shapes y cuatro para plates y bars. Estos grados varían de 40 klb/plg<sup>2</sup> a 50 klb/plg<sup>2</sup>, según la sección a usar y su espesor.
- d) **ASTM A572.** Acero de alta resistencia, baja aleación con cuatro mínimos grados de resistencia que varían desde 65 klb/plg<sup>2</sup> a 42 klb/plg<sup>2</sup>. Todas los Grupos de secciones están disponibles en los grados siguientes: 42klb/plg<sup>2</sup> a 50 klb/plg<sup>2</sup>; a menudo sin embargo se muestran sólo en el

grupo 1 y 2, el grado 60 klb/plg<sup>2</sup> y solamente en el grupo 1, el grado 65.

- e) **ASTM A242.** Acero de alta resistencia, resistente a la corrosión y de baja aleación. Este acero tiene tres grados mínimos de resistencia: 50 klb/plg<sup>2</sup>, 46 klb/plg<sup>2</sup> y 42 klb/plg<sup>2</sup>. Estos aceros muestran sus características cuando se incrementa la sección o el espesor.
- f) **ASTM A588.** Acero resistente a la corrosión, de alta resistencia y baja aleación. Tiene un grado mínimo de resistencia en aceros tipo Shapes y tres grados para los tipos plates y bars. Estos niveles son: 50 klb/plg<sup>2</sup> y 46-42 klb/plg<sup>2</sup> respectivamente. Este tipo de acero es único debido a que la gran resistencia aplica a todas las secciones tipo Shapes, plates y bars arriba de 4 pulgadas de espesor. Plates y bars de 4 pulgadas tienen reducido al mínimo su resistencia.
- g) **ASTM A514.** Acero templado con una resistencia mínima de 90 a 100 klb/plg<sup>2</sup>. Esta especificación únicamente incluye placas y barras. Este acero se fabrica con un especial cuidado en el tratamiento del calor.

Algunos aceros son llamados "aceros del productor" (proprietary steel), debido a que su composición y característica son definidas por las especificaciones del productor. Los productores de este tipo de acero tienen rígidos controles del proceso de moldeo y aleación para poder alcanzar el mínimo de resistencia de 100 klb/plg<sup>2</sup>. La calidad de este acero a veces resulta muy favorable comparado con el acero estándar.

Los productores de acero están en constante progreso técnico y científico. La industria metalúrgica está desarrollando nuevos aceros para propósitos específicos y mejorando la versatilidad de los viejos aceros.

<sup>11</sup> Manual of Steel Construction, Allowable Strees Design, 9<sup>th</sup>. Edition, AISC. Páginas 1-7.

<sup>12</sup> Idem.

<sup>13</sup> Kips Square Inch (ksi) = klb/plg<sup>2</sup> (kilolibra por pulgada cuadrada)

### iii. Propiedades físicas

Cuando aplicamos fuerzas externas a los elementos de acero, estos producen "esfuerzos de compresión" y "resistencia a tensión".

Asumamos que tenemos una barra de acero estructural de 1 pulgada cuadrada y de un largo manejable, y la sujetamos a una máquina de prueba de materiales. Si ésta máquina se ajusta para estirar con una fuerza de 10.0 kips, se dice que la barra (con una sección de 1 pulgada cuadrada) tiene un esfuerzo de tensión de 10.0 kips por pulgada cuadrada (klb/plg<sup>2</sup>). Si la fuerza se incrementa a 20.0 kips, la barra tendrá un esfuerzo de tensión de 20.0 klb/plg<sup>2</sup>, y así en adelante.

La barra de esta forma se encuentra estirada o en tensión en proporción directa con la fuerza que está resistiendo. Si la máquina incrementa la fuerza, la barra se estira proporcionalmente. Dentro de ciertos límites, la fuerza externa deformará la barra casi sin notarlo y cuando se le quite la fuerza, la barra de acero volverá a su forma original. Esta propiedad del acero se llama elasticidad. Si la fuerza se aplica más allá del límite, entonces la barra se deformará, este estiramiento es característico del acero dúctil.

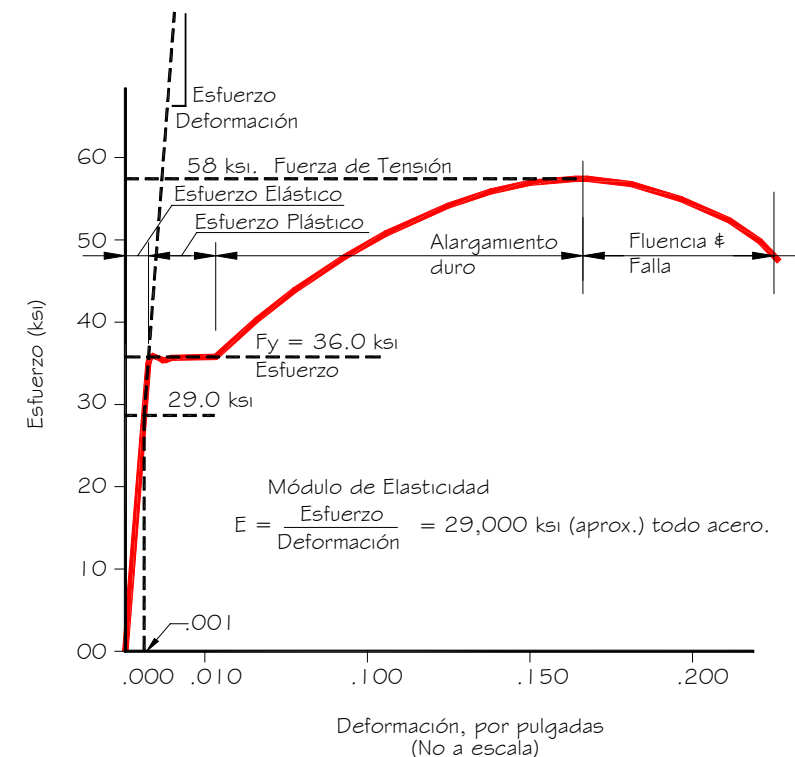
Las pruebas mecánicas de la mayoría de aceros dúctiles producen un punto de fluencia representado en la siguiente gráfica, este punto tiene un valor numérico diferente en diferentes aceros. Aceros de alta resistencia podrían no exhibir definidamente el punto de fluencia. Para todos estos aceros se establece un esfuerzo máximo en el *ASTM A370 Standard Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*.

No debería ser causa de confusión la diferencia entre el anterior concepto y el hecho que las especificaciones del AISC hayan establecido la definición el esfuerzo producido (lo que implica conocer un punto de fluencia) y la resistencia (en aquellos aceros que no muestran un punto de fluencia definido). El símbolo  $F_y$  se usa para expresar el esfuerzo en kips por pulgada cuadrada.

El ratio de esfuerzo se llama módulo de elasticidad y se representa numéricamente así:

$$E = \text{esfuerzo} / \text{deformación} = \text{aproximadamente } 29,000 \text{ klb/plg}^2.$$

La ilustración que aparece a continuación muestra un diagrama teórico del comportamiento del acero ASTM A36. La fuerza y el esfuerzo que se muestran son los mínimos especificados. Los test actuales muestran valores que exceden a estos.



CURVATURA DE ESFUERZO-DEFORMACIÓN PARA ACEROS ASTM A36

Ilustración IV.5

## B.- MANUALES DE ACERO

Alrededor del mundo existen diferentes tipos de manuales y códigos que norman la construcción con acero estructural. Estos manuales se han beneficiado de la investigación y avance de la técnica constructiva. A continuación se listan algunos importantes:

- Manual de Norma Americana AISC LRFD 3TH EDITION
- Manual de Norma Americana AISC ASD 9TH EDITION
- Manual de Normas Canadiense
- Manual de Normas Australiana B7
- Manual de Normas Europeas PS5400
- Manual de Normas Europeas PS5950
- Manual de Normas Europeas BSK94
- Manual de Normas Europeas BSK99
- Manual de Normas Chinas
- Manual de Normas CM6-0
- Manual de Normas DIN 18800
- Manual de Normas DS412
- Manual de Normas Alemanas
- Manual de Normas Danesas
- Manual de Normas Japonesas
- Manual de Normas Rusas
- Manual de Normas Españolas
- Manual de Normas NPD

### i. Sobre el "Manual of Steel Construction AISC Allowable Stress Design" Ninth Edition.

La Novena Edición del Manual fue producida por guía del *AISC Manual Committee*. El comité incluye un número igual de ingenieros que trabajan en el sector privado así como ingenieros que trabajan para agencias gubernamentales, ingenieros relacionados con la

investigación y la enseñanza, además ingenieros empleados por compañías constructoras y fabricantes.

Se aprecia además la importante aportación realizada por *The American Iron and Steel Institute* y al *The Welded Steel Tube Institute*, la cual se muestran desplegada en tablas por todo lo largo del libro.

Estas especificaciones forman un documento consensuado para una práctica constructiva uniforme tanto en el diseño como en la construcción de edificios de marcos de acero estructural.

### ii. Sobre el "Manual of Steel Construction AISC LRFD Low Factor Design" Third Edition.<sup>14</sup>

La segunda edición estuvo disponible en dos volúmenes conteniendo "el manual" en uno y "conexiones" en otro. Ahora, la tercera edición esta disponible en formato condensado en un solo volumen que tiene pestañas para una referencia rápida.

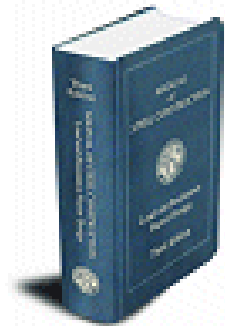


Ilustración IV.6

"Este manual ha sido reorganizado y creado en un nuevo formato con el propósito de proveer una práctica y eficiente forma de acceder la información necesaria para diseñar y construir con acero estructural. Las tablas lo guían rápidamente a especificaciones aplicables, códigos y estándares, así como normas aplicables a esos estándares. En este código todas las formas de acero (americano) están cubiertas incluyendo las características de estándares antiguos, los nuevos valores  $T$ ,  $k$  y  $k_1$  para las Vigas tipo  $W$  y el factor de reducción de muros 0.93 para HSS."

<sup>14</sup> Estos manuales se pueden conseguir a través de Internet en el sitio oficial del American Institute of Steel Construction, Inc. [www.aisc.com](http://www.aisc.com)



"Para las regulaciones de seguridad, los requerimientos de estabilidad y las apropiadas especificaciones de material, este código usa la guía de la OSHA.

"A diferencia de los códigos anteriores este provee nueva información sobre el dibujo de los elementos de acero, el criterio para lograr conexiones, información relacionadas a los molinos de acero, la fabricación, el montaje, tolerancias, fachadas, efectos de temperatura y requerimientos para la protección contra el fuego con un sumario de los más comunes UL partes."<sup>15</sup>

La tercera edición también incluye:

- \* Base de datos de los dibujos de las formas del AISC V3.0 en CD
- \* Especificaciones estructurales para edificios de acero 1999 LRFD
- \* Especificaciones para secciones huecas estructurales 2000 LRFD
- \* Especificaciones para miembros de angulares sencillos 2000 LRFD
- \* Especificaciones para juntas estructurales usando pernos ASTM A325 o A490
- \* Código estándar para edificios y puentes de acero
- \* Información sobre las W shapes actualizadas
- \* Rodondas HSS Cubiertas
- \* Dimensiones y propiedades para dobles canales unidos por 'la espalda'
- \* Tablas de superficie, perímetro, área a perímetros de ratios y áreas de superficie expandidas cubrir todas las formas (shapes).
  - Guía para códigos de aplicación y estándares para diseño con

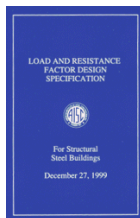


Ilustración IV.7

Para especificaciones técnicas de construcción para edificios de acero con este método de diseño se deberá consultar la siguiente publicación: LOAD AND RESISTANCE FACTOR DESIGN SPECIFICATION

<sup>15</sup> Según artículo publicado en la edición online de *Modern Steel Construction*.

acero.

- Nueva sección sobre especificación de materiales, incluyendo formas, placas, aseguradores y otros productos.

### C. CRITERIOS GENERALES PARA EL ESPACIAMIENTO ESTRUCTURAL (LUZ) CON ACERO.

La tabla mostrada a continuación ilustra el sistema adecuado para cubrir luces o espacios. Se muestran de forma comparativa otros materiales de construcción.

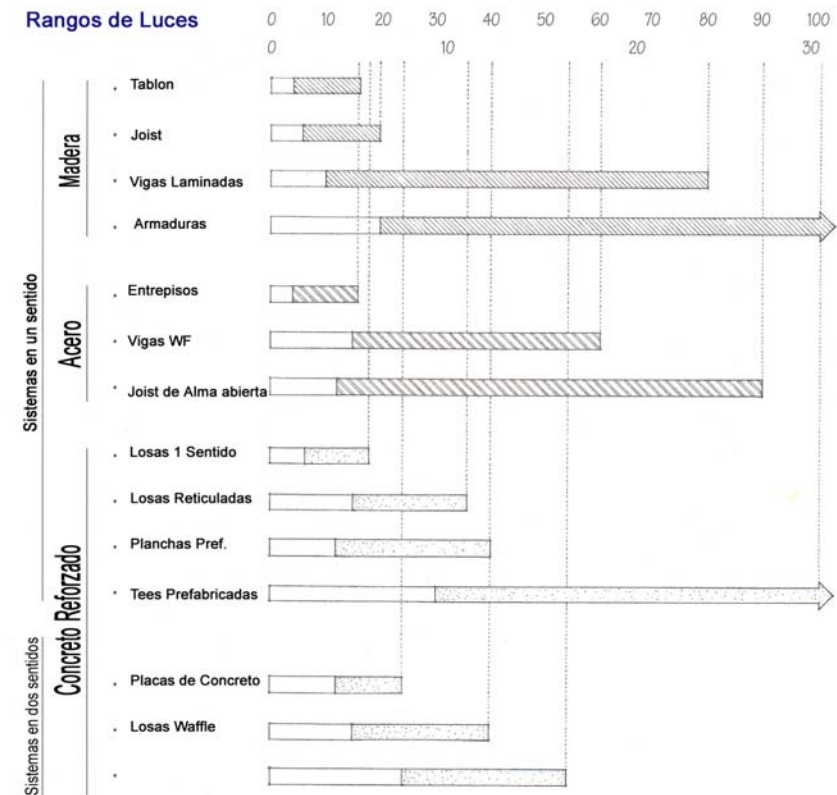


Ilustración IV.8

BUILDING TYPES AND WIDTHS		TOTAL WIDTH (FT)																	REMARKS			
BUILDING TYPE (ROOF SLOPE)		0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320		340	360	
Small building or self-framing (1:12/1:48)			■	■																		
Tapered beam/straight columns (1:12/1:24)			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Rigid frame one-way slope (1:12/1:48)			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	With interior columns, width increases by: 1 col./100 ft; 2 col./120 ft; 3 col./160 ft; 4 col./200 ft
Rigid frame high profile (4:12)			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Rigid frame low profile (1:12/1:24)			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Beam and column with interior column (1:12)					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Beam and column with 2 interior columns (1:12)						■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Beam and column with 3 interior columns (1:12)							■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Rigid frame wing extensions (1:12/1:24/1:48)			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Truss frame straight columns (1:12/3:24/5:24/1:48)					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	With interior columns, width increases by: 1 col./100 ft; 2 col./160 ft; 3 col./200 ft

Copyright © 2000

Architectural GRAPHIC Standards CD-ROM

John Wiley & Sons, Inc. New York, NY

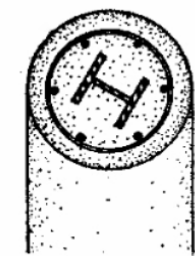
Ilustración IV.9 Tipos de estructuras y sus luces., tomada del *Architectural GRAPHIC Standards CD-ROM Version*

A continuación se explican algunos criterios para el uso de elementos de acero en los proyectos de arquitectura.

#### D. COLUMNAS DE ACERO

Cuando se diseña un edificio, frecuentemente se utilizan las secciones llamadas "Wide-Flange" (W ó WF)<sup>16</sup> o de patín ancho. Las secciones W, se ajustan a conexiones o vigas en 2 ó 4 sentidos. Debido a su forma, toda su superficie es accesible para hacer conexiones soldadas o pernadas.

Otras formas de acero usadas para columnas son



Columna compuesta (Composite column)

Ilustración IV.9

<sup>16</sup> En Guatemala se utiliza comúnmente la denominación "vigas I", sin ningún tipo de discriminación a perfiles, sin embargo este nombre, técnicamente aplica únicamente a las secciones "S". Ver página 96.

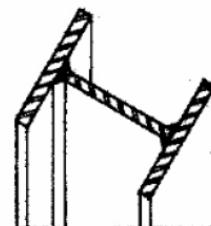
los tubos redondos (round pipes), tubos cuadrados o rectangulares (square or rectangular tubes). También es posible fabricar columnas a partir de otras formas de acero así como de placas, éstas secciones se llaman "Fabricated Beam" o "Fabricated Column" (Vigas fabricadas o Columnas fabricadas). Esto posibilita la flexibilidad y creatividad.<sup>17</sup>

A las columnas metálicas se les puede recubrir con concreto (Compound Column). En este caso, el espesor del mismo deberá ser de 2 1/2" (65 mm) como mínimo y deberá reforzarse con malla.

Las llamadas "Composite Column", son secciones estructurales encapsuladas en toda su longitud con concreto utilizando refuerzos verticales y espirales.<sup>18</sup>

La distribución de columnas en un edificio esta dada principalmente por el sistema de entepiso a usar.<sup>19</sup>

En la prefiguración estructural de la columna, se toma sobre la base de la viga más pesada con la cual se une.



Placas soldadas (Welded plates)



Cruciforme (4 angulares) Cruciform (4 angles)



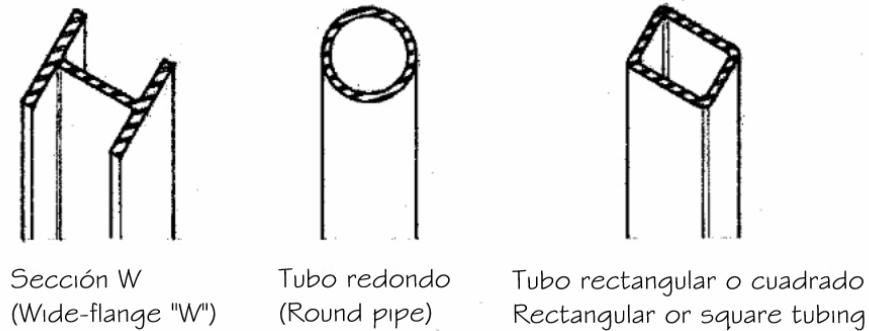
Placas soldadas (Welded plates)

Ilustración IV.10

<sup>17</sup> Las columnas y vigas con "cartelas variables" en marcos con base articulada, son vigas y columnas fabricadas a partir de planchas planas.

<sup>18</sup> Una novedad en el Manual of Steel Construction AISC LRFD Third Edition, es que contiene una sección acerca de las posibilidades estructurales con este tipo de columnas.

<sup>19</sup> Véase la sección F. Marcos Estructurales.



Sección W  
(Wide-flange "W")

Tubo redondo  
(Round pipe)

Tubo rectangular o cuadrado  
Rectangular or square tubing

Ilustración IV.11

Diferentes secciones para columnas de acero.

### i. Platina Base de columna

Para distribuir las cargas concentradas de una columna a los cimientos de concreto, se requiere una placa o platina de base, esto también nos asegurará que el área de presión de la columna no exceda la capacidad del concreto.

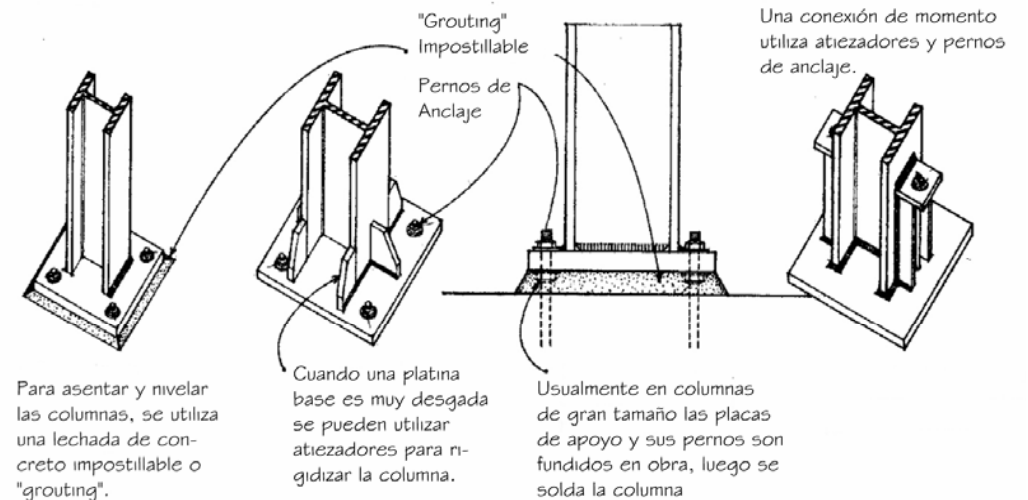
Es importante hacer notar que *sólo en casos muy especiales* la placa o platina de base se solda a la columna en el taller, generalmente esta se coloca cuando se funden los cimientos, de esta forma también es posible soldarla a la armadura del mismo.

Para nivelar la placa se utiliza una mezcla especial e impostillable llamada "Grouting".

El soldar las columnas en el campo sobre sus respectivas placas hace más fácil el montaje de la estructura misma debido a que si existió un error involuntario en la fundición de cimientos o un pequeño corrimiento del pedestal de zapata sobre su eje, aún es posible compensar la estructura sobre las placas.

Es conveniente que los pedestales de zapata (incluido el "grouting") sobresalgan un mínimo de 2 pulgadas (50 mm) del nivel de piso terminado para evitar corrosión de la columna.

A veces dependiendo del uso y la localización geográfica de nuestro proyecto, es aconsejable elevar el nivel del pedestal de zapata hasta una altura de 1.00 o 1.50 metros de esta forma puede evitarse daño a la estructura debido a tráfico de vehículos o humedad.



Para asentar y nivelar las columnas, se utiliza una lechada de concreto impostillable o "grouting".

Cuando una platina base es muy desgajada se pueden utilizar atezadores para rigidizar la columna.

Usualmente en columnas de gran tamaño las placas de apoyo y sus pernos son fundidos en obra, luego se solda la columna

El uso de platinas de apoyo para asentar las columnas metálicas es necesario para distribuir su peso en toda el área de apoyo, pero el soldarlas en taller a la columna o dejarlas fundidas en el concreto y luego soldar la columna en campo, es una decisión que se deberá tomar en el desarrollo de la planificación.

Ilustración IV.12  
Platinas de apoyo

Cuando se diseña un edificio en acero, se debe tomar en cuenta que las secciones de las columnas varían en peso y dimensión en cada nivel del mismo. Algunas formas en que estos cambios pueden realizarse se pueden observar en la siguiente gráfica.

Platina de apoyo

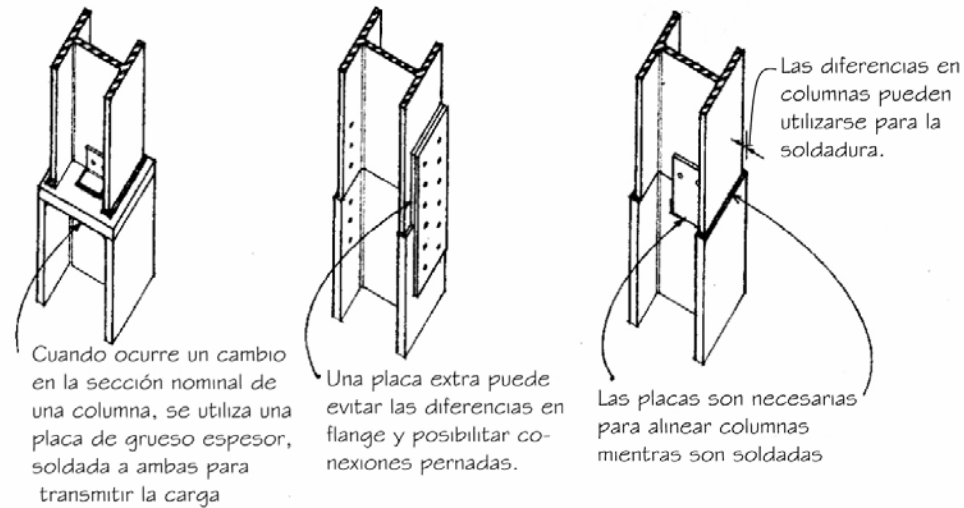


Ilustración IV.13  
Union de columna a columna

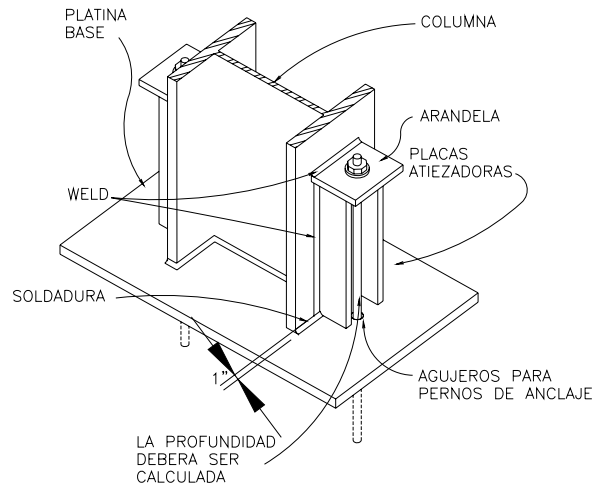


Ilustración IV.14

Más información con relación al diseño de elementos en compresión (columnas con carga concéntrica) así como para el diseño de placas de base se puede consultar en el *Manual of Steel Construction ASD, Ninth Edition, Part 3. Column Design & Part 5 Specifications and Codes.*

Guía estimada para columnas de acero

Descripción	Sección	Pies <sup>2</sup>	Metros <sup>2</sup>
Tubo Estructural (Structural Tube)	4x4	750	70
Tubo Estructural (Structural Tube)	6x6	2400	223
Wide-Flange	W6x6	750	70
Wide-Flange	W8x8	3000	279
Wide-Flange	W10x10	4500	418
Wide-Flange	W12x12	6000	557
Wide-Flange	W14x14	12000	1115

Ilustración IV.15

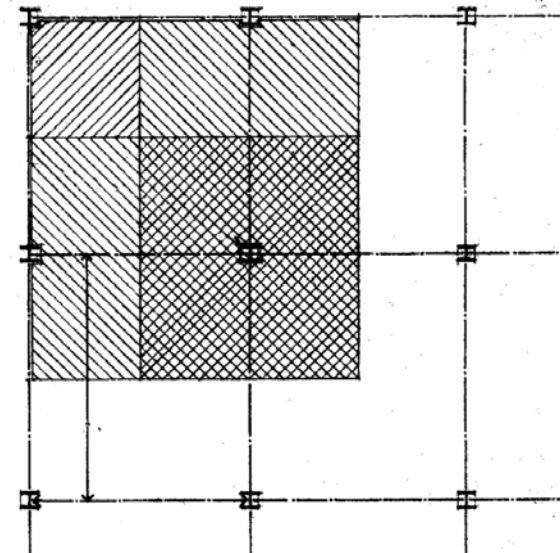


Ilustración IV.16

## E. VIGAS DE ACERO

Las formas estructurales más eficientes son las secciones tipo "Wide Flange" (W ó WF) comúnmente conocidas como de patín ancho. Igual que en las columnas, las secciones W, se ajustan a conexiones en 2 ó 4 sentidos, sean estas vigas o columnas. Debido a su forma, toda su superficie es accesible para hacer conexiones soldadas o pernadas de diferentes elementos.

Estas secciones reemplazaron a las clásicas vigas I, (S), sin embargo, las vigas también pueden formarse por secciones de Canal (C), por tubos estructurales o bien secciones compuestas por otros elementos.

### i. Prefiguración Estructural de Vigas

La prefiguración estructural de las vigas (WF) se hace de la manera siguiente:

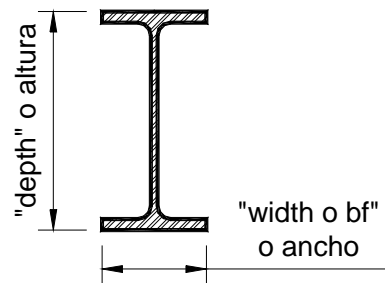


Ilustración IV.17

- Para estimar "depth" o altura = luz / 20 (en vigas de molino)
- Para estimar "depth" o altura = luz / 15 (en vigas fabricadas)
- Para estimar "width" o ancho = 1/3 o 1/2 (de "depth" o altura)

El objetivo del cálculo estructural es usar las secciones de acero más ligeras que resistan el torcimiento, las fuerzas de corte, las fuerzas

externas e internas aceptables a los límites de tensión y la vibración excesiva.

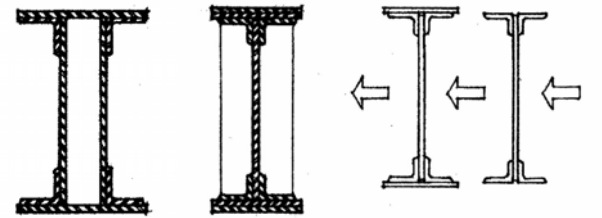


Ilustración IV.18

Ejemplos de vigas fabricadas

Las vigas se pueden fabricar con placas o formas que se soldan o se remachan juntos. Una placa puede formar el alma, otra el patín inferior E otra el superior, estas últimas

placas pueden ser sustituidas por angulares. Se pueden soldar también placas para que el alma incremente su resistencia a la fuerza de corte. Para incrementar su resistencia a la flexión también se pueden soldar placas para incrementar el módulo de la sección.<sup>20</sup>

En las vigas fabricadas de alma abierta, la rigidez del elemento se puede lograr al colocar elementos (angulares) atezadores. Generalmente estas piezas se colocan en los puntos que resisten cargas concentradas, los puntos de soporte y los demás se distribuyen a lo largo de la viga para incrementar la resistencia a las fuerzas de compresión diagonales.

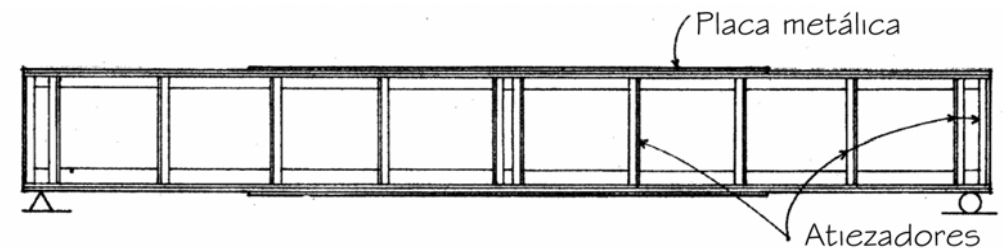


Ilustración IV.19  
Ejemplo de viga fabricada

<sup>20</sup> Véase la página 67 y 68 del capítulo anterior para lograr visualizar cómo trabajan los esfuerzos en la viga.

Las vigas de caja se construyen a partir de placas y tienen una sección rectangular al hacerles un corte transversal.

Otro tipo de vigas son aquellas que se fabrican dividiendo el alma de una sección W con un corte tipo zigzag, entonces se sueldan las crestas, de esta forma se logra aumentar su profundidad sin aumentar su peso.

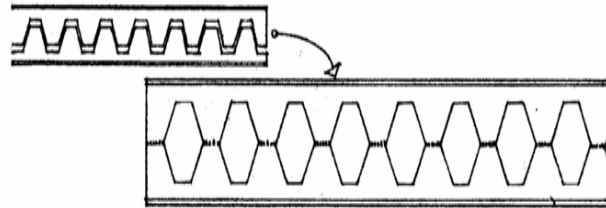


Ilustración IV.20  
Ejemplo de viga fabricada

No es aconsejable hacer este tipo de cortes por método manual, debido a que es necesario dejar un radio mínimo de 1/2" en los vértices. Este radio evita la fisura en el material.

Más información con relación al diseño de vigas se puede consultar en el *Manual of Steel Construction ASD. Ninth Edition*.

## ii. Uniones Viga-Columna.

La resistencia de una unión depende de varios factores: dimensiones y pesos de sus miembros, tipo de elementos de fijación que se utilicen (tees, angulares o placas), de la configuración de pernos y soldadura que se usen.

El AISC define tres tipos de configuraciones de uniones que deben ser usadas en marcos de acero. Estos tres tipos afectan el

desempeño estructural, la forma, dimensiones de sus miembros y los métodos a usar para lograr las uniones.

**Tipo 1. Unión rígida o de momento**, asume que las conexiones de la viga-columna están rígidas y serán capaces de mantener su ángulos originales sobre cualquier carga.<sup>21</sup>

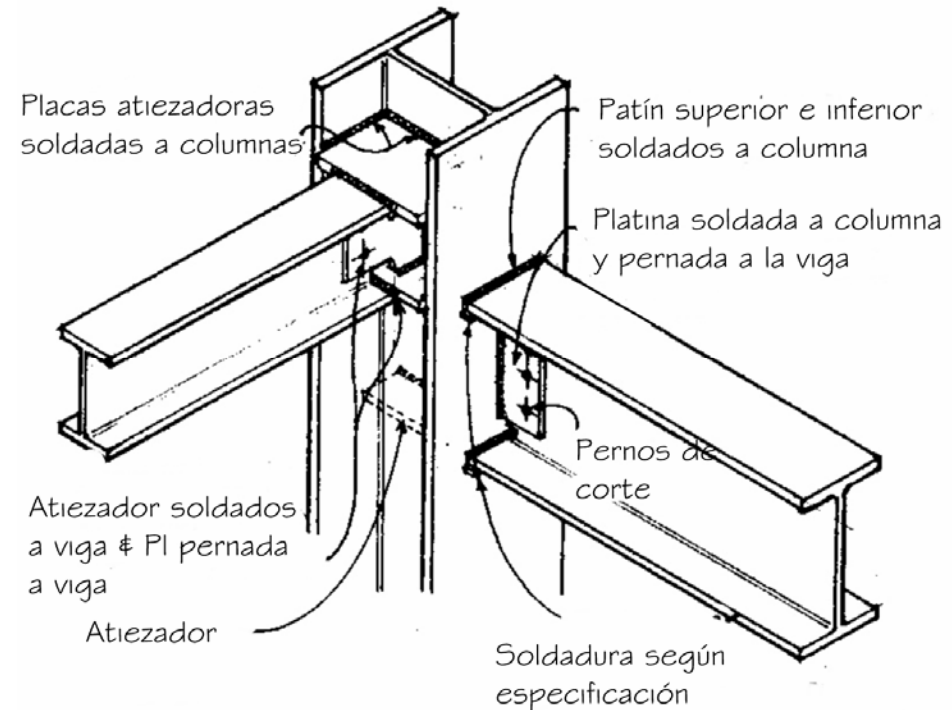


Ilustración IV.21

<sup>21</sup> Véase la sección B. "Esfuerzos Internos" en el capítulo anterior.

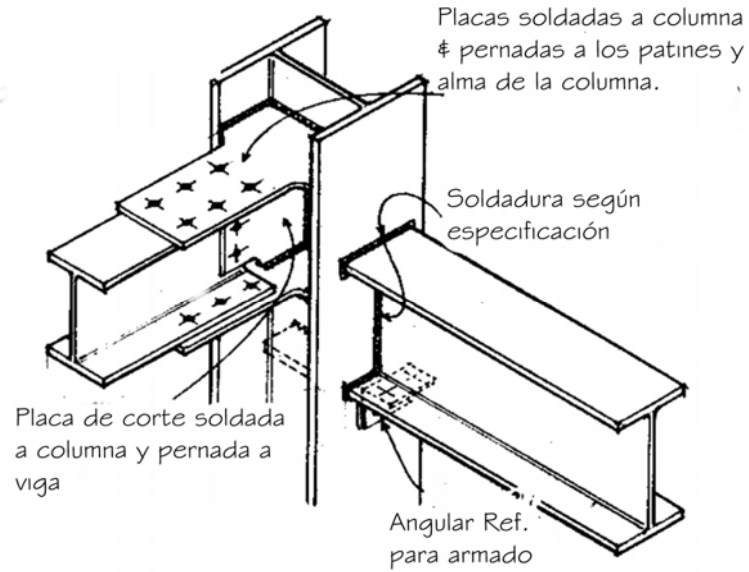


Ilustración IV.22

**Tipo 2. Unión simple o de corte**, asume que sólo se conectan los extremos de las vigas de molino o vigas fabricadas y son libres girar bajo las cargas de gravedad.

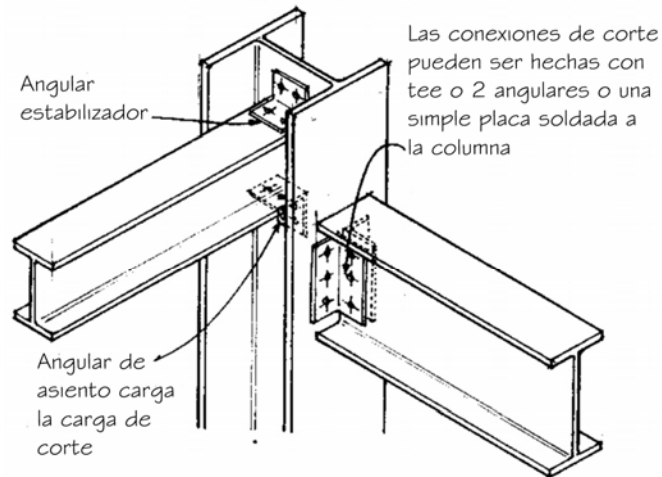


Ilustración IV.23

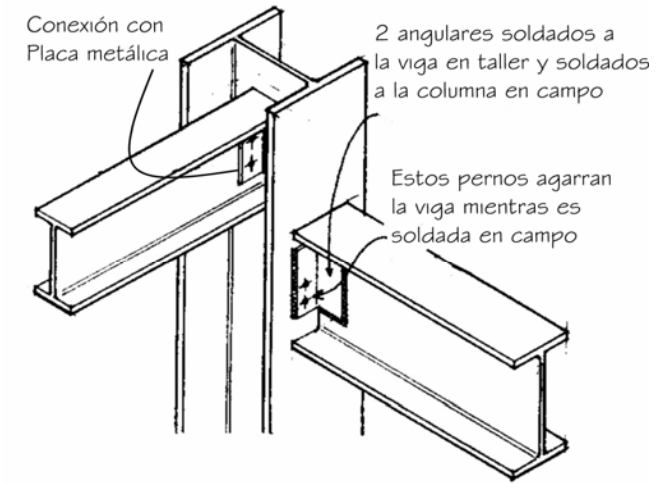


Ilustración IV.24

**Tipo 3. uniones semi-rígidas**, asume que la viga y las conexiones de la viga poseen una limitada pero conocida capacidad al momento-resistente.

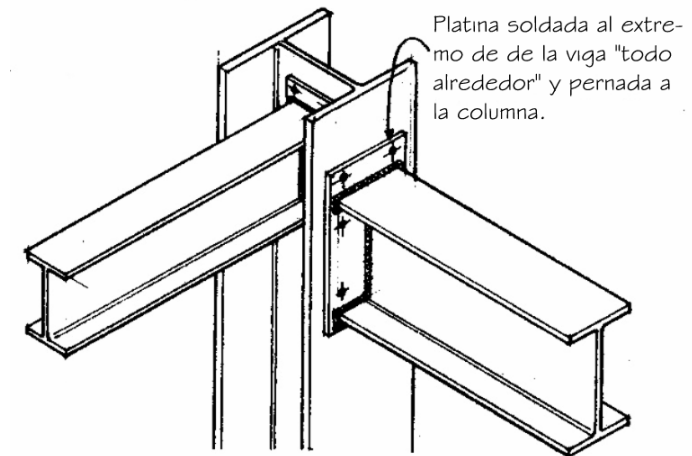


Ilustración IV.25

Estos tipos de uniones no solamente afecta la configuración y la capacidad de resistencia estructural de los miembros, sino también el costo del proyecto.

Hay muchas formas en la cual el acero estructural puede unirse o conectarse. Se pueden usar varios tipos de conectores y varias combinaciones de pernos y soldaduras. Para una referencia completa de la disponibilidad de secciones de acero se debe consultar el AISC Manual of Steel Construction, en el Manual también se puede encontrar las propiedades, dimensiones, tabla de cargas permisibles para vigas y columnas, además se detallan los requerimientos para las uniones soldadas o pernadas.

Además, la resistencia a la ruptura y el grado de rigidez de las uniones, debe ser evaluado tomando en cuenta la economía en la fabricación, montaje y apariencia visual si la estructura se deja expuesta.

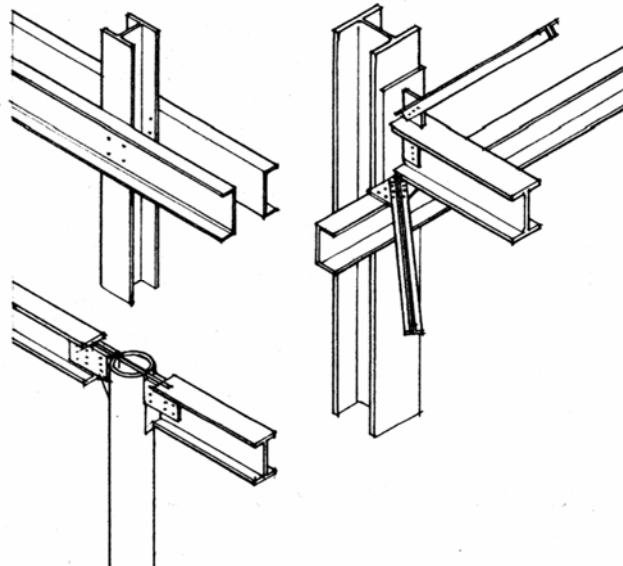


Ilustración IV.26

### iii. Uniones Viga-Vigueta

**Tipo 1. unión rígida o de momento:** asume que las uniones viga-viga están rígidas y serán capaces de mantener su ángulos originales sobre cualquier carga.<sup>22</sup>

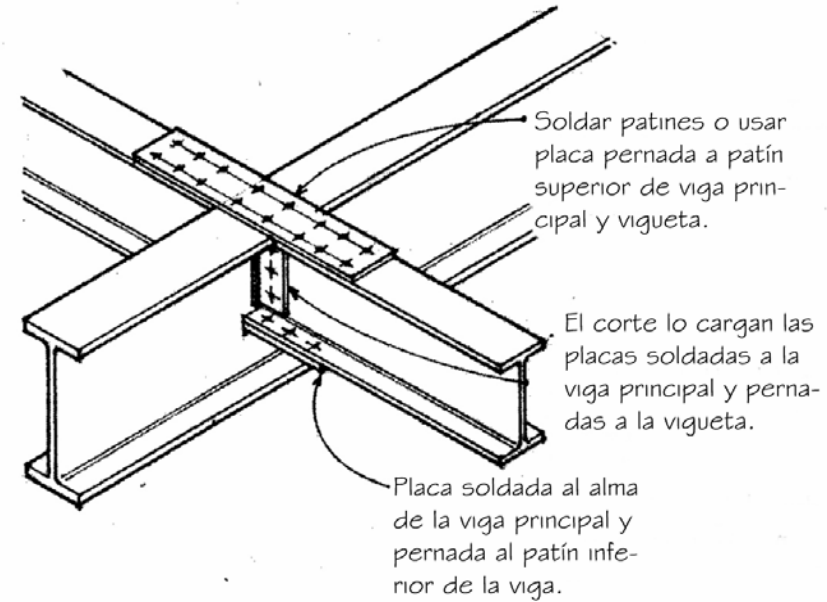


Ilustración IV.27

<sup>22</sup> Véase la sección B. "Esfuerzos Internos" en el capítulo anterior.



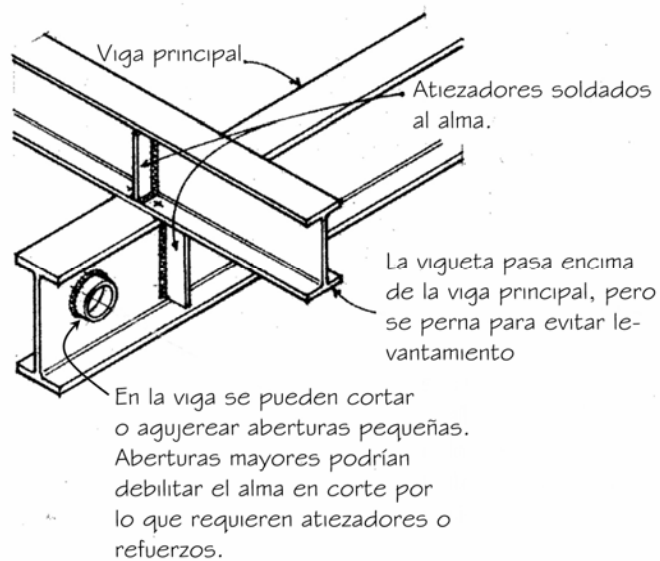
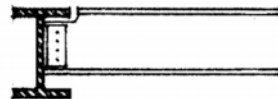
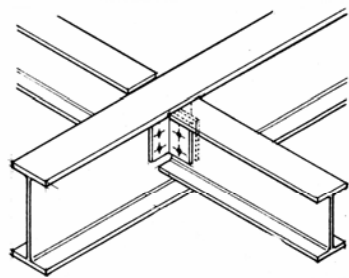


Ilustración IV.28

**Tipo 2. unión de Corte:** se asume que sólo se conectan los extremos de las viguetas y estas son libres de girar bajo las cargas de gravedad.



Cuando se une una vigueta a la viga principal, se deben realizar cortes especiales para evitar el rozamiento ellas.

Ilustración IV.29

## F. MARCOS ESTRUCTURALES

Las estructuras de acero convencionales<sup>23</sup> se construyen a partir de vigas y columnas de molino roladas en caliente y se complementan con viguetas (joist) de alma abierta, pisos de formaleta metálica y una regular cantidad de elementos secundarios (angulares, costaneras, canales, etc). Todos estos elementos llegan a formar parte de un esqueleto metálico que se subdivide en "marcos estructurales" con el que se pueden diseñar desde un simple piso hasta edificios de mediana altura.

Debido a que es difícil trabajar en acero en el sitio de montaje, normalmente este se corta, se trabaja en su forma final y se taladra en un taller de fabricación. En el taller de fabricación, se trabaja de acuerdo a las especificaciones generales basadas en el código del AISC y especificaciones técnicas propias del proyecto. El trabajo del taller permite tener una construcción rápida y precisa.<sup>24</sup>

Cuando se proyecta un edificio en acero, con marcos rígidos horizontales, es necesario tener presente lo siguiente:

- Los marcos de acero son muy eficaces cuando se diseñan de forma que las columnas soporten un patrón regular de vigas y viguetas.
- El espaciado de columnas, deberá ser igual o menor a la luz de la viga.

<sup>23</sup> Con el término "convencional" nos referimos a la construcción de edificios, casas, bodegas, centros comerciales, etc., es decir todas aquellas estructuras que no requieren soportar grandes cargas y a la vez tener grandes luces como podría ser el caso en edificios industriales de grandes dimensiones.

<sup>24</sup> Con los programas de computadora que enlazan el CAD (Diseño Asistido por Computadora) con las máquinas CNC (Control Numérico Computarizado) de corte y taladrado, la precisión es milimétrica. En edificios de 7 a 10 niveles se pueden llegar a tener diferencias entre la proyección y construcción menores a 1 pulgada.

- Se deberá orientar el alma de las columnas paralelamente al eje corto del marco estructural, debido a que esta dirección es crítica y más susceptible a movimientos laterales.
- Se deberá orientar los patines de las columnas al perímetro del edificio de manera que facilite la sujeción de muros, tabiques y cualquier otro elemento al marco de la estructura.
- La resistencia lateral al viento o fuerzas sísmicas requieren la formación de planos de corte, refuerzos diagonales o marcos rígidos con uniones de momento.
- Debido a que el acero puede perder su resistencia debido a incendios, todos los elementos de acero deberán ser protegidos o cubiertos para contrarrestar el efecto del fuego.

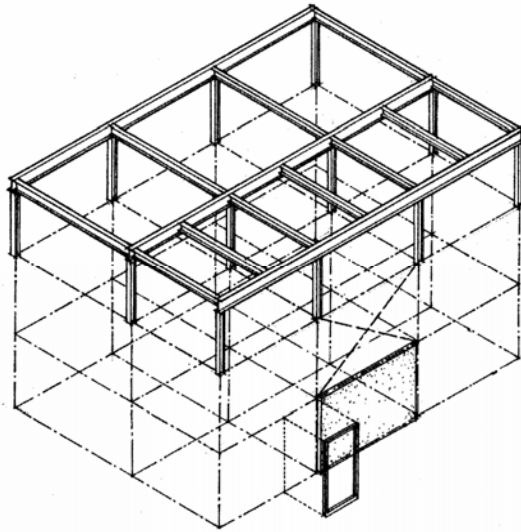


Ilustración IV.30 La ilustración muestra la configuración de marcos rígidos del tercer nivel de un edificio. Nótese la formación de planos de corte y el uso de tensores para contrarrestar el movimiento lateral.

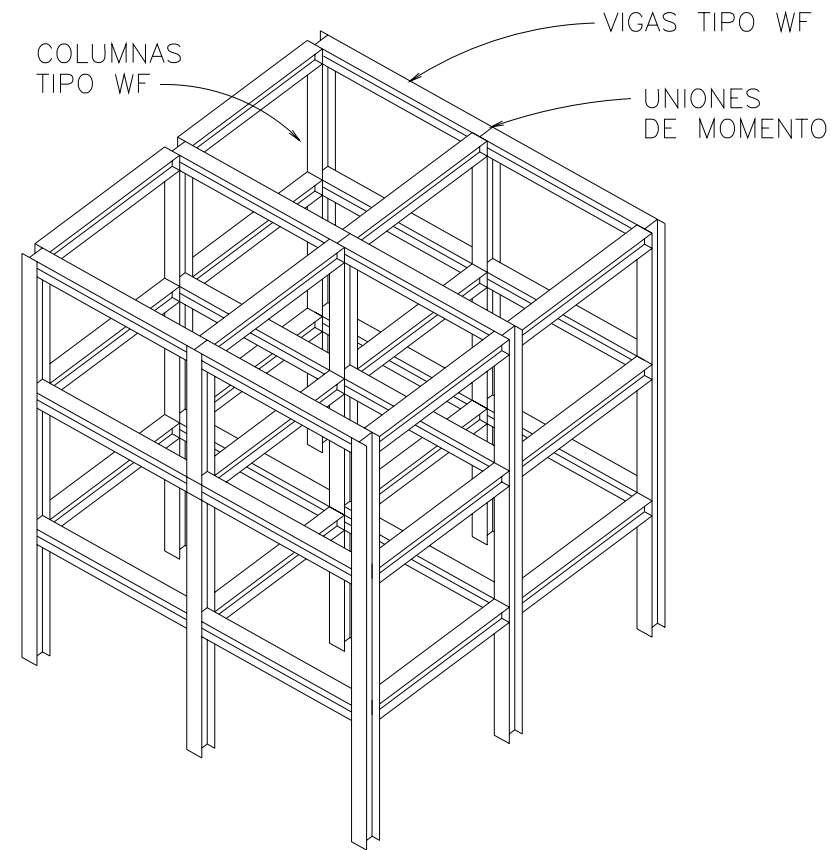
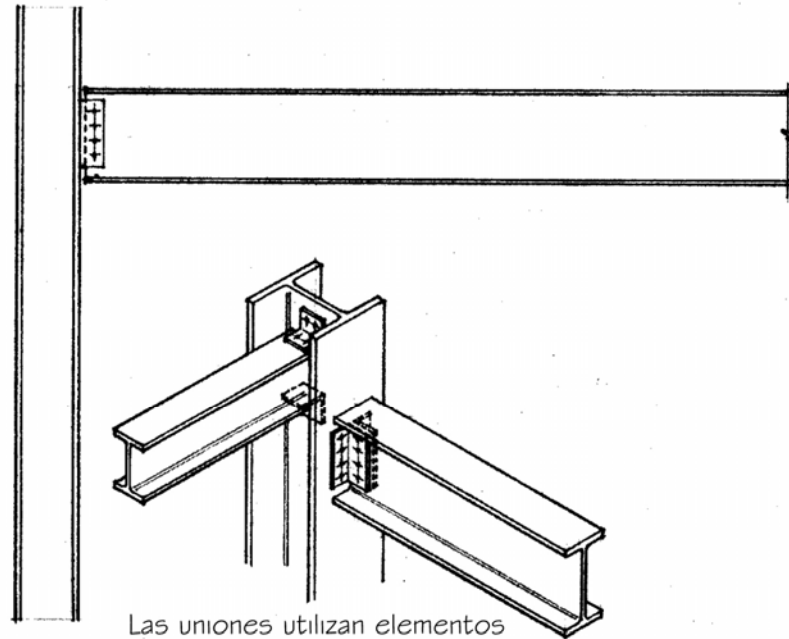


Ilustración IV.31 Se muestra el uso de vigas y columnas WF.



Las uniones utilizan elementos de transición como: angulares, tees, placas o platinas. Algunas uniones podrían ser remachadas pero muy a menudo son pernadas o soldadas.

Ilustración IV.32

Un marco rígido es lo menos eficiente para alcanzar la estabilidad lateral en edificios altos por lo que son recomendados en edificios bajos y medianos.<sup>25</sup> Cuando se incrementa la altura en un edificio, es necesario no solamente un marco rígido sino algún mecanismo de arriostamiento como arriostres diagonales o un centro rígido. El tema de la edificación de gran altura no es cubierto en esta tesis.

<sup>25</sup> Como “edificios altos” nos referimos a rascacielos. Todo proyecto de edificio debe ser sujeto a un profundo análisis estructural, pues podría darse un caso de un edificio medianamente alto pero muy estrecho que lo haría muy susceptible a fuerzas laterales, por lo que su diseño debería tener arriostres adicionales.

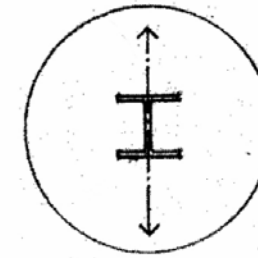


Ilustración IV.33 se deberá orientar el alma de las columnas paralelamente al eje corto del marco estructural

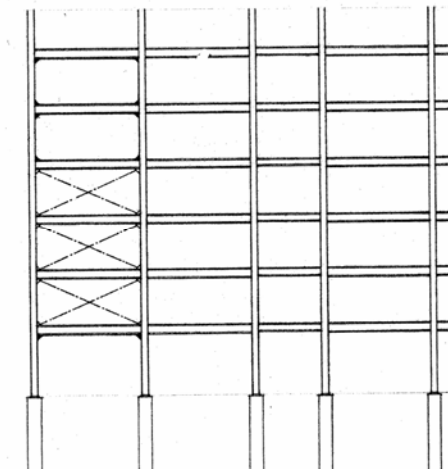
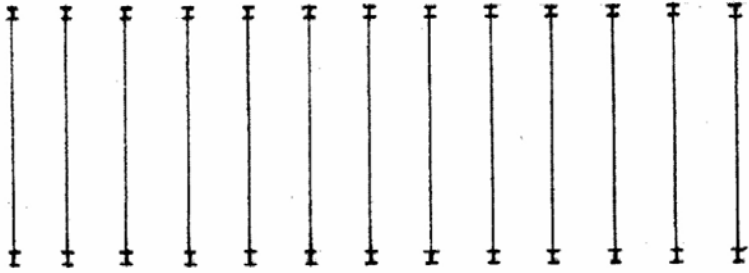


Ilustración IV.34. Elevación lateral de un edificio mostrando una sección del mismo debidamente arriestrado.

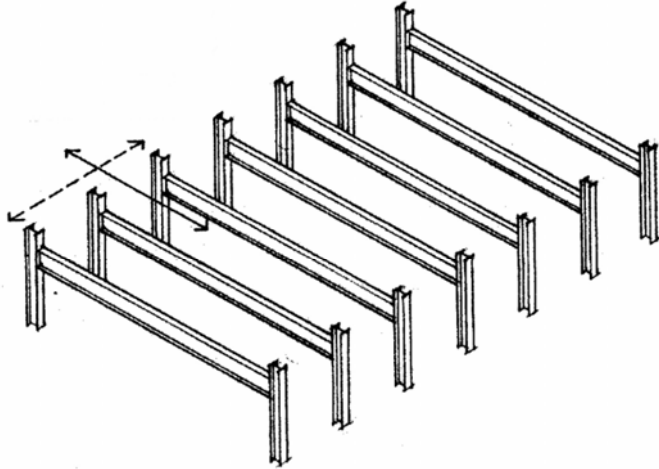
La forma de distribución de vigas es una característica de la estructura que debe ser analizada en los proyectos de arquitectura, en los sistemas de marcos rígidos podemos mencionar tres tipos:

**i. Sistema de vigas en un sentido**



Cada par de columna soporta una gran luz de una viga. Este sistema se ajusta para aquellos edificios largos y estrechos, en especial cuando se desean espacios donde no interfieran las columnas.

Ilustración IV.35

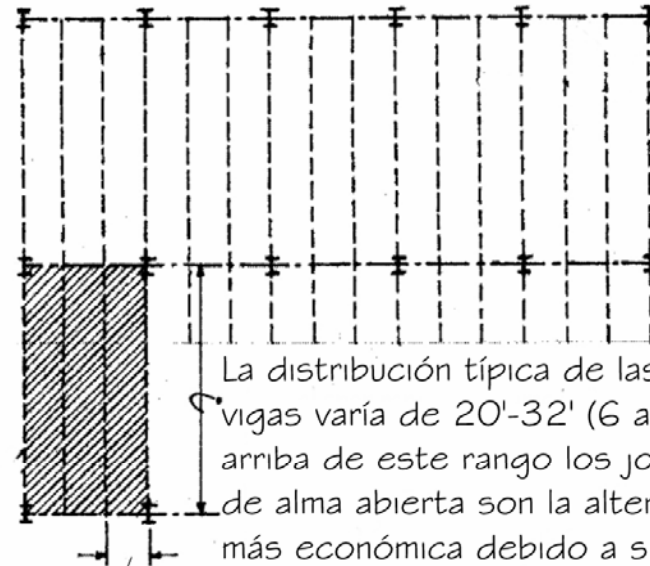


Se necesita algún mecanismo para resistir la carga lateral, pero las fuerzas laterales tienden a ser más críticas en las direcciones cortas.

Ilustración IV.36

Para criterios de longitudes de luces apropiadas en este sistema ver tabla en ilustración IV.8 & IV.9

**ii. Sistema de vigas en dos sentido**

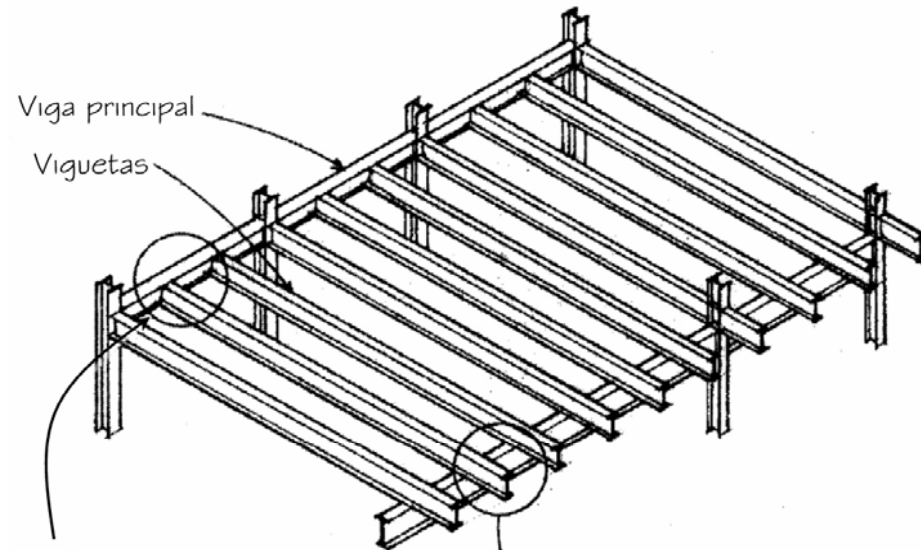


La distribución típica de las vigas varía de 20'-32' (6 a 9 m.) arriba de este rango los joist de alma abierta son la alternativa más económica debido a su peso reducido.

Las vigas están espaciadas a 6'-15'. El espaciamiento varía depende de la magnitud de carga aplicada.

Los marcos de acero deben utilizar bahías rectangulares formadas por vigas relativamente livianas.

Ilustración IV.37



Las uniones de viguetas dentro de las vigas principales, minimizan la profundidad del piso; algunos servicios mecánicos pueden pasar a través de agujeros en el alma de la viga, pero las líneas largas pueden ser acomodadas entre el cielo suspendido.

El sistema en dos capas, incrementa la profundidad del piso, pero provee más espacio para servicios mecánicos

Las vigas principales, distribuidas en el eje corto de un edificio pueden contribuir a la estabilidad lateral de la estructura.

Ilustración IV.38

## G. SISTEMAS DE MARCOS

Los marcos articulados en su base también pueden ser configurados para ofrecer soluciones a dos aguas. De manera similar a los marcos rígidos de vigas horizontales, estos consisten en dos columnas y una viga de molino<sup>26</sup> o viga fabricada rígidamente conectada en sus extremos.

<sup>26</sup> Estructuralmente se considera una sola viga, en la práctica es formada por dos o más elementos.

Las cargas aplicadas al marco producen momentos en su eje axial así como esfuerzos de corte en todos sus miembros. Esto se produce debido a que se restringe el giro en cada extremo de los elementos. Los momentos en la base de los marcos se evitan utilizando uniones articuladas (es decir que permitan el movimiento) estas generalmente consisten en utilizar platinas de anclaje con solo dos pernos de sujeción. Un marco articulado es por tanto, estáticamente indeterminado y rígido solamente en su plano.

Cuando se proyecta un edificio con marcos articulados a dos aguas, es necesario tener presente lo siguiente:

- Los marcos articulados pueden fabricarse de varias formas con luces que pueden variar desde los 30' a 120' (9.00 a 36.00 m).
- Los marcos articulados a dos aguas son estructuras de un nivel que se utilizan para edificios industriales livianos, bodegas y edificios de uso recreativo.
- Pueden ser soluciones rápidas y relativamente baratas a ampliaciones en edificios.<sup>27</sup>
- La distribución de costaneras (sean del tipo "C" o "Z") varía en función de la lámina de cubierta a usar. Comúnmente las distribuciones varían desde 4' a 5' (1.22 a 1.525 m).<sup>28</sup>. Para láminas de fibra vegetal se utiliza generalmente una

<sup>27</sup> 25 a 35# por metro cuadrado con altura de columnas de 6.00 m.

<sup>28</sup> Esta distribución se basa en el uso de las costaneras más comerciales: tipo C de 4" de 1/16" y C de 6" de 1/16". La empresa guatemalteca Aceros Prefabricados, S. A. rola sus propias costaneras desde 4" hasta 12" variando los espesores desde 1/16 hasta 3/16". Esto permite modulaciones de marcos rígidos arriba de los 6.00 m usuales y a la vez utilizar la máxima distancia entre apoyos en lámina troquelada, alrededor de 1.90 m. para calibre 24

distribución de 1.22 m<sup>29</sup> y en láminas troqueladas la distancia de apoyo máxima es de 1.90 m.

- Pueden forrarse totalmente con láminas troqueladas. En este caso, se utilizan el mismo tipo de costaneras que en la cubierta y el mismo sistema de arriostramiento.
- El espaciamiento típico entre marcos es de 20' a 24' (6.10 a 7.315 m) a ejes.<sup>30</sup>
- El marco articulado provee resistencia a las fuerzas laterales en su plano, pero deberá ser arriostrado en dirección perpendicular al marco.
- Estos marcos generalmente se dejan sin protección contra-incendio, la razón es que algunos códigos reducen los requerimientos de protección contra-incendios a estructuras de cubiertas de acero que se eleven 25' (7.62 m) arriba del suelo.

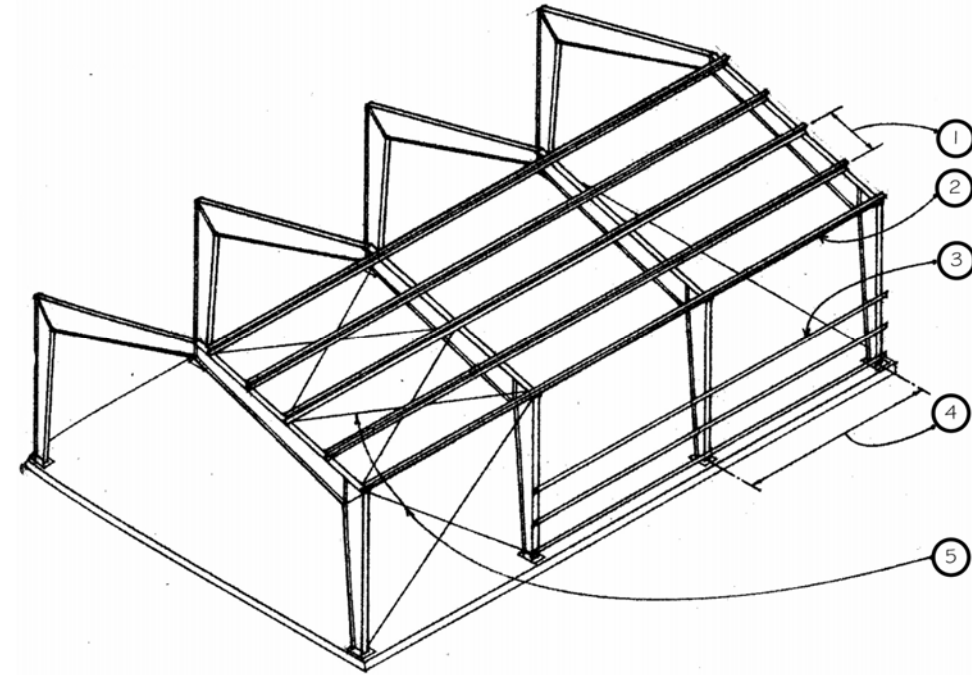


Ilustración IV.39. Isométrico de marco articulado.

1. Espaciamiento entre costaneras varía en función de la costanera a usar (4", 6", 8" o 12") y el tipo de lámina o peso del techo a soportar (si es sólo láminas troqueladas, láminas tipo Sándwich, tipo fibrocemento + tejas. Usualmente, para láminas troqueladas, se pueden utilizar costaneras de 4" para luces menores a 4.00 metros y espaciamientos @ 1.20 m. Se pueden utilizar costaneras de 6" para luces menores a 6.00 m y espaciamientos de 1.50 m. Cualquier otra distribución es aconsejable que sea chequeada por un ingeniero.
2. Los elementos que se utilizan como costaneras o polines pueden ser los tradicionales tipo "C", tipo "Z" o pequeños viguetas (viguetas (joist)) de alma abierta conformados por varillas de hierro.

<sup>29</sup> En proyectos donde se utiliza lámina perfil 10 como base para tejas de barro, esta distribución puede variar sobre la base del peso (#/pie<sup>2</sup>) y el tipo de costanera a usar.

<sup>30</sup> En casos especiales se pueden diseñar marcos a espaciamientos más amplios.

3. El cerramiento lateral de la nave de marcos articulados puede ser de mampostería reforzada, paredes de concreto tipo tilt-up o forro de láminas troqueladas. En este último caso, el espaciamiento corresponderá a las mismas consideraciones descritas en el punto 1.
4. La modulación de marcos usual es de 5.00 hasta 8.00 m, sin embargo, resultan ideales aquellas modulaciones que lleguen a los 6.00 m. Un asunto a tomar en consideración en la modulación de marcos es la longitud de los polines o costaneras a usar, ya que estos están disponibles en longitudes de 20' y 40' (6.00 – 12.00 m.)
5. Los arriostres contribuyen a estabilizar toda la estructura tensándola y rigidizándola. Generalmente son ubicados de forma intercalada en los marcos, es decir: 1 módulo sí, el siguiente no. Asimismo, las cubiertas cuyas pendientes sean mayor o igual al 25% deberán tener elementos metálicos conocidos como tensores que unirán a las costaneras. En una luz típica de 6.00 m, los templetos estarán distribuidos @ 2.00 m.
6. Tensores. Se utilizan para evitar la flexión lateral entre costaneras en pendientes mayores al 25%. Se colocan en los tercios si las luces de costaneras son mayores de 21' y a los medios si son menores.

El marco articulado<sup>31</sup> y a dos aguas se compone de los siguientes elementos:

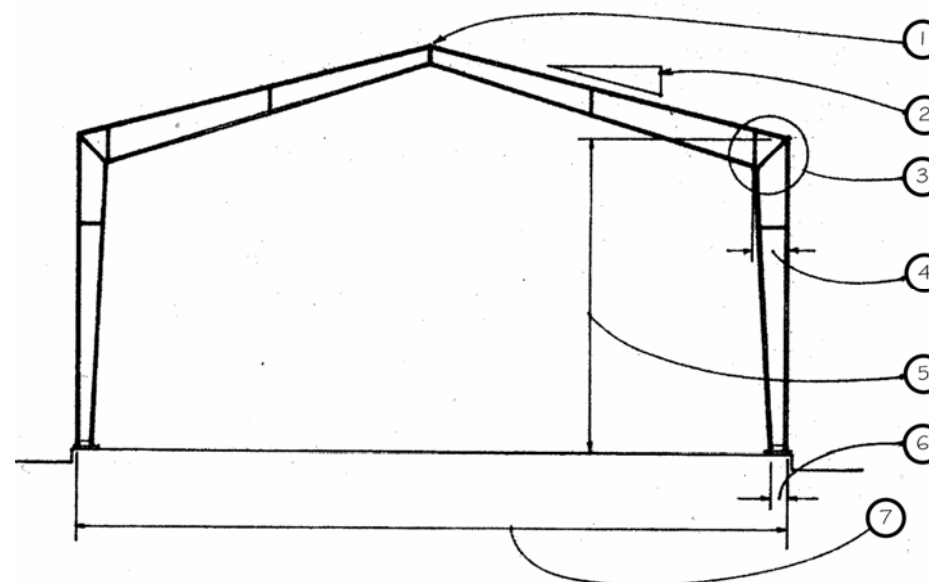


Ilustración IV.40

1. Cumbre: Su altura se determina dividiendo la luz entre 40. ( $c = \text{luz} / 40$ )
2. La pendiente: variable de 8% hasta 30%. Es necesario chequear la pendiente mínima de la lámina a usar de cubierta para determinar la pendiente del marco.
3. Las uniones: son pernadas o soldadas para resistir el momento.
4. Hombro de columna: se determinan dividiendo la luz entre 25. ( $Hb = \text{luz} / 25$ )

<sup>31</sup> La razón por la que este sistema de marcos reducen sus secciones se expone claramente en el capítulo anterior, página 69.

5. Altura de columna: generalmente varia desde los 8' hasta los 30' (2.44 a 9.145 m). En Guatemala resultan muy típicos los marcos con alturas de columnas de 6.00 y 7.50 m.
6. Base: 8" a 20" (0.205 a 0.510 m) típico.
7. Luz: 30' a 120' (9 a 36 m) típico. La altura total desde el nivel de piso hasta la cumbrera puede variar entre  $L/3$  a  $L/6$ . La altura recomendada es de 6 a 20 m. El

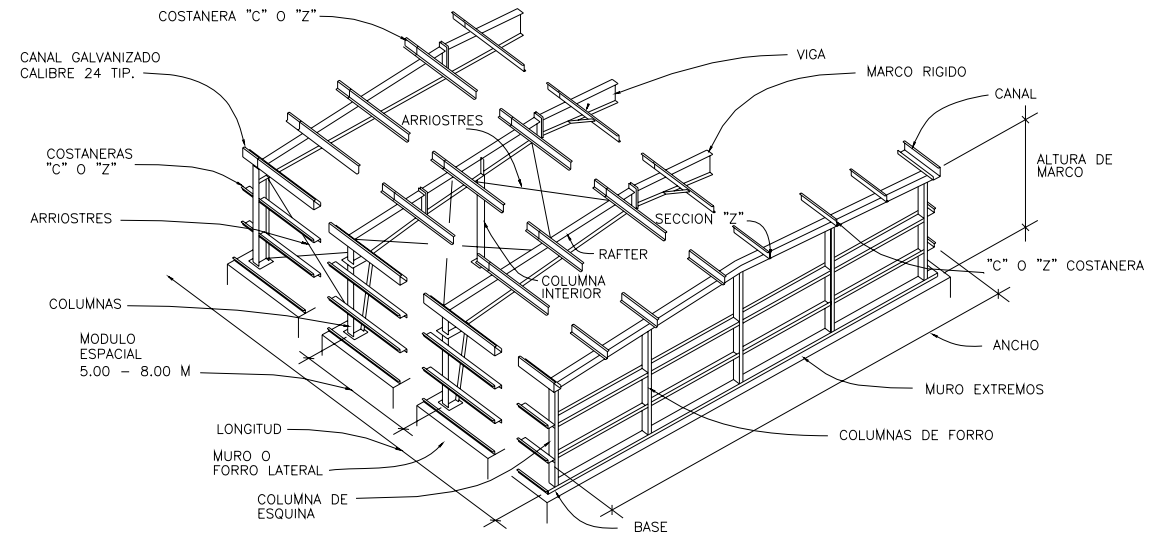


Ilustración IV.41 Marco a dos aguas con sus partes.



## H. SISTEMAS DE ENTREPISOS

### *i.- Piso fundido en formaleta metálica o "Metal Decking".*

El piso metálico o "losa-acero" como acostumbramos a llamarle en Guatemala, se trata simplemente de una fundición de concreto con o sin refuerzo, sobre una formaleta metálica, la cual es troquelada galvanizada y corrugada, lo último con el propósito de incrementar su capacidad de resistencia. Esta formaleta sirve como una plataforma durante la etapa de construcción del proyecto y no es recuperable en la fundición.

La lámina puede asegurarse con soldadura o con pequeños hierros de corte (llamados shear studs) localizados a lo largo de la viga. Los panel de láminas son unidos unos a otros con tornillos, soldadura o sellos realizados con la misma lámina. Si la "losa-acero" va a servir como un diafragma estructural y transferir su carga a muros de corte, el perímetro entero deberá ser soldado al soporte de acero.

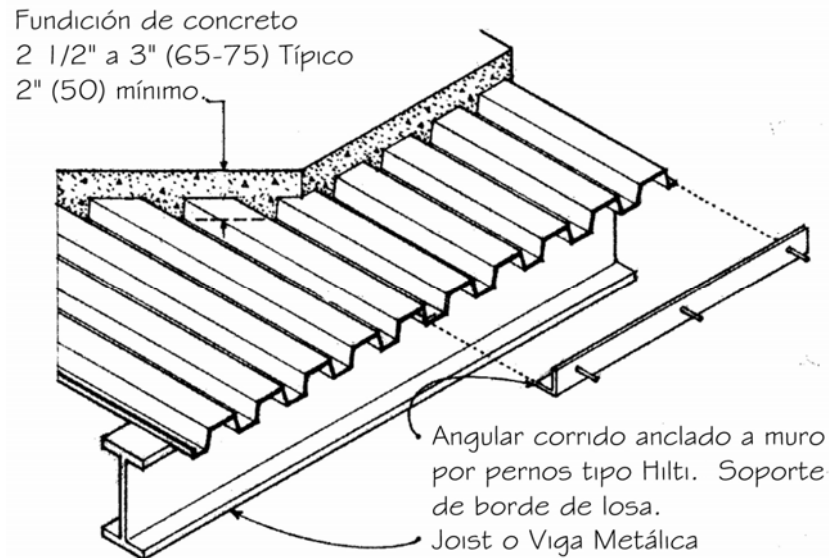


Ilustración IV.42

Hay tres tipos de "losa-acero":

### *ii.- Piso de Formaleta. (Form Decking)*

Sirve como una formaleta permanente para una losa de concreto reforzada.

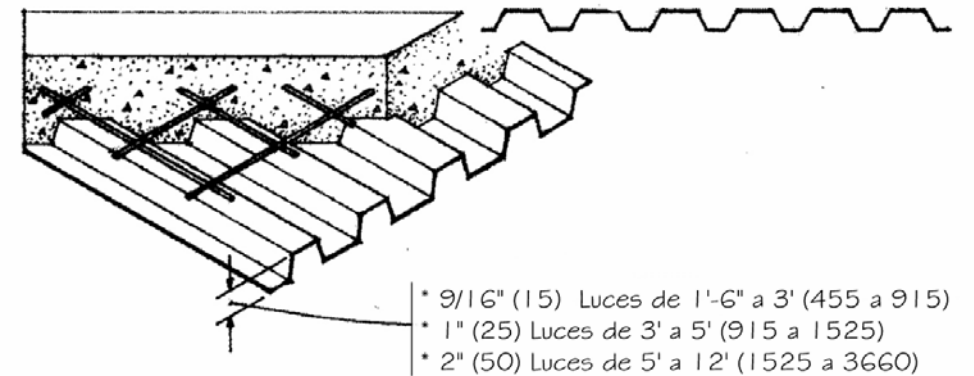


Ilustración IV.43

### *iii.- Piso Compuesto. (Composite Decking)*

Los pisos compuestos sirven como un refuerzo de tensión para la losa de concreto. Puesto que la lámina metálica está corrugada puede trabajar conjuntamente con la losa, además se pueden utilizar hierros de corte (nelson studs) soldados a lo largo de la viga, para mejorar su desempeño.

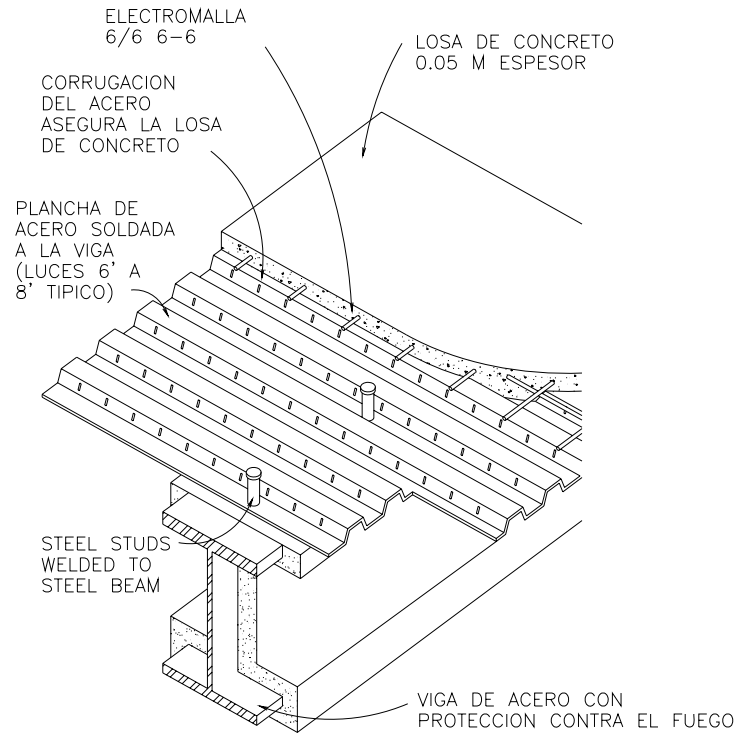


Ilustración IV.44

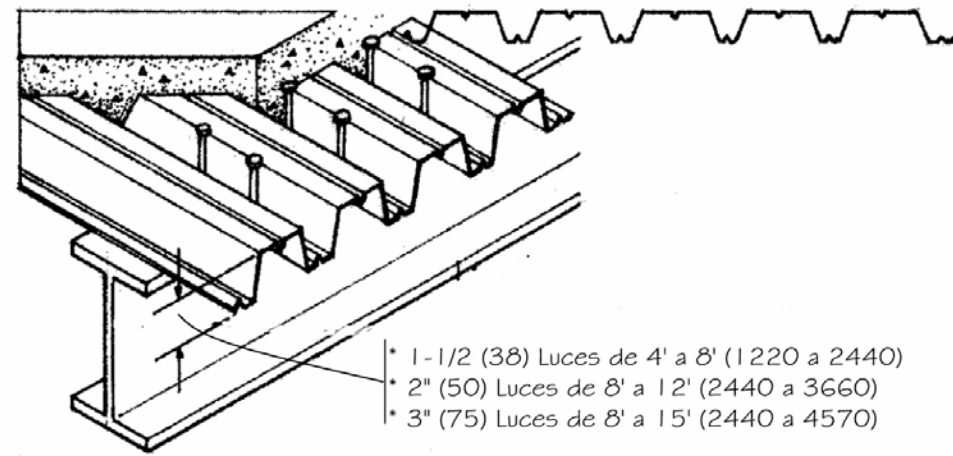


Ilustración IV.45

**iv.- Piso Celular. (Cellular decking)**

Este tipo de piso es realizado al soldar una lámina troquelada a una hoja metálica, lo cual logra crear una serie de espacios entre las crestas de la lámina que sirven para atravesar alambrado eléctrico o de comunicación. Existen salidas especiales para este tipo de piso, de modo que pueda utilizarse donde se necesiten salidas. Este tipo de piso también logra aislamiento acústico cuando se llenan con fibra de vidrio.

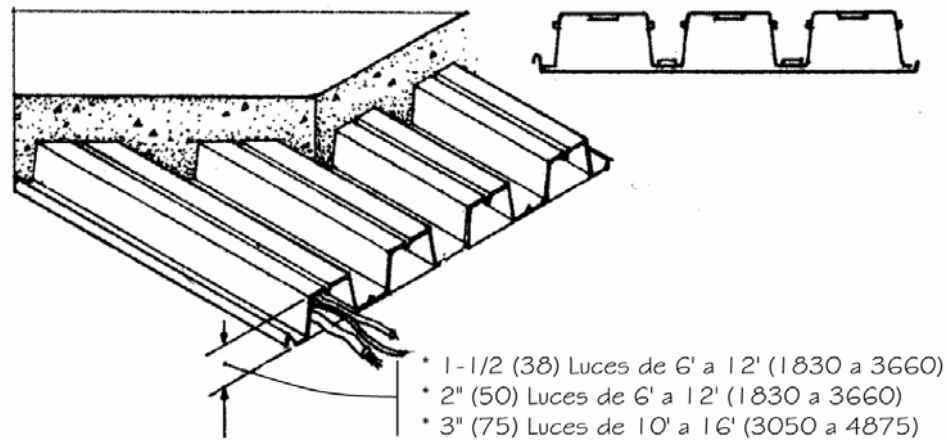


Ilustración IV.46

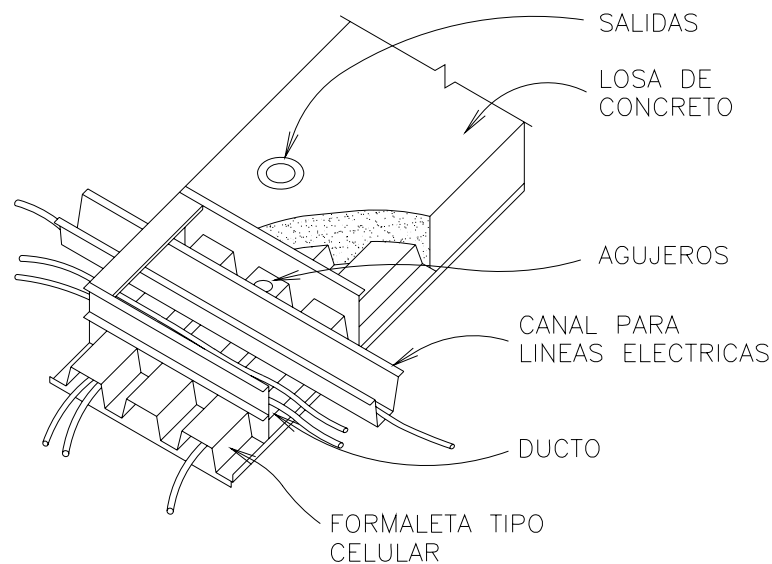


Ilustración IV.47

### **Entrepisos con viguetas (joist) de alma abierta**

Los viguetas (joist) son estructuras ligeras fabricadas en taller con miembros de acero estructural. Estos pueden estar conformados por angulares, barras, tees, hierros redondos o piezas dobladas en frío. En Estados Unidos, se pueden conseguir viguetas (joist) estándares y normalizados por el *Steel Joist Institute*<sup>32</sup>, aunque sus secciones pueden variar dependiendo del fabricante. Las series K, LH y DLH son las más comunes. En nuestro país actualmente estas secciones sólo están disponibles a solicitud expresa del cliente.

Generalmente en Guatemala los viguetas (joist) son fabricados para necesidades y proyectos específicos, esto significa que no existe un inventario de éstos en los talleres de acero nacionales.

A continuación se exponen las consideraciones necesarias para el uso de viguetas (joist) en proyectos de arquitectura.

- Los viguetas (joist) de alma abierta pueden ser cargados por muros de carga, muros de block, concreto reforzado o vigas de acero.
- El alma abierta del viguetas (joist) permite atravesarlo cuando se requiere por instalaciones mecánicas y de servicio.
- Si es necesario mayor espacio para las instalaciones, estas pueden colgar del viguetas (joist), asimismo resulta fácil de colocar cielos suspendidos. Sin embargo, también existe la posibilidad de dejar el viguetas (joist) y el piso metálico expuesto.

<sup>32</sup> Para una lista completa de especificaciones y cargas de todos los tipos de viguetas (joist) americanos, consulte el *Manual of Steel Joist Institute*.

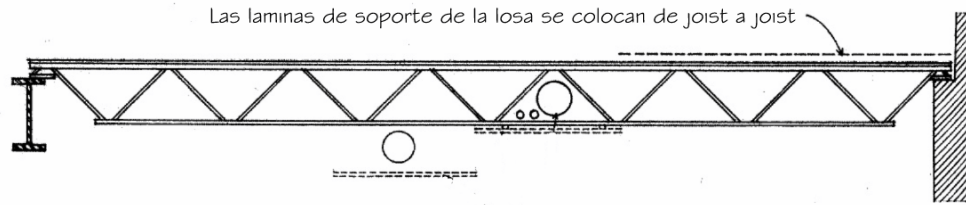


Ilustración IV.48

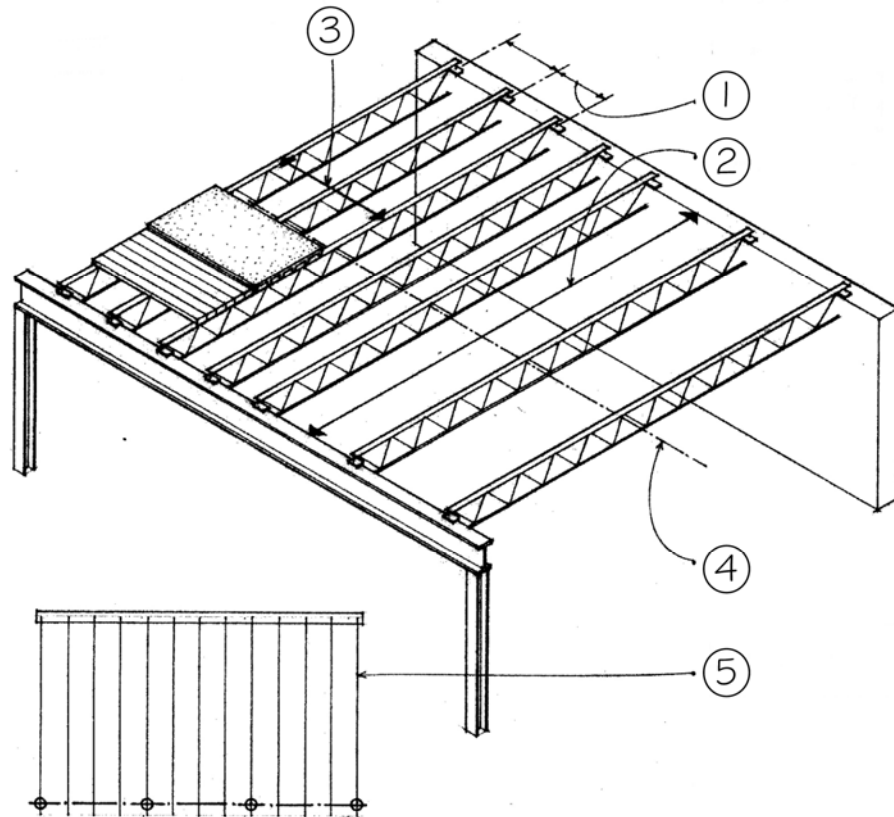


Ilustración IV.49

1. El espaciamiento del viguetas (joist) está determinado por la magnitud de la carga del piso a soportar, la capacidad de resistencia de la lámina de formaleta, la capacidad de carga misma del viguetas (joist) y la profundidad del piso que se desea construir. Generalmente un espaciamiento de 2' a 10' (610 a 3050) es lo más común. También es necesario modular el espaciamiento del viguetas (joist) a la dimensión de la lámina de formaleta.
2. Por regla general la luz a cubrir del viguetas (joist) no debe exceder la profundidad del viguetas (joist) multiplicada por 24 (profundidad J x 24).
3. La colocación del piso en la estructura del viguetas (joist), deberá obedecer a cierta modulación. El diseñador por tanto deberá tener una idea tanto de las módulos constructivos que desea poner sean estos de: piso losa-acero, planchas de concreto, páneles de plywood, etc.
4. Se utilizan elementos horizontales o diagonales para prevenir el movimiento lateral de los cordones del viguetas (joist). La construcción de estos viguetas (joist) livianos puede usarse en lugar de estructuración de madera.
5. Debido al control en la producción de estos viguetas (joist), se puede lograr uniformidad en su profundidad así como que las cargas se distribuyan uniformemente.

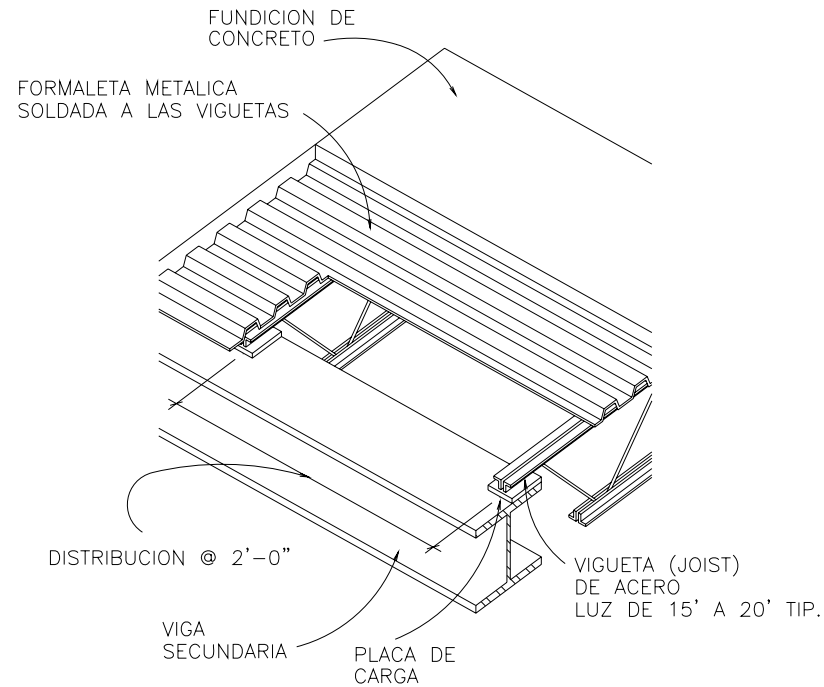


Ilustración IV.50 Losa fundida sobre viguetas o joist.

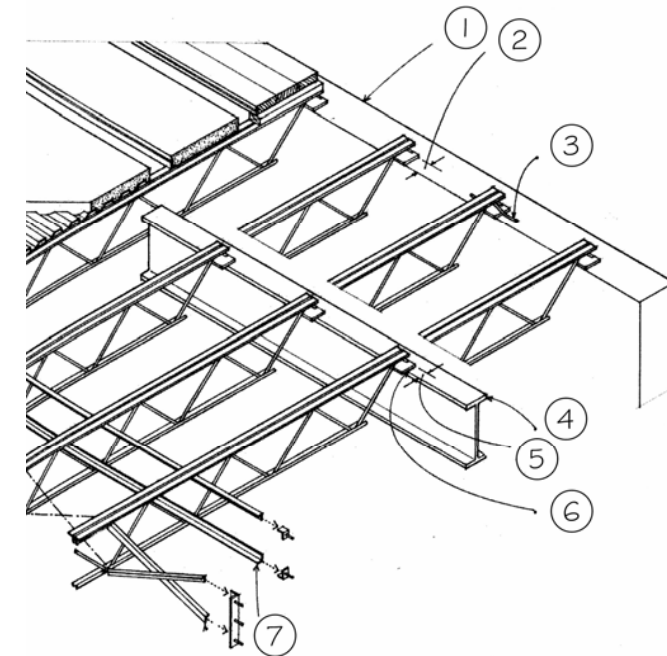
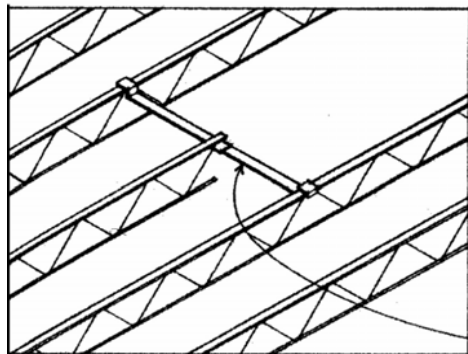


Ilustración IV.51

En el dibujo anterior se puede observar detalles de uniones y accesorios generales para anclar los viguetas (joist).

1. Muro de carga de concreto o blocks
2. El largo mínimo dependerá de la clase de viguetas (joist), este puede variar desde las 4" (100) hasta 12" (300).
3. Se debe asegurar que la resistencia por unidad de área de la placa de anclaje del viguetas (joist), no exceda el permisible para el material del muro. Las platinas se deberán fundir primero para luego soldar el viguetas (joist). Esto permitirá tener una tolerancia en el montaje.
4. Viga de acero de molino o fabricada.

5. El largo del cordón superior para hacer posible el anclaje variará desde 2 1/2" (65) a 4" (100).
6. Elementos horizontales o diagonales son necesarios para prevenir el movimiento lateral de los cordones del viguetas (joist). Usualmente el espaciamiento es de 10' a 20', dependiendo de la luz del viguetas (joist) y de su altura (depth).
7. La fijación a la pared se puede lograr con angulares asegurados al muro por soldadura, por pernos de expansión (tipo Hilti) o hierros soldados a los refuerzos del muro.



Cuando se realizan aberturas pequeñas se colocan angulares para soportar el joist que fue cortado. Si la abertura es muy grande se pueden utilizar un marco estructural.

Ilustración IV.52

**Detalles de fijación del viguetas (joist) a muros de mampostería.**

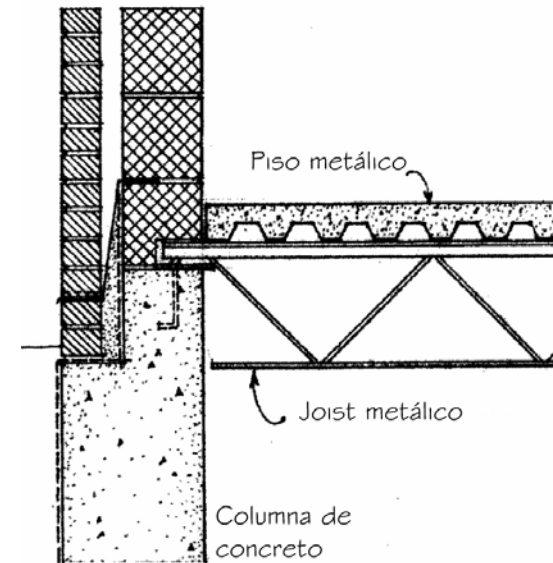


Ilustración IV.53

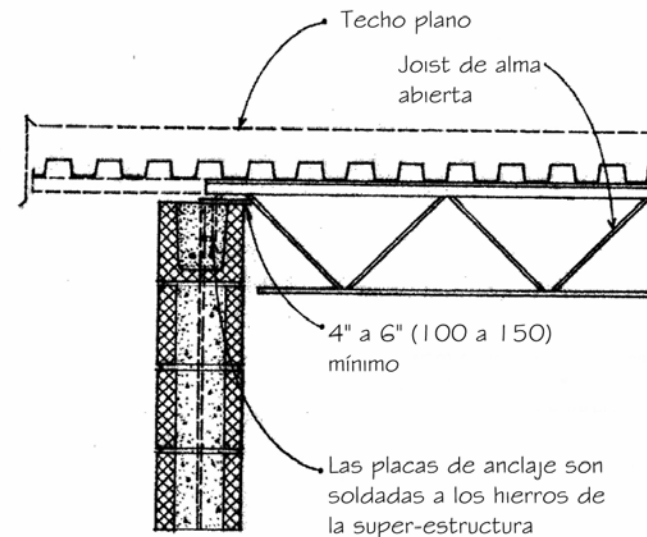


Ilustración IV.54

## J. SISTEMA DE TECHOS

### i. Función

La primera protección de los elementos exteriores en un edificio es el techo. La forma y la pendiente deben ser compatible con el tipo de material de cubierta: shingles, tejas o láminas continuas. Además, el techo deberá ser capaz de llevar el agua de lluvia al sistema de drenajes por canales, tuberías y aun por goteo libre.

La construcción de un techo debería también controlar el paso de la humedad, la filtración de aire, el flujo de calor y radiación solar. Dependiendo del tipo de construcción y del requerimiento del código de construcción que se especifique, también deberá resistir la propagación de fuego.

Como los sistemas de pisos, un techo debe ser estructurado para soportar cierta luz, su propio peso y además cargar con elementos que pudieran ser colgados del mismo.

### ii. Consideraciones de diseño

Los techos planos deben diseñarse con carga viva adicional a la usual debido a que es muy probable que estos lleguen a convertirse en entrepisos. Adicionalmente a estas cargas de gravedad, se puede requerir resistencia a los vientos laterales y a las fuerzas de sismo, lluvia, nieve o ceniza así también al levantamiento por viento.

Debido a que las cargas de gravedad se originan en el sistema de techo, debe haber correspondencia entre su estructura con la estructura general de toda la edificación. La distribución de las columnas, vigas y viguetas del techo influye directamente en los ambientes interiores del edificio de modo que las grandes luces, pueden lograr espacios más amplios y flexibles mientras que las luces cortas pueden sugerir espacios más reducidos y definidos.

### iii. Aspectos arquitectónicos

La forma de una estructura de techo –sea plano, inclinado, a dos aguas, cuatro aguas o rítmicamente articulado- tiene un gran impacto en la imagen del edificio. El techo puede tener sus bordes expuestos o bien puede quedar oculto en las paredes o en algún parapeto. El techo también transmite su forma marcando los límites entre lo interior y exterior.

*Techos planos:* Algunas consideraciones a tomar en cuenta para el diseño de los mismos son:

- Los techos planos requieren un enlaminado continuo que sirva de formaleta y luego la fundición de concreto de 2" mínimo (50 mm).
- La pendiente mínima para drenar el agua de lluvia es de 2%. Esta se puede lograr en la fundición del concreto o por la inclinación de los miembros estructurales.
- La pendiente del techo generalmente esta orientada a los tubos de drenaje del techo. En su perímetro puede utilizarse un canal.
- Los techos planos pueden cubrir eficientemente un edificio de cualquier dimensión, además pueden ser estructurados y diseñados para que sirvan en espacios exteriores.
- La estructura plana puede lograrse con marcos de acero o viguetas (joist) metálicos.

*Techos inclinados:* Algunas consideraciones a tomar en cuenta para el diseño de los mismos son:

- Existen dos categorías de pendientes: (1) pendientes bajas, 25% y 30%. (2) pendientes medianas y altas, 35% a 100%.

- La pendiente del techo influye en la elección del material de cubierta, los requerimientos de traslapes y flashing y el diseño de carga de viento.
- Las bajas pendientes requieren rollos o membranas continuas.<sup>33</sup> Algunos tipos de shingles pueden usarse en pendientes de 25%.
- Las pendientes medianas y altas se pueden cubrir con shingles, tejas y láminas troqueladas.
- Los canales pueden agregarse fácilmente a los techos inclinados.
- El espacio debajo de las pendientes de un techo puede ser habilitado.
- Los techos inclinados pueden realizarse con marcos rígidos, armaduras metálicas y viguetas (joist)s.
- Finalmente, no está demás mencionar que en acero se puede lograr cualquier configuración de cubiertas.

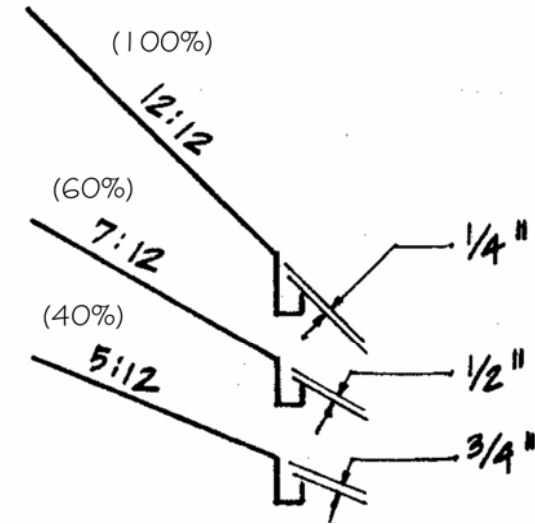


Ilustración IV.55  
Pendientes para techos

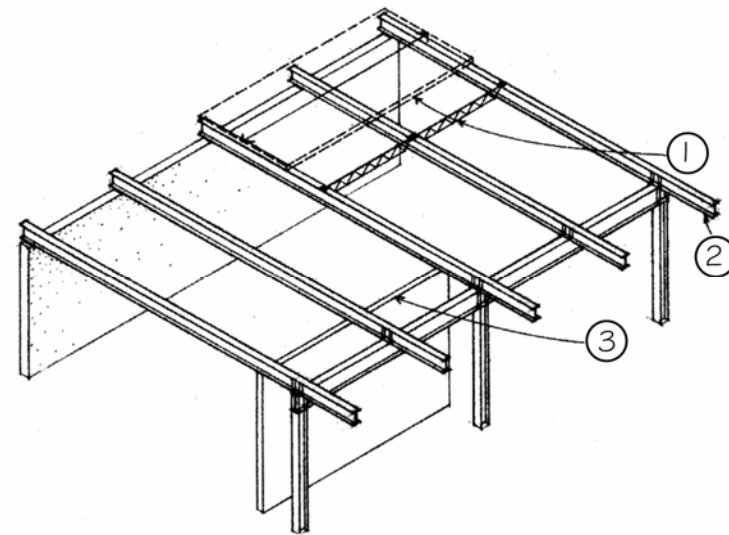
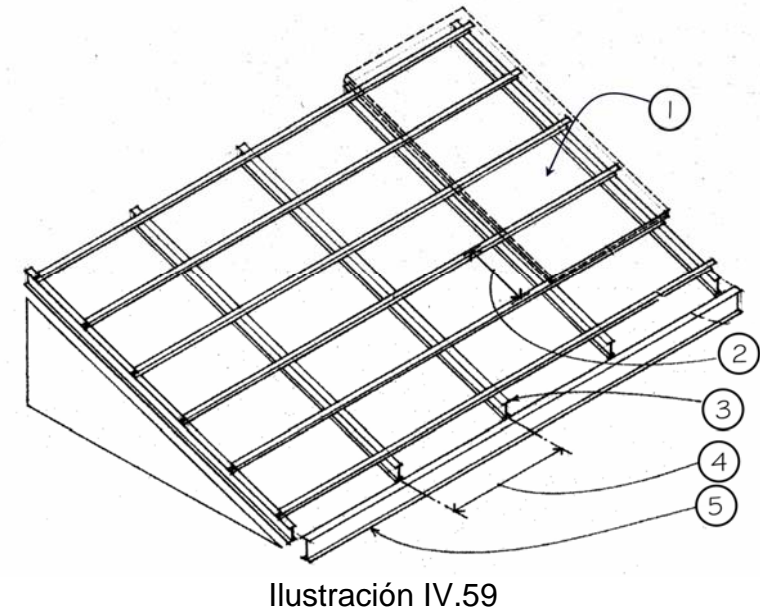
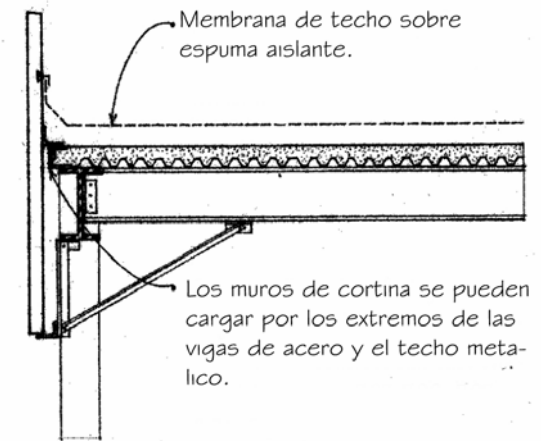
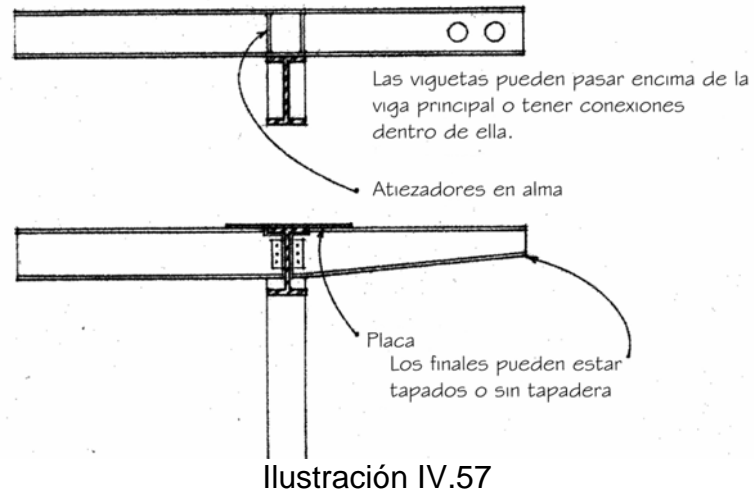


Ilustración IV.56

<sup>33</sup> Algunas empresas nacionales que rolan lámina troquelada pueden proporcionar láminas cuya longitud esta en función de la posibilidad de transporte (se han logrado longitudes de hasta 14 metros), de esta forma se evitan los traslapes y se hace más fácil su montaje. Es conveniente que se pregunte al proveedor de lámina sobre esta posibilidad.



1. Las vigas primarias y secundarias del techo pueden cargar pisos con formaleta metálica, losas de concreto fundido *in situ* o unidades de concreto prefabricada.
2. Los extremos de los voladizos pueden taparse.
3. Los voladizos se logran al extender las vigas secundarias sobre la viga principal o sobre los muros de carga.



Un techo construido con acero estructural puede tener algunas de las siguientes características:

1. Puede utilizarse diferentes tipos de lámina de cubierta o planchas prefabricadas de concreto.
2. Perfiles W o I soportan las costaneras.
3. Costaneras tipo "C" o "Z" así como perfiles Channel o viguetas (joist) pueden ser utilizados para soportar la lámina del techo.
4. Vigas principales soportan las secundarias.

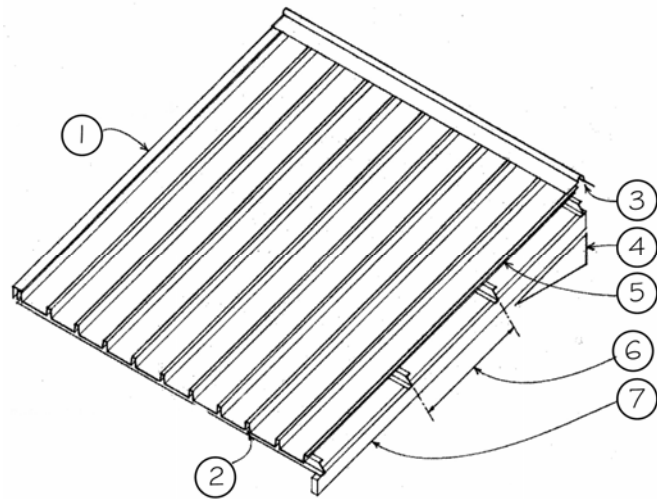


Ilustración IV.60

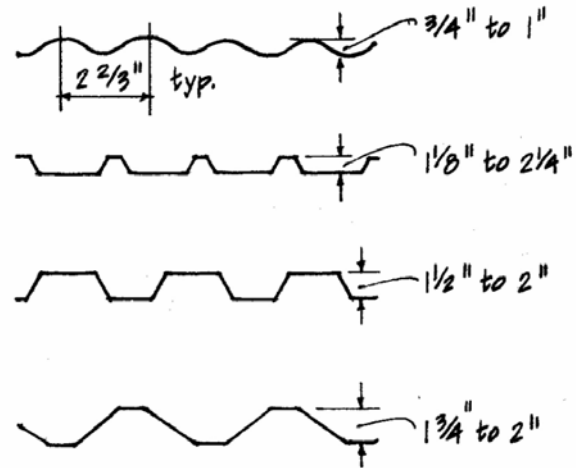
Las láminas troqueladas son de uso común como cubierta de techos, estas pueden ser:

- De Aluminio con aleaciones y acabado natural.
- De Acero galvanizado.
- De Fibra de vidrio o plástico reforzado.

- Plástico corrugado estructural.

1. El capote inclinado debe cubrir la cresta de la lámina y caer tipo faldón. Además en situaciones donde la estructura colinde con un muro o cerramiento de mampostería, en lo posible se deberá cubrir el mismo con un flashing hasta llegar al canal de la estructura.
2. Generalmente se deja los extremos de la lámina se dejan sin cubrir, sin embargo, en casos especiales se podría utilizar aislante o una faja metálica especialmente diseñada como tapadera.
3. La cumbrera se fabrica en taller y se hace del mismo tipo de lámina de cubierta.
4. La pendiente mínima será de 25%. Si la lámina se rola de manera que cubra toda la luz desde la cumbrera hasta el hombro de columna, la pendiente pudiese ser del 15%.
5. Las láminas troqueladas pueden cortarse en la fábrica cubriendo la longitud desde la cumbrera hasta el borde.
6. El espaciamiento de las costaneras varía desde 2' a 6' (0.60 a 1.83).
7. Viga de techo o viguetas (joist).

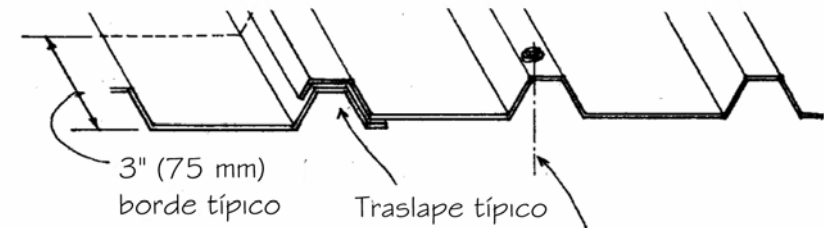
Tipos de lámina troquelada:



Se utilizan diferentes tipos de troqueles para fabricar láminas metálicas y láminas traslúcidas de fibra de vidrio.

Ilustración IV.61

En arquitectura estas láminas se usan en ocasiones como forros o paredes laterales de edificios o estructuras.



Se utilizan tornillos para lámina colocados en la cresta de la misma. Estos llevan arandela y un sello de hule para evitar filtraciones.

Ilustración IV.62

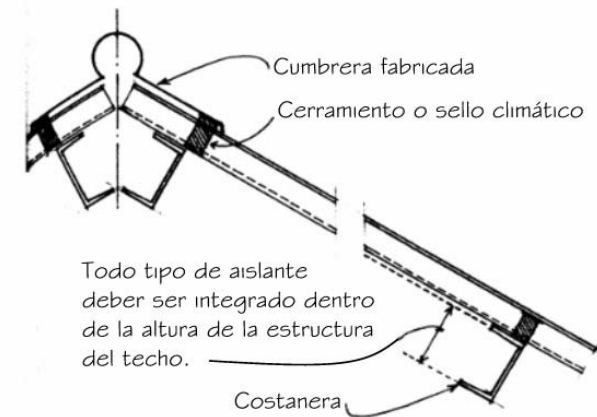


Ilustración IV.63

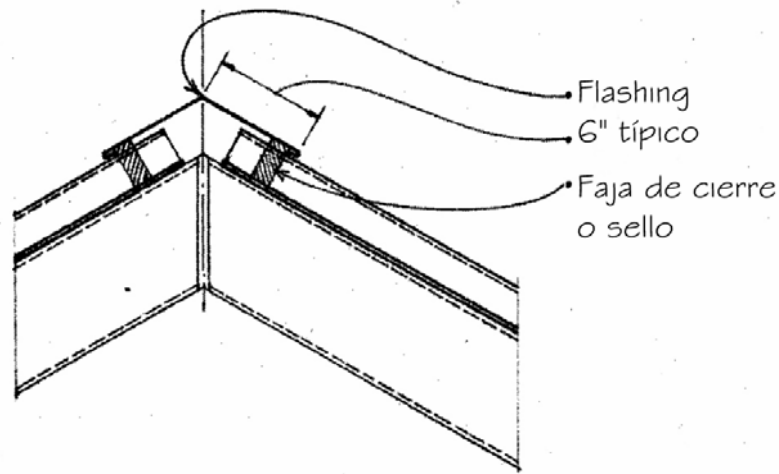


Ilustración IV.64

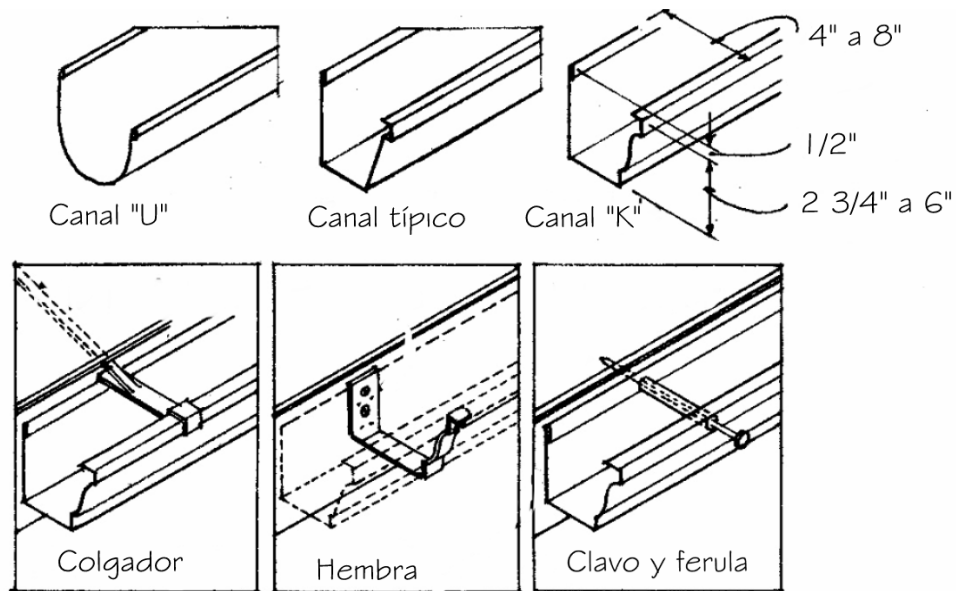


Ilustración IV.65

## K. ARMADURAS

Los estructuras de armaduras metálicas son ensambladas con perfiles que actúan en tensión y compresión arregladas de tal forma que la base de la resistencia es el triángulo<sup>34</sup>. Esto significa que todas las fuerzas internas de compresión o tensión son axiales pues no hay corte o volteo. La categoría de estructuras triangulares incluye: cables, armaduras, marcos espaciales y domos geodésicos.

La geometría triangular es fundamental para el comportamiento de una armadura debido a que el triángulo es el único polígono que tiene una geometría estable inherente. La forma de un triángulo únicamente puede ser cambiada si se cambian uno de sus lados. Esto significa que los lados del triángulo resisten únicamente tensión o compresión (no volteo) para mantener su forma. Otros polígonos requieren tener una o más juntas rígidas (las cuales introducen momentos en los lados) para mantener su forma.

En la práctica ocurren dobleces secundarios en los miembros de una armadura cuando las uniones no tienen pines conectores friccionados, o cuando las cargas son aplicadas directamente a los miembros perpendiculares a sus ejes. Estas fuerzas de torsión son ignoradas en las armaduras debido a que son despreciables comparadas con las fuerzas axiales.

### i. Tipos de armaduras

La forma perimetral de la mayor parte de las armaduras planas, son triangulares, rectangulares, curvas (sea que la curva se encuentre en el cordón superior o inferior). Estas armaduras se subdividen en pequeñas unidades triangulares. Todos los tirantes y puntales son discontinuos en las uniones y sin embargo, todas se comportan como bisagras.

<sup>34</sup> Véase el capítulo anterior bajo la sección iv. "Estructuras espaciales".

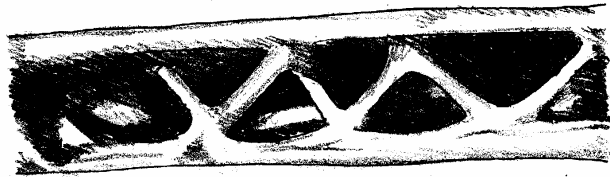


Ilustración IV.66 Metacarpo del ala de un buitre, está estructurado de forma similar a la armadura tipo Warren.

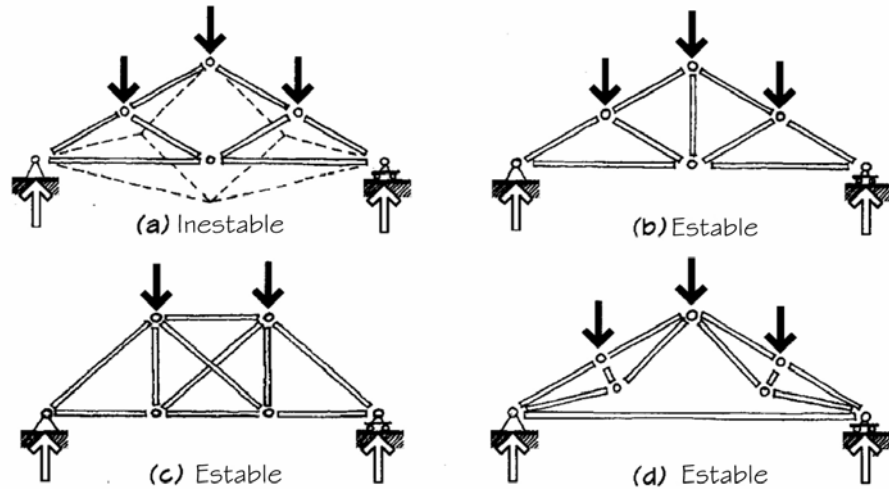


Ilustración IV.67. Armaduras estables

**LUCES SUGERIDAS PARA ARMADURAS METÁLICAS**

Tipo	Luz	División	Módulo	
PRATT	15-21 m	L/6-L/10	3.50-6.00	C
PRATT	24-30 m	L/7-L/15	3.50-6.00	E
WARREN	24-30 m	L/7-L/15	3.50-6.00	E
FINK	15-24 m	L/6-L/10	3.50-6.00	C
WARREN I	12-18 m	L/20-L/24	3.50-6.00	E

C = usada para cubierta inclinada

E = usada como entrepiso

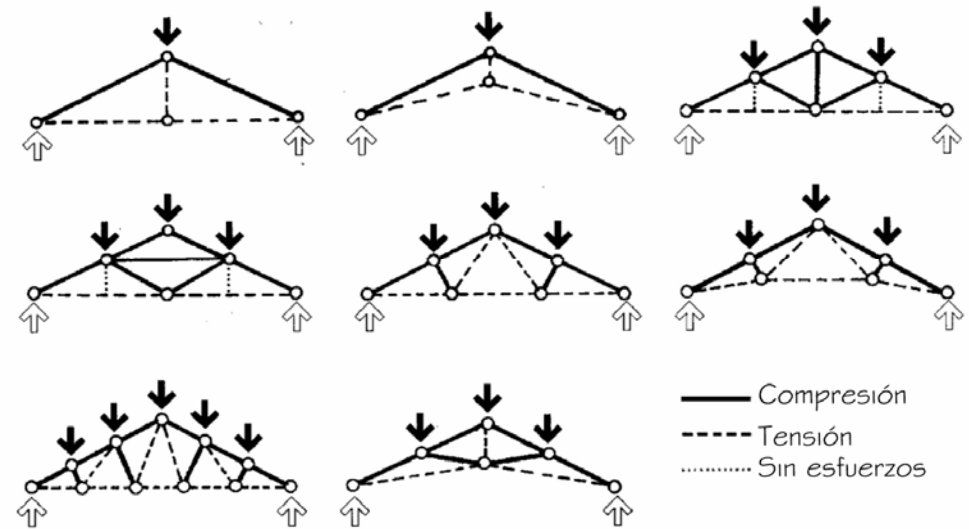


Ilustración IV.68. Esfuerzos en armaduras inclinadas.

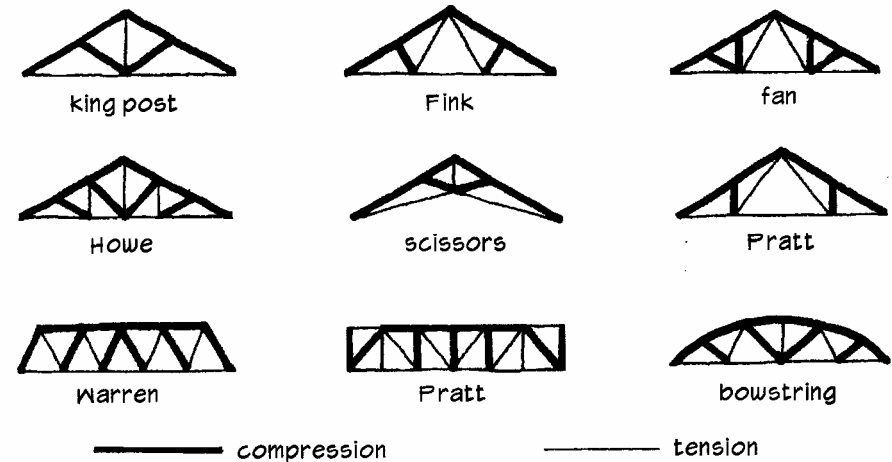


Ilustración IV.69 Tipos de armaduras<sup>35</sup>

<sup>35</sup> Véase la sección “ Gráficas para diseños preliminares en acero” en la página 127 a 129 de este capítulo.

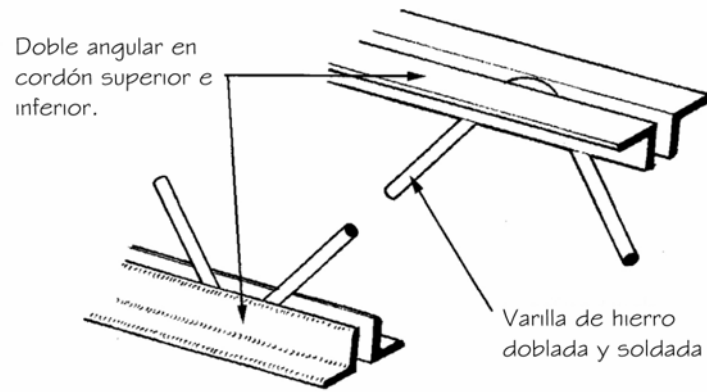


Ilustración IV.70. Los viguetas (joist) de alma abierta son armaduras livianas, generalmente usados para entrepisos metálicos y cubiertas.

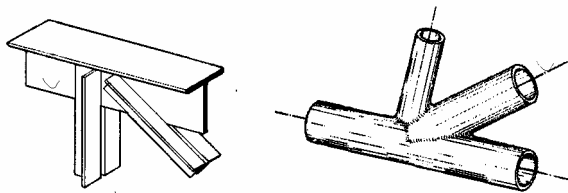


Ilustración IV.71. Uniones típicas en armaduras.

## ii.- Conformación de Armaduras de Acero

Las armaduras de acero son fabricadas generalmente al soldar o pernear *angulares* y *tees* para que formen un marco triangular. Debido a la escasa sección existente en las miembros, se usan platinas de acero para lograr las uniones. Las armaduras pesadas utilizan vigas W y Tubería estructural.

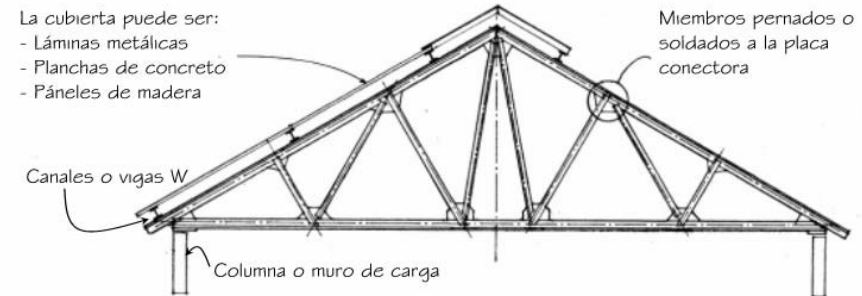


Ilustración IV.72.

La armadura ilustrada aquí es tipo Bélgica. Generalmente es mejor usar armaduras en las cuales el miembro más largo está en tensión.

La altura de la inclinación en este tipo de armaduras generalmente se obtiene dividiendo la luz a cubrir entre 4 o 5.

$$\text{Altura} = \text{luz} / 4 \text{ a } \text{luz} / 5$$

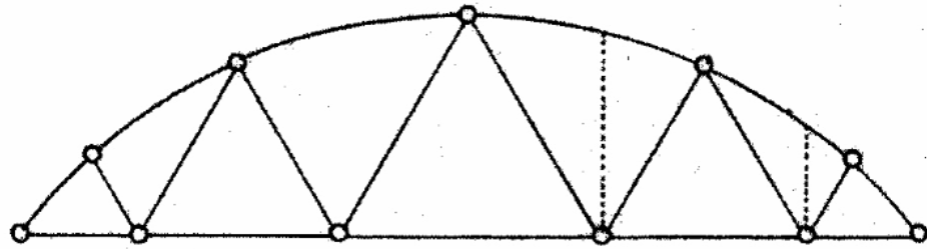


Ilustración IV.73. Armadura Curva

Para obtener la altura en armaduras curvas se divide la luz a cubrir entre 6 u 8.

$$\text{Altura} = \text{luz} / 6 \text{ a luz} / 8$$

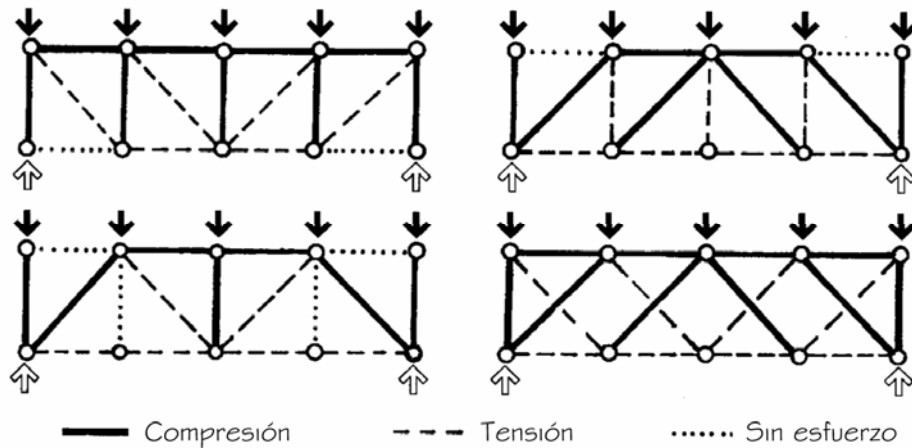


Ilustración IV.74.

Tensión y compresión en armaduras rectangulares.  
 La mejor disposición se encuentra distribuyendo los diagonales a 45 grados debido a la mejor descomposición de fuerzas.

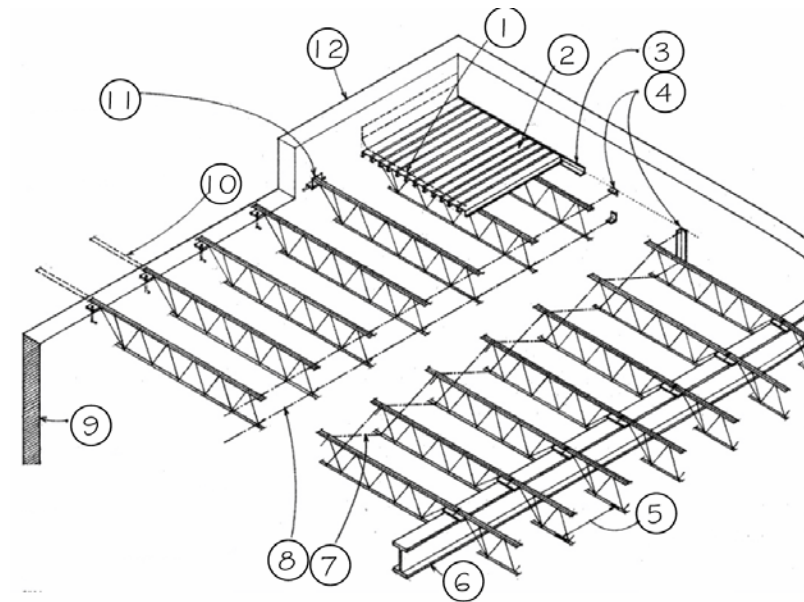


Ilustración IV.75

El sistema de techo plano de estructuras de alma abierta tipo viguetas (joist), tienen una configuración similar a la construcción de pisos.

1. La membrana de techo puede extenderse sobre una espuma rígida o un aislante térmico.
2. El techo puede armarse a partir de láminas metálicas, paneles de plywood o planchas prefabricadas de concreto.
3. Se necesita un angular continuo en todo el perímetro del muro para soportar la lámina. Se puede utilizar pernos tipo Hilti para anclar el angular al muro, asimismo se pueden dejar placas fundidas en el muro para que sirvan como apoyo al angular y esta unión puede ser soldada.
4. Todas las piezas deben asegurarse debidamente al muro.

5. El espaciamiento del viguetas (joist) debe ser igual a la modulación de la formaleta metálica o del tipo de panel que se ponga. Generalmente este espaciamiento varía de 4' a 10' (1.22 a 3.05 m) La longitud del viguetas (joist) no debe exceder la profundidad del mismo multiplicado por 24.
6. Vigas de acero o viguetas (joist) de placas metálicas pueden servir como apoyos a los viguetas (joist) secundarios.
7. El arriostre diagonal debe ser soldado o pernado a los angulares localizados en el rostro del muro. Estos arriostres pueden estar espaciados a 10' o 20' (3.05 a 6.10 m).
8. Los arriostres horizontales pueden ser soldados al cordón superior e inferior. De forma similar a los arriostres diagonales, estos pueden estar espaciados a 10' o 20' (3.05 a 6.10 m).
9. Los muros de soporte pueden ser de concreto reforzado o levantado de blocks.
10. Se pueden lograr voladizos extendiendo el cordón superior del viguetas (joist), llegando a cubrir hasta 5'-6" (1.675 m).
11. Para resistir el levantamiento debido a fuerzas de viento, los anclajes deben ser asegurados a la estructura.

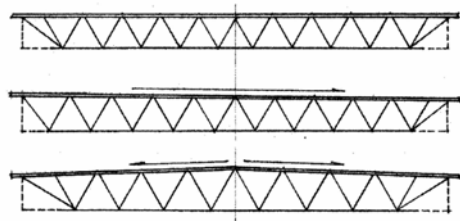


Ilustración IV.76. Tipos de Viguetas (joist)

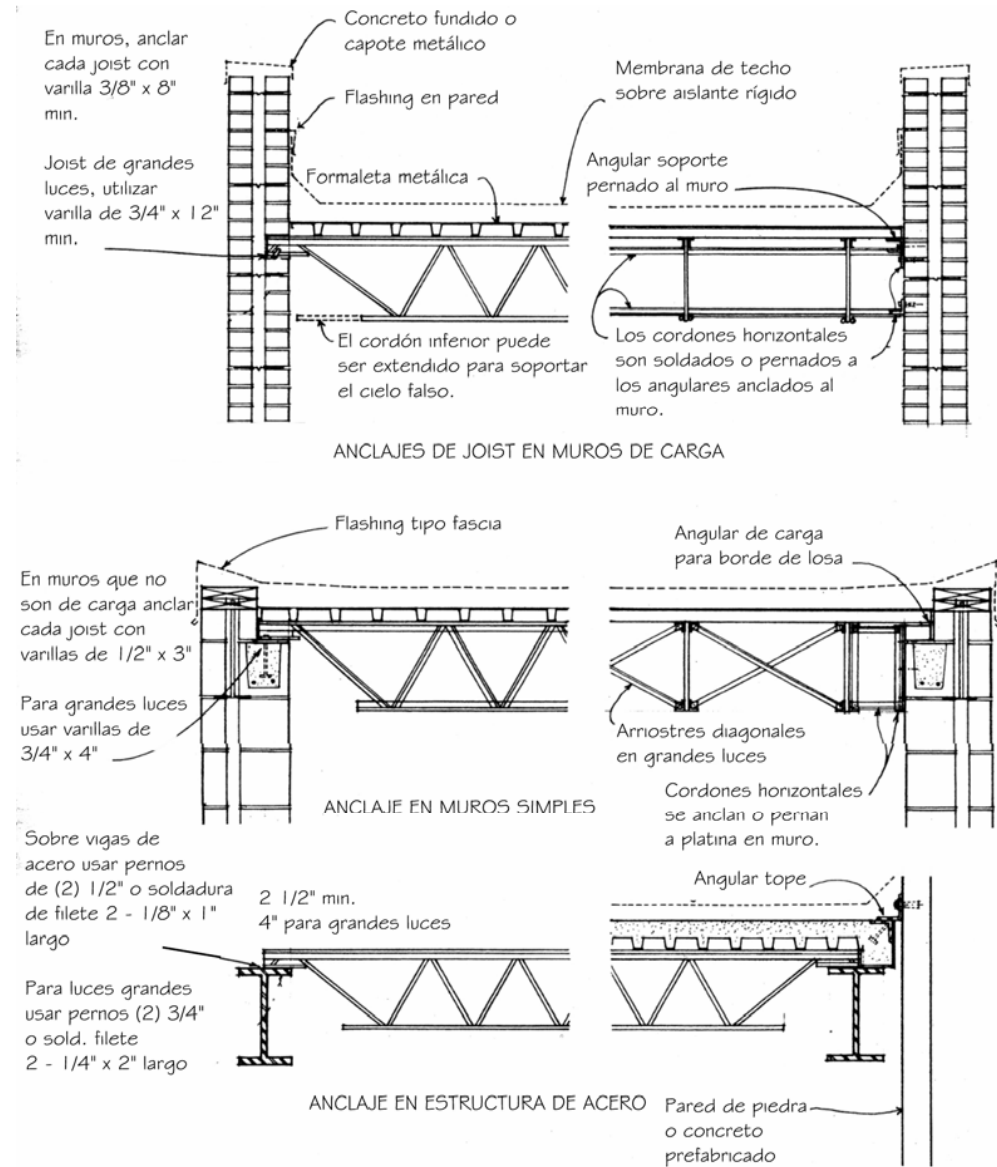


Ilustración IV.77



## L. SISTEMAS DE RETICULADO ESPACIAL

Un sistema de reticulado espacial es una armadura tridimensional que se extiende en dos direcciones (ancho x largo). Igual que en las armaduras planas, sus miembros están en pura tensión o pura compresión (véase página ilustración IV.74). La palabra “marco” se refiere correctamente a las estructuras con uniones rígidas, el término “sistemas de reticulado espacial” se usa a menudo tanto para uniones rígidas como articuladas.

La mayoría de estos sistemas consisten en módulos repetitivos con una “capa” superior y otra inferior (estos corresponden a los cordones superior e inferior de una armadura plana).

La geometría puede ser diversa<sup>36</sup>, la mitad de un octaedro (una pirámide de cuatro lados) y el tetraedro (pirámide de tres lados) forman módulos poliedros ampliamente usados en la construcción de edificios. Estas estructuras se utilizan frecuentemente para cubrir grandes luces, sin embargo, pueden tener varias configuraciones y pueden servir como muros, techos inclinados y curvos.

### i. Consideraciones de diseño

La profundidad o altura de este tipo de estructura puede llegar a ser tan bajo como un 3% de la luz a cubrir, sin embargo, la profundidad que resulta más económica es aproximadamente del 5%. El tamaño del módulo más económico se sitúa entre un 7% y un 14% de la luz. Hay que tomar en cuenta que la

cantidad de miembros y la mano de obra crece directamente proporcional al decrecimiento de la estructura.<sup>37</sup>

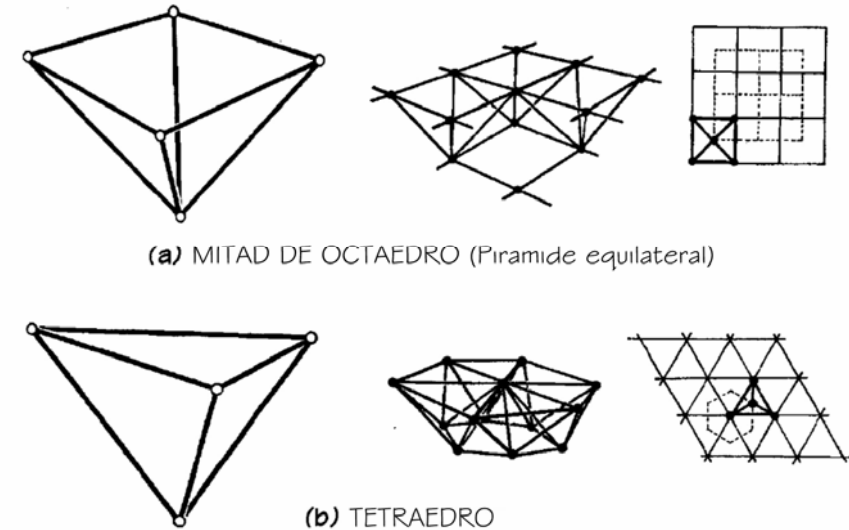


Ilustración IV.78. Módulos frecuentemente utilizados para reticulados espaciales.

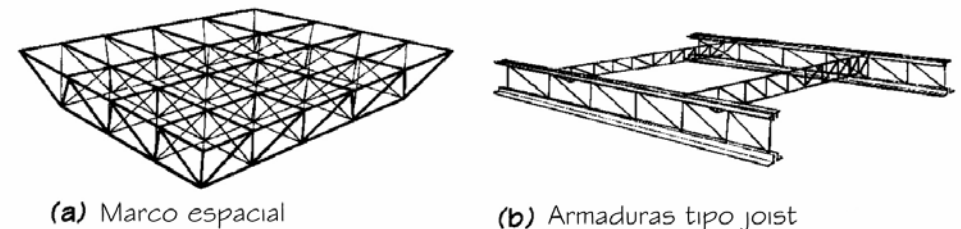


Ilustración IV.79. La profundidad de un reticulado espacial es menor si se compara con las armaduras planas.

<sup>36</sup> Pearce, 1978; Borrego, 1968

<sup>37</sup> Gugliotta, 1980

Los sistemas de reticulado espacial son estructuras eficientes y seguras que soportan proporcionalmente las cargas en cada cordón superior e inferiores y en el alma de los miembros. Cuando se aplica una carga, esta viaja por la ruta más rígida a los soportes. Si algunos miembros son removidos, la estabilidad de la estructura no se afecta significativamente, debido a que las fuerzas viajan alrededor de los miembros circundantes, éstos miembros, comparten las fuerzas adicionales en proporción a su resistencia. Esto es la razón por la que los marcos espaciales son seguros y estables aun cuando se sobrecargan.

## ii. Tipos de uniones

Debido a que estas estructuras son tridimensionales, las juntas en los nudos son complejas. Para luces pequeñas (aquellas menores 30.00 m), el nudo puede ser una placa doblada y soldada con agujeros en sus extremos a fin de que los miembros se puedan pernear. Estos miembros son generalmente secciones rectangulares (canales o tubos) lo que facilita la colocación de pisos, tragaluces o claraboyas, envidriados y otros elementos.



Ilustración IV.80. Secciones típicas de miembros

Para luces grandes (aquellas mayores a 30 m), el sistema más común usado es el llamado "Sistema Mero" el cual tiene miembros tubulares atornillados a un nudo en esfera. Este sistema es capaz de lograr luces arriba de 200 metros. El nudo de esfera sólida permite variar el diámetro de los tubos dependiendo de las fuerzas presentes en cada miembro.

Debido a la complejidad de la geometría de los marcos espaciales y las grandes cargas presentes, el acero y el aluminio son los materiales más usados.

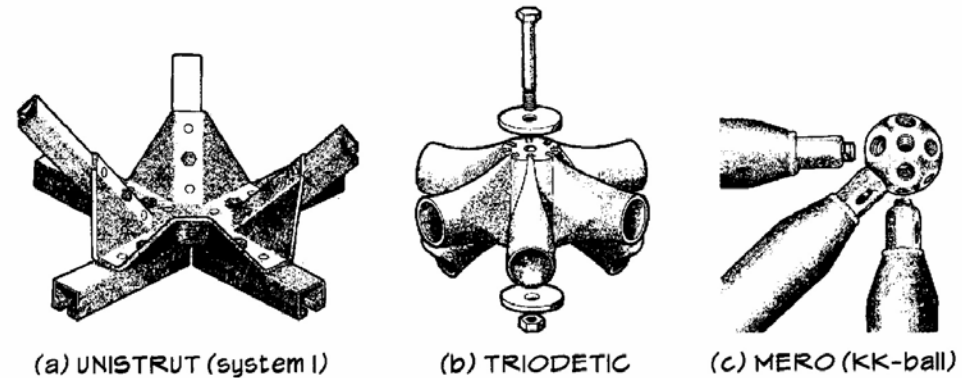


Ilustración IV.81. Uniones para marcos espaciales.

(a) Ideal en luces pequeñas. El *Sistema I Unistrut*, se fabrica de placas de acero. Los miembros son perneados. (b) El sistema Triódico consiste en un nudo de aluminio extruido cuyos extremos son interiormente dentados. Los miembros consisten en tubería galvanizada con extremos dentados que encajan en los agujeros del nudo. (c) El sistema Mero KK-ball consiste en miembros tubulares que pueden atornillarse en un nudo de esfera sólida. Este sistema es apropiado para grandes luces.

## iii. Soportes o apoyos

Si un marco espacial es soportado por columnas (empotradas en el piso) en una serie de puntos, los esfuerzos en los miembros que rodean los soportes son considerablemente mayores a las que resisten los otros miembros. Estos

esfuerzos mayores pueden ser resistidos incrementando la sección de los miembros cerca del apoyo.

Los marcos espaciales necesitan un mínimo de tres soportes para lograr la estabilidad. Generalmente, mientras más soportes tenga un marco espacial más eficiente es.

En el ejemplo siguiente, el diseño del miembro mayor del marco espacial soportado por la serie de columnas perimetrales, es tan solo un 11% del miembro mayor en el marco espacial soportado sólo en sus esquinas.

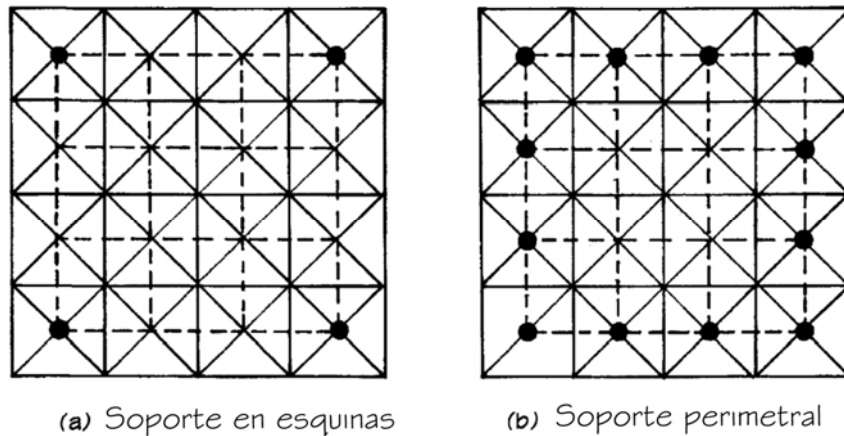


Ilustración IV.82. Soportes de marco espacial

Otra consideración importante es la relacionada con los miembros. Independientemente de los esfuerzos que estos resistan, mientras más estandarizados y uniformes sean, más económica será la estructura. Sin embargo, estos ahorros deben equilibrarse con el costo adicional de las columnas y cimientos.

Para los marcos que utilizan miembros idénticos con un limitado número de columnas, los esfuerzos en los soportes pueden disminuir al distribuir las reacciones sobre varios miembros.

A continuación se ilustran tres de los módulos más usados. Los módulos típicos de estos marcos espaciales son: 4', 5', 8' y 12' (1220, 1525, 2440, 3660 mm).

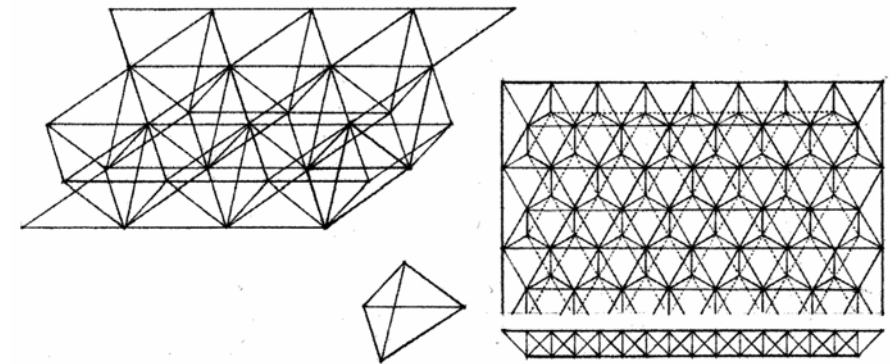


Ilustración IV.83. Módulo Mitad del Tetraedro

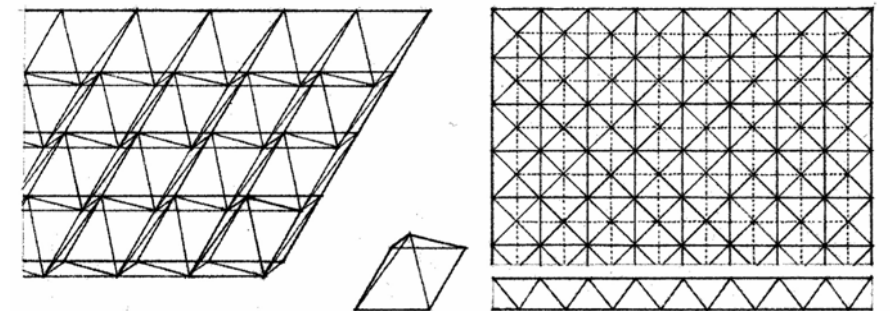


Ilustración IV.84. Módulo Mitad del Octaedro

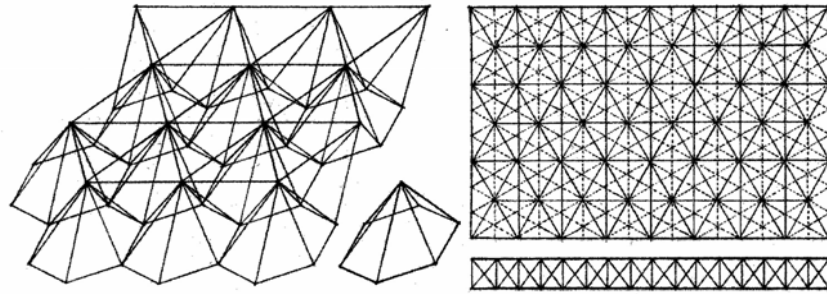


Ilustración IV.85. Módulo Hexagonal

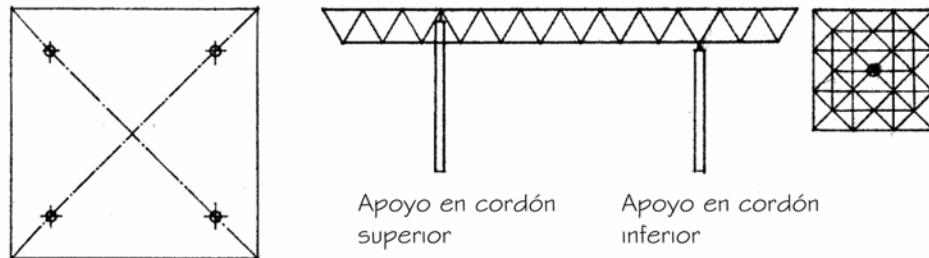


Ilustración IV.86. Un marco espacial debe ser soportado en un punto en el panel

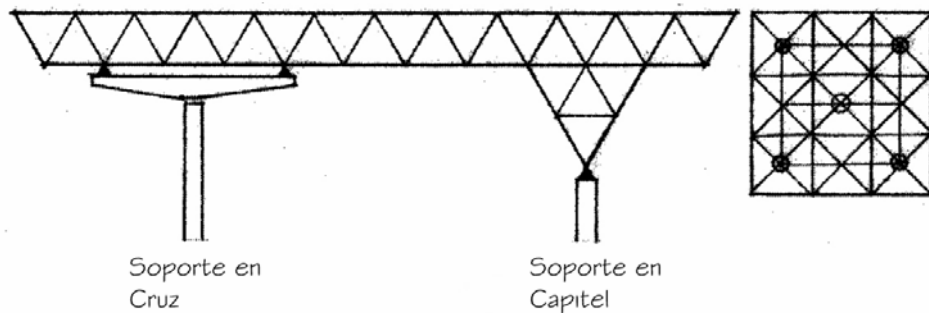


Ilustración IV.87. Al incrementar el área de soporte incrementa el numero de miembros a los cuales el corte es transferido y reduce la fuerza en los miembros.

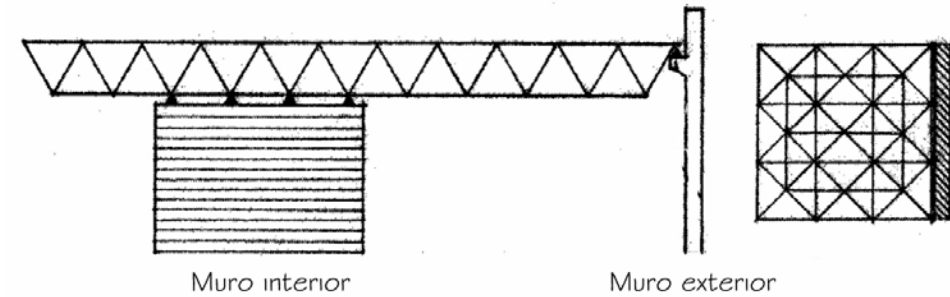


Ilustración IV.88. Un muro de concreto reforzado distribuye los puntos de soporte a lo largo de una línea.

Características generales:

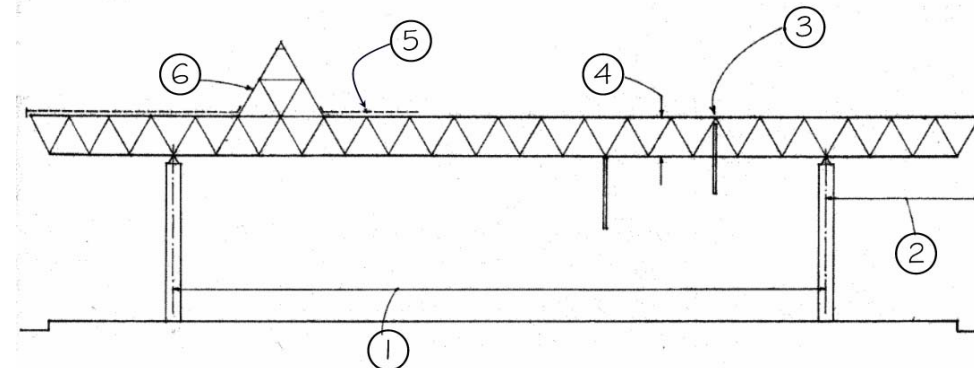


Ilustración IV.89

1. Luz = de 6 a 36 módulos.  
Rango de distribución de columnas: 30' a 80' (9 a 24 m)  
Rango de distribución de muros de carga: 30' a 130' (9 a 39 m)
2. Voladizos = de 15% a 30% de la luz.
3. La colocación de techos y divisiones de muros se deben hacer en los nudos de la estructura.

4. Rango de profundidad = Luz / 12 ó Luz / 20.
5. Las cubiertas pueden ser de paneles de madera, pisos de formaleta metálica, planchas de concreto. La pendiente mínima para drenaje se puede lograr inclinando el marco espacial un 2%.
6. La iluminación interior se puede lograr con el mismo marco espacial o colocando claraboyas.
  - Los servicios mecánicos como tuberías y ductos pueden pasar a través de los espacios del alma.
  - Si la construcción es menor a 6.00 m es posible dejarla sin protección contra incendios.

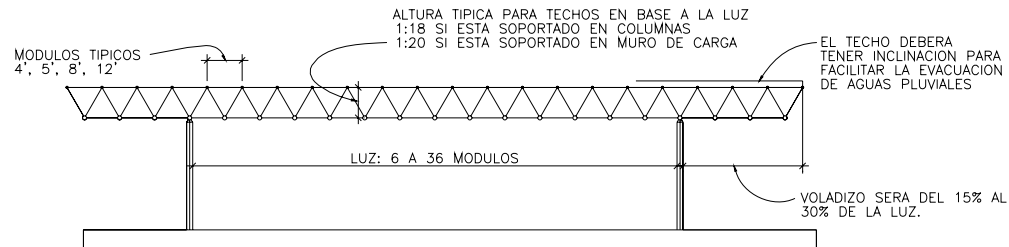


Ilustración IV.90 Otras consideraciones

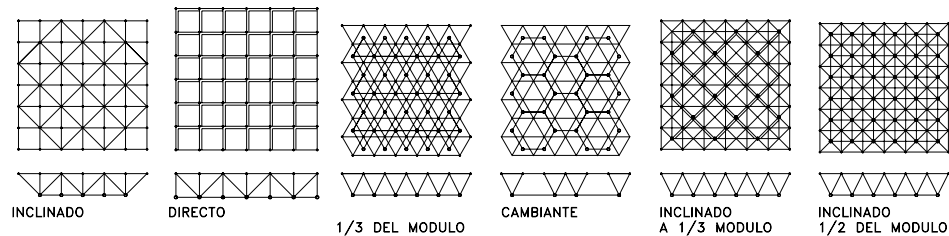


Ilustración IV. 91 Otros sistemas

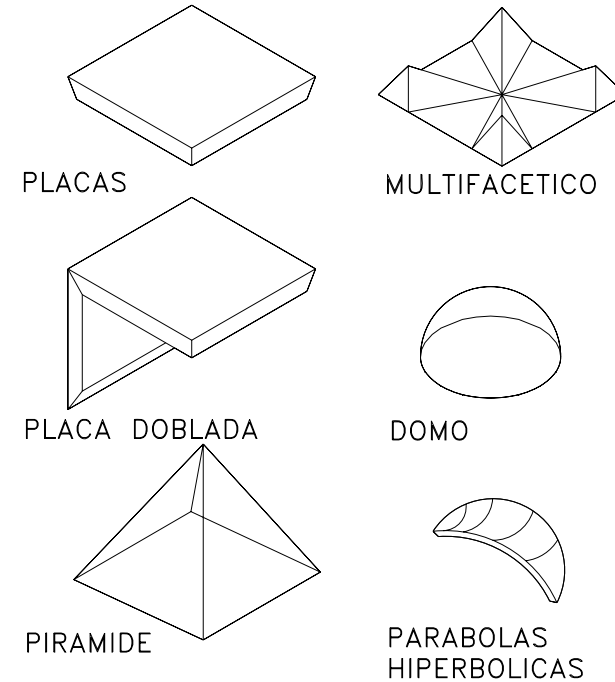


Ilustración IV.92 Por su configuración en el conjunto los sistemas de reticulado pueden tener estas formas.

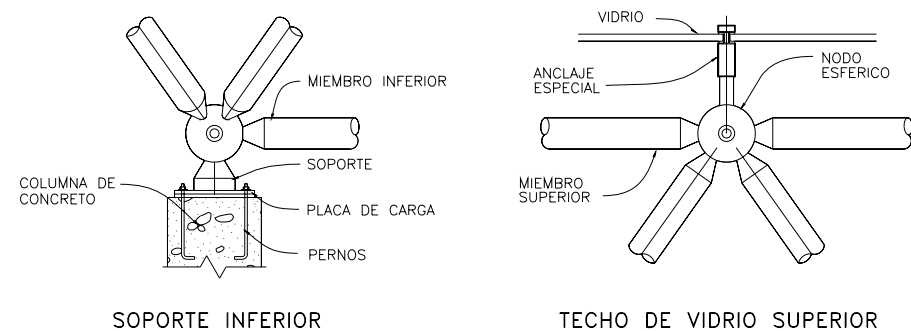


Ilustración IV. 93 Detalles de anclajes.

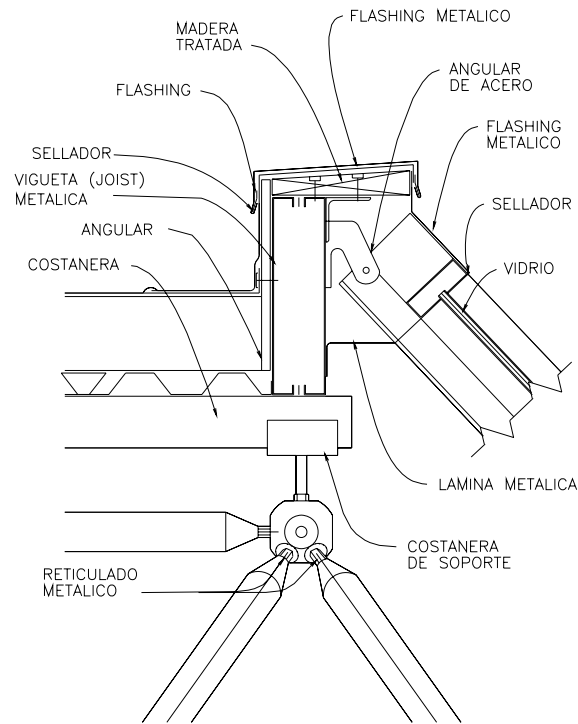


Ilustración IV.94 Detalle de techo inclinado

## PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS

La protección de estructuras contra incendios tiene una clasificación que se basa en la duración del tiempo en que se expone al fuego y no muestra daño significativo (o al alcanzar una temperatura promedio de 540 a 650 grados centígrados). La protección contra el fuego involucra dos aspectos:

- Reducir la exposición del material al fuego
- Controlar la distribución de las llamas del fuego.

Las columnas y vigas de acero tipo WF se pueden proteger de la siguiente forma:

1. Recubrir los elementos con concreto. El espesor del concreto afectará el tiempo en que el acero quede realmente expuesto a las llamas.
2. Cubrir las secciones con mampostería o ladrillos.
3. Cubrir las estructuras con 3 ó 4 capas de tablayeso o cualquier otro panel resistente al fuego.
4. Recubrir el material con capas de repello plástico de fibras minerales o cemento.<sup>38</sup>
5. Fabricar secciones que puedan llenarse con agua.

### **Preparación de las superficies para pinturas y recubrimientos**

La superficie debe estar libre de rebaba y de cualquier otro material que no sea acero. Para la limpieza se puede lograr de varias formas: por medio manuales con cepillo de alambre, por chorro de arena o *Sandblasting*<sup>39</sup>, y por flama limpiadora o con ácidos.

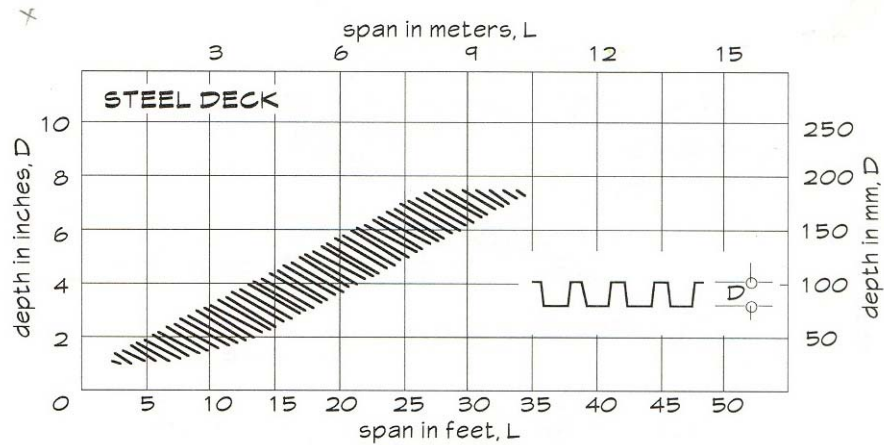
Se puede obtener más información consultando el libro *“Designing with structural steel –a guide for architects”*. Este libro puede ser bajado en forma gratuita del sitio de Internet del American Institute of Steel Construction: [www.aisc.com](http://www.aisc.com)

<sup>38</sup> En el mercado existen revestimientos intumescentes como el “stop fire” el cual al entrar en contacto con la llama reacciona hinchándose y formando un aislamiento multicelular que impide la propagación del calor.

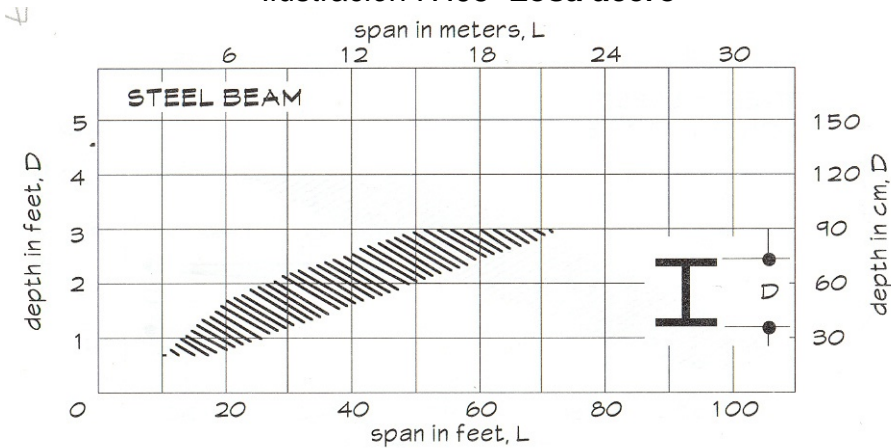
<sup>39</sup> Existen varios grados de pureza, el más común es el grado comercial que es usualmente el que los proyectos de arquitectura consideran.

**GRAFICAS PARA DISEÑOS PRELIMINARES EN ACERO<sup>40</sup>**

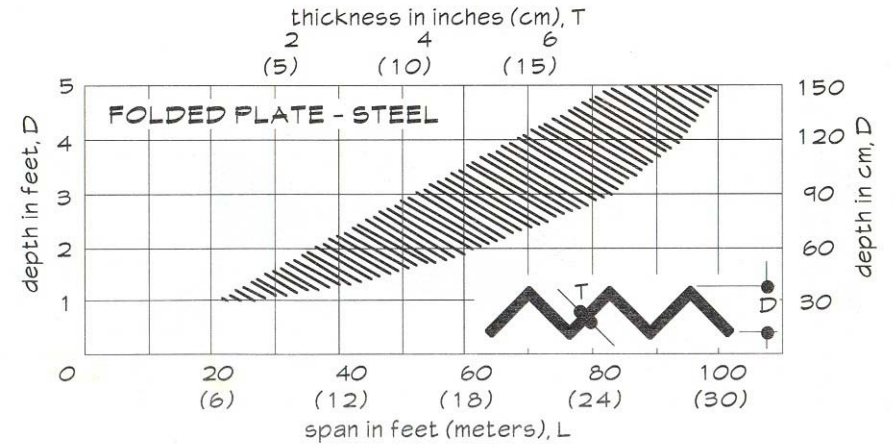
Las siguientes gráficas nos pueden dar una idea para hacer organizaciones espaciales con elementos de acero.



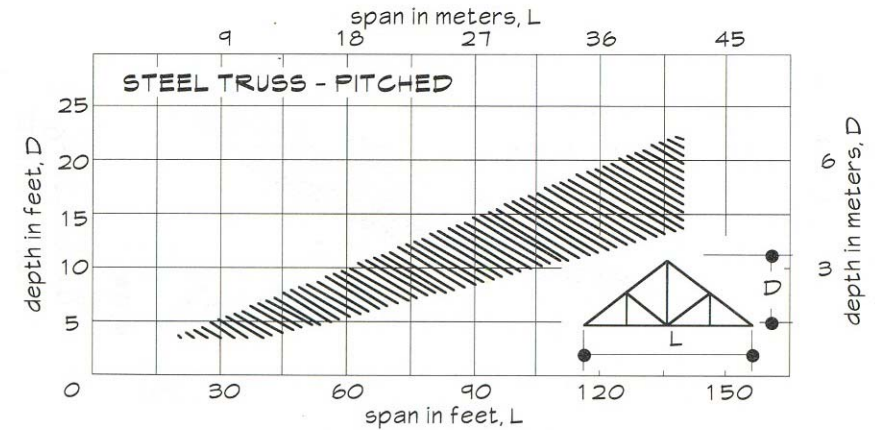
**Ilustración IV.95 Losa acero**



**Ilustración IV.96 Viga de Acero**



**Ilustración IV.97 Estructuras de acero plegadizas**



**Ilustración IV.98 Armaduras de Acero**

<sup>40</sup> Las gráficas presentadas fueron tomadas del libro "Understanding Structures" de Fuller Moore. Editorial WCB, McGraw-Hill. 1999.

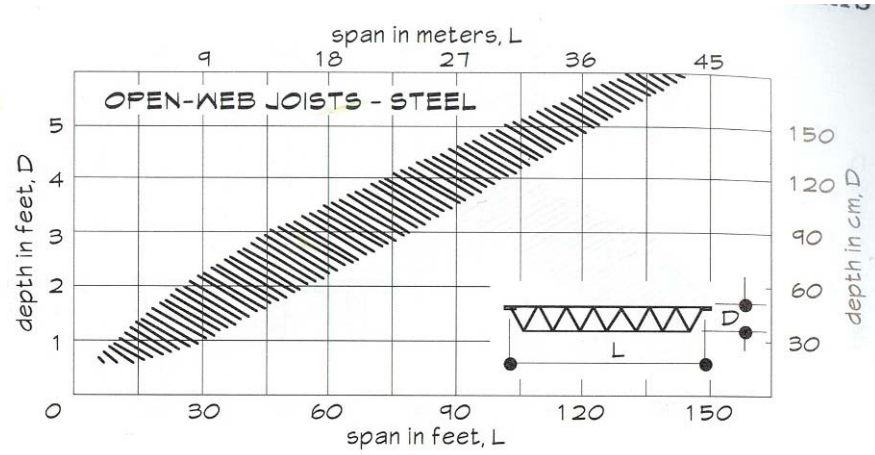


Ilustración IV.99 Joist Alma Abierta

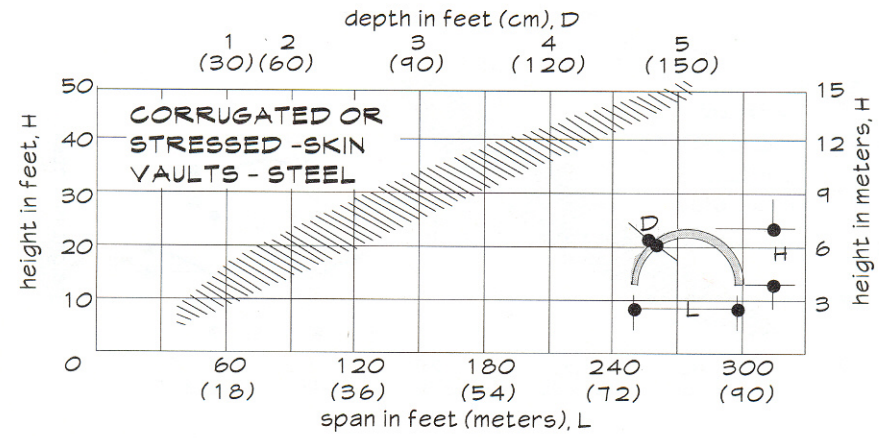


Ilustración IV.101 Bóvedas acero corrugado (tipo Emco)

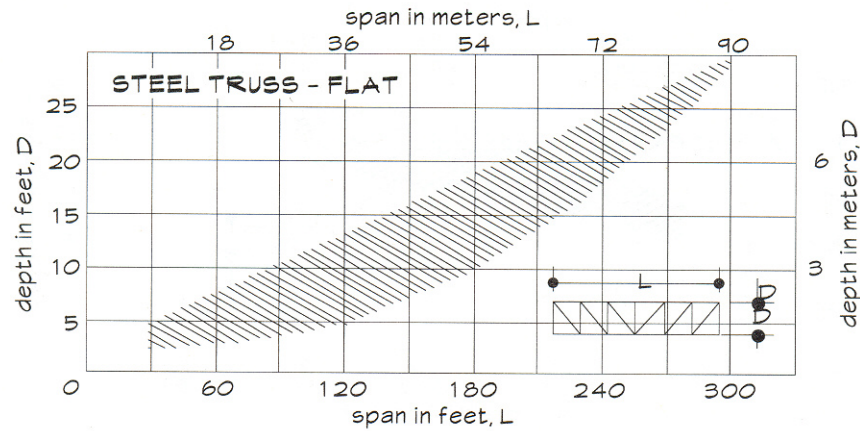


Ilustración IV.100 Armadura de vigas

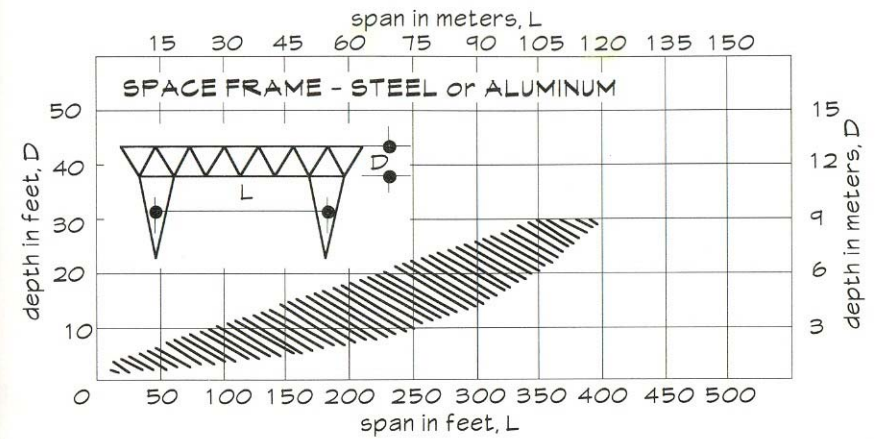


Ilustración IV.102 Marcos espaciales de acero o aluminio



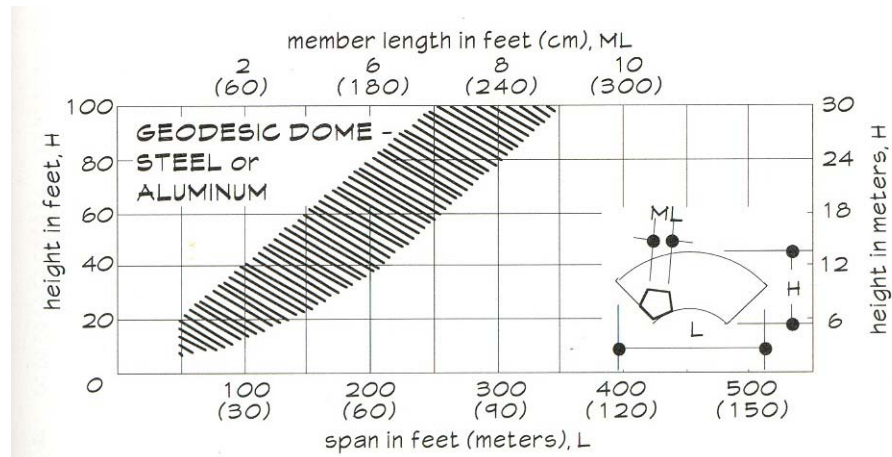


Ilustración IV.103 **Domo Geodésico de acero o aluminio**

El presente capítulo tiene la intención de mostrar conceptos de configuraciones de diseño para ser aplicadas por el diseñador de espacios, en ningún momento se ha pretendido mostrar todas las configuraciones posibles con el acero estructural. Como se verá en el siguiente capítulo la creatividad de la actividad humana en la construcción nos lleva de un proyecto interesante con un concepto estructural acertado a otro.

## V

### INTEGRACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE ACERO CON EL DISEÑO ARQUITECTÓNICO

#### Introducción

**E**l camino a la cultura del diseño arquitectónico con acero estructural empieza entendiendo cómo estas estructuras trabajan. En los capítulos anteriores nos hemos acercado a las estructuras de acero desde su óptica histórica, su comportamiento estructural y también hemos considerado algunos aspectos técnicos que nos brindan un panorama del uso del acero como material constructivo. Imbuidos de este conocimiento, el estudiante de arquitectura puede empezar a tomar decisiones acerca del tipo de estructura de acero que usará para un diseño particular de edificio, unido a esto también puede predimensionar las luces, las

proporciones de los miembros, qué sistema de techos usar, cómo disponer las columnas y los entrepisos.

En este capítulo mostraremos numerosos casos de estudio seleccionados debido a la integración de la estructura al diseño arquitectónico. Estos estudios también permiten analizar cómo el diseño se ajusta al comportamiento único de un sistema estructural específico.

Uno de los proyectos cuyo desarrollo reviste importancia desde el diseño hasta su desarrollo y conformación es el museo Guggenheim de Bilbao. En este capítulo se haya una descripción del proyecto.

Finalmente, habiendo considerado varios ejemplos, se considerará una metodología para integrar la estructura al proceso de diseño en las etapas primarias del diseño, usando esquemas, diagramas, un sistema de selección a través de matrices y gráficas para estimar el peralte de los miembros.

#### ESTUDIOS DE CASOS PRÁCTICOS DE ESTRUCTURAS DE ARMADURAS.

***Centre George Pompidou. (1977, Paris; Piano and Rogers, arquitectos; Ove Arup y Compañeros, ingenieros estructurales).***

“Tendemos a poner la estructura afuera debido a que buscamos la máxima flexibilidad del espacio. Creemos que los usos tienen una vida más corta que la del edificio”, dijo Richard Rogers acerca del diseño del Centre Pompidou.

Como consecuencia de su rol como un centro nacional para las artes, el *Centre George Pompidou* era polémico aún antes de su realización, debido a su concepción estética, pues contrastaba dramáticamente con el área histórica donde se construiría. Pensado para ser un “no-edificio”, llegó a ser un fondo neutral donde las diversas actividades y exhibiciones que podrían tomar su propio carácter. El edificio es original desde su particular tipo de

construcción y detalle. El volumen rectangular tiene 551 pies (168 m) de largo y está diseñado para acomodar expansiones futuras en sus extremos. En la fachada que da a la calle este, se localizan ductos verticales y de servicios mecánicos los cuales son pintados con brillantes colores. Debido a que el muro de revestimiento está localizado detrás de la estructura expuesta, los elementos de circulación y equipo mecánico contribuyen muy poco a la apariencia final del edificio.<sup>1</sup>

Los marcos estructurales se enfatizan en los otros tres lados, y organizan el edificio visualmente, proveen la textura de la fachada, la escala y el detalle visual. Las uniones tipo clavija o con pines son muy usadas y visualmente enfatizan la enorme escala del edificio, el cual tiene cargas considerables y movimientos por temperatura. El edificio utiliza un completo "vocabulario" de miembros y uniones estructurales, -incluso ménsulas fundidas que cargan vigas- que dan un refinamiento y vitalidad a la estructura y a las columnas del edificio.

La estructura consiste en 14 marcos bidimensionales cuyas luces son de 157 pies (48 m) con una adición de 25 pies (7.6 m) de cada lado (para el movimiento de la gente del lado oeste y para el alojamiento de los servicios mecánicos en el lado este). Estos marcos albergan seis niveles con una altura de piso típica de 23 pies (7 m), están unidos por cuatro losas y reforzados por una rejilla de barras de acero.

El diámetro de las columnas principales es de 34 pulgadas (850 mm), son de acero y están llenas de agua como protección contra incendios. Estas columnas soportan unas ménsulas fundidas cuyas uniones utilizan pines. El extremo lejano de estas ménsulas, está amarrado a unas barras verticales y el extremo cercano soporta la armadura principal. Cada armadura de 147 pies. (44.8 m), tiene una profundidad de 9.3 pies (2.82 m). Los cordones superiores consisten en un doble tubo cuadrado de 16 pulgadas (419 mm) y los inferiores



Ilustración V.1  
Pompidou Centre, Paris, by Renzo Piano and Richard Rogers, 1977.  
*Alex Bartel/Science Source/Photo*

en un doble tubo redondo de 9 pulgadas (225 mm) de diámetro. Los diagonales son tubos (para el caso de los que actúan a compresión) y barras (para el caso de los que actúan a tensión) soldados.

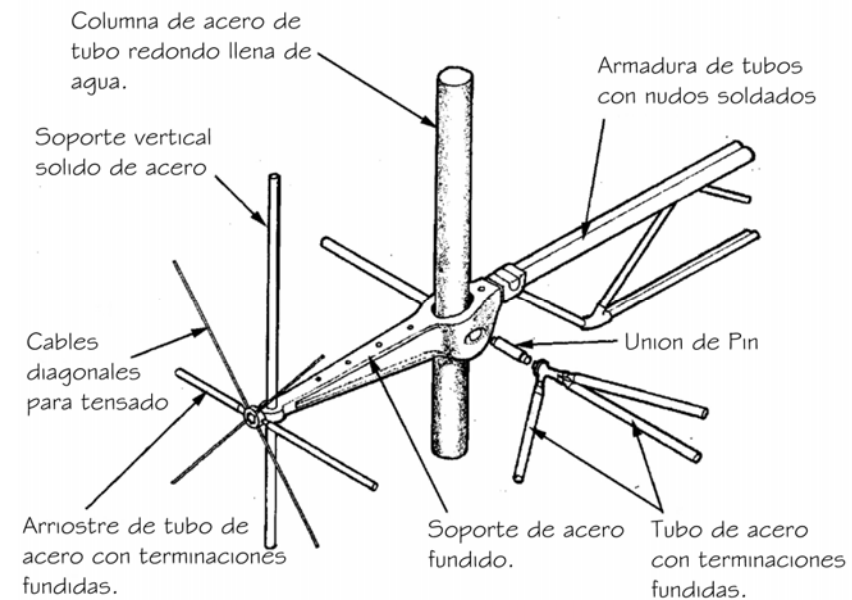


Ilustración V.2

<sup>1</sup> Orton, 1988; Sandaker and Eggen, 1992

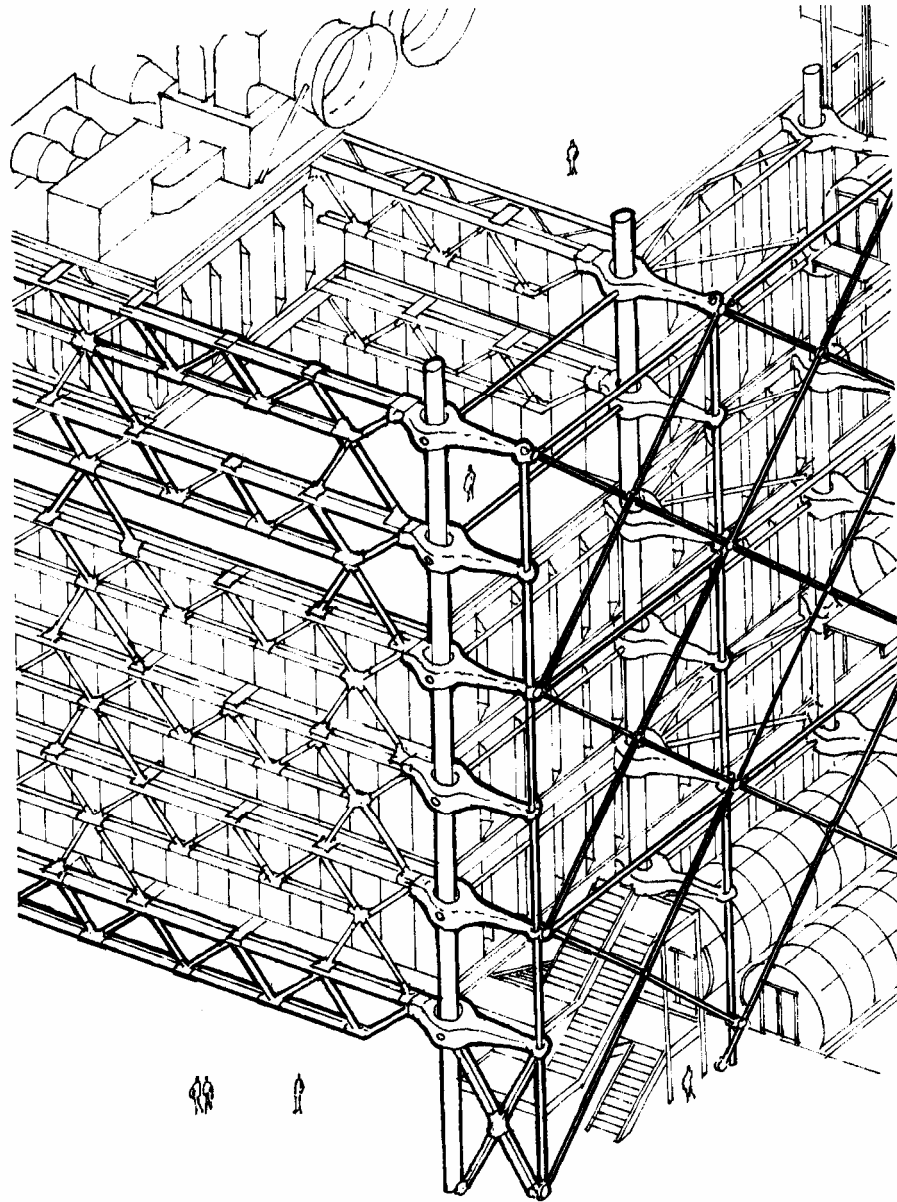


Ilustración V.3

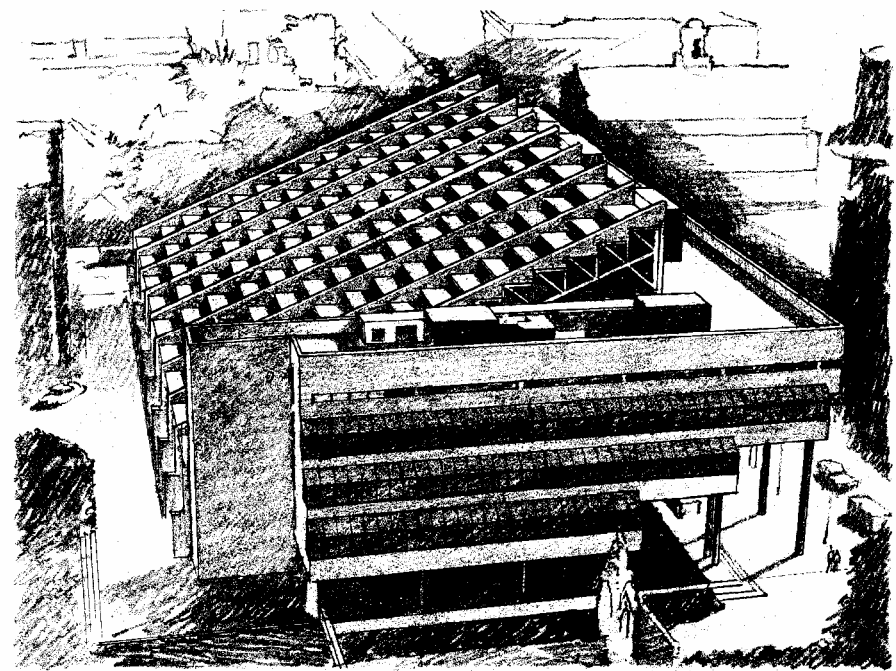


Ilustración V.4

**Gund Hall. (1972; Cambridge, MA; John Andrews, arquitecto).**

Hogar de *The Harvard Graduate School of Design*, la cual tiene programas en arquitectura, arquitectura del paisaje y diseño urbano. El concepto de diseño era utilizar un gran espacio para estimular la comunicación con los estudiantes de diferentes disciplinas. John Andrew, lo describe como: “un espacio tipo desván de fábrica con espacios menores para actividades especiales. Para proveer la cantidad de espacio requerida, los estudios están cubiertos por una armadura tipo “grada” inclinada que permite utilizar claraboyas para lograr iluminación interior.”<sup>2</sup>. Los arquitectos querían que la

<sup>2</sup> Taylor y Andrew, 1982

estructura tuviera expuestos sistemas mecánicos como una herramienta para la enseñanza.

Las nueve armaduras planas están espaciadas a 24 pies (7.3 m), tienen una luz de 134 pies (41 m) y una altura de 11 pies (3.4 m), el cordón superior es un tubo redondo de 12 pulgadas (300 mm), tanto el cordón inferior como los diagonales están formados de tubos de menor sección. Las armaduras tienen una unión tipo bisagra en la parte superior y una unión corrediza en la inferior (esto permite la expansión térmica y cualquier otro movimiento). El criterio para elegir que los miembros de la armadura fueran tubos fue que estos permiten una "fabricación limpia" comparados con las vigas tipo W y que al mismo tiempo facilitaban la aplicación de los 0.125 pulgadas (3 mm) de pintura requerida para la protección contra el fuego. La resistencia al empuje lateral fue solucionada por refuerzos diagonales en los extremos de la armadura.

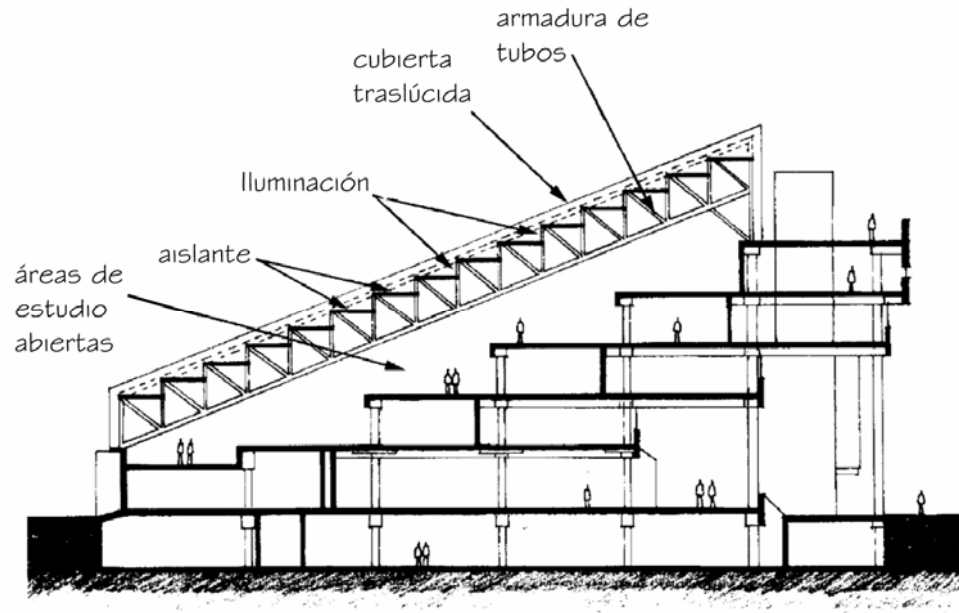


Ilustración V.5

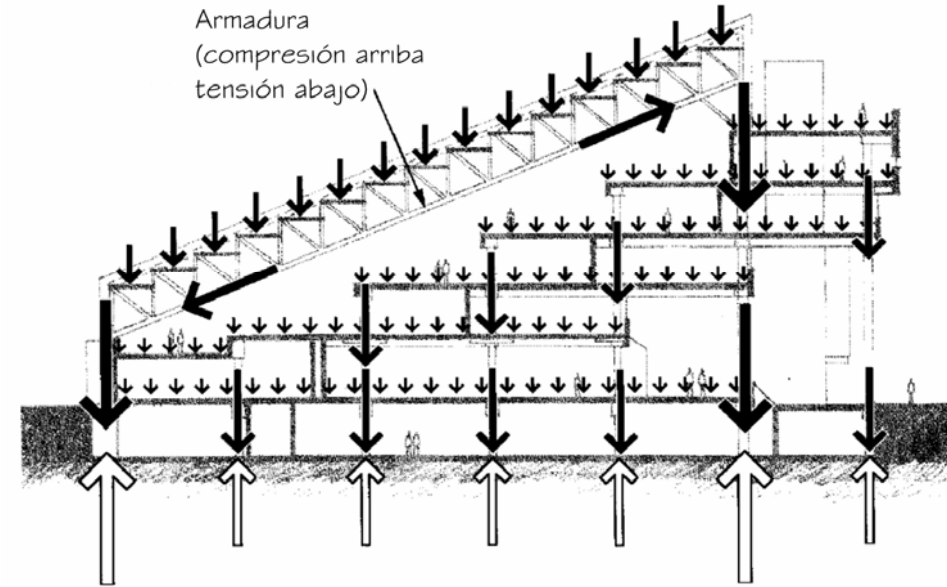


Ilustración V.6

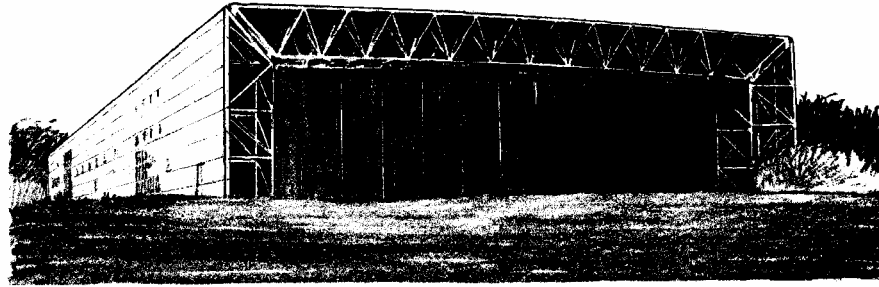


Ilustración V.7

**Sainsbury Center (1978; Norwich, England; Foster Associates, arquitectos; A. Hunt Associates, ingenieros estructurales)**

La función principal de este edificio es albergar una galería de arte, además, un tercio del mismo se usa como escuela de arte, salón de varios usos y un restaurante. El edificio tiene forma rectangular con los dos extremos totalmente vidriados. Fue detallado con gran esmero con el objeto de preservar la simplicidad de la forma y superficie. La luz solar es difusa y está controlada por unas persianas venecianas.

El diseño del edificio involucraba fabricar piezas en taller con alta calidad en acabados debido a que estos llegarían a formar parte de la estructura formal final del edificio.

La estructura consiste en 37 armaduras (triangulares en sección) distribuidas a lo largo de 430 pies. (131.4 m), la luz de cada armadura es de 113 pies (34.4 m). Cada una tiene 8.2 pies (2.5 m) de profundidad y 5.9 pies (1.8 m) de ancho en los cordones superiores. Los extremos de estas armaduras utilizan uniones tipo clavija para conectarse con las columnas que tienen una estructuración similar (triangulares en sección), pero trabajan como voladizo desde el suelo.

Las armaduras que se ubican en los extremos vidriados del edificio, tienen refuerzos adicionales: rigidizantes diagonales y uniones pineadas con el propósito de prevenir la distorsión del parteluz de vidrio. Estos refuerzos adicionales, provocan que la armadura y la columna se comporte como un marco rígido.

Finalmente, para el revestimiento final se utilizó placas aislantes de aluminio sólido, parrillas o paneles de vidrio que encajaban en una grilla de neopreno de 5.9 pies x 3.9 pies. (1.8 m x 1.2 m).

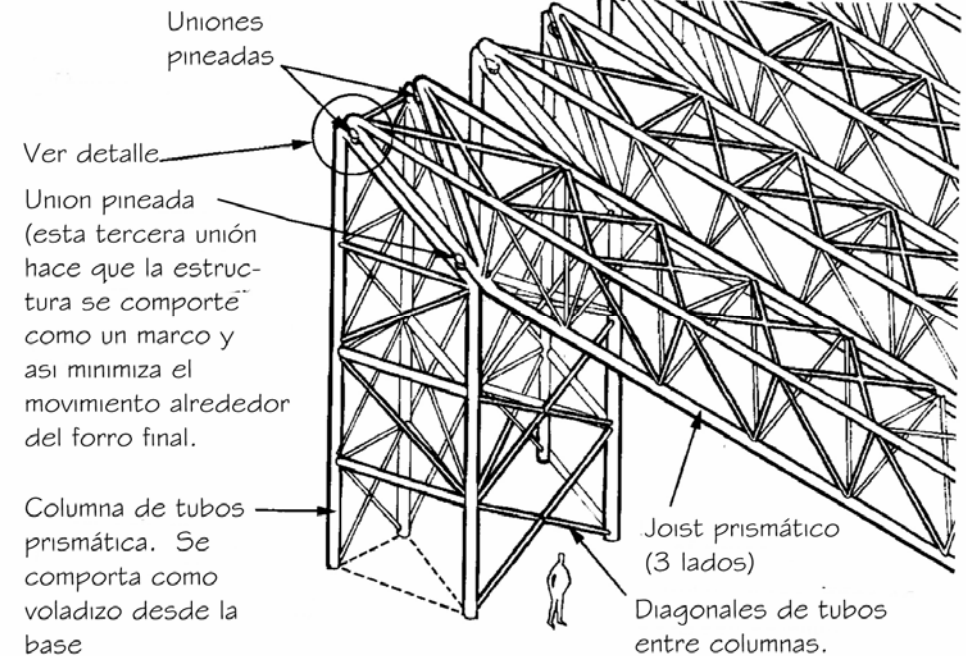


Ilustración V.8

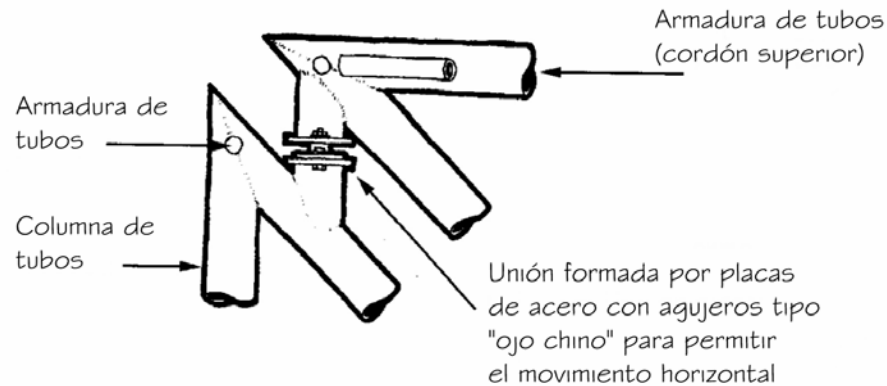


Ilustración V.9

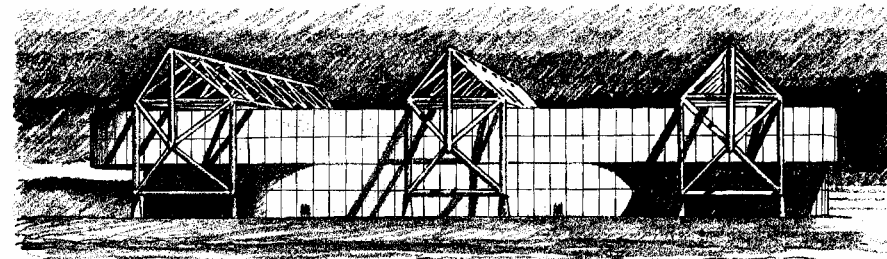


Ilustración V.10

**Crosby Kemper Arena (1974; Kansas City, MO; C. F. Murphy Associates, arquitectos e ingenieros estructurales)**

Este coloso establecimiento, tiene sus armaduras encima del techo, de esta forma se logró tener un mínimo de espacio de estructuración en el interior. Esta configuración contribuyó además a enfatizar la estructura en el exterior.

Las tres grandes estructuras triangulares (en sección) que soportan el techo, tienen una luz de 324 pies (99 m) y en ambos extremos se unen a columnas espaciales para formar un marco rígido cuyos anclajes son de tipo clavija en cada cimiento. Cada armadura tiene 27 pies (8.23 m) de altura y es fabricada de tubos redondos de acero. El cordón superior tiene 4 pies (1.22 m) de diámetro, los dos cordones inferiores tienen 3 pies (914 mm) de diámetro y los diagonales tienen 30 pulgadas (762 mm). Esta configuración posee gran rigidez y resistencia tanto para las fuerzas verticales, horizontales y de torsión.

Debajo de las armaduras principales, se encuentran suspendidos otras armaduras de tipo joist de dos dimensiones que van de centro a centro de la armadura principal, espaciados a cada 54 pies (16.5 m). Luego, se encuentra una tercera distribución de joist livianos espaciados a cada 9 pies (2.74 m) del cual se encuentra modulado el piso metálico.

Las juntas de las armaduras principales, permitieron ensamblar toda la estructura en su sitio. Además, es interesante que la ubicación de las mismas fuera en el exterior, lo cual fue conveniente para el movimiento que produce la expansión térmica.

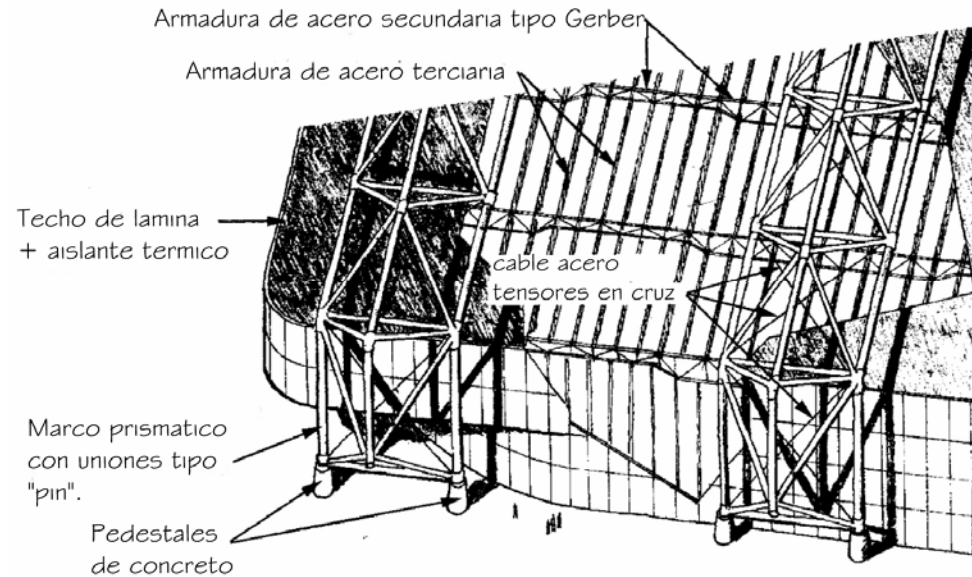


Ilustración V.11

## ESTUDIOS DE CASOS PRÁCTICOS DE “ARMADURAS ESPACIALES”

**Expo 70 Plaza Festiva. (arquitectos: Kenzo Tange y Koji Kamiya; ingenieros: Sadao Hirata)**

Al centro de la Expo 70 en Osaka, Japón, se erigió el espacio más grande del mundo la idea generatriz era crear un techo encima de la Plaza del Festival

Diseño organizar y armonizar el sitio festivo entero, mientras manteniendo una área el desarrollo del tema-progreso principal y armonía. La plaza conectó con el espacio de exhibición de tema y se diseñó para varios alojamientos asiento que van de 1,500 a 30,000 personas que dependen del tipo de evento. La plaza y los espacios de la exhibición se fueron unificados por el gran tejado del marco espacial que los cubrió (Tange, 1969)

El propio marco espacial consistió en medio-octaedro (la pirámide equilátera) los módulos 33.5 pies (10.2 m) el cuadrado en el plan y 29.3 pies (8.9 m) profundo para cubrir una área 1082 pie x 394 pies (330 m x 120 m) (los Kenzo Tange Socios, 1987). El sistema del Mero-tipo usó un nodo de acero sin substancia esférico con los miembros tubulares con fines despallados echados el cerrojo a a los nodos. El tejado entero se cubrió con un transparente, almohada-formó. plástico infló techado fijado a los miembros de cordón de cima alrededor de cada módulo. Las dimensiones aproximadas de los componentes eran 3.6 pies (el 1.1-m)-diámetro los nodos de acero esféricos. El 2.2-pie (el 67-centímetro) el diámetro el cordón superior y más bajo los miembros de acero tubulares, y 1.4pies (46cm) el diámetro el tejido diagonal los miembros de acero tubulares. La estructura se congregó en la tierra y levantó por neumático alza 100 pies (30 m) en el lugar. Esta asamblea entera pesó 4700 toneladas (4260 toneladas métricas) y era soportado por seis columnas. Se desmontó al final del evento.



Para lograr esta balanza inaudita, los ingenieros tenían que superar dificultades que habían restringido el tamaño de marcos espaciales en el pasado: la exactitud angular y dimensional, y los límites impusieron por la construcción en el terreno. Desde que es difícil de lograr la exactitud durante la asamblea inicial, la acumulación del error resultante como los módulos subsecuentes se agrega requiere los reajustes macizos después.

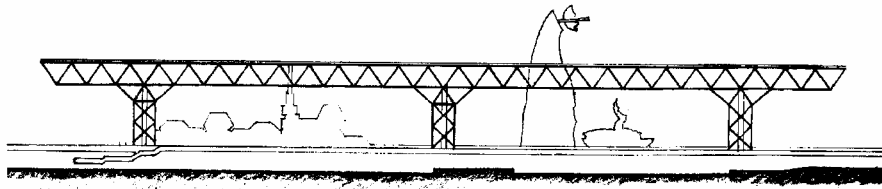


Ilustración V.12

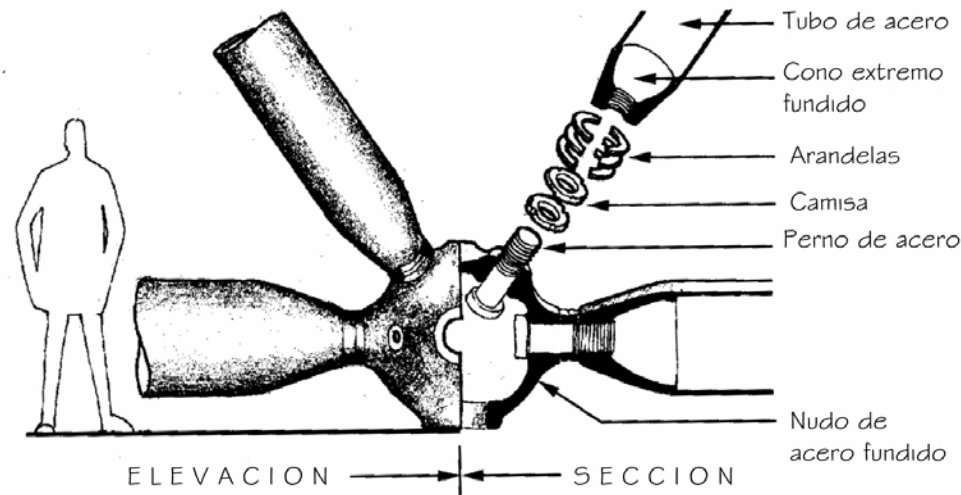


Ilustración V.13

**Jacob K. Javits Convention Center (1980; New York; I.M. Pei & Partners, arquitectos; Weidlinger Associates, ingenieros estructurales)**

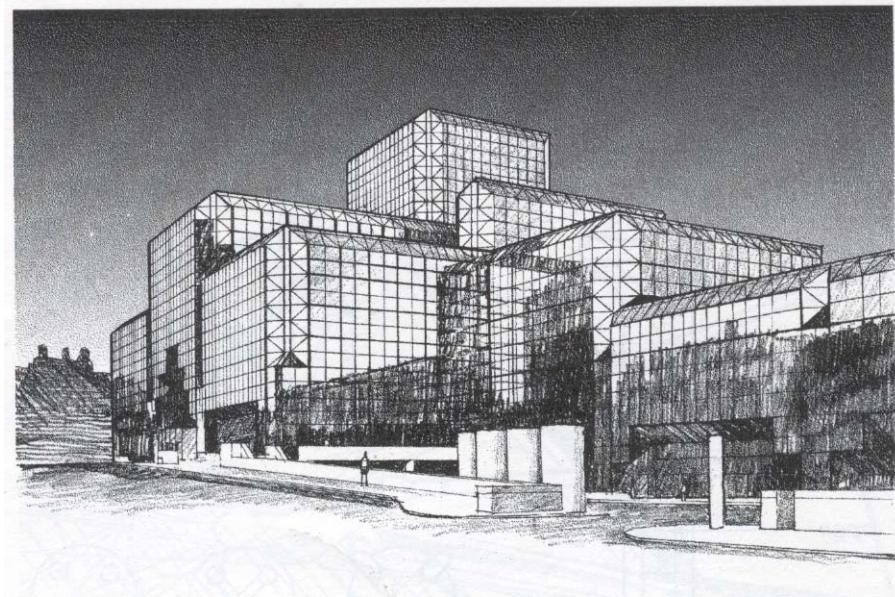


Ilustración V.14

Cinco cuerdas más grandes incluso que el techo de la Plaza del Festival Tange, The Javits Center ocupa 315 m de largo desde la 11a a la 12a avenida y 157 m desde la 34a a la 39a calle de Manhattan. Todas las áreas del edificio suman 148,000 m<sup>2</sup>. Una característica del diseño fue el deseo del propietario y de los arquitectos a que el edificio tuviera un acceso fácil y "festivo". El diseño consideró un espacio de 82 m<sup>2</sup> para lograr un gran vestíbulo enmarcado por una entrada monumental sobre la 11 avenida. A continuación se ubica un puente de 110 m de largo desde el cual se logran ver las exhibiciones principales del vestíbulo y culmina en la 12 avenida con un restaurante que tiene una vista impresionante del Hudson River

Debido a que el diseño era esencialmente lo que James Freed participante del equipo de diseño llama "un almacén", los

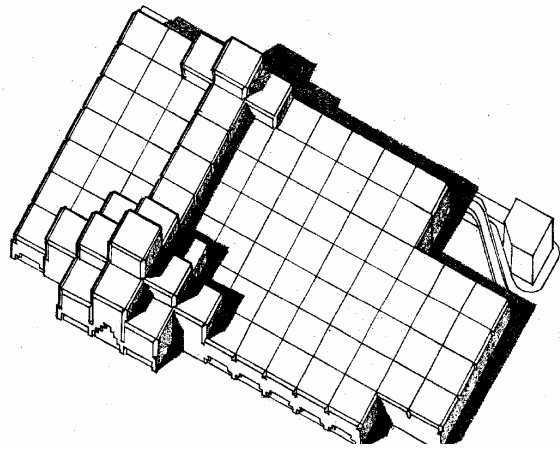


Ilustración V.15

diseñadores no podrían confiar en las funciones interiores para modular la gran fachada. La llave para resolver la disposición de la fachada de 5 cuadras era un marco espacial que soportaría los muros y techos. Las columnas están distribuidas cada 28.00.

El edificio está recubierto por vidrio semi-reflexivo por lo que durante el día se torna opaco y en la noche gana transparencia debido a la iluminación interior y revela la estructura de soporte.

El espaciamiento de las bahías estructurales se da a cada 27.00 m y está formado por módulos de 9.00 m y 3.00 m de profundidad. La columna del vestíbulo central está formada por cuatro secciones de tubos enormes, sin embargo, produce un efecto liviano y transparente. A la misma vez, el diseño evoca la imagen de un árbol y sus ramificaciones. La columna consiste en cuatro tubos de 55 cm de diámetro separados lateralmente a cada 1.50 m. El diseño utiliza conectores diagonales de placas metálicas. El capitel consiste en soportes diagonales a cada 3.00 m. El módulo estándar del marco espacial es un rectángulo de 3.00 m.

El sistema de marcos espaciales fue manufacturado por PG Structures, Inc., según James Freed la ciencia detrás de la estructura no está basada en Buckminster Fuller sino en tecnología británica, es debido a eso que puede ser tratado como "un sistema tan flexible que provee textura y transparencia". El uso de este marco espacial fue restringido a la estructura primaria del edificio,

mientras que el interior fue dividido en elementos de concreto que son la marca de mucho del trabajo de Pei.

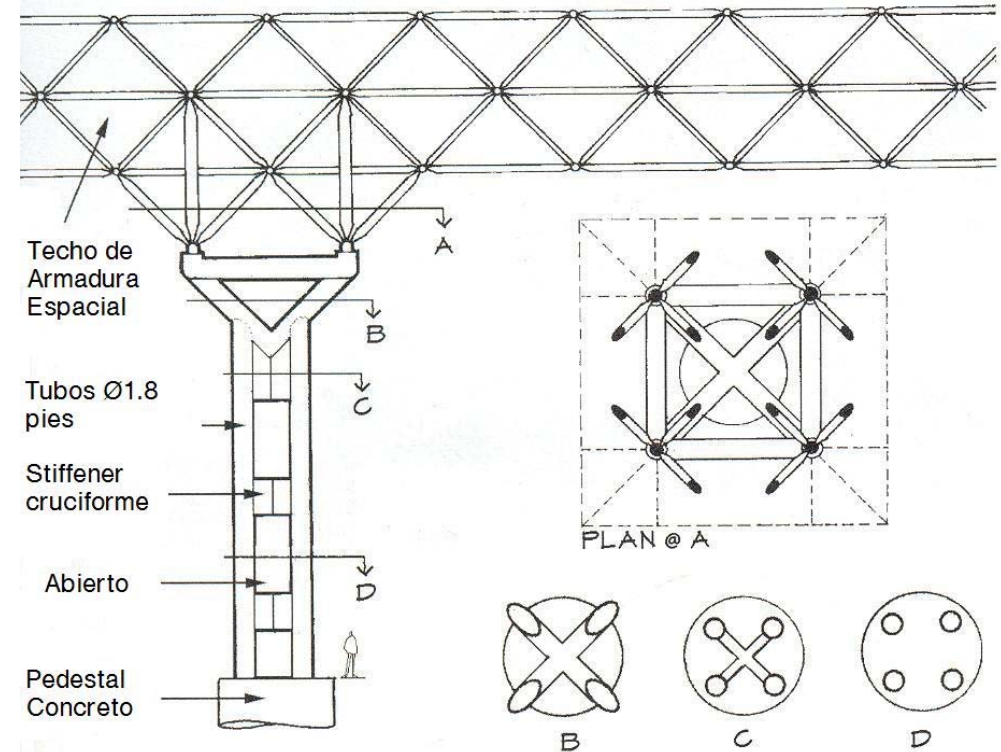


Ilustración V.16

**Schulitz Residence (1978; Beverly Hills, CA; H.C. Schulitz, architect)**

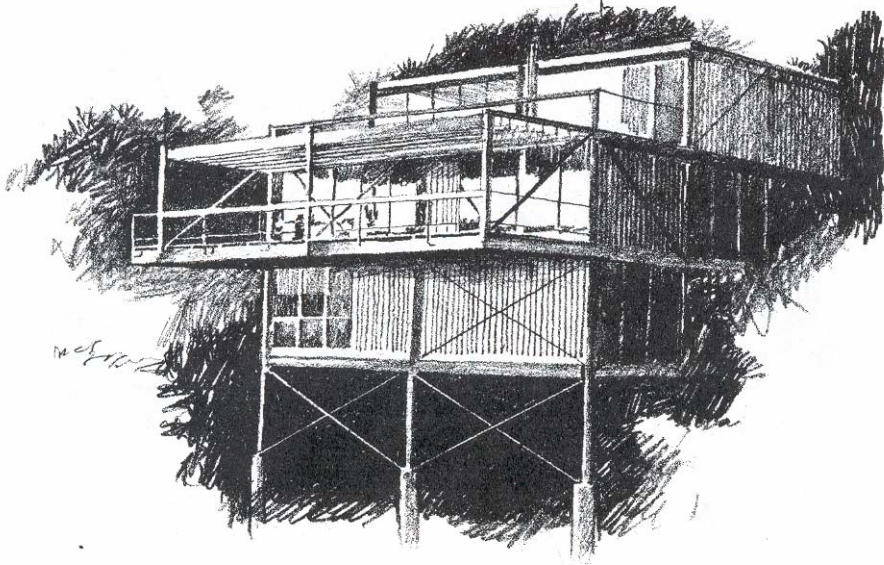


Ilustración V.17

Esta residencia es un ejemplo excelente del uso del acero para la construcción residencial. De manera similar al de la casa de Charles Eames en 1949, este diseño utiliza armaduras livianas en un entramado de “vigas y columnas”.

Debido a su ubicación en una zona de alta actividad sísmica, la estructura debería resistir no solamente cargas de gravedad y viento sino las aceleraciones del terreno que son resultado de la actividad sísmica. La estructura liviana minimiza las fuerzas de inercia de la casa.

Los refuerzos diagonales resisten las fuerzas laterales y permiten las uniones entre vigas, armaduras y columnas lo que hace posible que toda la armadura junta se comporte como una estructura articulada. Esto resulta en una construcción económica y permite tolerancias en el montaje.

Localizado en una ladera, la casa tiene tres niveles, el nivel superior se encuentra a nivel de la calle. La estructura consiste en columnas tubulares de 6” que soportan dos vigas formadas por canales metálicos en cada lado. Los extremos de estos canales sobresalen en las columnas lo que hace que en la fachada se enfatizen las uniones. Estas vigas de canal soportan los joist de alma abierta que están distribuidos a cada 1.20 m a ejes.

Las cuatro hileras de columnas metálicas están soportadas a su vez por cuatro hileras de pedestales de columnas y un muro de contención que llega hasta el nivel de calle.

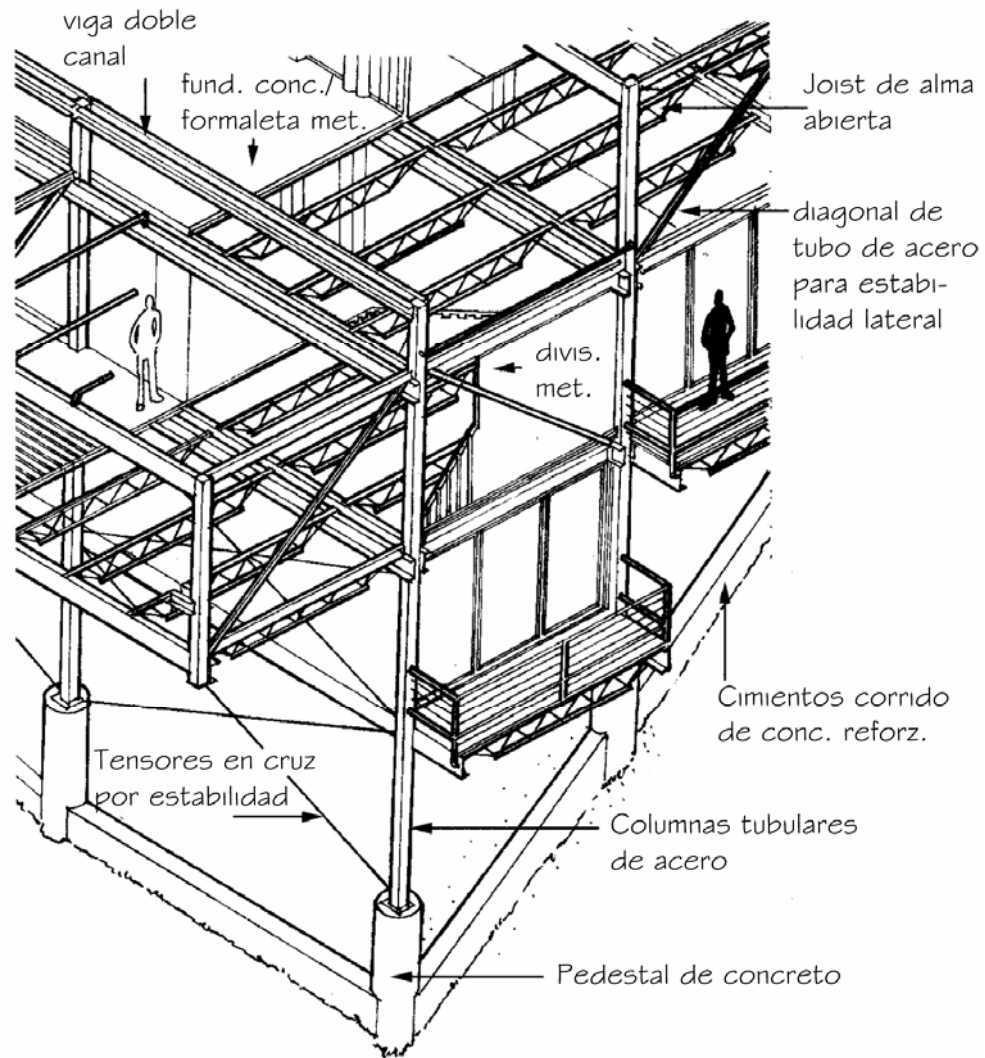


Ilustración V.18

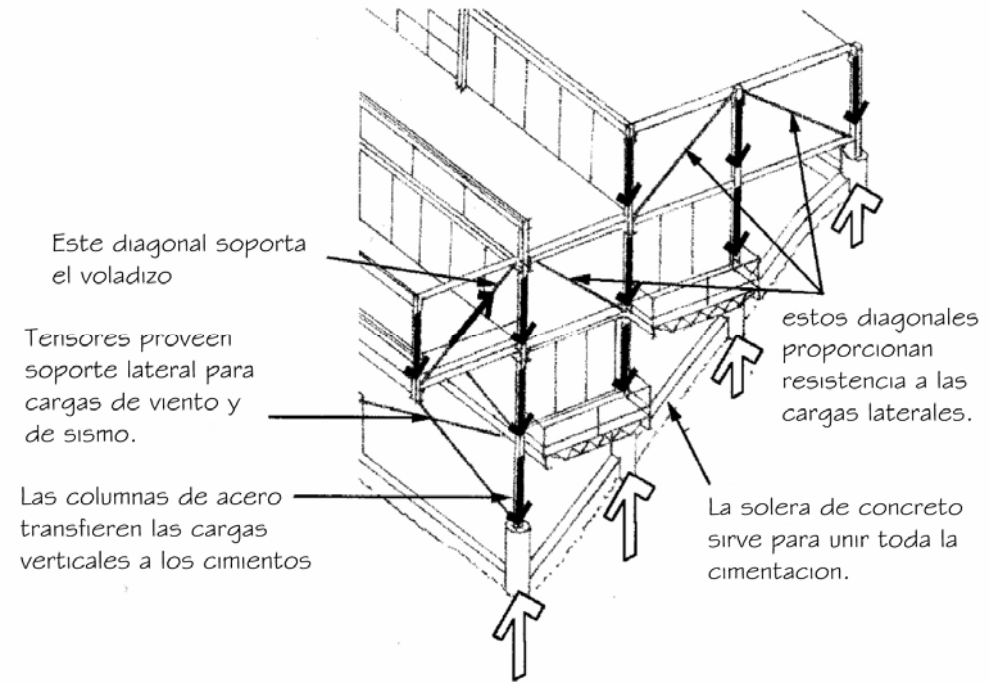


Ilustración V.19

### Guggenheim de Bilbao<sup>3</sup>

Construido en el corazón de la industrializada ciudad de Bilbao en el País Vasco de España, el Museo Guggenheim cuyas fluidas y curvas formas saltan a la vista, ha sido reconocido como uno de los más complejos, únicos e importantes diseños de arquitectura de este siglo.

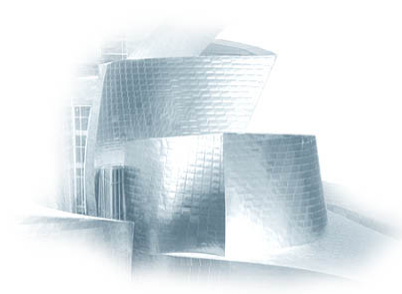


Ilustración V.20  
Diseño basado en la fachada del Museo Guggenheim

Siendo descrito como: “la flor metálica”, “reminiscencia de barco”, “casco y proa”, “un sistema de espiral de metal”, “arquitectura abstracta”, “una gran masa sin forma”, etc., el diseño ha sido universalmente aplaudido tanto por críticos de arquitectura como por el público visitante.

Con un concepto innovador del uso de la estructura de acero junto a la confianza que proveen los programas de computadora que usan actualmente los arquitectos, ingenieros, dibujantes y fabricantes se logro que todo el proyecto se terminara en tiempo y dentro del presupuesto.

#### El reto

En 1991, el arquitecto Frank O. Gehry y Asociados, en Santa Monica, CA, fueron los exitosos ganadores de una competencia limitada para el diseño del museo, organizada por *El Gobierno Regional del País Vasco* y la *Solomon R. Guggenheim Foundation*. El tema de diseño era no solamente crear uno de los más grandes museos de arte sino además uno de los más grandes edificios del mundo. El edificio es dos veces más largo y alto que el famoso George Pompidou en París y en su atrio central cabe el entero

edificio del *New York Guggenheim Museum* diseñado por Frank Lloyd Wright, sus 250,000 pies cuadrados (23,226 m<sup>2</sup>) costaron \$100 millones.

El museo está asentado en una plataforma baja desde donde su atrio central se eleva unos 50 metros (164’). Desde ahí, las galerías de varias formas y tamaños radian prácticamente en todas direcciones. Algunas, galerías llamadas “clásicas” son de geometría rectilínea y están recubiertas de piedra. Otras, son curvadas en sus tres dimensiones y están recubiertas de titanio. La galería más grande llamada “bote” tiene 140 m (459’) de largo por 25 m (82’) ancho sin columnas interiores y se extiende debajo del Puente de la Selva. Todas las galerías incluyen aberturas por el orden de los 15 m (49’) a 20 m (66’) sin pisos internos o soportes verticales.

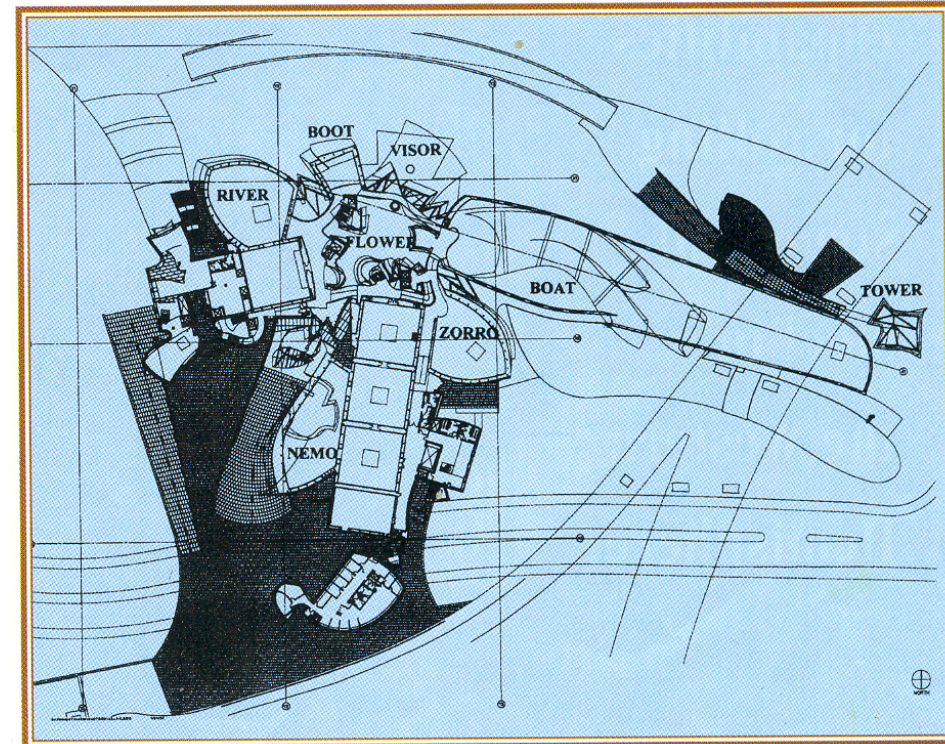


Ilustración V.21. Planta de ambientes del Guggenheim

<sup>3</sup> La información que se presenta a continuación apareció impresa en la revista “Modern Steel” de Julio de 1998, Volumen 38, No. 7 publicada mensualmente por *The American Institute of Steel Construction*.

*Skidmore, Owings & Merrill*, compañía de ingeniería estructural cuya sede está en Chicago, fue elegida para el proyecto debido a su exitosa colaboración con Gehry para un proyecto en Barcelona, España. El proceso de diseño conceptual desde el punto de la ingeniería estructural era único, no había ningún precedente en términos de geometría, organización y escala. La mayor parte de estructuras para edificios son extensiones o derivaciones de los primeros sistemas de construcción, la estructura del Museo de Bilbao tenía que desarrollarse sin el beneficio común de tener un proyecto similar. Además el “fracturado” e “irregular” tema arquitectónico de masas y superficies curvas era explícitamente raro para los preceptos de estabilidad, organización, regularidad y orden en el diseño, que son convencionales en la ingeniería estructural para lograr un costo eficiente. El reto del diseño era por tanto crear un sistema estructural organizado y racional, dentro del diseño de arquitectura, el cual podría ser razonablemente diseñado, dibujado y construido. Para lograr estos objetivos, se concibió un sistema estructural de acero único.

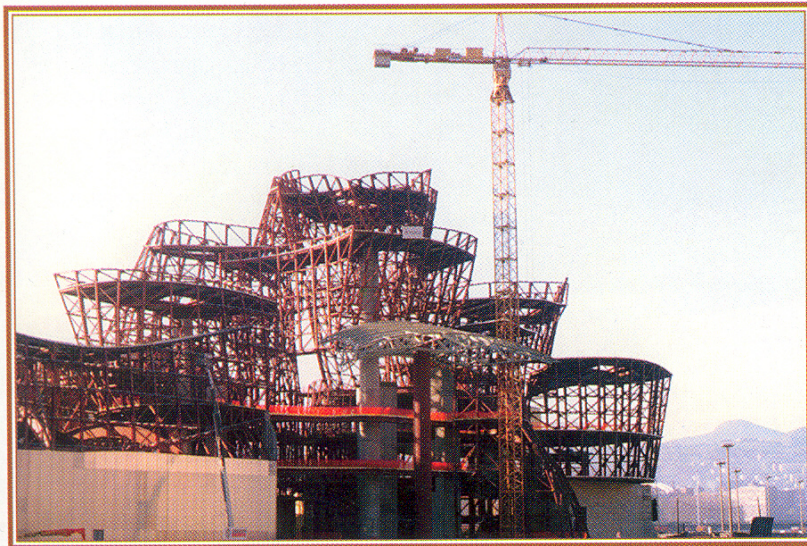


Ilustración V.22. El sistema estructural proveyó la rigidez y ligereza necesaria para la compleja geometría del Museo Guggenheim de Bilbao

### Sistema Estructural

Las etapas iniciales del proyecto se concentraron en la búsqueda de un sistema estructural apropiado para las superficies de anclaje doblemente curvas del exterior y la complejidad general del proyecto. Estas superficies y su volumen interior, se caracterizaban por alturas arriba de los 20 m (66') sin ninguna estructura interna en su longitud, espacios libres de columnas interiores y una distribución de soportes discreta y aleatoriamente situados.

Muchas de las superficies tridimensionales están interconectadas, mientras que otras tienen soportes laterales o están lateralmente arriostradas por las galerías en forma de bloques. Tradicionalmente, este tipo de formas han sido realizadas casi exclusivamente por concreto reforzado –de hecho otros diseños de edificios pequeños de Gehry lo han sido– sin embargo, la escala de este proyecto demandaba un sistema estructural liviano. Basado en estos parámetros, se pensó en un sistema estructural que tuviera las siguientes características:

1. La estructura debería ser aplicable a una variedad de formas de arquitectura de forma que cada elemento no requiriera un sistema separado. Las proporciones de los miembros deberían ser simples y convencionales.
2. La estructura debería poder trabajarse y organizarse sin impactar y limitar el diseño arquitectónico.
3. La estructura debería poder fabricarse siguiendo lo más cerca posible las superficies del diseño arquitectónico para poder simplificar el recubrimiento de las placas de titanio exterior y el sistema de paredes interiores.
4. El espesor estructural debería ser lo más delgado posible con el objetivo de minimizar la profundidad del espacio entre el recubrimiento exterior e interior y brindar el máximo espacio de uso interior.

5. La estructura debería ser analíticamente verificable tanto estructuralmente como arquitectónicamente por rutinas de computadoras actualmente disponibles.
6. La estructura debería ser liviana y ser capaz de extenderse eficientemente entre los puntos de soportes discretos.
7. Debería ser posible construir la estructura y controlar las tolerancias en el campo con el propósito de ajustar la geometría compleja del exterior e interior.

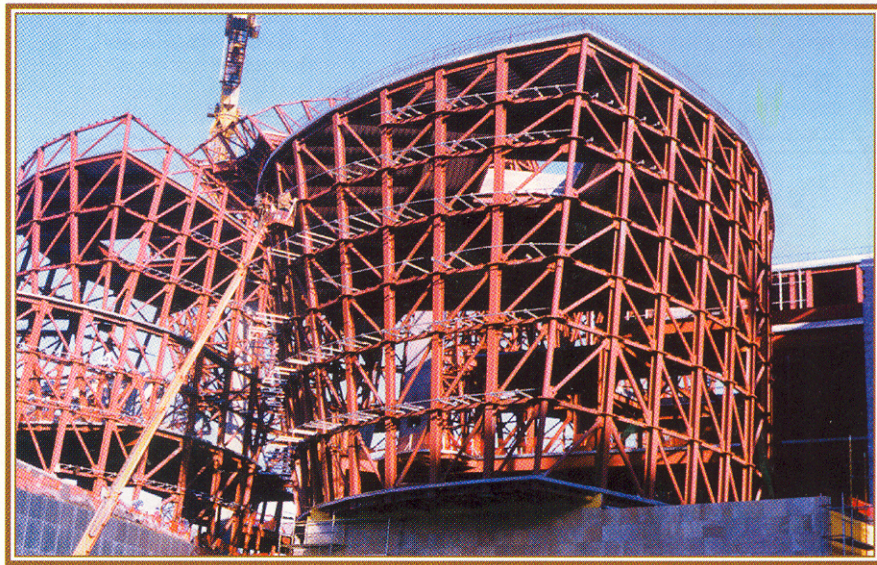


Ilustración V.23. La compleja geometría del Guggenheim fue creada por una grilla de acero estructural que sirvió de soporte para la piel de titanio del edificio.

concepto fue la filosofía de diseño de seguir lo más cerca posible la forma de la arquitectura. Se probó que la curvatura de la forma era una manera ingeniosa y avanzada de resistir las cargas laterales. El concepto de un sistema de muro de carga discreto en acero estructural fue desarrollado a base de la organización relativamente densa de una grilla de miembros diagonales. Finalmente, la geometría de las superficies exteriores fueron estudiadas a base de planos horizontales y verticales lo que permitió germinar la idea de organizar los marcos de forma similar, una manera geoméricamente rígida.

Finalmente se desarrolló una compleja estructura que posibilitaba la colocación de las placas de titanio exteriores, esta estructura podría ser descrita como “grilla de diagonales en tres dimensiones”. Debido a la altura y el bajo peso de la estructura, el sistema tiene la capacidad de lograr grandes espacios sin columnas intermedias. Al mismo tiempo se aprovecha la rigidez que las variadas curvas proveen.

Este tipo de organización de la estructura proveyó una economía y un espesor estructural similar al que proveen las estructuras de concreto reforzado del tipo conchas. El concepto del sistema estructural se completó con la presentación de la idea de la fabricación de “bandas” horizontales de armaduras en taller las que podían fácilmente ser colocadas en posición vertical en el sitio de construcción sin la necesidad de tener apoyos laterales temporales y de esta forma, simplificar el montaje del muro de la gran galería. Las juntas se podían hacer de placas de carga horizontales en cada nudo, permitiendo que los ángulos verticales y horizontales pudiesen cambiar entre los miembros en el momento del montaje.

#### **Proceso de Diseño Arquitectónico**

El diseño inicial de la arquitectura del proyecto fueron creados a nivel de un modelo arquitectónico hecho de cartón, papel, madera, etc. Cuando el modelo físico estuvo completo, fue transferido electrónicamente a una computadora mediante digitalizar todas las superficies exteriores. Este proceso de digitalización resultó en una

La capacidad de tener una estructura liviana así como la posibilidad de controlar y verificar la estructura en un ambiente de taller además de los objetivos anteriormente expuestos hizo de la elección del acero estructural una decisión natural. El concepto general del sistema estructural evolucionó en un período de pocos meses a través del dialogo interno y del equipo de arquitectura. Una clave del

estructura de alambre tridimensional, en donde cada punto de control podía ser verificado con respecto al modelo físico. Llegando a este punto, los datos geométricos del proyecto fueron manipulados usando el software CATIA, el cual fue desarrollado para el diseño de los aviones de combate “Mirage” de la armada francesa.

Se usó CATIA para suavizar y racionalizar las superficies curvas y también para crear una “superficie vecina” para localizar el desarrollo de la estructura. Con la definición de esta “superficie vecina”, los equipos de arquitectura e ingeniería desarrollaron una “estructura de alambre” de nudos y líneas que eventualmente definirían los ejes estructurales. Se crearon “estructuras de alambre” segmentadas con el uso de planos horizontales y verticales a intervalos regulares de la “superficie vecina” provistas por CATIA, las intersecciones de estos planos, llegarían a ser los nudos estructurales.

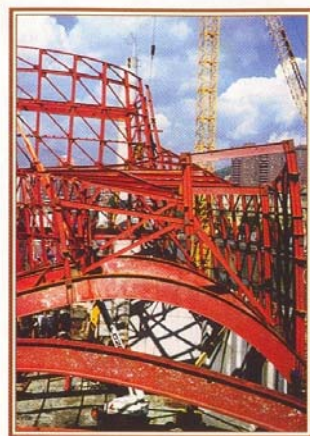


Ilustración V.24

Al crear el modelo de estructura de alambre para el complejo revestimiento de las superficies, el equipo de arquitectura dio una serie de guías con el objetivo de organizar el trabajo de acero. Esta “reglas” fueron impuestas para el desarrollo estructural con el propósito de crear cierta disciplina y un patrón regular de estructura dentro de las limitantes del diseño arquitectónico:

- 1) 1. Todos los miembros pueden ser segmentos rectos entre los puntos de nudos.
- 2) La grilla o retícula debería ser aproximadamente de 3m x 3m (10' x 10'). La grilla resultó ser lo suficientemente densa para las superficies curvas y al mismo tiempo permitió dimensionar razonablemente las “bandas” horizontales de armaduras en taller y facilitó el transporte de las mismas al sitio.

- 3) Los nudos estructurales de trabajo, deberían tener una dimensión constante de 600mm (2') desde el revestimiento exterior de la superficie.
- 4) Los miembros horizontales, deberían tener una elevación constante, excepto por las pendientes del techo.
- 5) Los miembros que constituyen columnas inclinadas deberían de poder crearse pasando un plano vertical y luego usando el programa CATIA. La orientación del alma debería ser perpendicular al exterior de las superficies.
- 6) Los miembros diagonales deberían ser orientados en un arreglo a tensión (Pratt), basado en las consideraciones de cargas de gravedad.
- 7) Donde fuera posible, se debería usar las mínimas dimensiones posibles en las secciones de los miembros para lograr economía y a la vez simplificar la coordinación del proceso de fabricación:
  - a) Para columnas verticales inclinadas: tipo estándar y roladas. Estándar Europeo HD 310mm x 310 x 97 kg/m (aproximadamente la sección en cruz de una HP12 x 63) y HD 260mm x 260 x 73 kg/m (ligeramente más grande que la sección en cruz de una HP10 x 57) (50 ksi).
  - b) Para miembros verticales en esquina: Tubería de 250mm (10") de diámetro x 10mm (.39") en paredes. Tubo cerrado de 42 ksi.
  - c) Miembros horizontales: 160mm (6.3") x 160 x 6mm (.24") de espesor de muro cuadrado de 42 ksi.
  - d) Miembros diagonales: 155mm (6.1") diámetro x 6mm (.24") de espesor de muro de tubo redondo de 42 ksi.





Ilustración V.25

La geometría de las uniones estándares y sus capacidades de carga se desarrollaron a base de un número de piezas que podían ser fácilmente verificadas en términos de interferencia con el revestimiento interior y exterior por el equipo de arquitectura. El limitado número de secciones armadas en cruz permitió verificar todas las cargas y combinaciones de cargas. Sobre el análisis se encontró que el 95% de todos los miembros de la compleja armadura tridimensional estaban realizados con el mínimo de secciones.

#### Documentos de Ingeniería Estructural

Siguiendo la naturaleza única del proyecto, los dibujos de diseño estructural fueron organizados con vistas al uso eventual de computadoras para la manipulación de datos por parte de todos los involucrados en el proyecto. De hecho los primeros dibujos fueron preparados para chequear la información generada por computadora y cualquier discrepancia existente entre los equipos de ingeniería y arquitectura. La definición de la geometría para las placas de sujeción del revestimiento, se basó en el sistema de coordenadas universales (x, y, z). El punto de trabajo de cada nodo fue especificado en el dibujo como una marca de referencia para la columna inclinada versus la elevación de la misma. Se preparó una lista de ángulos para definir la orientación de cada columna.

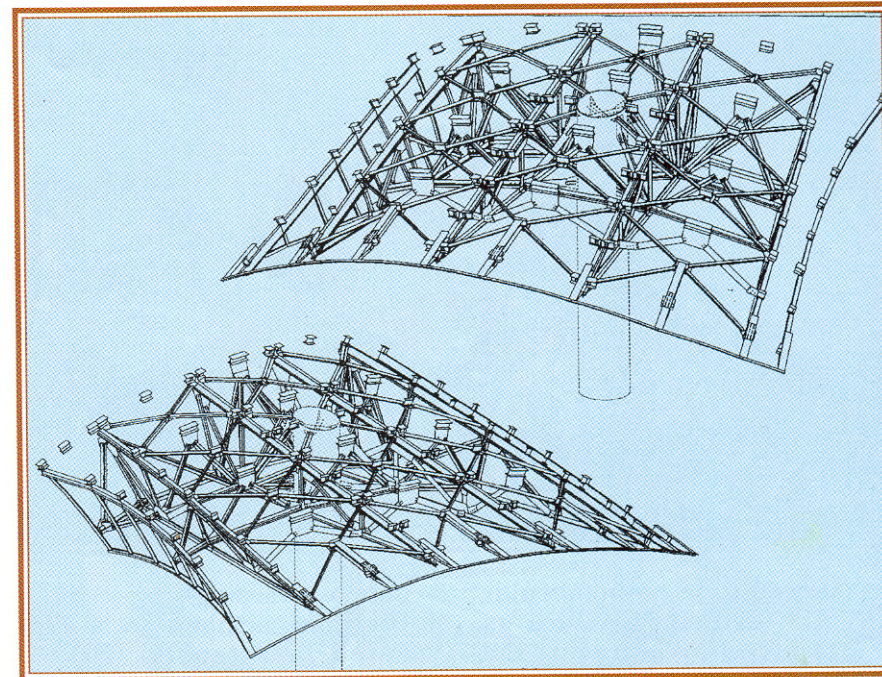


Ilustración V.26 Vistas isométricas del "Visor".

Los dibujos de la geometría de cada armadura se lograron mediante una serie de vistas isométricas tridimensionales que incluían la continuación de las interfaces entre las varias formas. Cada superficie fue presentada pura, en una elevación desarrollada donde cada miembro: verticales, horizontales y diagonales fueron desarrollados. Se realizaron planos convencionales para los pisos de las galerías, techos y parapetos.

Se comprendió por todas las personas involucradas en el proyecto que los archivos de computadora eran tan, sino más importante que los dibujos impresos en papel. Se puso rigurosa atención a la exactitud de la información basada en computadora y fue esta información la que sirvió al subcontratista de dibujos de taller. A este término, los dibujos de construcción realizados en el formato DXF de AutoCad fueron presentados al contratista como parte de la

documentación del proyecto. Para el complejo revestimiento metálico de titanio, se creó especialmente una estructura de alambre electrónica con colores codificados, la cual se presentó al fabricante del acero estructural.

Estos archivos de computadora, incluidos aquellos donde se encontraba la geometría de trabajo del proyecto y las dimensiones de los miembros utilizando códigos de colores, formaron parte de un listado master de dimensiones de secciones.

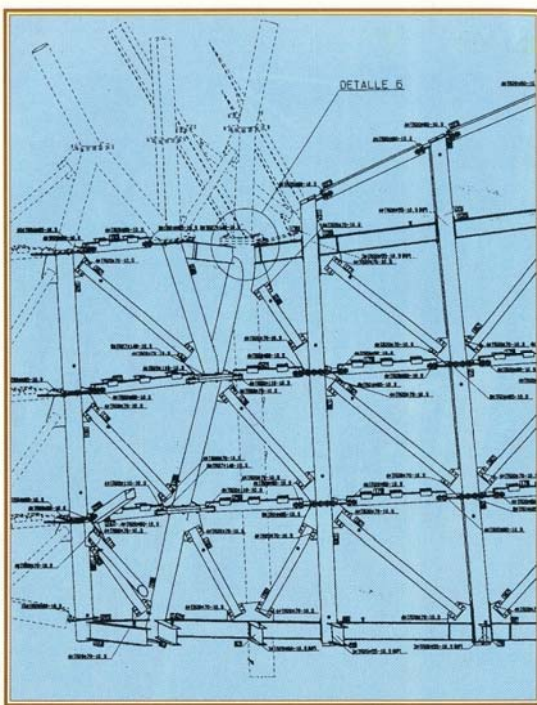


Ilustración V.27

la estructura de alambre desarrollada por SOM. Cada nodo de junta resultó único en su geometría de interconexión de miembros, sin embargo, hubieron juntas que resultaron diferentes lo que obligó a trabajarlas por separado, estas juntas se organizaron en subrutinas y fueron incluidas en la base de datos de BOCAD. El programa

Las estructuras de alambre realizadas por computadora fueron chequeadas por los dibujantes de taller contra los dibujos impresos y de esta forma se creó la base para la toda la creación de los dibujos de taller.

### Desarrollo de planos, fabricación y montaje

El fabricante de la estructura usó BOCAD, un poderoso programa desarrollado en Bélgica, para dibujar los planos de taller y crear archivos de gráficas tridimensionales de todas los ensambles de acero.

Esta información se tomó de

BOCAD entonces fue capaz de dibujar completamente y en tres dimensiones la estructura completa incluyendo todas las uniones de placa, pernos, miembros con saques, etc. A partir del entero conjunto tridimensional, se logró hacer los dibujos detallados, dimensionados e impresos. Todo este proceso automatizado fue el responsable de crear cada pieza y ensamble en dibujos, prácticamente libre de error.

La armadura tipo “banda” horizontal se levantó y se colocó en forma adyacente a los marcos horizontales, esto permitió que hubiera poco ajuste en el campo así como un rápido montaje. Las placas de carga horizontales en cada nudo también formaron puntos de conexión para los miembros horizontales y diagonales. Se lograron uniones pernadas en taller lo que permitió el ajuste en campo. Las armaduras parcialmente completas tuvieron suficiente rigidez lo que permitió un montaje con pocos elementos temporales de soporte.

Los fabricantes del acero y el subcontratista del sistema de anclajes de planchas de titanio utilizaron la deflexión calculada de la estructuras con las curvas de nivel del terreno para determinar que la estructura estuvieran dentro de los parámetros de tolerancia deseados y analizados por el programa SOM. Todo el acero fue limpiado por chorro de arena (Sandblasting) recibió una aplicación de pintura debido a la exposición y naturaleza pública del trabajo en el museo.

### Esculturas de Acero Exteriores

La mayoría del acero estructural en el proyecto fue disimulado dentro de las planchas de titanio y piedra de las superficies exteriores del edificio, en el interior algunas estructuras fueron expuestas parcialmente. Sin embargo, las estructuras esculturales de acero ubicadas en los exteriores sirvieron como un complemento del concepto arquitectónico global. Todas estas estructuras son únicas en sistema y geometría y sirvieron para demostrar las poderosas rutinas del programa de dibujado y detallado de todas las piezas que uso el fabricante. La naturaleza expuesta de estas estructuras exigieron emplear sistemas detallados para cada una de ellas, los

cuales fueron diferentes a los empleados en las superficies curvas del proyecto. Cada uno de estos elementos recibieron múltiples capas de pintura posteriormente a su limpieza con chorro de arena a presión. Los últimos retoques se hicieron en obra.

A una altura aproximada de 26 metros se yergue la “visera” de 25 m x 20 m sobre el río, esta está soportada por una columna en voladizo de 2 metros cuyo espesor es de 40 mm. La estructura esta configurada a manera de armaduras en voladizo cuya altura es variable y asimétrico. Las cargas de viento consideradas fueron de 200 kg/m<sup>2</sup>.

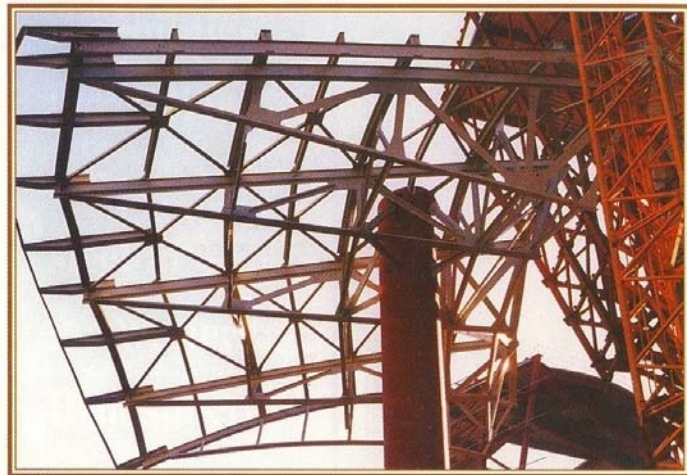


Ilustración V.28 Estructuras del “Visor”

Sin los pisos internos de 50 m, la torre no tendría sentido. Este elemento constituye una marca visual extendiéndose a los límites del proyecto y abrazando el puente De la Salve. Los 200 m adyacentes de la galería “bote” se extiende debajo del puente y termina en la base de la torre. Los marcos expuestos en la torre están anclados parcialmente en piedra, los cuales son vistos desde diferentes puntos de vista. De una base simple, la estructura se abre y se extiende verticalmente hasta llegar a bifurcarse en la parte media. Todos los



Ilustración V.29 Estructura exterior iluminada

miembros son armaduras a base de secciones tipo Wide Flange con uniones soldadas en taller. En algunos puntos, se unen hasta 12 miembros en un solo punto y en ángulos no ortogonales.

El museo fue abierto al público en octubre de 1997. La naturaleza y la repetición del sistema desarrollado para el Museo Guggenheim de Bilbao dió como resultado que sus 3900 toneladas tuvieron un costo comparable a un proyecto tradicional.

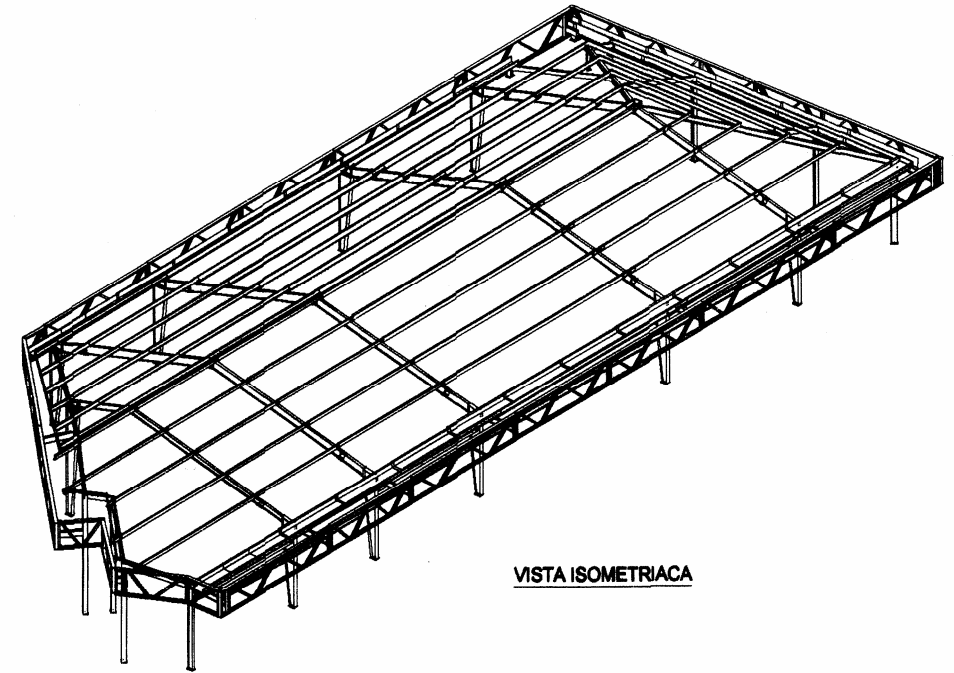
## CASOS PRÁCTICOS EN LA CONSTRUCCIÓN CON ACERO EN GUATEMALA.

### Estructuras de marcos rígidos con apoyos articulados:

Gran parte de los procesos industriales necesitan espacios amplios para lograr sus fines productivos. Esta necesidad, surge de albergar actividades de almacenamiento de materia prima, transporte, procesos automatizados o de manufactura, áreas de empaque y almacenamiento de producto terminado. Al mismo tiempo, la industria requiere soluciones seguras, eficientes y económicamente accesibles para no incrementar innecesariamente sus costos de producción.

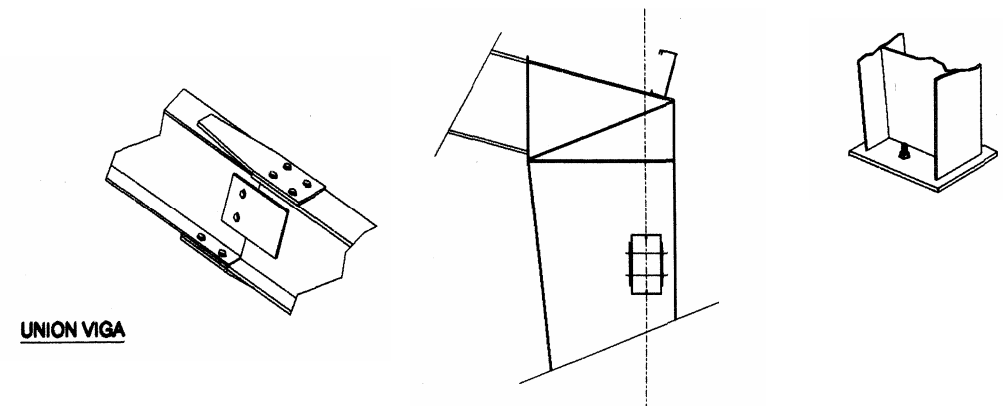
La solución tradicional es construir estructuras de marco articulados logrando cubrir luces desde los 10 hasta los 30 metros. Estos marcos se caracterizan por ser soluciones económicas pues se logran con estructuras cuyo peso puede variar desde los 25 a 35 libras por metro cuadrado. Estructuras de luces mayores construidas en marcos rígidos pueden pesar entre 35 a 45 libras por metro cuadrado, pero a pesar que se construyen con regularidad, resultan más económicas las estructuras de alma abierta.

Estas soluciones también son empleadas en centros comerciales, grandes almacenes y bodegas tradicionales.



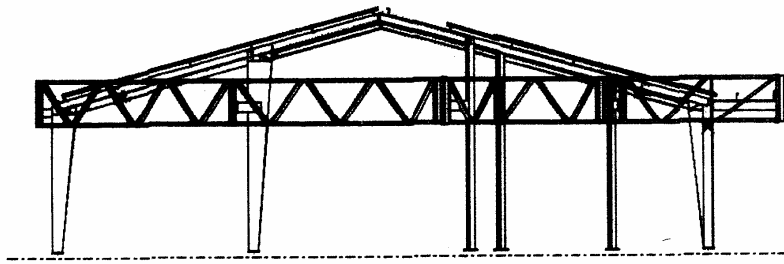
VISTA ISOMETRICA

Ilustración V.30 Isométrico de Bodega con cenefa perimetral.



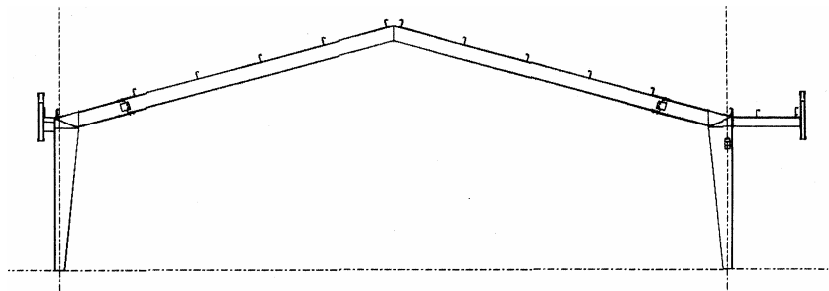
UNION VIGA

Ilustración V.31 Detalles típicos



**ELEVACION**

Ilustración V. 32 Elevación de Bodega con cenefa perimetral



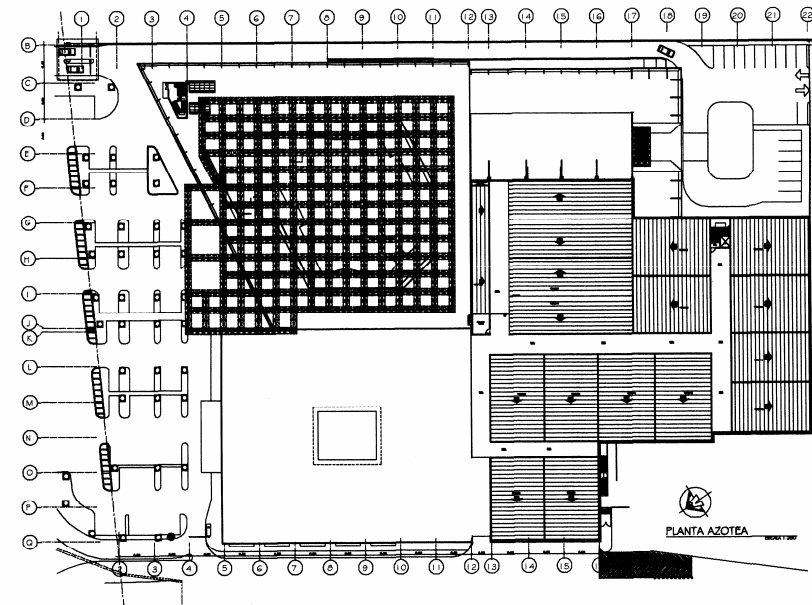
**VISTA EN SECCION**

Ilustración V. 33 Elevación de Marco.

**Estructuras para centros comerciales:**

En este tipo de uso se espera que la estructura no solamente cubra una luz en particular, sino que también impresione al público. Generalmente, se cuidan detalles estéticos, yendo más allá de los parámetros estructurales necesarios. Esto significa que posiblemente algunas secciones de la estructura estén sobredimensionadas y sobre-diseñadas.

Sin embargo, es importante destacar que en estos casos la economía resulta de utilizar estructuras en sus propios rangos ideales de trabajo y a la vez utilizar creatividad en la proposición estructural de parte del arquitecto diseñador. (Véase ilustración IV.59) Esto producirá elementos estructurales livianos y atractivos.



PLANTA GENERAL DE CONJUNTO

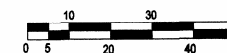


Ilustración V.34

En la ilustración anterior, podemos apreciar la planta del Edificio de Miraflores, -uno de los centros comerciales más recientes en Guatemala-. Es fácil discernir en la planta aquellas cubiertas techadas a dos aguas, las que son losas de concreto y el marco espacial que techa el gran vestíbulo principal.

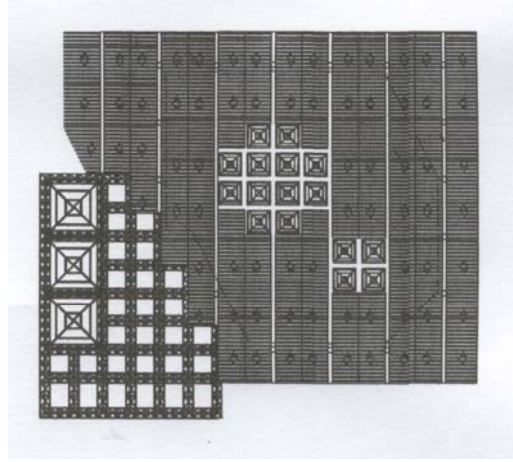


Ilustración V.35. Techo metálico en Centro Comercial Miraflores

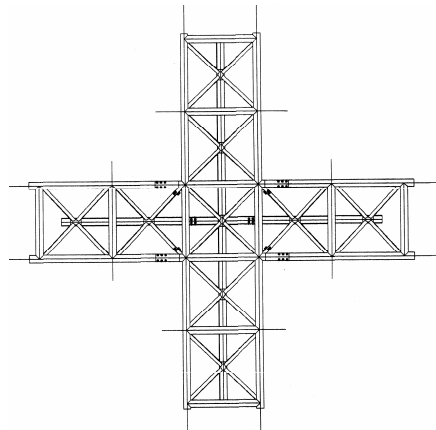


Ilustración V.36. Módulo Estructural Básico propuesto por Aceros Prefabricados, S. A.

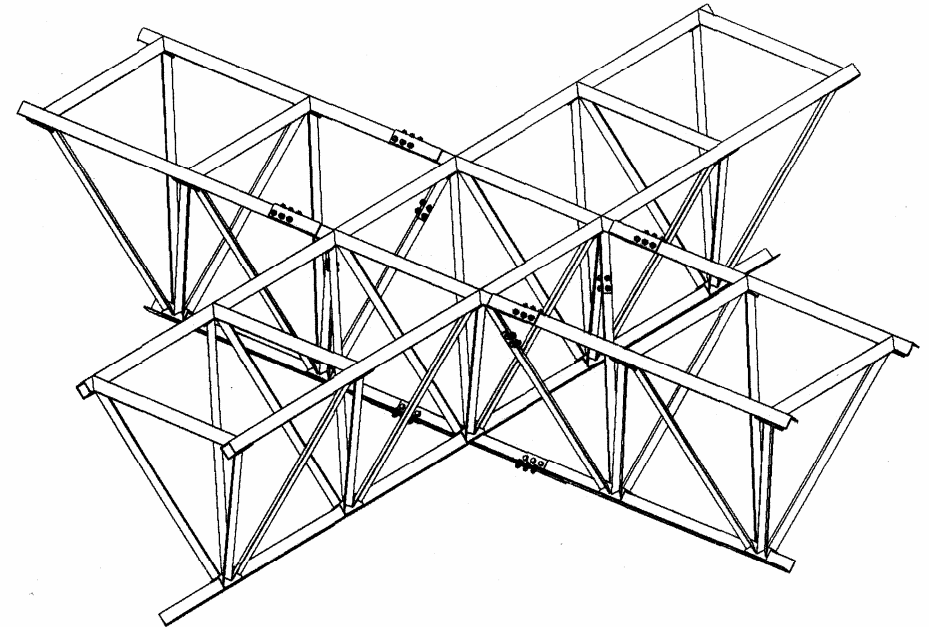


Ilustración V.37

Propuesta para cubierta tipo marco espacial en Centro Comercial Miraflores. Nótese la ubicación de la uniones pernadas. Finalmente, sin embargo, se usaron tubos.

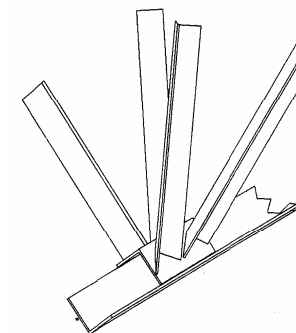


Ilustración V.38. Detalle de la propuesta de uniones soldadas.

**Estructuras de grandes luces para la industria:**

Esta estructura de 70.00 m de luz, 13.80 m de alto y 300.00 m de largo fue construida para albergar procesos de producción en la planta de producción de Cementos Progreso, S. A.

La estructura está conformada por angulares doblados en frío por lo que resultó muy liviana (52 #/m<sup>2</sup>), sin tener en consideración los cerramientos laterales hechos del mismo material.<sup>4</sup>

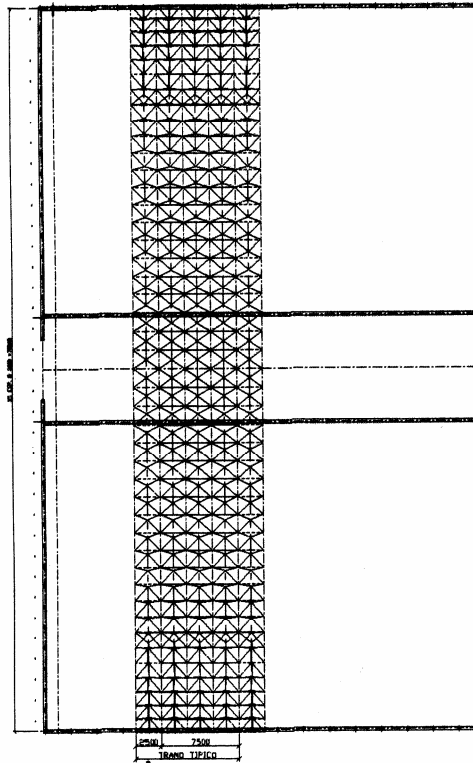


Ilustración V.39  
Porción de la Planta de la Estructura

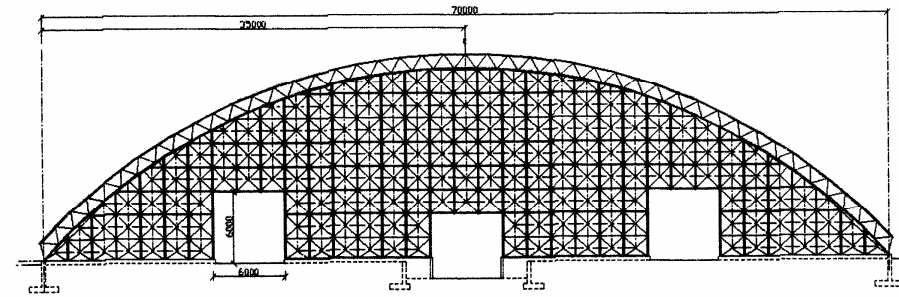


Ilustración V.40  
Elevación de Estructura Curva de 70.00 m de luz.

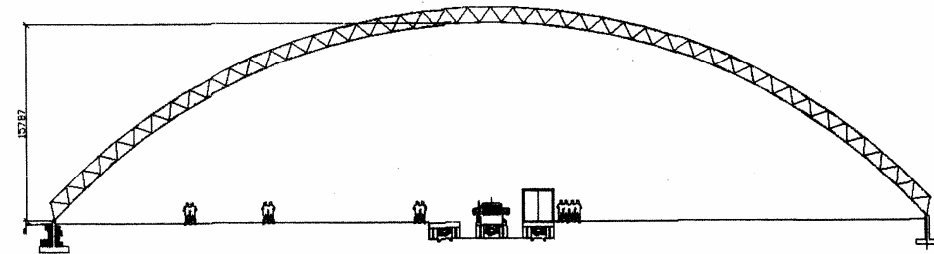


Ilustración V.41  
Sección de Estructura Curva de 70.00 m de luz.

<sup>4</sup> Diseño y construcción por Aceros Prefabricados, S. A.



Ilustración V.42 – V.44  
Estructura Curva de 70.00 m de luz  
de Cementos Progreso, S. A.

### Empacadora de Azúcar “Nuevo Kalel”

Esta estructura ubicada en la costa sur del país fue concebida para albergar actividades de recepción, empaque y despacho de azúcar. Debido a las diferentes luces y utilidad del edificio se usaron diferentes sistemas constructivos para su fabricación.



Ilustración V.45

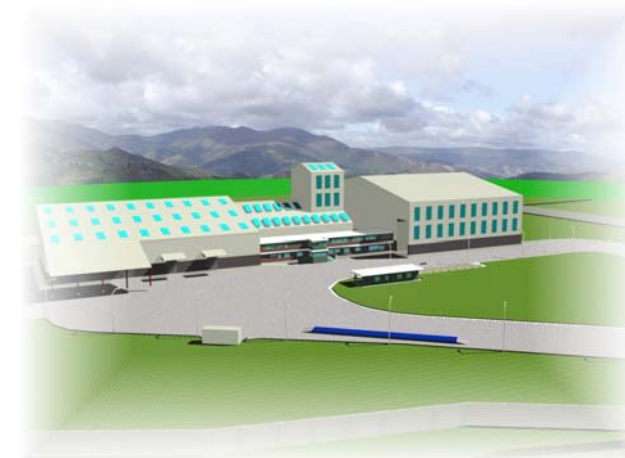


Ilustración V.46



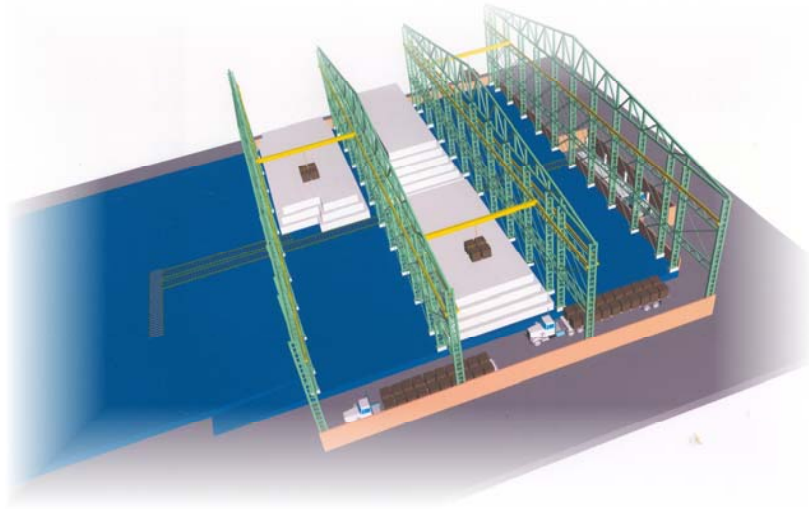


Ilustración V.47 Edificio de Recepción

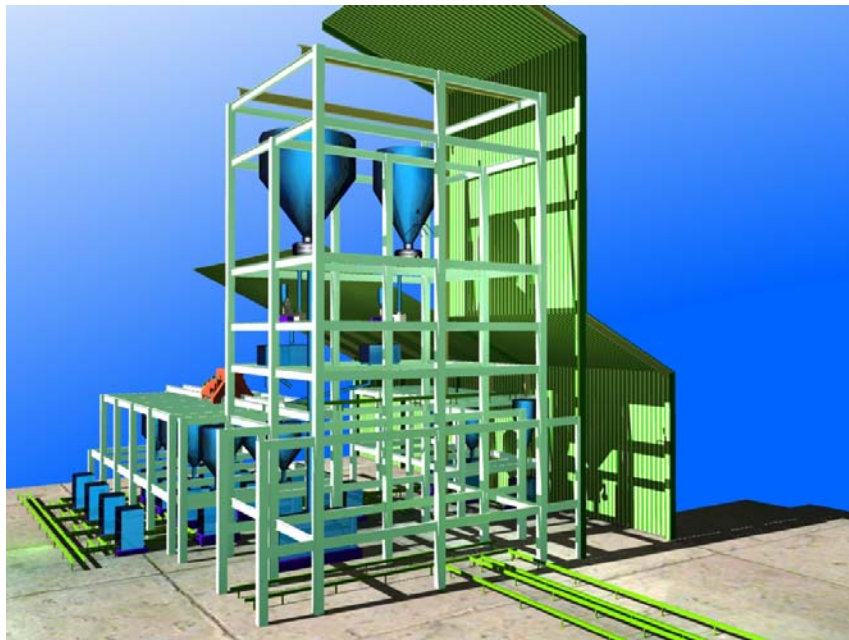


Ilustración V.48 Edificio de Empaque y Vitaminado



Ilustración V.49 Nave de Envío.

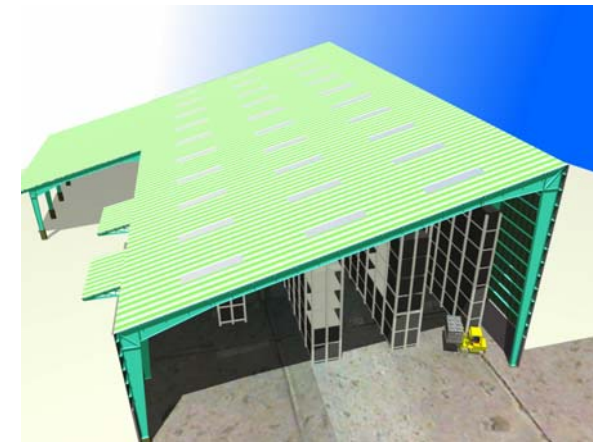


Ilustración V.50 Nave de Envío

**Estructura para viviendas:**

Cuando se proyectan viviendas unifamiliares, uno de los problemas a los que los diseñadores se enfrentan es lograr economía en la construcción. Cuando los proyectos son concebidos tomando en consideración la economía, las soluciones de armaduras son las más económicas como bien lo ilustró nuestro ejemplo de la vivienda *Schulitz Residence*. (véase ilustración V.17)

A continuación se muestra un caso de una vivienda unifamiliar cuyo propietario decidió utilizar marcos rígidos, esta solución real produjo una construcción excesivamente cara<sup>5</sup>. Lo que ocurre en este tipo de construcciones es que no se aprovecha las características del material, pues debido a los ambientes reducidos, estos pueden ser cubiertos por secciones más pequeñas de acero.

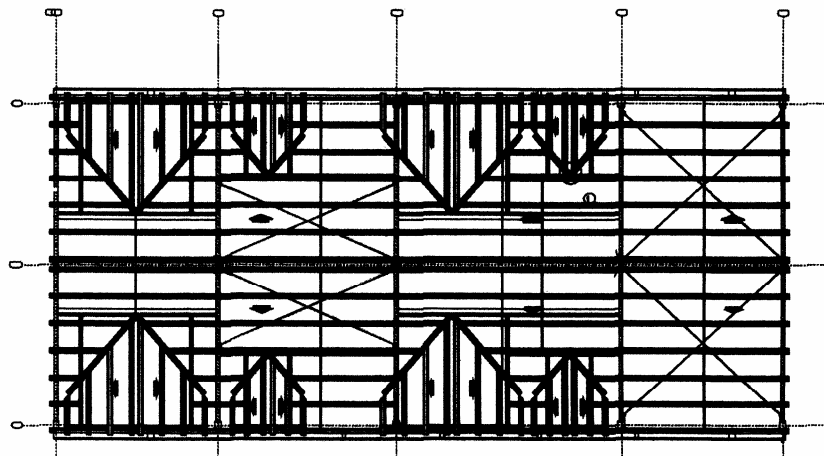


Ilustración V.51  
Planta de Techo de Vivienda Unifamiliar.

<sup>5</sup> Por el contrario, nótese el acertado diseño propuesto por Mies van der Rohe y Philip Johnson, en la página 29 de este trabajo.

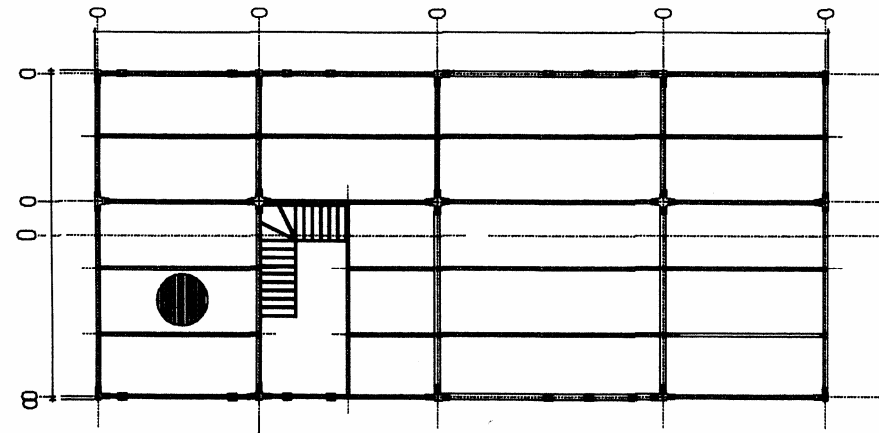


Ilustración V.52  
Distribución de marcos rígidos en vivienda unifamiliar.

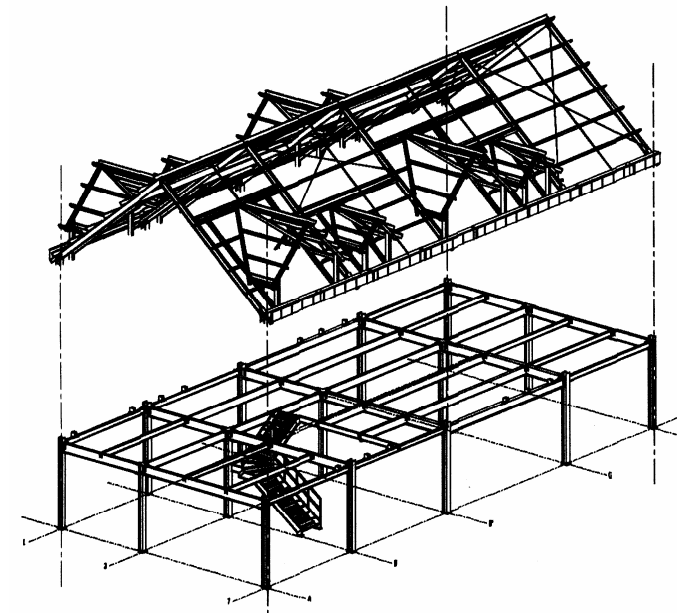


Ilustración V.53  
Isométrico Proyectado de Vivienda Unifamiliar con marcos rígidos.

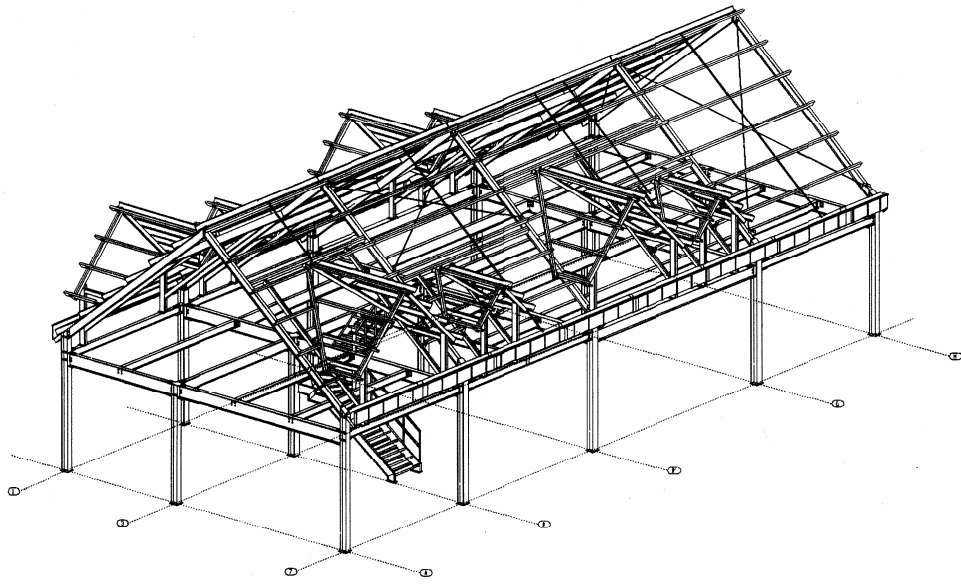


Ilustración V.54  
Isométrico Vivienda Unifamiliar con marcos rígidos.

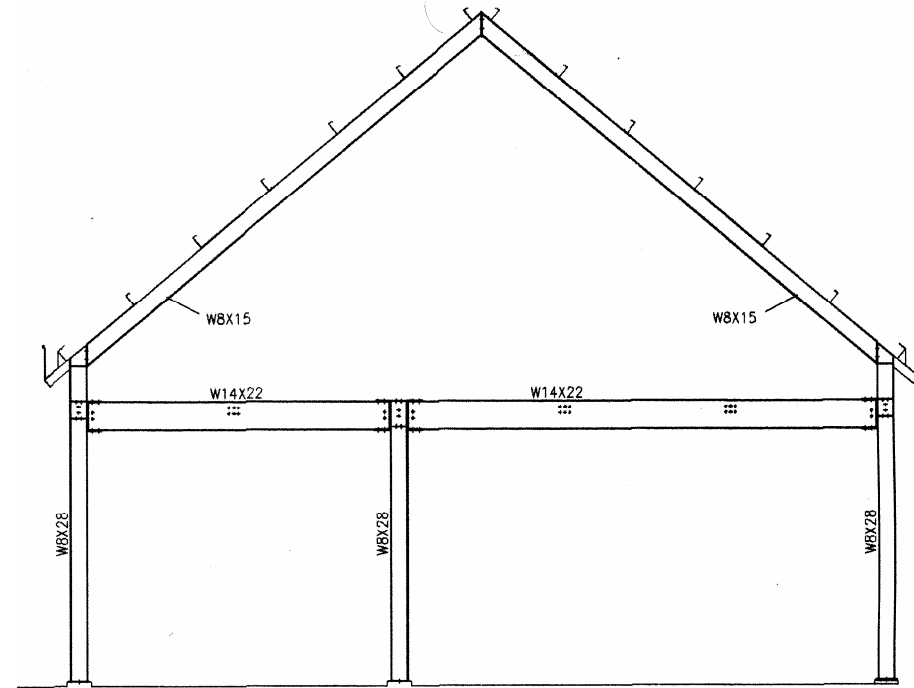


Ilustración V.56  
Sección de marcos

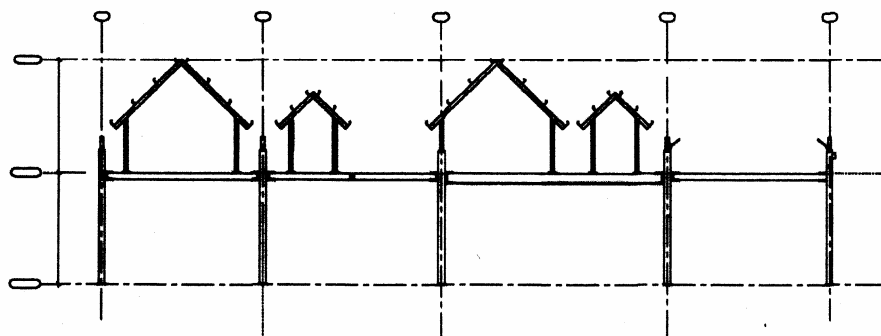


Ilustración V.55  
Elevación de marcos

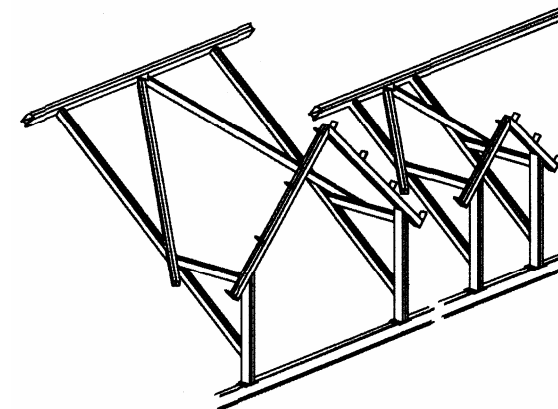


Ilustración V.57  
Detalle de armadura de ventanas.

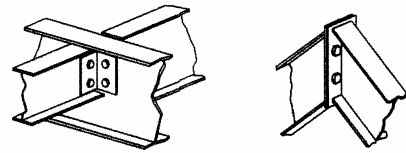


Ilustración V.58  
Detalles típicos de unión.

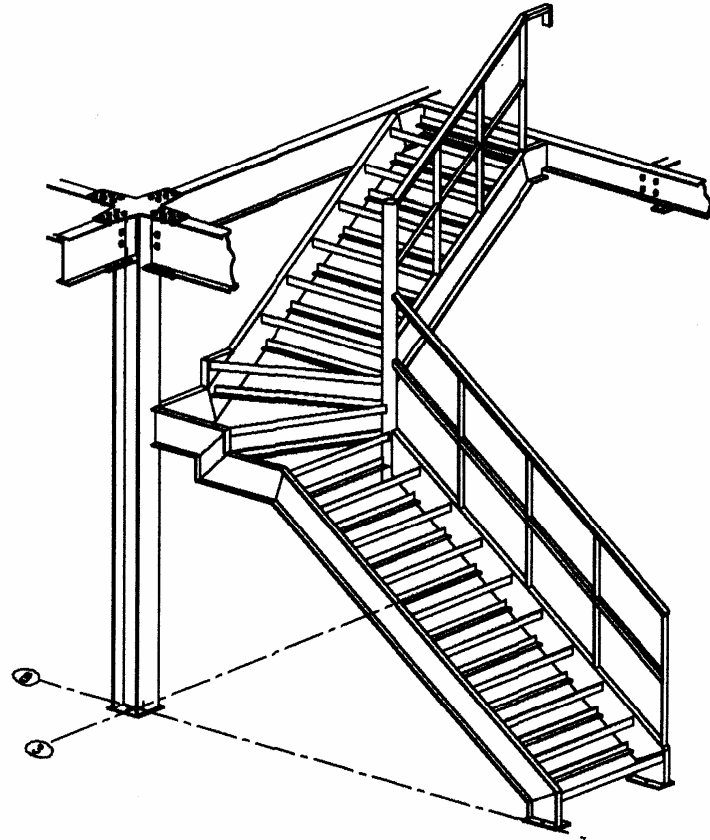


Ilustración V.59  
Detalle de Escalera Metálica.

## Ampliaciones de viviendas

El presente es la propuesta de una ampliación de una vivienda ubicada en la zona 11 de esta capital.

El cliente requería poder construir un segundo nivel en toda el área de su primera planta. El problema consistía que su vivienda tenía cubiertas de losas inclinadas.



Ilustración V.60

El caso fue resuelto colocando una viga de concreto en el perímetro de la cubierta inclinada de forma que ésta pudiera recibir las viguetas metálicas que soportarían el segundo nivel, de esta forma la losa existente no recibiría ninguna carga.



Ilustración V.62

Posteriormente el trabajo se realizó de manera convencional: Paredes de mampostería y cubierta conformada por costaneras metálicas y cubierta final tipo *Shingle*.

El acero se utiliza con mucha frecuencia en techos de vivienda debido, esto contribuye a aligerar la carga del sistema de cubierta.



Ilustración V.63  
Propuesta vivienda económica con techo metálico.

### Edificios de Ofibodegas

El proyecto que se presenta a continuación fue desarrollado conceptualmente (diseño de arquitectura, presentación y presupuesto) en el término de 1 semana. El terreno para desarrollarlo está ubicado en el kilómetro 8.5 carretera al Atlántico.

La facilidad de planificación fue producto de la modulación estructural, algunos criterios de diseño, reglamentos municipales y el uso de computadoras.



Ilustración V.64  
Perspectiva Frontal Fachadas Típicas



Ilustración V.65  
Perspectiva del Proyecto



Ilustración V.66  
Perspectiva del Conjunto

Lo mostrado anteriormente brinda la oportunidad de visualizar lo complejo y a la vez interesante que puede ser diseñar estructuras en acero. Sin embargo, sólo comprendiendo cómo funcionan pueden desarrollarse proyectos económicos. Un ejemplo de esto es la casa de Mies van der Rohe, Philip Jonson o Schultz vrs. el ejemplo descrito en la página 171. Como profesionales de la arquitectura, tenemos el compromiso con nuestro cliente de encontrar soluciones económicas, funcionales e interesantes.

La industria requiere edificaciones de grandes luces y que soporten grandes cargas. Como hemos considerado en el capítulo IV, estas grandes luces se logran muchas veces utilizando marcos rígidos cuyos apoyos son articulados. Sin embargo, se pueden lograr configuraciones interesantes si son analizadas por su función y forma.

Pocos arquitectos en el medio nacional son conocidos por desarrollar proyectos que integren la necesidad industrial con los principios de arquitectura, sin embargo, en países industrializados se han logrado excelentes ejemplos de arquitectura industrial (véase página 43 y 44) por supuesto que una buena propuesta arquitectónica debería ser totalmente funcional y lograr costos aceptables.

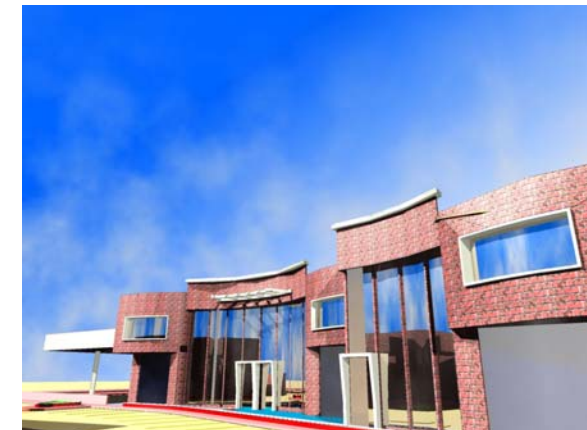


Figura V.67 Ejemplo de Fachadas Segunda Opción

**Pequeños Edificios de Oficinas**



Figura V.68 Edificio "Oficinas Tecnopark"



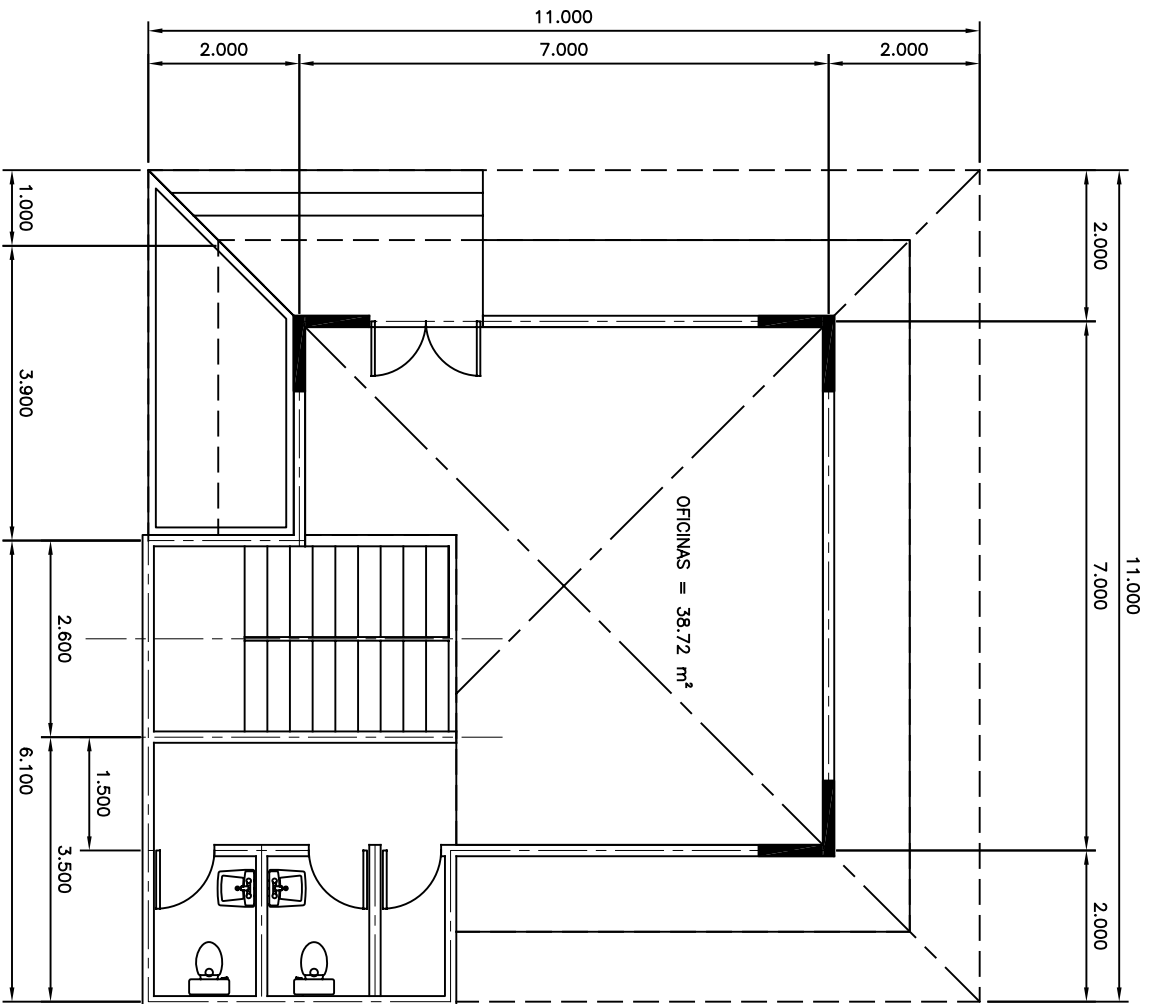
Figura V.70 Edificio "Oficinas Tecnopark"



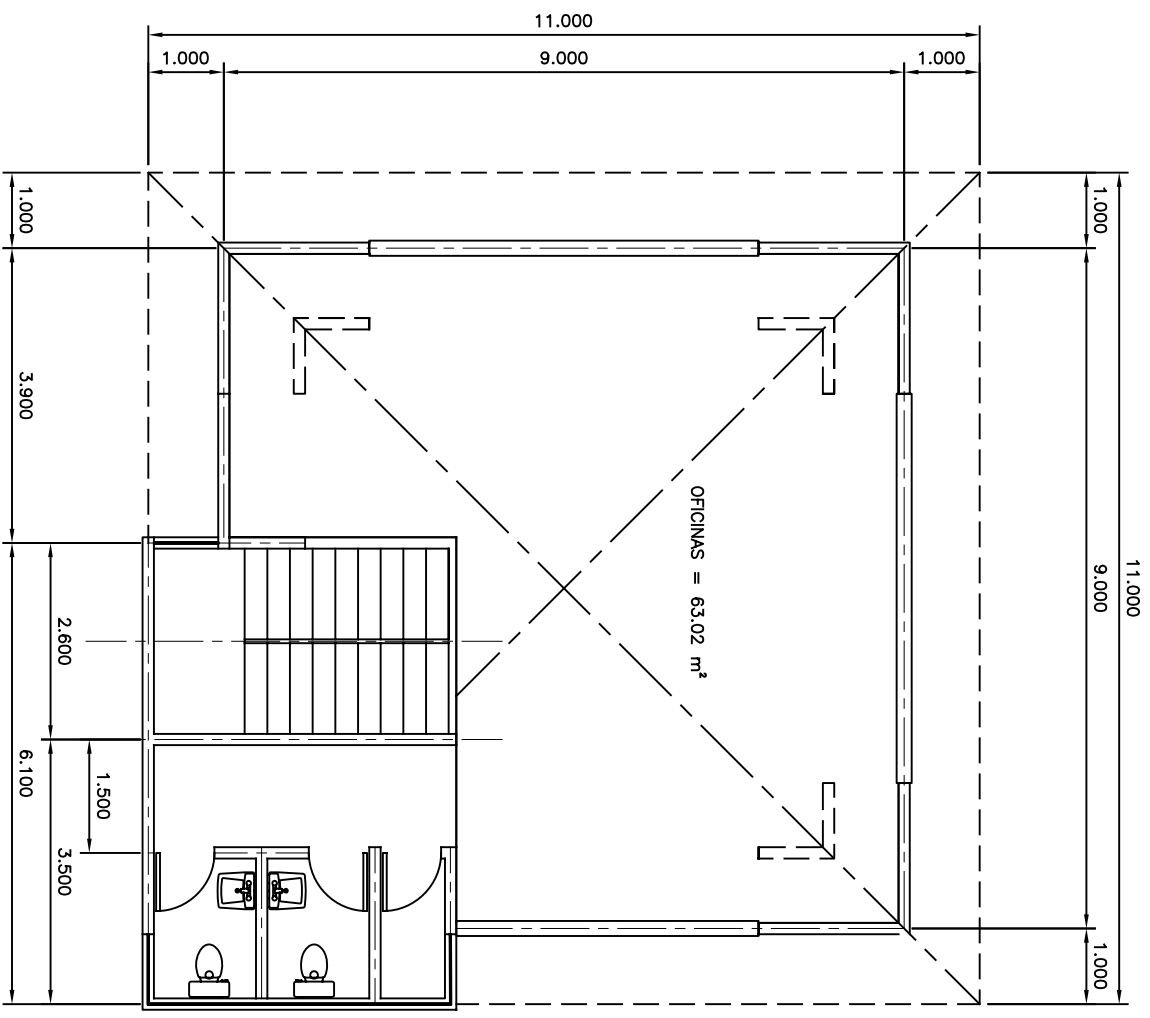
Figura V.69 Edificio "Oficinas Tecnopark"



Figura V.71 Edificio "Oficinas Tecnopark"



**Planta Baja**



**Planta Alta**



## VI CRITERIOS PARA EL DISEÑO ARQUITECTÓNICO CON ACERO

### *Introducción*

La información presentada a continuación proviene de estudios publicados por diferentes instituciones americanas, británicas y japonesas, relacionadas tanto a la producción como a la normativa del uso del acero<sup>1</sup>, entre estas podemos mencionar a: Bethlehem Steel Corporation, British Steel, Inc., Chaparral Steel Company, Northwestern Steel & Wire Company, Nucor-Yamato Steel Company<sup>2</sup> y TradeARBED, Inc., así como del American Institute of Steel Construction, Inc.<sup>3</sup> y de la Lincoln Electric<sup>4</sup>.

<sup>1</sup> Por medio de entrevistas a profesionales y la experiencia propia se ha tratado de proveer un punto de vista adaptado al medio nacional.

<sup>2</sup> El mayor productor de Acero Estructural en Estados Unidos.

<sup>3</sup> American Institute of Steel Construction, Inc. One East Wacker Drive, Suite 3100. Chicago, IL 60601. Tel: 312-670-2400, Fax: 312-670-5403.

Todo arquitecto que se involucre en el diseño de proyectos arquitectónicos con estructuras de acero deberá tener presente claros criterios de diseño arquitectónico y el sistema constructivo en acero así como otras condicionantes nacionales. Algunos de estos criterios y condicionantes se exponen a continuación:

### **Los proyectos en acero**

El desarrollo de proyectos de arquitectura con estructuras de acero en nuestro medio ha correspondido en muchas ocasiones a empresas extranjeras<sup>5</sup>, esta tendencia ha estado cambiando en los últimos años, logrando que empresas nacionales diseñen y desarrollen proyectos<sup>6</sup>. Esto abre la oportunidad para jóvenes arquitectos que pueden considerar como opción interesante para sus proyectos el uso de las estructuras de acero.

Algunos aspectos que son importantes tratar son los siguientes:

1. Selección del tipo de estructura
2. Criterios para el Diseño Arquitectónico
3. Ventajas de las estructuras de acero
4. Principales objeciones al empleo de las mismas
5. Soluciones para mejorar la economía
6. El papel que desempeñan los participantes en el proceso de construcción.

Actualmente existe en Guatemala una fuerte demanda para el desarrollo de edificaciones en donde se puede aprovechar los beneficios de las estructuras de acero. Algunos proyectos

<sup>4</sup> Latin America Headquarters. 5715 N.W. 158<sup>th</sup> Street. Hialeah, FL. 33014-6719. Tel: 305-556-0142. Fax: 305-822-9129.

<sup>5</sup> Tal fue el caso del “Edificio de Finanzas Públicas”, “El Centro Comercial Los Próceres”, “Hotel Grand Tikal Futura” y otros.

<sup>6</sup> Un ejemplo de estos edificios son el recientemente inaugurado “Pacific Center” diseñado por la empresa Abstracta propiedad del Arq. Rolando Balleza Arenales. Asimismo pueden citarse las remodelaciones de La Volvo, realizadas por el Arq. Rodolfo Castañeda y varios centros comerciales.

solicitados consisten en edificios, centros comerciales, centros recreativos, ofibodegas, etc.

#### **Algunas razones para el desarrollo de proyectos en acero.**

Entre las razones por las que se construyen algunos proyectos se encuentran las siguientes:

1. Compañías que deciden dejar secciones antiguas de su área metropolitana a fin de trasladarse a zonas suburbanas donde pueden desarrollarse en áreas de oficinas y almacenamiento.
2. Programas de expansión o ampliación de edificios o áreas.
3. Programas de Inversión de la iniciativa privada (centros comerciales, edificios, parques industriales, etc.)
4. Programas gubernamentales de vivienda
5. Licitaciones de Gobierno para edificios públicos o diseño arquitectónico de los mismos.
6. Búsqueda de una nueva imagen corporativa en una zona de prestigio.

En ciertos casos, el principal ocupante del edificio, el propietario, incluirá algunas áreas adicionales con el propósito de satisfacer las futuras necesidades de expansión y así evitar construcciones posteriores y también generar ingresos para financiar la estructura. Asimismo podrá requerir espacios definidos para futuras ampliaciones.

Es importante determinar las necesidades reales del propietario. Por ejemplo: espacios abiertos amplios, soporte para cargas pesadas y facilidad de modificación, etc. Los fabricantes de la estructura deberán participar en forma activa en el proyecto.

Los propietarios con posibilidades económicas pueden contar con su propio personal para la administración de la construcción o de bienes raíces. En tal caso, ellos están en capacidad de, en primer lugar, contratar una compañía de arquitectura o ingeniería para que se encargue del diseño, y luego llamar a concurso de ofertas para seleccionar un contratista. En este caso, el propietario participa directamente en las decisiones de orden económico y en aquellas relacionadas con el diseño.

Debe tenerse presente que muchos propietarios han reducido o eliminado sus departamentos de ingeniería con el objetivo de minimizar los costos de personal. En la actualidad existen firmas de arquitectura e ingeniería que se dedican a la administración de construcciones y asumen el control de esas funciones. Estas trabajan conjuntamente con el coordinador del proyecto.

Firmas pequeñas o con actividad limitada en la construcción utilizan un administrador de la construcción para que represente sus intereses. Este administrador guía al propietario durante las etapas de financiamiento, diseño, construcción y, en algunas ocasiones, en la selección de la compañía de arquitectura. El Administrador de la Construcción también analiza ofertas individuales para componentes separados de la estructura, tales como el acero estructural.

Si el proyecto incluye locales para alquiler (como sucede con los proyectos de Ofibodegas o Centros Comerciales), frecuentemente está involucrada una firma de bienes raíces. Estas compañías generalmente poseen experiencia en el desarrollo y construcción de sus proyectos empleando a su mismo personal para la administración de sus construcciones, a diferencia de las firmas que simplemente buscan arrendatarios para los locales de otros. Estas compañías pueden asumir la responsabilidad del administrador de la construcción mediante su participación en la selección del diseño arquitectónico, cálculo estructural,

presupuesto de la construcción y concurso de ofertas de contratista y subcontratistas.

### Selección del tipo de estructura

Pocos propietarios poseen el personal adecuado para examinar cuidadosamente las ventajas y desventajas de los diferentes materiales estructurales (acero, hormigón, madera, etc.). Algunos pueden tener ideas preconcebidas debido a experiencias anteriores, observaciones de construcciones previas, avisos comerciales, agentes vendedores, por mencionar ciertas fuentes. Otros delegan por completo sus decisiones a consultores (arquitectos, administradores de construcciones, etc.) y no intervienen en la selección.

Independiente del grado de participación del propietario, es muy importante influir en su opinión relativa al material de la estructura a la brevedad posible. Si se nos ha delegado la selección del tipo de estructura podremos despertar el interés del propietario y dar razones para que utilice aceros estructurales. Si el propietario manifiesta inicial y positivamente su interés en el acero, tal preferencia determinará que el consultor base sus decisiones en la misma o evite cuestionar su “conocimiento” del campo.

El proyecto así como las razones para usar acero estructural deberá ser explicado a todas las personas involucradas en la toma de decisiones.

Muchos arquitectos no se involucran en el proceso de selección del material para la estructura, y dejan que la decisión la tome el ingeniero estructural (basado en la experiencia) o el administrador de la construcción (basado en su análisis de costo). Esta situación puede originar que el proyecto no se conciba desde sus inicios con los criterios y ventajas del sistema constructivo.

Sin embargo, los arquitectos pueden desempeñar un rol importante en la toma de decisiones basados en las distribuciones de los pisos, espacios entre columnas o características estructurales que afectan los costos de construcción y la factibilidad de usar otros materiales. Por ejemplo, pequeños espacios entre columnas y alturas entre pisos muy restrictivas tienden a promover las oportunidades del acero contra el concreto.

El ingeniero estructural puede ser un consultor independiente que trabaja para el arquitecto, o puede ser un departamento de la firma responsable por el diseño arquitectónico (muy común en firmas grandes). Si el propietario utiliza una firma de arquitectura o ingeniería, existe generalmente una mejor interacción entre el ingeniero estructural y el arquitecto, y la selección del material para la estructura se decide por consenso. Si es posible, se deberá contactar e influenciar simultáneamente al ingeniero y al arquitecto en lugar de hacerlo individualmente.

Si el ingeniero estructural es un consultor independiente empleado por el arquitecto, existe menos interacción. El ingeniero estructural tiende a seguir la opinión del arquitecto.

En caso de utilizarse, el rol del Administrador de la Construcción (AC) o Planificador de bienes raíces (PBR) variará dependiendo del tipo de contrato que tiene con el propietario. Si el (AC) o (PBR)

**Muchos AC realizan su propio trabajo de concreto, incluyendo la estructura, pero pocos realizan fabricación de acero y edificación**

sirve como representante del dueño ante el arquitecto o ingeniero, el AC o PBR tendrá una posición bastante fuerte en la decisión de determinar el sistema estructural. Si el arquitecto trabaja directamente para el propietario, el AC o PBR cumple el rol de: supervisar el trabajo del A/I, cuestionar las decisiones del A/I y ofrecer sugerencias de reducción de

costos al propietario. En cualquier caso, el AC o PBR va a tener una influencia muy fuerte y debe recibir su atención.

### Criterios del diseño arquitectónico<sup>7</sup>

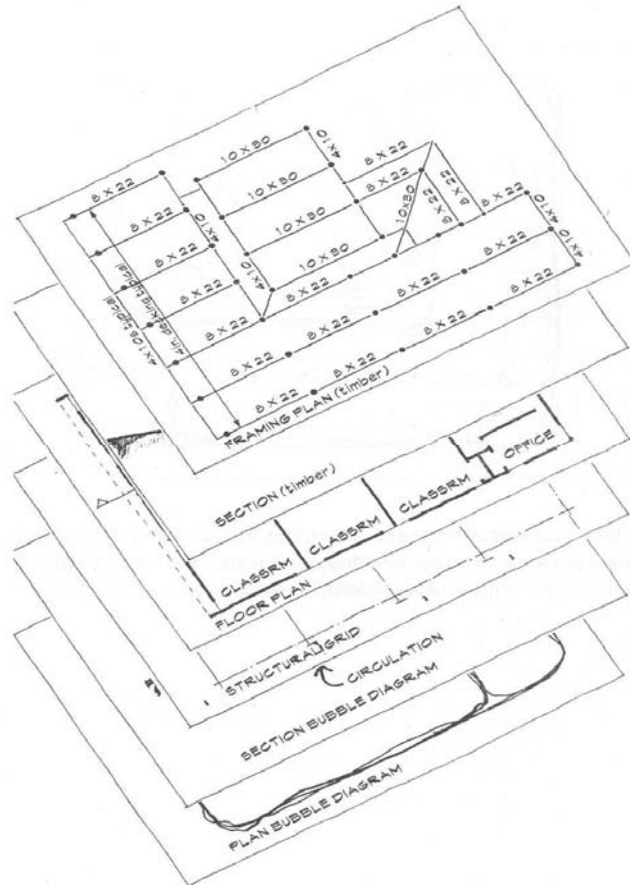


Ilustración VI.1

1. En cualquiera de los casos anteriores, el arquitecto se enfrentará al desafío de elegir la estructura de acero más

<sup>7</sup> Las ilustraciones se han tomado del libro: Understanding Structures. Fuller Moore, Editorial WCB, McGraw-Hill. 1999.

eficiente para lograr economía, eficiencia, funcionalidad y creatividad para cualquier proyecto dado. A continuación se sugieren algunos criterios a seguir:

2. Para que la estructura del edificio sea totalmente integrada al diseño arquitectónico, ambos deben trabajarse *simultáneamente*, empezando con esquemas simples. No está demás indicar que desde acá debemos tener el criterio para elegir el sistema estructural. Estos esquemas a mano son realmente útiles al definir el diseño.

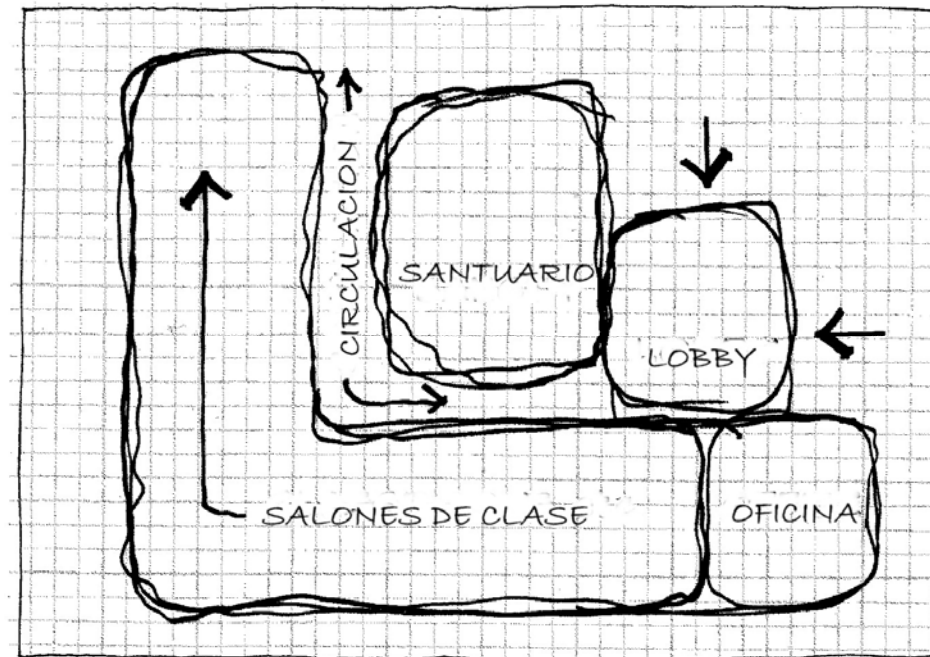


Ilustración VI.2

3. El proceso empieza analizando los diagramas de bloques y puede variar debido al análisis de varias configuraciones espaciales en las que se muestren diferentes formas de cubrir los espacios utilizando las modulaciones óptimas de los sistemas estructurales (marcos rígidos, armaduras,

reticulados espaciales, etc.) hasta llegar a la prefiguración de todos los miembros estructurales. Este proceso no es lineal, sino más bien puede resultar cíclico y repetitivo, sin embargo, cada repetición contribuye a la comprensión y puede contribuir a la simplicidad del diseño.<sup>8</sup> En esta etapa puede ser útil consultar revistas de arquitectura que contengan proyectos similares realizados con estructuras de acero<sup>9</sup> así como proyectos similares en Internet.

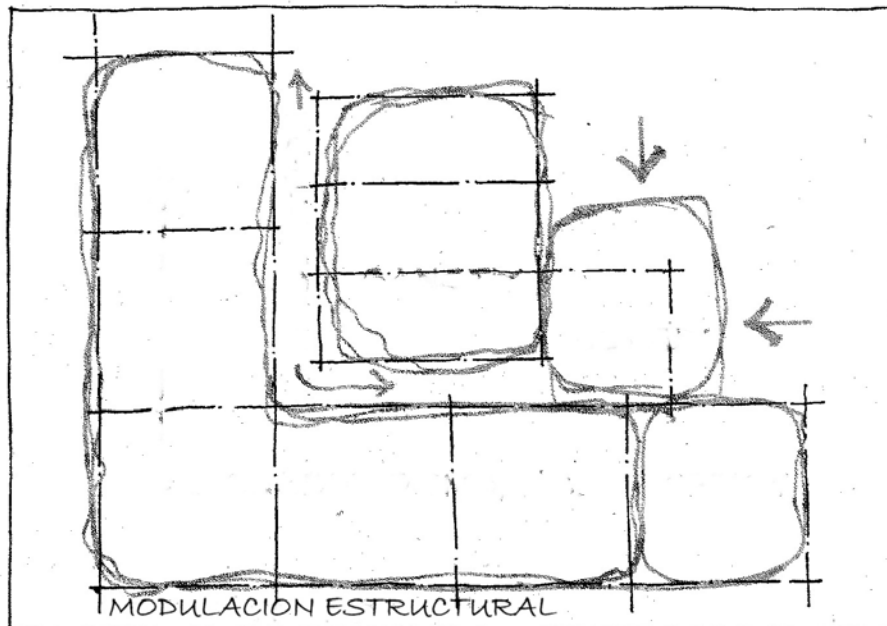


Ilustración VI.3

<sup>8</sup> Para la definición de las luces adecuadas, tipos de columnas, sistemas de cubiertas y demás consideraciones técnicas véase el capítulo IV. “Generalidades Técnicas de la Construcción con Acero.”

<sup>9</sup> En el capítulo V. “Integración de la estructura de acero con el diseño arquitectónico.”, se consideran algunos ejemplos de configuraciones acertadas.

4. Es importante tener presente criterios generales de arquitectura: forma del edificio, calidad espacial, orden, así como el carácter del edificio, función, cargas a recibir, ampliaciones estimadas. Estos aspectos del edificio pueden ser *caracterizados* por la estructura de acero. Es decir, las estructuras pueden quedar totalmente ocultas, semi-ocultas o totalmente expuestas así como ser una parte escultural del edificio.

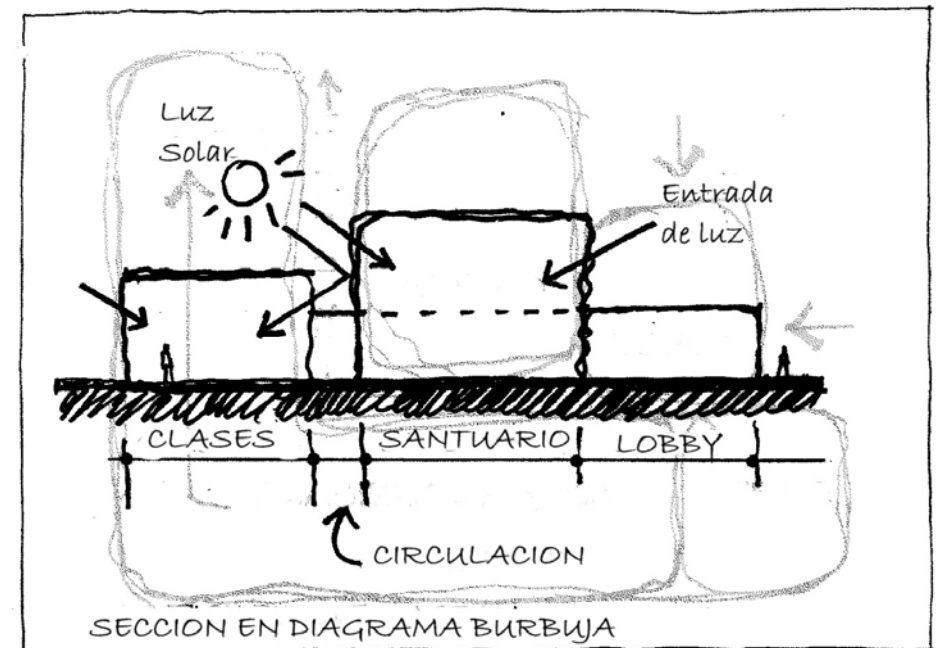


Ilustración VI.4

5. Los esquemas del proyecto deben trazarse a escala, de esta forma se facilitará la ubicación y trazo de la modulación estructural que definirá la ubicación de vigas y losas, filas de columnas, muros de carga, cubiertas con marcos o armaduras metálicas, etc. El arquitecto debe recordar que esta grilla tendrá efecto no sólo en el sistema estructural, sino en la apreciación del espacio, forma del edificio, el flujo,

la división de espacios y la circulación. En esta etapa del trabajo, todavía son posibles los cambios.

6. Simultáneamente a la configuración o distribución de las modulaciones en planta, se deberá tener presente las diferentes secciones del proyecto. Estas deben ser analizadas para estudiar las formas de los techos, la volumetría del conjunto y sus relaciones. En esta etapa se puede apreciar cómo la organización espacial vista en sección puede afectar a la estructura. Finalmente, se pueden localizar elementos tales como iluminación cenital, ventanas de techo, monitores de ventilación y cualquier otro elemento que afecte la forma y estructura del edificio.
7. El próximo paso es pasar en limpio y a una escala adecuada las plantas y secciones del proyecto. Esto requerirá un afinamiento del proyecto y puede requerir interacciones con ingenieros civiles para criterios específicos. Para predimensionar el sistema estructural se pueden utilizar las tablas, gráficas y demás consideraciones técnicas presentadas en el capítulo IV de este trabajo.

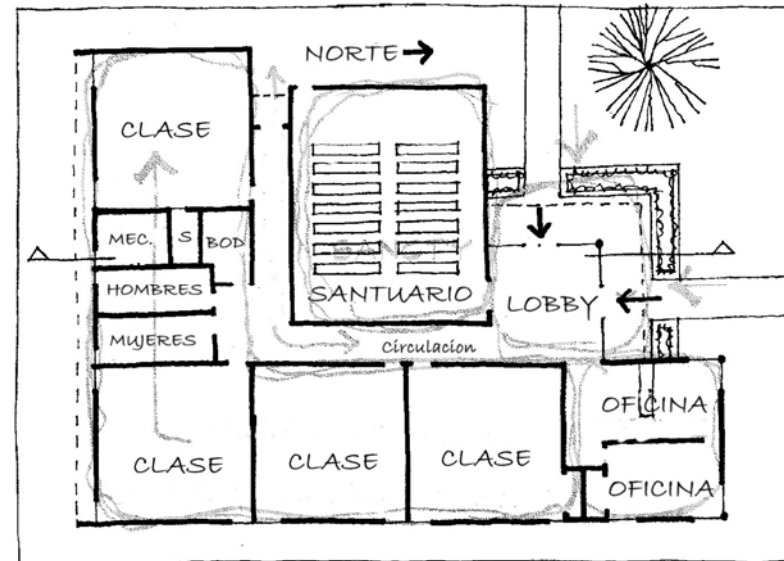


Ilustración VI.5

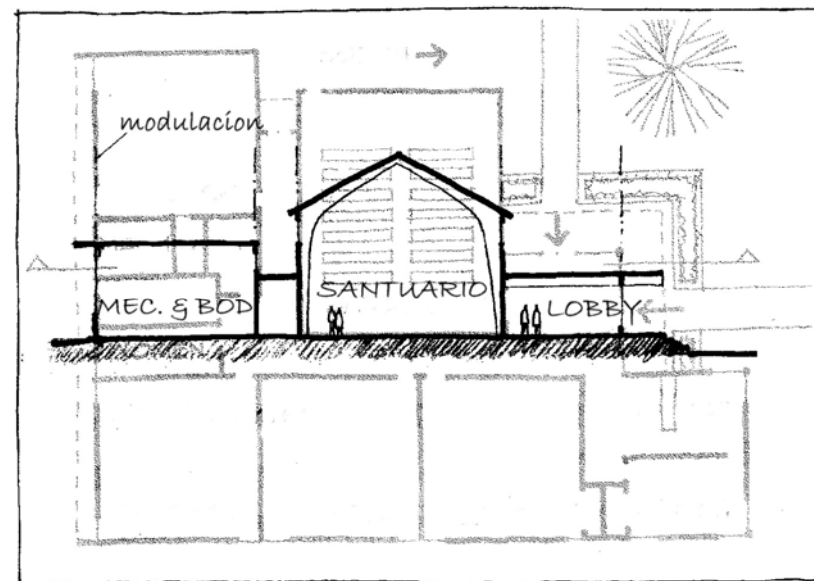


Ilustración VI.6

7. Posteriormente, sobre la grilla estructural se pueden localizar líneas de columnas. Estas líneas pueden representar vigas, armaduras o muros de carga. Generalmente, estas *líneas de carga* serán paralelas, esto finalmente nos permitirá localizar las viguetas y posteriormente las formaletas de losa-acero. Igualmente, se podrá también ubicar los espacios que no se techarán o que se cubrirán con un diferente sistema estructural. En la práctica, las columnas se encuentran en las intersecciones de vigas. Usualmente se requerirá vigas o viguetas para cualquier abertura en la losa. En las gráficas que se muestran en el capítulo IV, se encuentran sugerencias de espaciamientos de vigas y techos.

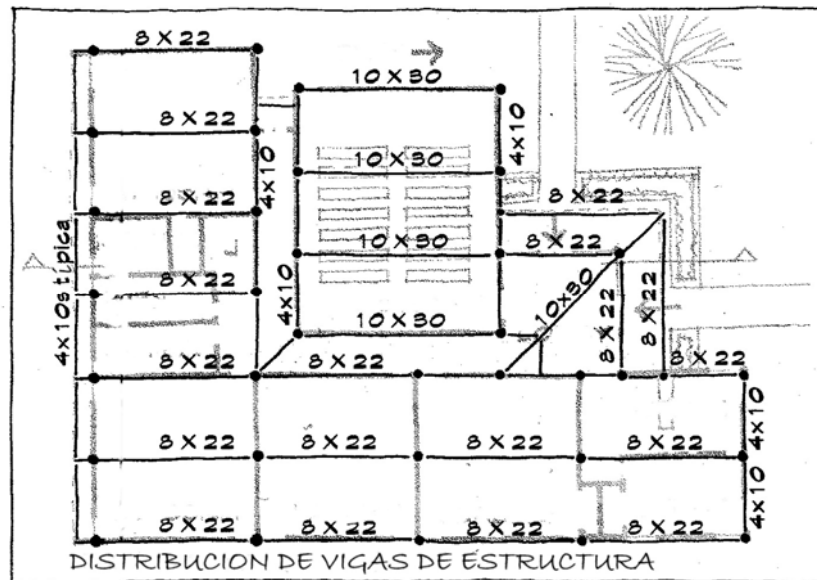


Ilustración VI.7

8. Para tratar con diferentes alternativas estructurales pueden seguirse las tablas y sugerencias del capítulo IV de esta tesis.
9. En esta etapa el proyecto deberá estar listo para ser diseñado estructuralmente por un ingeniero civil capacitado.

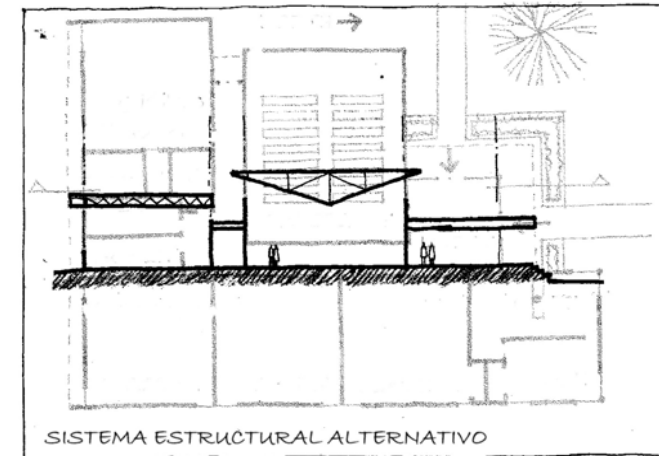


Ilustración VI.8

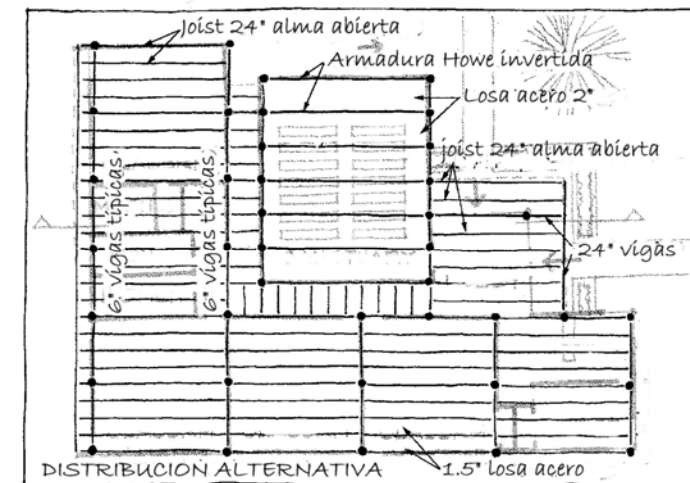
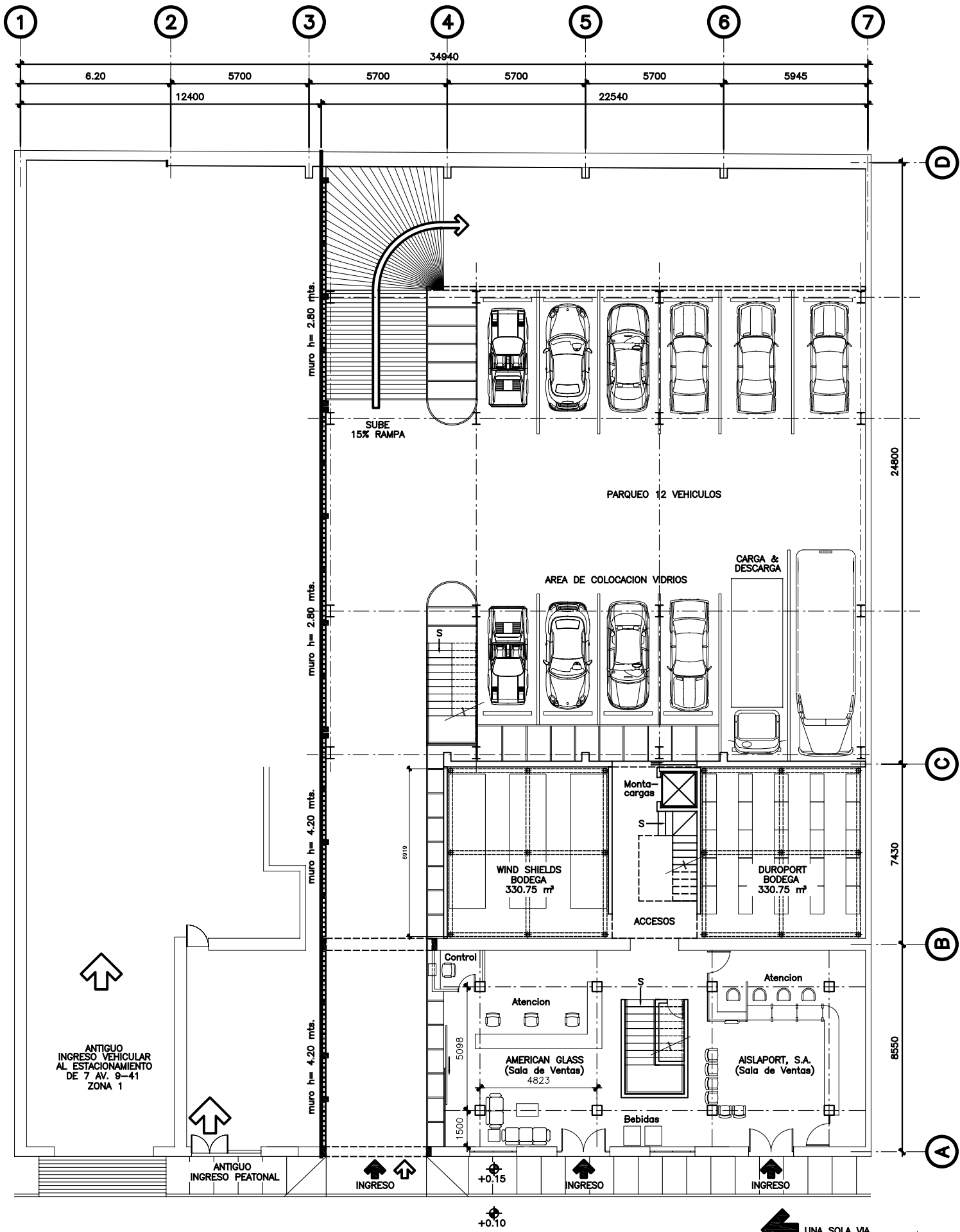
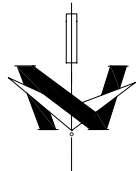


Ilustración VI.9

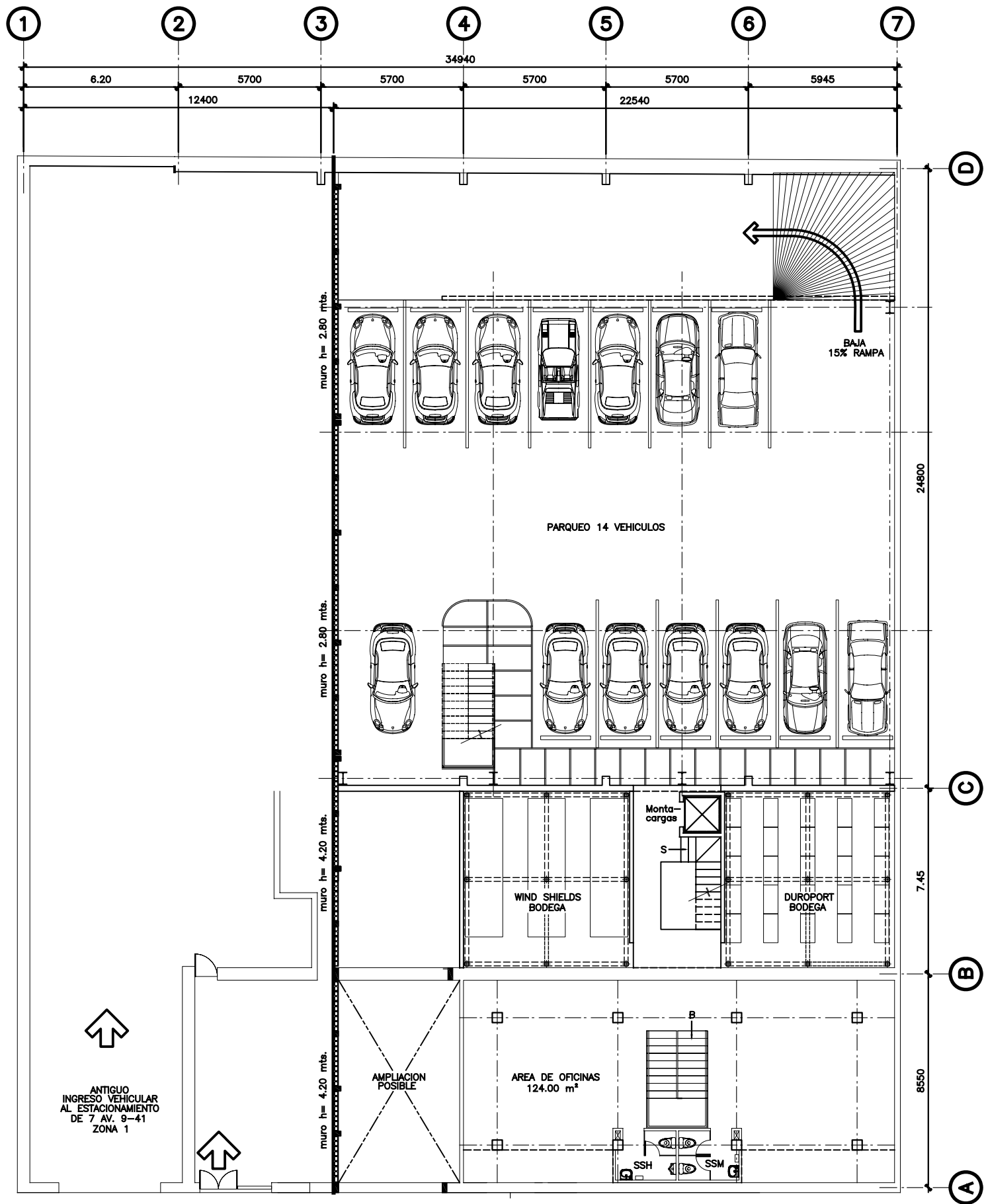


PLANTA ARQUITECTONICA PRIMER NIVEL

ESC. 1:200

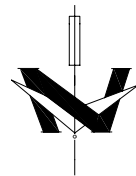


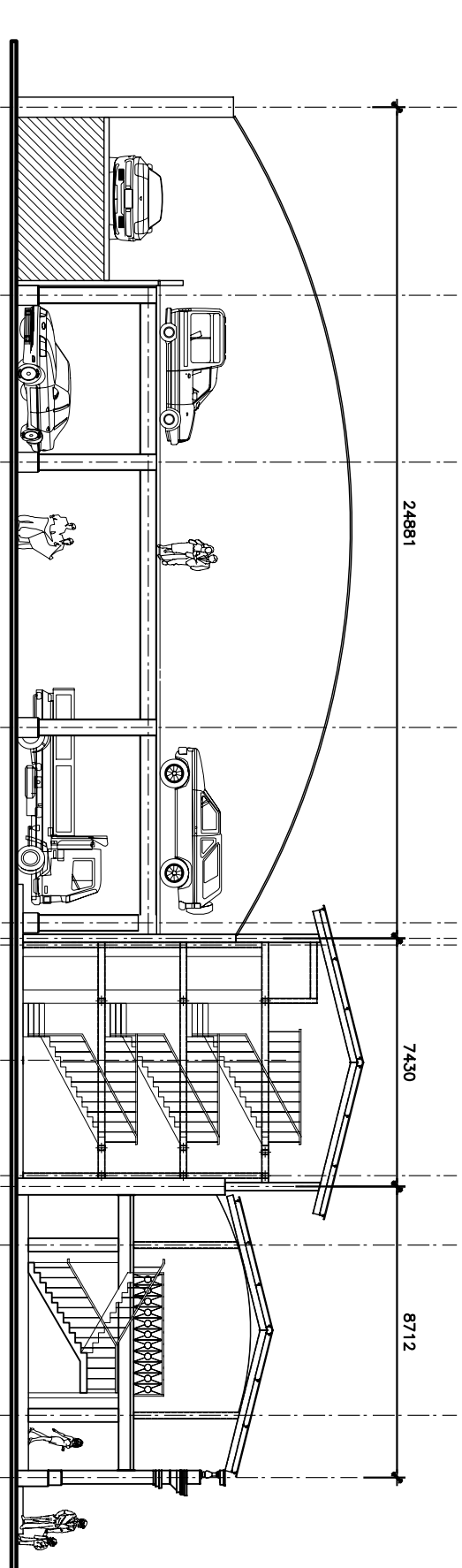
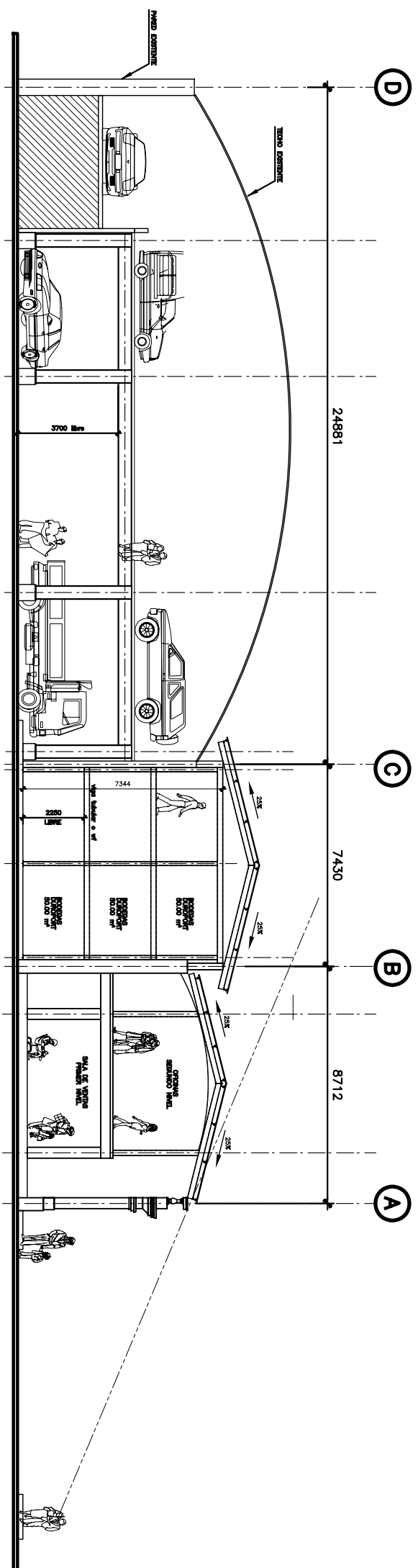




PLANTA ARQUITECTONICA SEGUNDO NIVEL

ESC. 1:200





### Fuentes de información preliminar

Existen fuentes de información inicial en lo referente a proyectos de construcción de acero tales como:

1. Periódicos locales, especialmente las secciones de negocios y bienes raíces.
2. Revistas y otras publicaciones locales y regionales;
3. Reportes y comunicaciones de la Cámara de Comercio;
4. Organizaciones de desarrollo económico locales y nacionales, ONG's;
5. Agencias comerciales de bienes inmuebles;
6. Empresas de arquitectura, de ingeniería y de administración de construcciones;

Las posibilidades de tener éxito aumentan mientras más pronto nos involucremos en el proyecto. Por lo general, al momento que se anuncia un proyecto a través de fuentes de información de la construcción, especialmente las relacionadas a licitaciones públicas o privadas, ya se ha tomado una decisión con respecto a la estructura. Las fuentes que ofrecen información en la etapa de planificación del proyecto usualmente le proporcionarán temprana información de forma que usted tiene tiempo para influir en la decisión relacionada con la estructura. Es aconsejable que establezca un sistema de seguimiento del proyecto con el objeto de que lleve un registro de las firmas involucradas en la toma de decisiones, nombres de personas, títulos, números de telefónicos, direcciones e información sobre el alcance del proyecto y plan de actividades.

### Beneficios de las estructuras de acero

Existen muchas ventajas de las estructuras de acero cuando se las compara con otros materiales tales como el concreto y la madera<sup>10</sup>. La siguiente es una lista de las ventajas de las estructuras de acero (no todas ellas aplican a toda situación). Estos beneficios pueden ser clasificados en tres categorías:

- Utilización de espacios
- Facilidad de futuros cambios
- Ahorros en los costos de construcción.

La mayoría de los propietarios se preocuparán principalmente de los costos de construcción y tratarán de adaptarse a su presupuesto. Proprietarios con menores posibilidades económicas y experiencia considerarán beneficios de utilización de espacio y futuros cambios.

- Los arquitectos tienden a analizar puntos de flexibilidad de diseño tales como: utilización de espacio, facilidad de diseño y modificaciones.
- Los ingenieros estructurales analizan la facilidad de diseño y la conveniencia del sistema para el proyecto.
- Los Administradores de la construcción se concentran solamente en el costo, mientras que los planificadores de bienes raíces analizarán tanto el costo como la utilización de espacio.

---

<sup>10</sup> Véase Capítulo IV, página 91

### 1.- Espacios abiertos más amplios

En el caso particular de *Edificios de Oficinas*, el propietario va a buscar máxima flexibilidad en la planificación de la distribución de las oficinas ya sea que utilice mamparas movibles, fijas o una combinación. Mediante el uso de estructuras de acero, se puede obtener fácilmente espacios claros más amplios para oficinas prácticamente sin costo adicional. Las estructuras de acero pueden crear económicamente espacios claros de 40' x 40' (12.192 x 12.192 metros) y mayores, minimizando la interrupción de columnas tanto en localizaciones internas como externas. Un espaciamiento entre columnas de 30' (9.144m.), es generalmente más económico que un espaciamiento de 40' (12.192m), pero este costo ligeramente más alto es justificable si se considera la flexibilidad del espacio adicional. En resumen, las columnas son las que imponen la localización de las divisiones, dimensiones y espacios.

La flexibilidad adicional de disponer espacios claros más amplios pueden compensar durante los períodos de construcción inicial, cuando se cambia de lugares de trabajo, o cuando se está haciendo modificaciones. Las restricciones de espacio se mantienen al mínimo.

Si parte de la estructura se va a alquilar, es una ventaja tener un espacio más amplio con un menor número de columnas debido a que es más fácil subdividir y adaptar el espacio para satisfacer las necesidades particulares de los arrendatarios. Esto permite que el alquiler de espacio para oficinas sea más fácil y más rápido, lo cual es muy importante en un mercado actual muy competitivo. En algunas ocasiones, los arrendatarios pagan una prima adicional por la facilidad de disponer de espacios más amplios.

Si el edificio se va a vender en el futuro, la disponibilidad de un espacio abierto más amplio permite que más compradores potenciales se interesen por el, especialmente aquellos que

desean especular. Esta disponibilidad también permite que se pueda cotizar precios más altos.

El costo de las estructuras de concreto se incrementa rápidamente a medida que se incrementa la luz entre columnas. La funcionabilidad de las estructuras de concreto se deteriora con luces más grandes, debido a que el peso del concreto no solamente causa deflexiones temporales, sino también deformaciones permanentes debido al alargamiento de las estructuras.

Las estructuras de madera tienen una limitación en lo relacionado al espacio entre columnas, a no ser que se utilice miembros laminados o armaduras de madera. Las características de vibración y deflexión de las estructuras de madera en espacios grandes hacen que éstas no se las considere para los sistemas de pisos. Además, los costos de estructuras de madera se incrementan rápidamente cuando se las utiliza en pisos con grandes espacios entre columnas.

### 2.- Columnas más pequeñas.

Las columnas de acero son considerablemente más pequeñas que las columnas requeridas para las estructuras de concreto. Esto significa que habrá desviaciones más pequeñas en la colocación de las paredes, menos obstrucciones visuales a lo largo de las ventanas horizontales continuas.

Las columnas pequeñas van en conjunto con menor número de columnas para crear planos de pisos con máxima flexibilidad de utilización de espacio y, por supuesto, menor número de columnas de dimensiones menores significa más espacio disponible.

3.- Se requiere un mínimo y en algunos casos no se requieren paredes de carga.

En el caso de edificios de acero en el rango de número de pisos de 1 a 7, se utiliza comúnmente estructuras para resistir momentos y estructuras “tipo 2, para soportar momentos por viento” para proveer un edificio libre de espacios con arriostramientos y paredes de carga. Aunque éste tipo de estructuras no es tan económico como el tipo de estructura que utilizan arriostramiento, éstas se justifican debido a que se eliminan obstrucciones en el plano del piso o vistas de las ventanas.

Si se decide utilizar estructuras con arriostramiento más económicas, los elementos de acero para reforzar pueden tomar una variedad de configuraciones (X, K, excéntrica) para minimizar la interrupción. Estos refuerzos también se pueden colocar en las paredes requeridas alrededor del elevador, escaleras y cuartos de servicio. La pequeña sección transversal del refuerzo de acero minimizará cualquier obstrucción visual en caso de que éste se utilice en una región abierta.

Las estructuras para momento de concreto diseñadas para resistir las fuerzas laterales del viento y terremotos son relativamente complejas y costosas debido a la necesidad extensiva de arcos

formados por numerosas varillas de acero de gran diámetro dobladas y colocadas en las juntas piso-columnas, lo cual dificulta el trabajo de formar el concreto.

Este tipo de estructuras por lo general origina miembros y columnas voluminosas. Consecuentemente, se debe utilizar paredes de carga de concreto o mampostería para

**Las aberturas del piso para escaleras, elevadores y unidades mecánicas se realizan fácilmente mediante las estructuras de acero, no se requieren de trabajos de conformado especiales, ni de estructuras de soporte y refuerzo**

simplificar el diseño y construcción, lo cual origina que se reduzca el espacio disponible y la adición de grandes elementos no removibles como parte del plano del piso.

Las estructuras de madera casi siempre son arriostradas, lo cual produce obstrucciones frecuentes.

4.- Flexibilidad de creatividad y diseño eficiente.

El acero se adapta a los requerimientos de diseño más exigentes del arquitecto o propietario. Se puede adaptar espacios claros, voladizos, paredes oblicuas, paredes curvas, superficies para vertederos, marcos curvados, atrios, características estéticas especiales y cargas inusuales. Las estructuras de acero acomodarán cualquier sistema de paneles y también permitirán realizar cualquier cambio futuro de diseño para adaptar un nuevo estilo arquitectónico.

La tendencia general en edificios modernos demandan espacios públicos y corredores grandes (como los que encontramos en centros comerciales). Estos espacios se pueden crear fácilmente con las estructuras de acero debido a los mayores espacios entre columnas. Si se desea crear áreas de corredores más grandes, se pueden utilizar vigas de transferencia con el propósito de remover las estructuras columnares. Cuando las columnas deben penetrar el espacio de los corredores, su tamaño es mínimo comparado con otros materiales. Si el diseño de la estructura incorpora atrios o tragaluces en los espacios públicos o corredores, se puede obtener fácilmente el ambiente deseado (claro y aireado) debido a las dimensiones pequeñas de los miembros de acero.

Las estructuras de acero no están limitadas a ángulos de 90°. Fácilmente se pueden oblicuar e inclinar para producir las características arquitectónicas deseadas, solamente se necesitan modificar los detalles de conexión. El acero se puede curvar

virtualmente a cualquier radio o se pueden fabricar unidades especiales para cumplir con los requerimientos más exigentes.

Las aberturas del piso para escaleras, elevadores y unidades mecánicas se realizan fácilmente mediante las estructuras de acero, no se requieren trabajos de conformado especiales, ni de estructuras de soporte y refuerzo.

Las estructuras de acero también acomodan fácilmente requerimientos de carga especiales para librerías, cuartos de archivo y almacenamiento, equipo mecánico, pasillos y otras condiciones que interrumpen las condiciones típicas de carga de los pisos de oficinas. Las dimensiones de los miembros de acero pueden ser fácilmente modificadas durante el diseño para adaptar tales condiciones, o reforzarlas durante o después de la construcción, cuando se ha terminado los arreglos del piso.

El trabajo relacionado con la parte mecánica, especialmente ductos y tuberías se puede realizar más fácilmente con la construcción en acero. Entre los beneficios tenemos:

- Facilidad de sujeción a los miembros de acero
- Facilidad de los ductos y tuberías de pasar a través de aberturas en el alma de las vigas.
- Las vigas pueden ser diseñadas con estas aberturas, sin embargo también se pueden realizar aberturas posteriores a menudo sin reforzarlas.
- Las condiciones de carga y dimensiones de las aberturas determinan la factibilidad y requerimientos estructurales para la abertura en el alma de la viga.

#### 5.- Eficiencia para instalaciones adicionales

Muchas actividades humanas hoy día tienen gran dependencia en computadoras y otros equipos eléctricos para oficinas tales como: teléfonos, máquinas para fax, copiadoras, impresoras, trituradoras

y otros dispositivos. Los computadores de las oficinas frecuentemente están interconectados, y es un común compartir impresoras. Las operaciones de las oficinas son frecuentemente actualizadas a medida que la tecnología avanza y más equipos están disponibles económicamente, creando una constante demanda por cambios en la disposición y cableado para suministrar energía a los computadores y equipos de comunicación. Factores económicos exigen que los sistemas de cableado permitan realizar cambios en forma fácil y eficiente, con un mínimo de interrupción en las operaciones de las instalaciones y los trabajadores del área.

Los sistemas de cableado deberán también ser diseñados para el futuro. La evolución actual en la tecnología de equipos para oficinas, indican que en un futuro cercano existirán sistemas de oficinas y equipos todavía no imaginados. Un sistema deberá tener la flexibilidad para proveer futuras mejoras y adiciones a las operaciones de las oficinas.

Las estructuras de acero son los sistemas estructurales más eficientes para acomodar sistemas de cableado flexibles. Una solución común es el uso de pisos con cubiertas de acero celular<sup>11</sup> con colectores para proveer ubicación y fácil acceso para las instalaciones del piso se puede realizar sin necesidad de perforar el mismo, lo cual evita la interrupción de las operaciones de las oficinas y el desorden.

---

<sup>11</sup> Véase Ilustración página 120.

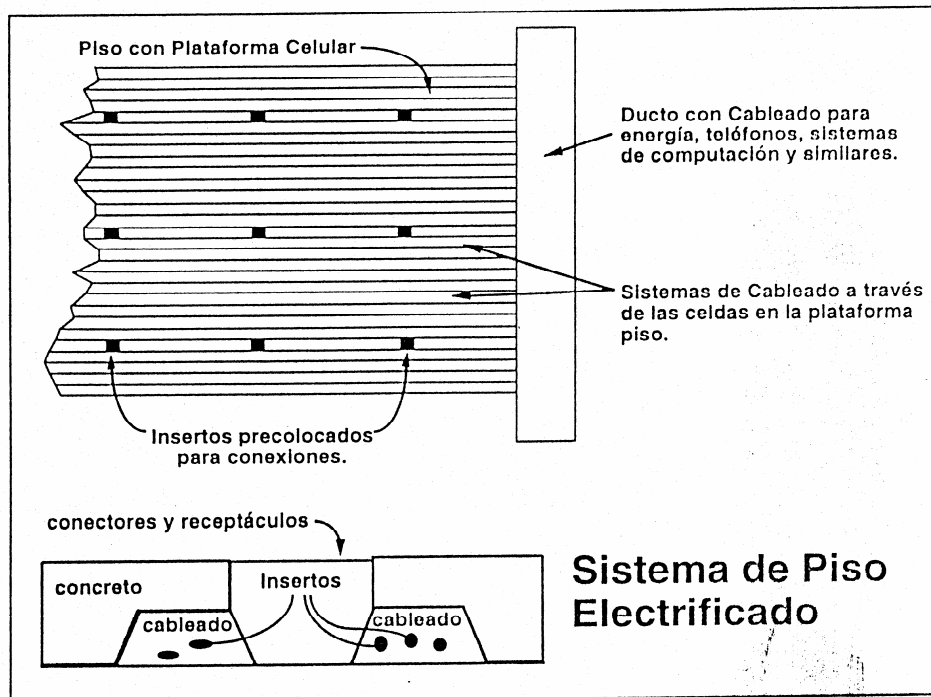


Ilustración VI.10

Si no se utiliza cubiertas para piso de acero celular, las perforaciones necesarias se las puede realizar más fácilmente a través de la plataforma que a través de losas fundidas. No es necesario encontrar o evitar las barras de refuerzo, debido a que este sistema de pisos no requiere refuerzos. Los sistemas de cableado se los puede colocar en la misma forma que se colocan los sistemas de ductos y tuberías.

Existe una recompensa en el costo de los sistemas que utilizan pisos con cubiertas de acero celular. Dependiendo de la configuración del edificio y código de construcción, se puede requerir también que los sistemas piso de concreto / plataformas

metálicas sean resistentes al fuego. Estos costos adicionales iniciales usualmente se los recupera con facilidad cuando el propietario tiene que hacer cambios debido a las modificaciones de la oficina o nueva tecnología, de acuerdo a lo que se anotó anteriormente.

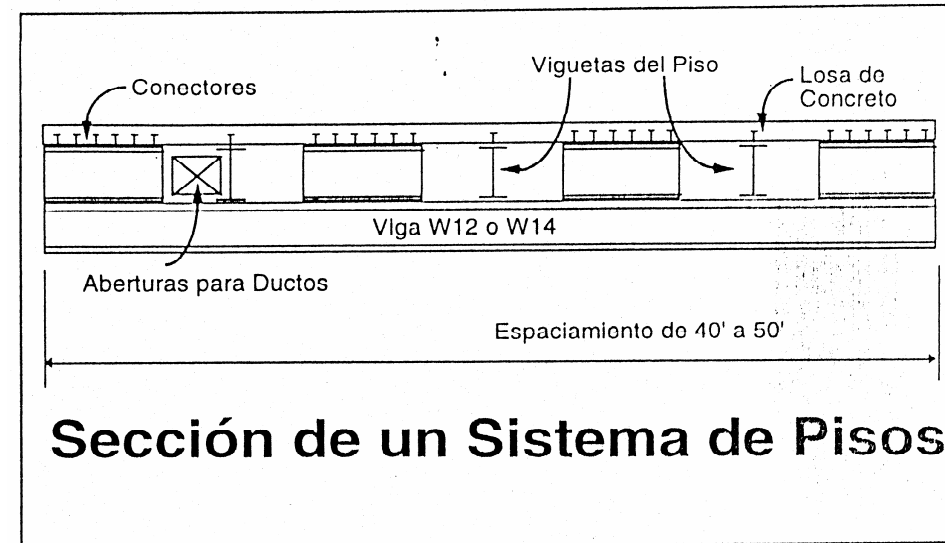


Ilustración VI.11

Los sistemas de pisos celulares también están disponibles para pisos de las estructuras de concreto, pero a un costo adicional substancialmente mayor.

### 6.- Facilidad de cambio, remodelación y renovación

En varias de las secciones anteriores se ha analizado la facilidad con la que se puede realizar cambios en las estructuras de acero durante las fases del diseño y construcción, y también, después de que el edificio haya sido ocupado. Para resumir estos beneficios "futuros" de las estructuras de acero son:

*Las grandes luces de las estructuras de acero proveen espacios abiertos claros para dar máxima flexibilidad en los cambios relacionados con la utilización de espacio y disposición de la oficina.*

*Las menores dimensiones de las columnas de acero minimizan la interrupción visual y obstrucción cuando se realizan cambios en la disposición de la oficina.*

**La facilidad de diseño y construcción con acero posibilita el rápido concurso de ofertas y apresura el proceso de edificación**

*Las estructuras de acero pueden ser diseñadas para eliminar requerimientos de refuerzos y paredes de carga, lo cual permite flexibilidad total para futuros cambios en la disposición de la oficina. Si se selecciona estructuras reforzadas, los miembros de acero de menores dimensiones y refuerzos con una variedad de configuraciones*

*minimizan la obstrucción. En la mayoría de los casos, estos elementos pueden ser colocados en la parte central del edificio o estructuras de las escaleras.*

*Las estructuras de acero pueden ser fácilmente reforzadas para soportar cargas agregadas al piso para unidades mecánicas, bibliotecas, cuartos de almacenamientos y áreas de archivo. Estas cargas generalmente superan la capacidad de carga típica de las oficinas, lo cual requiere reforzar los miembros inferiores para soportar adecuadamente las cargas adicionales.<sup>12</sup>*

*Las estructuras de acero y sistemas de pisos pueden también incorporar flexibilidad en los sistemas de cableado, lo cual es vital para los sistemas de oficinas modernos presentes y futuros. Las plataformas para pisos de acero celular electrificado proveen la*

*mejor flexibilidad para hacer cambios en las instalaciones eléctricas de los sistemas de computación y comunicaciones.*

*Mediante las estructuras de acero se pueden agregar fácilmente nuevas aberturas en el piso para: escaleras, elevadores de servicio y otros cambios arquitectónicos.*

*De acuerdo a los requerimientos, los miembros de acero pueden ser removidos, agregados o reforzados. Los propietarios pueden conectar las operaciones entre dos o más pisos mediante la adición de escaleras. Espacios adicionales abiertos se pueden obtener agregando atrios y claraboyas. Se pueden agregar espacios de corredores o acomodar cargas adicionales no previstas.*

*Modificaciones arquitectónicas externas. La remoción de los elementos de la fachada, cubiertas de las columnas y similares, y la recolocación de sus reemplazos se pueden hacer más fácilmente con acero. Los paneles son sujetos a las estructuras de concreto con anclajes empotrados, los cuales son imposibles de cambiar. Con las estructuras de acero, los anclajes son fácilmente recolocados, si esto fuera necesario.*

*Las estructuras de acero permiten revisar más fácilmente los sistemas de calefacción y aire acondicionado de los edificios. La configuración de los miembros de acero hace posible la perforación del alma de las vigas para los trabajos de ductos y cañerías, usualmente con un mínimo o sin refuerzos. Estos elementos también pueden ser fácilmente sujetos bajo los miembros de acero. Algunas estructuras de peso para pisos proveen elementos de acero con aberturas en el alma para uso actual y futuro.*

#### 7.- Reducción del tiempo total de construcción

Los perfiles de acero estructural se pueden adquirir, fabricar y ensamblar con prontitud. La facilidad inherente al diseño y

<sup>12</sup> Véase la página 65.



construcción con perfiles estructurales posibilita el rápido concurso de ofertas y apresura el proceso de edificación. Los numerosos detalles que caracterizan a las construcciones de concreto y madera son factores importantes a considerar en el proceso de licitación y, consecuentemente, retrasan el mismo.

Tanto depósitos como fábricas de acero estructural poseen inventarios de perfiles en volúmenes considerables. La mayoría de fabricantes también mantienen un inventario de perfiles estructurales pequeños y más comúnmente usados, además de platinas y ángulos de conexión. La disponibilidad de acero estructural permite al fabricante efectuar la rápida y eficiente entrega de materiales a un proyecto, muchas veces antes de que la construcción de los cimientos haya concluido.

**Las estructuras de acero son más propicias para la sucesión de las construcciones, lo cual reduce el tiempo de conclusión de un proyecto**

La simplicidad que caracteriza a la construcción con acero posibilita acelerar el proceso de edificación desde su mismo inicio. La plataforma estructural es colocada a medida que avanza la estructura para servir como plataforma de trabajo y como base

para losa de concreto. La erección de la estructura es seguida por otras fases tan pronto como sea posible. El rápido ritmo de la construcción de la estructura frecuentemente apresura el inicio de las otras etapas.

Las estructuras de hormigón por otro lado, requieren encofrados y puntales, numerosas barras de refuerzo, estribos, asientos, y otros aditamentos, en adición al vaciado y fijación del concreto, antes de proceder al levantamiento del siguiente piso. El apuntalamiento retrasa las etapas posteriores a la construcción de la estructura de concreto o dificulta operaciones. Las estructuras de acero muy rara vez necesitan de algún tipo de apuntalamiento.

Las paredes de ladrillo retrasan la construcción debido a que a colocación de bloques toma más tiempo. A menudo, las secciones más altas de las paredes necesitan apoyo temporal hasta que otros componentes de la estructura puedan proveer a las mismas con la estabilidad necesaria.

Las estructuras de madera requieren numerosos elementos y mano de obra. La unión de tales componentes demanda de muchas conexiones. Adicionalmente, este tipo de construcción es, por lo general, muy lenta e inapropiada en el caso de las estructuras grandes.

#### 8.- Reducción de costos y tiempo de construcción de los cimientos

Las estructuras de acero son mucho más livianas que las estructuras de concreto o ladrillo, como consecuencia de ello, los cimientos de las primeras son más pequeños y generalmente más simples y fáciles de construir. Esto no solamente resulta en un ahorro de dinero debido a la menor cantidad de material y mano de obra utilizada, sino que también disminuye el tiempo de construcción, facilitando la pronta utilización del edificio.

Las amplias luces que caracterizan a las estructuras de acero requieren un número menor de bases; a consecuencia de ello, los costos y tiempo de construcción son inferiores.

#### 9.- Tiempo ahorrado es dinero economizado

La rapidez con que se llevan a cabo la construcción de las estructuras de acero economiza dinero al propietario. A medida que la construcción progresa, los intereses se acumulan o demandan más pagos periódicos; así, mientras más tiempo transcurre, los intereses aumentan.

La rápida conclusión de la obra implica que el edificio estará listo para ser ocupado más pronto. Si el propietario ha venido

alquilando un lugar para sus oficinas, el mismo podrá mudarse a su nuevo edificio, lo que eliminará gastos de arrendamiento.

Si el propietario planifica rentar una parte de su inmueble, el mismo empezará a recibir ingresos tempranamente, lo cual contribuirá al pago de la deuda de inversión o recaudación de las respectivas utilidades.

En un mercado tan competitivo como el de edificios, la pronta disponibilidad de espacio puede determinar la ganancia o pérdida de clientes con fechas específicas de mudanza. El proceso acelerado e impresionante de la construcción con acero atrae atención al edificio; esto incrementa sus posibilidades de mercado.

Las estructuras de acero son las más propicias para la sucesión de las construcciones, lo cual reduce el tiempo de conclusión de un proyecto.

Otros ahorros adicionales son la consecuencia de la reducción de gastos generales; por ejemplo, el pago a contratistas y representantes del propietario.

#### 10.- Información relativa a la protección contra incendios

El acero es un material incombustible que puede ser fácil y económicamente protegido si los estándares de protección contra incendios así lo requieren. Tal protección puede realizarse por medio de pulverización de materiales, revestimientos intumescentes u otros métodos. La protección aísla a la estructura de acero del calor generado por el fuego, manteniendo al acero a una temperatura inferior a aquella que causaría su debilitamiento. En ciertas aplicaciones es posible reducir o eliminar tal protección, previo al análisis del fuego.

Generalmente, todo lo que se necesita es proteger las vigas y columnas. La protección por pulverización es muy común, sin

embargo perfiles estructurales pueden también protegerse mediante encerramiento, usando cubiertas para columnas, cielo raso a prueba de fuego, o recubrimiento de ladrillo o concreto.

El hormigón que se coloca sobre la base estructural de acero generalmente cumple con las especificaciones requeridas por los estándares para pisos.

En el caso de los sistemas para pisos de acero celular electrificado y para el cabezal de tubos de fluido eléctrico, la protección por pulverización se aplica a la parte inferior de la plataforma, a través de las aberturas provistas por las celdas y el ducto de acero.

La protección antiincendios en estructuras de concreto es provista por la capa de hormigón sobre el acero de refuerzo. La colocación de acero de refuerzo es esencial a fin de proteger adecuadamente al enrejado, de otra forma el concreto podría desintegrarse y exponerlo al calor directo del fuego, lo cual debilitaría este elemento.

La madera, material altamente combustible, no se usa normalmente en aplicaciones que requieren protección contra incendios. Su empleo en estructura precisa una protección conveniente.

#### 11.- Desempeño superior en caso de movimientos sísmicos.

Las cargas sísmicas provocan diferentes tipos y niveles de falla estructural dependiendo del material con el cual fueron construidas. Aquellas diseñadas con materiales inherentemente dúctiles, tales como el acero, poseen una ventaja fundamental. Las estructuras de hormigón y ladrillo tienen gran resistencia estática pero carecen de ductilidad (la capacidad de absorber sobrecargas repetidas sin fracturarse) o resiliencia, a menos de que se las refuerce con acero.

El comportamiento de tales estructuras en caso de sismos depende principalmente de la calidad de su diseño, construcción y detalles. Las estructuras convencionales de concreto que carecen

**De todos los materiales de construcción que se usan en estructuras de considerable envergadura, únicamente el acero posee las características más deseables para un diseño antisísmico confiable**

de las suficientes precauciones sísmicas y las de ladrillo sin refuerzo sometidas a cargas superiores a su límite elástico son propensas al colapso, fisuración y fragmentación debido a su deficiente ductilidad. Las estructuras de hormigón y ladrillo que carecen de refuerzo adecuado se

comportan de una manera similar a las mencionadas. Estos tipos de edificaciones han demostrado ser peligrosas, como lo han indicado los terremotos en el pasado.

De todos los materiales de construcción que se usan en construcciones de considerable envergadura, únicamente el acero posee las características más deseables para un diseño antisísmico confiable.

Estudios de los daños sufridos por estructuras en terremotos pasados han demostrado que las construcciones de acero

**Los elementos de acero que han sufrido daños se pueden reparar o reemplazar rápida y económicamente, a menudo sin interrupción de actividades**

estructural son consistentemente superiores a los edificios construidos con otros materiales, cuando se trata de proteger la vida y limitar las pérdidas económicas e interrupción de actividades comerciales. Durante los terremotos de los últimos años, solamente unos pocos edificios de acero estructural sufrieron daños severos mientras que cientos de edificaciones similares de materiales

estructurales diferentes se derrumbaron o sufrieron daños irreparables.

A continuación se indican algunas de las razones por las que las estructuras de acero se comportan mejor que otros materiales de construcción.

- Las estructuras de acero poseen una alta resistencia a pesar de su bajo peso. Esto permite que las mismas sean económicas y ayuden a reducir las cargas de inercia de un edificio.
- Las propiedades del acero estructural han sido ampliamente analizadas lo cual ha permitido una excelente comprensión de sus características. El comportamiento de las estructuras de acero es predecible y confiable.
- El acero estructural exhibe un comportamiento estable aún bajo cargas cíclicas repetitivas dentro del rango inelástico. Esta ductilidad inherente o capacidad de absorber sobrecargas repetitivas sin fracturarse permite que las estructuras de acero resistan altas cargas verticales y laterales bajo considerable deformación.
- Los elementos de acero estructural que han sufrido daños se pueden reparar o reemplazar rápidamente y económicamente sin recurrir a la demolición total o interrupción total de actividades.

**Un piso que pueda tener tendencia a una vibración inaceptable puede ser corregido en la etapa de diseño mediante simples modificaciones o incrementando el espesor de la losa**

- La soldadura del acero estructural en el taller trae como consecuencia un mejor control de calidad y un comportamiento más confiable.

12.- El acero es un material durable

Una vez que se ha colocado el techo y las paredes de un edificio para oficinas, la estructura de acero no se halla expuesta a la corrosión. De esta manera el acero puede permanecer sin pintarse.

13.- Las construcciones de acero son resistentes a todo tipo de clima

El clima frío no impide la construcción de estructuras de acero. Bajo las mismas condiciones, las estructuras de hormigón requieren protección, calefacción y/o aditivos, lo cual considerablemente incrementa su costo de construcción. Las estructuras de acero mantienen su calidad bajo cualquier clima.

14.- El acero es un material reciclable

Al final de la vida útil de un edificio el propietario confronta tres alternativas:

Puede remodelar o reconstruir completamente el edificio. Esto es fácil con estructuras de acero, como se indicó anteriormente.

Puede desmantelar la estructura. Si se usó una estructura de acero, se la puede desmontar y ensamblar nuevamente en el mismo o en otro lugar.

Puede demoler el edificio. La demolición (o el desmantelamiento) de una estructura de acero produce chatarra que se vende en el mercado como acero usado o como chatarra de reciclaje para producir más acero. Debido a la limitada disponibilidad de

terraplenes, el hormigón presenta un serio problema de demolición y deshecho. El valor residual del acero garantiza su transformación en otros productos. La utilización del acero estructural incrementa el valor a los bienes. La madera empleada en construcción posee poco valor si se recicla por lo que generalmente termina en terraplenes.

### OBJECIONES TÍPICAS AL USO DE LAS ESTRUCTURAS DE ACERO

Las experiencias de un administrador en el campo de la construcción, la visita de un representante de una firma rival, o quizás un artículo o anuncio comercial pueden despertar dudas respecto al uso de las estructuras de acero. La presente sección discute varias objeciones comunes y ofrece respuestas a las mismas.

1.- *“El tiempo entre la orden y recepción del acero retrasa la obra. Podemos empezar la construcción desde los cimientos hasta completar la estructura de concreto sin tener que retrasar el trabajo en espera del acero”*

Actualmente existen numerosos fabricantes de acero que manufacturan perfiles de acero estructural en horarios de producción intensivos. Hoy en día, hay un mayor número de proveedores mayoristas en el mercado que disponen de una amplia variedad de perfiles y platinas de acero A36 y A572, grado 50. Algunos fabricantes han establecido depósitos para almacenar sus líneas de productos con la finalidad de realizar una pronta entrega.

Si un proyecto determinado consume un volumen considerable de acero, se pueden solicitar cotizaciones vía internet o fax a diferentes empresas en Estados Unidos. Generalmente, la cotización puede llevarse entre 1 a 3 días. Al efectuar la compra, el acero puede estar en el cualquiera de los puertos de Guatemala en el término de 2 a 3 semanas. En este tiempo resulta prudencial para hacer trazos y obras preliminares de cualquier proyecto.

La mayoría de los fabricantes mantienen un número limitado de órdenes, o tienen una adecuada capacidad, a fin de establecer la demanda en corto tiempo. Los fabricantes de acero durante la primera etapa de fabricación trabajan de forma más rápida y

eficiente con el advenimiento de programas computarizados. Varios fabricantes usan programas de computación para procesar las órdenes de fabricación con el objeto de ahorrar tiempo y obtener materiales de manera más eficiente. Actualmente, muchos talleres usan equipos de control numérico de fabricación<sup>13</sup> para apresurar la manufactura de los productos. Los procesos de soldadura automáticos y semiautomáticos para acelerar las operaciones de soldadura son también comunes.

2.- *“Los pisos de estructura de acero vibran demasiado; esto incomoda a mis empleados. Los pisos de hormigón no vibran.”*

Las características vibracionales del piso dependen de la frecuencia y amplitud, factores que pueden ser chequeados y controlados durante la etapa de diseño. En el pasado, algunos ingenieros ignoraban la vibración del piso o asumían que poseían una amortiguación mayor a la realmente existente. Los diseñadores pueden asegurarse que las vibraciones no caigan dentro del rango crítico. Existe una variedad de publicaciones a este respecto y programas computacionales de diseño que llevan a cabo la mencionada verificación. Los criterios de control de vibraciones se deben establecer con anticipación conjuntamente con el propietario.

La variable fundamental para el control de vibraciones del piso es su masa (el peso de la losa). Un piso que pueda tener tendencia a una vibración inaceptable puede ser corregido en la etapa de diseño mediante simples modificaciones o incrementando el espesor de la losa. Cualquiera de estos cambios tendrá un efecto insignificante en el costo.

Los pisos de madera y de losa delgada de hormigón también vibran; por lo tanto, también requieren de medidas adecuadas para controlar su vibración.

<sup>13</sup> La empresa Aceros Prefabricados, S. A. es la única que ofrece estos servicios en el medio nacional.

3.- *“A diferencia del hormigón, el costo de protección contra incendios es elevado”.*

La producción contra incendios de estructuras de acero por medio de pulverizantes es económica, un promedio de US\$ 0.10 por libra. Las estructuras de hormigón pueden requerir de una cubierta de concreto adicional (elementos largos) con el fin de cumplir con los estándares recomendados. Sin embargo, el costo de dicha protección no se desglosa al propietario como un ítem individual en el costo estimado de la construcción.

Es fácil verificar el espesor de la protección contra incendios del acero por medio de un instrumento sencillo. En caso del hormigón, las pruebas requeridas para realizar tal verificación después del vaciado resultan costosas.

Tanto las columnas de acero como de hormigón necesitan de algún tipo de cubierta; generalmente se usa capas reforzadas con pernos. El costo adicional del uso de otra capa para proteger a las estructuras de acero (prácticamente común) es mínimo. La mayoría de los costos asociados con la protección contra incendios por revestimiento realmente constituyen costos de acabados y los mismos no están relacionados con el costo del acero.

4.- *“La distancia entre pisos en las estructuras de acero es mayor que la correspondiente a las estructuras de concreto, lo cual aumenta mis costos de ventilación, calefacción y aire acondicionado, así como también el costo de las paredes y otros costos...”*

La distancia entre pisos en el caso de estructuras de acero es típicamente un poco más alta que la correspondiente a edificios de hormigón; esto se debe, entre otras razones, a las amplias luces que caracterizan a las estructuras de acero. Si se usara luces más largas en las estructuras de concreto, la dimensión de sus vigas y la distancia entre pisos se incrementarían.

Una de las razones por las que el espesor de las estructuras de acero de los pisos es mayor se debe a que ellas usan menos elementos (vigas a 10' en vez de 3' a 6' en hormigón). También se puede usar un sistema de estructuras de hormigón de vigas anchas (Wide Flange) o un sistema de viguetas. En ciertos casos, se emplea continuidad a través de vigas a fin de reducir el espesor de los elementos.

En los miembros de acero se utiliza el espesor (la principal variable para la rigidez) con la finalidad de deflexión del piso. Las estructuras de hormigón delgadas son susceptibles a deformaciones permanentes incorregibles como consecuencia de la aplicación de cargas muertas continuas, las cuales incluyen el peso mismo del hormigón. La construcción de losas planas de hormigón, un método usado en construcciones de corta distancia entre pisos, es notoria por este problema. Con estructuras de acero se puede controlar fácilmente la deflexión. La deflexión causada por sobrecarga y deformación de losas de concreto pueden corregirse por medio de la aplicación de calor a la estructura de vigas de acero.

A menudo se sobreestima el costo principal asociado con una distancia mayor entre pisos. El precio de las paredes frecuentemente se calcula usando un precio unitario por pie cuadrado de superficie. En el caso de paneles para paredes, el costo de mano de obra así como el costo de elementos horizontales (divisiones, sellos, barrederas) permanece igual; solamente el costo de los elementos verticales se incrementa. Para las paredes de mampostería, el aumento en el costo se debe únicamente al uso adicional de ladrillos o bloques, sin que exista un aumento en el costo de la estructura soporte.

Criterios similares se aplican a los costos de ventilación, calefacción y aire acondicionado. El equipo requerido puede ser ligeramente más grande basado en el mayor volumen del edificio, pero los otros costos tales como: instalación, trabajo de ductos,

etc., se mantienen iguales. La estimación del precio unitario basado en el volumen del edificio sería engañosa.

Hay quienes toman en consideración también el costo adicional de la tubería vertical, construcción del pozo del ascensor, construcción de escaleras, etc. Al estimar las diferencias producidas por las diferentes alturas entre pisos. Al igual que antes, el costo de la mano de obra se mantiene virtualmente inalterado. El costo de materiales es mínimo. Los beneficios económicos y de otro tipo que resultan del uso del acero deben exceder considerablemente a los costos secundarios antes mencionados.

El costo del terminado de interiores debe mantenerse inalterado debido a que solamente la superficie expuesta por debajo del cielo raso necesita acabado. Este valor debe mantenerse constante cualquiera que sea el tipo de material de construcción utilizado.

Existen maneras de reducir la altura entre pisos en las estructuras de acero, si así se lo requiere. Se puede usar vigas y durmientes más delgadas pero más pesadas. También puede utilizarse continuidad en los elementos del piso. Puede además diseñarse vigas y durmientes con aberturas en el alma que permitan el paso de tuberías a través de las mismas en vez de que pasen por debajo de ellas. Puede reducirse las luces de las vigas (sacrificando las ventajas de poseer espacios amplios). Si el edificio es una estructura resistente al momento, sus elementos son generalmente más gruesos a fin de controlar

**Con el acero es posible obtener cualquier ángulo y se puede fabricar cualquier elemento con cualquier ángulo –existen métodos eficientes para obtener curvas, vigas voladizo, o cualquier otra forma inusual**

tanto la resistencia como la rigidez. El cambio a una estructura reforzada convertiría estos elementos a espesores estándares. En el caso de luces amplias (de aprox. 45'), un sistema de durmientes

con sus respectivas aberturas para tuberías sería más delgado que la viga equivalente en la que las tuberías pasen por debajo.

5.- *“Con el acero no puedo obtener las curvas y ángulos que deseo.”*

Aunque los fabricantes de acero prefieren las esquinas en ángulo recto y las estructuras rectangulares, es posible obtener cualquier ángulo en acero y se puede fabricar cualquier elemento con cualquier radio. Existen métodos eficientes para obtener curvas, vigas en voladizo, o cualquier otra forma inusual. Este trabajo resulta más costoso que el trabajo de columnas vigas estándares. Sin embargo no olvide que el costo principal del conformado especial y trabajo de enrejado para estructuras y formas de concreto especiales es igual o más alto.

**Es importante tener una buena relación de trabajo con el ingeniero estructural durante la etapa de diseño**

6.- *“El acero cuesta más que el hormigón o madera.”*

En algunos casos tal afirmación puede ser correcta. En otros, la misma puede ser el resultado de un estimativo incompleto o incorrecto del costo de la construcción.

En el primer caso (si se ha preparado un estimativo preciso y la estructura de acero resulta realmente más costosa) usted tiene dos alternativas. Primero, analice los beneficios que ofrecen las estructuras de acero. Esto equivaldría a comprar algo de mejor calidad. El precio podría ser más alto, pero sus características justifican ese costo adicional. Un poco más de dinero invertido al inicio generará ahorros al propietario y/o mejores ingresos (más espacio de alquiler) durante la vida del edificio así como también mejorará su precio de venta. Recuerde al propietario los beneficios que podría obtener con la pronta utilización del edificio y del plan de depreciación.

La segunda alternativa a intentarse cuando se cuenta con costos estimativos precisos es tener preparado con anticipación un rediseño que emplee un mejor sistema de estructura de acero. Esta estrategia funciona si existe un evidente sobredimensionamiento de los elementos de acero (pisos con vigas y viguetas muy pesadas, construcciones no compuestas, etc.) o un esquema estructural ineficiente (numerosas estructuras de momento, pequeños espacios entre columnas, todo el acero es tipo A36, detalles costosos, etc.) Ahorros significativos se puede lograr mediante el uso de aceros de alta resistencia y el LRFD. Adicionalmente, usted podría explorar otras alternativas de ahorro como por ejemplo, evitar el uso innecesario de una mano de pintura para el acero de interiores.

Como sería de esperar, la mayoría de los ingenieros estructurales no aceptan con facilidad la crítica o el cuestionamientos de sus diseños. Así, es recomendable establecer una buena relación de trabajo con ellos durante las primeras etapas preliminares del diseño y presupuesto. Si usted cuestiona el trabajo del ingeniero, probablemente va a necesitar la ayuda de un consultor externo o un empleado interno a fin de preparar un diseño preliminar alternativo que demuestre los posibles ahorros. A veces un simple estudio de la distancia entre columnas puede ser suficiente para captar la atención del propietario. La alternativa de rediseño resulta más efectiva si se la vende al propietario o administrador de la construcción ya que ellos cuentan con la autoridad para solicitar al ingeniero estructural que repita su trabajo o que por lo menos coopere con el fabricante de acero. Tenga siempre presente que el ingeniero se esforzará por probar que su trabajo inicial era apropiado y económico.

Si confronta el segundo caso (el precio de la estructura de acero es “demasiado elevado” debido a una estimación inexacta) revise las asunciones, pesos y precios unitarios con que cuenta el propietario. Los precios unitarios pueden haberse obtenido de

proyectos anteriores, publicaciones o talvez puede haberse venido de un fabricante demasiado conservador.

La información relativa a precios unitarios correspondiente a proyectos anteriores no es confiable debido a que existen factores que pueden afectar su validez. Entre ellos es importante indicar los siguientes: la estructura del edificio, el alcance de la obra, la planificación, las condiciones del sitio de construcción, los términos generales y estipulaciones del contrato y las condiciones del mercado. En tal situación, el diseño de la estructura del edificio (estructura reforzada o de momento, compuesta o no compuesta, de vigas exclusivamente o de vigas y viguetas combinadas, método de conexión, etc.) afecta los precios unitarios. Averigüe si los precios anteriores incluyen detalles como dinteles, soportes de paredes para revestimiento exterior, hierros, empotramiento, bordillos angulares o de platina para las losas, fabricantes especiales para condiciones infrecuentes u otras características poco usuales.

Los ítem anteriores elevan los precios por unidad debido a que, aunque son livianos, requieren de mucha mano de obra. Indague si los precios del proyecto anterior incluían compensaciones por la entrega rápida de materiales o por condiciones climáticas adversas. Pregunte si el proyecto anterior se llevó a cabo en un solar pequeño, o si el sitio presentó inconvenientes para la construcción (por razones de suelo inestable, zanjas, interferencias de los servicios de electricidad, gas, etc.)

¿Existió alguna cláusula contractual (liquidación por daños y perjuicios, protección legal) que elevara el precio? ¿Fueron mejores las condiciones del mercado y mayor la acumulación de trabajo en esa época? ¿Se tomaron en cuenta los efectos inflacionarios en los precios unitarios de años anteriores? Si este es el caso, los cambios en el precio de fabricación del acero y el mejoramiento de la mano de obra han mantenido bajos a los precios unitarios.



Es imperativo preparar un presupuesto preciso. Frecuentemente, el estimado inicial del precio unitario del acero se basa en un aproximación que incluye un margen de más o menos 10% por contingencias. Dicha práctica le proporcionará flexibilidad al fabricante para cumplir con el precio propuesto

**Es necesario que los propietarios comprendan que “peso mínimo” no necesariamente significa “costo mínimo”, particularmente cuando se puede incrementar el peso para un diseño más eficiente y económico**

durante el proceso de negociación y licitación del proyecto. Los pesos estimados de la estructura pueden realizarse conservadoramente, así el ingeniero no se verá en la obligación de diseñar una estructura de “peso mínimo”, lo cual toma mucho tiempo. Frecuentemente, los precios y pesos unitarios elevados (digamos 10% sobre los del mercados) se combinan para dar un costo aproximado del 21% sobre el precio real del proyecto. Tal estimado resulta lo suficientemente alto como para que el propietario o administrador rechace el acero como una opción viable. Por esta razón es importante contar con cifras precisas. Es necesario que los propietarios comprendan que “peso mínimo” no necesariamente significa “costo mínimo” particularmente cuando se puede incrementar el peso para obtener un diseño más eficiente y económico.

#### SUGERENCIAS PARA MEJORAR LA ECONOMÍA DE LAS ESTRUCTURAS DE ACERO.

1. **Use pisos compuestos.** En caso de edificios, generalmente, las vigas entre 50 y 75% compuestas son las más económicas porque equilibran el peso de la viga de acero y el costo de los conectores.
2. **Utilice LRFD en los pisos compuestos.** Los procedimientos de diseño compuesto LRFD generan alrededor de un 10% de ahorro en comparación con los procedimientos ASD.
3. **Emplee estructuras reforzadas en vez de estructuras de momento.** Tal precaución reduce el peso de la estructura así como la complejidad y el número de conexiones.
4. **Para edificios en este rango de altura (1 a 7 niveles), considere la posibilidad de usar conexiones “tipo 2 con conexiones con contraventeo”,** en vez de conexiones de momento total. Si utiliza LRFD, emplee conexiones “parcialmente restringidas” si no existe impedimento para que el ingeniero lo haga así.
5. **En lo posible, utilice separaciones amplias entre columnas y entre vigas,** para disminuir el número de elementos y conectores a usarse.
6. **Use bordillos de concreto con lámina metálica en vez de ángulos metálicos o platina,** para losas de concreto elevadas.

**Los procedimientos de diseño compuesto LRFD generan alrededor de un 10% de ahorro en comparación con los procedimientos ASD.**

7. **Simplifique cualquier complejidad en los detalles de sujeción de las paredes.**
8. **Elimine cualquier revestimiento innecesario o capa de pintura.** En el interior de los edificios de oficinas donde el acero está encerrado detrás del cielo raso o detrás de los revestimientos de las paredes, *no se necesita ni se recomienda aplicar una capa de pintura a los perfiles estructurales.*
9. **Utilice elementos A572, grado 50 en el caso de que los mismos se hayan diseñado para resistencia.**
10. **Analice diferentes alternativas para reducir el costo de las estructuras de acero** por medio de cambios en el diseño de las conexiones, como por ejemplo la eliminación del uso de rigidizadores y placas de refuerzo en las mismas, utilizando columnas de secciones más pesadas y/o más resistentes.
11. **De ser necesario, considere la posibilidad de usar estructuras híbridas.** Si el tiempo lo apremia, o si las bajas temperaturas o localidad dificultan el vaciado del concreto sobre la base, una alternativa viable sería el piso de hormigón prefabricado. Recuerde, sin embargo, que los contratistas de hormigón prefabricado generalmente cobran precios más altos si suministran los bloques únicamente. Trate de hallar un proveedor que exclusivamente fabrique bloques y no otros componentes para construcción de edificios.
12. **Otra alternativa consiste en utilizar viguetas de barras de acero o largueros.** Esto disminuye la cantidad de acero estructural utilizado en el proyecto, pero podría generar suficientes ahorros para mantener la estructura principal de acero.

## ARGUMENTOS DE LOS MATERIALES RIVALES

Las personas interesadas en utilizar materiales diferentes al acero también sostendrán que los materiales rivales tienen características de bajo costo, rapidez de construcción, creatividad y flexibilidad de diseño, operación contra incendios (concreto y mampostería), y durabilidad. Con la finalidad de mantener y defender sus argumentos es necesario disponer de casos prácticos y ejemplos relacionados con el costo y rapidez de construcción.

Los avisos clasificados y literatura de promoción de los materiales de construcción rivales, particularmente concreto, concreto prefabricado y mampostería, promueven adicionalmente, las llamadas “ventajas” que poseen únicamente estos materiales. Esta sección suministra información sobre algunas de sus “campañas de ventas”, con una respuesta a cada argumento. También es conveniente que se refiera a la sección anterior “objeciones a las estructuras de acero”.

*“El concreto y mampostería proveen una masa térmica, lo cual genera ahorro de energía.”*

Los ahorros de energía no dependen de la térmica interna, sino de los valores del aislamiento de las paredes y techos que separan el exterior del interior. La masa térmica interna si ayuda a que la temperatura del interior del edificio permanezca constante, pero si se está utilizando controles de temperatura para reducir los requerimientos de calentamiento y aire acondicionado durante las horas que no se ocupan, esta masa incrementa la energía requerida para subir o bajar la temperatura al nivel deseado.

**Si se está utilizando controles de temperatura, la masa térmica del concreto incrementa la energía requerida para subir o bajar la temperatura al nivel deseado**

El concreto y mampostería expuestos al exterior también sirven como sumidero de calor para absorber el calor solar, lo cual incrementa la carga de enfriamiento durante los meses de verano. Si esta masa se usa para reducir la carga de calentamiento durante el invierno, entonces los sistemas de calentamiento y aire acondicionado deben balancear el calor ganado entre las diferentes partes del edificio (sol-sombra).

1. *“Los edificios que utilizan concreto prefabricado se pueden construir más rápidamente.”*

Los edificios para oficinas que utilizan concreto prefabricado (columnas, vigas, largueros, losas para pisos) ciertamente se los puede construir en menos tiempo, siempre y cuando se disponga de los respectivos elementos. Sin embargo, en la mayoría de los casos estos elementos necesitan ser diseñados y fabricados. Su precio depende de las condiciones locales del mercado.

Aunque hablar negativamente de otro producto, no es el método de ventas preferido, existen varios aspectos que se deben considerar en este tipo de construcción:

- Columnas masivas;
- Vigas y largueros de gran espesor, lo cual incrementa la distancia entre pisos;
- Prácticamente no hay flexibilidad para cambios futuros;
- Poco control de la uniformidad del nivel de piso;
- Poco control de la deformación posterior;
- Es necesario evitar tensionar los miembros cuando se efectúan modificaciones en la estructura.

También se argumenta que la construcción de los edificios que utilizan concreto prefabricado se la puede realizar bajo cualquier tipo de clima, debido a que se elimina la fundición de la losa. Sin embargo, todavía es necesario utilizar hormigón para los cimientos. También es necesario considerar que en la mayoría de los casos se necesita aplicar una capa delgada de concreto sobre las losas prefabricadas, para incrementar el nivel del piso. Este vaciado es sensitivo a efectos de temperatura.

2. *“La mampostería reduce el costo de las estructuras de acero en un 15%.”*

Esta campaña publicitaria por parte de las industria de la mampostería, inicialmente parece correcta, sin embargo, no considera el costo del trabajo de mampostería. Su argumento es que una construcción que utiliza mampostería puede eliminar columnas y posiblemente arriostamientos. Esto es verdad, sin embargo, se debe considerar que el proceso de construcción se retrasa mientras se coloca las paredes de mampostería, operación que es mucho más lenta que la requerida por la edificación con acero estructural.

3. *“El acero no es seguro en caso de incendio, debido a que se funde y deforma.”*

El tema principal es que es inseguro utilizar estructuras de acero sin protección y que no se puede confiar en los sistemas de extinción de incendios para proteger la estructura de acero. Sin embargo, hay que considerar que para llegar a fundir y deformar el metal, se requiere de grandes cargas inflamables durante largos períodos (lo cual afecta en caso de complejos de almacenamientos y no a edificios).

Para edificios de oficinas, las cargas inflamables (material combustible) serán mucho menores que las encontradas en bodegas de almacenamiento o construcciones similares.

Experiencias con incendios en ambientes de oficinas, así como pruebas de laboratorio, indican que una estructura de acero es capaz de soportar el incendio de una oficina. (Han ocurrido pocos casos en los que una viga local del piso haya fallado en el punto de conexión, sin embargo los incendios de oficinas no originan un colapso total de la estructura.) Las altas temperaturas que se alcanzan durante un incendio de oficinas son generalmente de corta duración y alcanzan valores más bajos que la crítica. El daño de las estructuras de acero en un incendio es raramente causado por el calentamiento hasta una temperatura crítica. La mayoría de los daños es causado por la expansión térmica de los miembros, lo cual origina distorsión si las juntas no pueden dilatarse libremente, seguido por un rápido enfriamiento a medida que se extingue el fuego con agua. La contracción del miembro distorsionado causa que las conexiones experimenten esfuerzos axiales no considerados en el diseño. Si el colapso ocurre, es generalmente por fractura en el punto de conexión y es localizado.

Los códigos para construcción de edificios cubren la parte relacionada con la protección contra incendios. Los edificios más pequeños requieren de menor protección. Protección pasiva tal como pintura y aislamiento es todo lo que se requiere para mantener bajo control la expansión térmica de la estructura de acero durante un incendio.

Las estructuras de concreto también experimentan daños durante un incendio, incluyendo desprendimiento del concreto, lo cual expone el enrejado a la resistencia crítica del miembro. Esto podría originar fisuras. La reparación de este tipo de daños antes de volver a ocupar el edificio es muy costosa. Las estructuras de acero por otro lado requieren de enderezamientos que utilizan calor, además de inspección y reparación de cualquier conexión que haya sufrido daño.

Algunos argumentan que los costos de seguro del edificio serán menores en el caso de que éste se construya de concreto en

lugar de estructuras de acero. Sin embargo este no es el caso, debido a que ambos materiales son incombustibles y ambos requieren construirse bajo códigos contra incendios.

5. *“Las estructuras de concreto también sirven como acabado exterior.”*

Se pueden producir problemas si se usa los elementos de la estructura de concreto como parte de los paneles. Las cargas originadas por el viento (y posiblemente sísmicas) causarán un movimiento lateral de la estructura, lo cual puede producir fisuras superficiales en la intersección de las vigas de concreto y columnas. Estas fisuras permiten luego que la humedad penetre, originando desprendimiento del concreto y corrosión del acero de refuerzo. La reparación de éstas fisuras es costosa, y el color del material de reparación difícilmente se parece al color del concreto original.

El concreto expuesto a la intemperie es también susceptible a la carbonatación, especialmente en ambientes urbanos. La carbonatación ocurre cuando el dióxido de carbono en el aire se combina con el calcio del concreto y forma carbonatos de calcio. Con el tiempo estos compuestos penetran el concreto desde la superficie exterior hacia el interior de la estructura de concreto. Debido a que el concreto carbonatado pierde su alcalinidad, este no puede proteger al acero de refuerzo cuando el frente de carbonatación lo alcanza, originando un astilleo. En ambientes urbanos esto ocurre después de 25 años. Las estructuras de concreto astillado son difíciles de reparar. La carbonatación solamente puede ser postergada recubriendo la parte externa con un material costoso.

**Las estructuras de acero también experimentan daños durante un incendio, incluyendo desprendimiento del concreto, lo cual expone el enrejado a la resistencia crítica del miembro**

El concreto sin acabado posterior tiene usualmente una superficie que carece de calidad estética. El uso de revestimiento para mejorar su apariencia externa es costoso y es difícil darle una apariencia uniforme. Los materiales de concreto y mampostería expuestos a la intemperie se manchan con el tiempo y se exponen a contaminantes, lo cual requiere de métodos de limpieza costosos.

6. “A diferencia del acero, el uso del concreto emplea mano de obra local.”

El acero fabricado puede venir de otras regiones. Sin embargo, el trabajo de edificación así como el resto del proyecto de construcción aún emplea mano de obra local. La mayoría de los otros materiales de construcción y componentes (paneles, madera, ladrillos, unidades de aire acondicionado/calefacción, elevadores, etc.) también provienen de otras regiones, lo cual no los hace diferentes del acero. Lo que sí se debe considerar es que el acero es un material que ahorra el costo de mano de obra.

## VENTAJAS DEL ACERO

### Diez razones que justifican el uso del acero estructural

- I. **Luces más grandes.** Las estructuras de acero estructural permiten construir fácilmente espacios de hasta 12200 x 12200mm (40' x 40') y aún más grandes, lo cual le proporciona flexibilidad al propietario para la disposición de las oficinas. Véanse las tablas provistas en las páginas 129 a la 131.
- II. **Columnas más pequeñas.** Las columnas de acero son más pequeñas que las de concreto. Esto posibilita el uso más eficiente del espacio disponible y obstruye menos la visibilidad.
- III. **Requerimientos mínimos para paredes de carga o arriostramientos diagonales.** Las estructuras de momento eliminan la necesidad de estructuras con arriostramiento por un costo mínimo en edificios de baja o mediana altura. Esto trae como consecuencia mayor flexibilidad para el uso del espacio y menos limitaciones para la colocación de las ventanas y puertas.
- IV. **Flexibilidad de diseño económico.** Luces grandes, vigas voladizo, paredes oblicuas, aberturas en el piso, características estéticas especiales y cargas inusuales pueden acomodarse sin inconvenientes utilizando acero.
- V. **Facilidad para la modificación y renovación.** Si en el futuro se añaden cargas adicionales a la estructura, el acero puede reforzarse fácilmente para que soporte el peso adicional. De la misma manera se puede construir nuevas aberturas en el piso para ascensores, escaleras y otros requerimientos mecánicos y arquitectónicos.

- VI. **Tiempo reducido de construcción.** Las estructuras de acero pueden adquirirse, fabricarse y levantarse rápidamente. La facilidad con la que se puede diseñar y construir con perfiles de acero se presta para la construcción acelerada.
- VII. **Reducción de costos de los cimientos.** El menor peso del acero requiere cimientos más pequeños y menos costosos.
- VIII. **Reducción de los costos de financiamiento.** En vista de que las estructuras de acero pueden erigirse más rápidamente, el edificio podrá ser ocupado más pronto, lo cual reduce los costos generados por el pago de intereses. Además, si existen oficinas de alquiler en el proyecto, el flujo de ingresos por tal concepto empezará más pronto.
- IX. **Desempeño superior durante movimientos sísmicos.** La ductilidad que caracteriza al acero lo convierte en el material más adecuado y económico para resistir terremotos. El propietario debe tomar en cuenta cuán segura es la estructura y que porcentaje de ella es recuperable después de un terremoto. Las estructuras de acero maximizan estos dos factores.
- X. **Completo reciclaje.** La mayor parte del acero que se vende hoy día ha sido reciclado y prácticamente todo el acero obtenido de demoliciones es reciclable en un 100%.

## SOBRE LA CONSTRUCCIÓN DEL PROYECTO

En capítulos anteriores nos hemos acercado a las estructuras de acero desde su óptica histórica, desde su análisis de comportamiento estructural y consideraciones técnico-constructivas que nos brindan un panorama del uso del acero como material constructivo. Imbuidos de este conocimiento, el estudiante de arquitectura puede empezar a tomar decisiones acerca del tipo de estructura de acero que usará para un diseño particular de edificio, unido a esto también puede predimensionar las luces, las proporciones de los miembros, qué sistema de techos usar, cómo disponer las columnas y los entrepisos.

A manera de ‘encaminar’ al estudiante, esta sección mostrará la forma en que los proyectos deben ser desarrollados en los talleres. Por supuesto, en nuestra realidad nacional se encontrará herreros, pequeños talleres y hasta empresas “consultoras” que no planifican adecuadamente sus estructuras esto origina un mal desarrollo del proyecto, una concepción antieconómica y contratiempos costosos (por ejemplo, llegar a tomar medidas y cortar las piezas mismas en el sitio de trabajo). El propósito del capítulo a su vez es dar orientación y guía para que el futuro arquitecto pueda mejorar o concebir soluciones prácticas al diseñar o dirigir una construcción con acero.

La fabricación y montaje de estructuras de acero, requieren de una organización de arquitectos, ingenieros y técnicos debidamente entrenados. Usualmente, el departamento de diseño de una empresa fabricante de estructuras es el encargado de interpretar los dibujos del arquitecto y los esquemas de diseño del ingeniero estructural y trasladarlos a planos de taller. Estos dibujos o “planos de taller” deberán contener todas las instrucciones para cortar, perforar y ensamblar miembros estructurales con pernos o soldadura. Asimismo deberán contener Listas de Materiales (estas listas de materiales son muy útiles en el trabajo de taller debido a que agilizan la tarea de recolectar piezas y asignar tareas

específicas a las máquinas de corte y doblaje. Asimismo, éstas listas de materiales contienen la cantidad de piezas sueltas que se deberán enviar al campo, ejemplo: pernos, platinas, etc).

## TALLERES DE ACERO

En nuestro país existen numerosos talleres pequeños, sin embargo, para los grandes proyectos existen contadas empresas, las que sobresalen podemos mencionar:

1. Aceros Prefabricados, S. A. (APSA)
2. Aceros Arquitectónicos, S. A.
3. PRECASA
4. TIPIC
5. MOPRECA

## EQUIPO Y PROCEDIMIENTOS DEL DEPARTAMENTO DE DISEÑO

### ***Equipo y Accesorios***

La gran mayoría de dibujos, planos de fabricación o de montaje *hechos hoy*<sup>14</sup> en la industria de la construcción son realizados a través de programas de computadora.

Los programas de computadora más usados en la industria son AutoCAD y Vector Works. Los requerimientos de hardware son muy cambiantes, éstos programas son actualizados casi cada año por lo que resulta innecesario describir el hardware necesario. Simplemente, es necesario asegurarse que la capacidad de la computadora a usar sea apropiada para los programas a correr.

<sup>14</sup> Hace tan solo unos 15 años atrás en nuestro país era común trabajar de forma tradicional, es decir, dibujantes con sus reglas, escuadras, lápices con diferentes durezas, mesas de dibujo, etc. Sin embargo, el gran avance que ha tenido la tecnología y la reducción gradual de sus costos, ha hecho posible que la computadora sea un instrumento de trabajo, hoy por hoy tradicional.

La *capacidad mínima del hardware* usualmente aparece en los manuales de instalación de los programas.

Es necesario además tener una copia del *Manual of Steel Construction*, idealmente la edición actual (es posible solicitarlo a través de la página de Internet del *American institute of Steel Construction*, [www.aisc.com](http://www.aisc.com))

Asimismo, un instrumento básico es una calculadora científica manual así como tablas de conversión, escalímetro en pies y metros. Idealmente, se debería contar con los estándares de dibujo usados en el lugar de trabajo.

Un dispositivo de salida de impresión que no puede faltar es el *Plotter* cuya resolución y capacidad dependerá del jefe del departamento. Asimismo es importante contar con una impresora *laser* que pueda conectarse a la red.

Dos recomendaciones generales para el Jefe del Departamento de Diseño:

- Observe claramente el equipo usado por dibujantes con experiencia.
- Comprar el mejor equipo posible. Actualmente los mejores equipos de cómputo tienen una vida útil de hasta 4 años.

### ***Escalas en dibujos***

Debido a las dimensiones reales de los miembros estructurales, es sumamente importante graficarlos en planos de taller a escalas adecuadas, sin embargo, se debe tener un concepto claro de qué sistema de unidades se empleará debido a que mucho del trabajo que los planos originan se realiza con maquinaria fabricada para trabajar en el sistema inglés. Por otro lado, según el trabajo que se

desarrolle, los operarios están (en nuestro país) acostumbrados a trabajar en sistema inglés.<sup>15</sup>

Opciones posibles al trabajar en escalas:

- Mostrar todas las dimensiones en pies como sistema de unidades primario y mostrar unidades alternativas en sistema métrico. Es decir utilizar los dos sistemas de forma simultánea.
- Acotar todas las piezas metálicas en sistema inglés (distancias entre agujeros, diámetros de agujeros, etc) y dejar únicamente las dimensiones que se trabajarán en la obra civil en el sistema métrico. Al usar este sistema, se debe aclarar debidamente en los planos.

En el sistema inglés las escalas pueden variar desde  $3/32" = 1'-0"$  hasta  $3" = 1'-0"$ . Las más usuales son:

$1/4" = 1'-0"$   
 $3/8" = 1'-0"$   
 $1/2" = 1'-0"$   
 $5/8" = 1'-0"$   
 $7/8" = 1'-0"$   
 $1" = 1'-0"$

En el sistema métrico, las escalas pueden variar desde 1:500 hasta 1:5. Las más usuales son:

1:250      1:25  
 1:200      1:20  
 1:100      1:10  
 1:50        1:05

<sup>15</sup> Los trabajadores de obra civil utilizan el sistema métrico, pero la fabricación en taller combina sistema métrico (para mediciones en tramos largos) y sistema inglés para piezas y soldaduras.

**Líneas y tipos de letras:**

La buena apariencia de cualquier dibujo es mayormente una cuestión de *uniformidad en tipos de líneas y letras*. Un buen dibujo debería combinar la uniformidad con la utilidad, se debería evitar las líneas muy finas así como la letra pequeña debido a que cuando se desee reproducir los dibujos, estos pueden no leerse debido a la suciedad o a la definición del sistema de reproducción.

Es un hecho que muchos diseñadores realizan dibujos a mano alzada para ordenar los datos disponibles y poder apreciar cómo distribuir los datos disponibles. Sin embargo, debido a la claridad y uniformidad es mejor que los dibujos sean realizados con instrumentos de dibujo o computadora.

Las siguientes son convenciones internacionales usadas en los planos de taller:

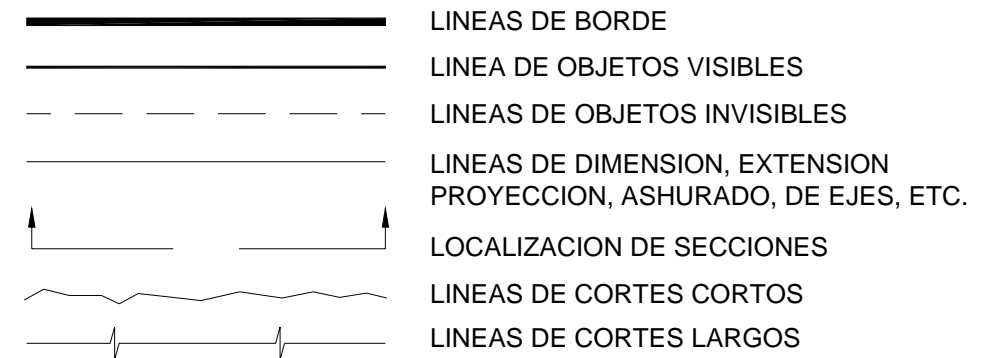


Ilustración VI.12  
 Convención de líneas para dibujos de taller



Se debe evitar personalizar los dibujos vanamente, es decir hacer adornos innecesarios, es mejor pensar la forma más simple de mostrar el detalle o la información, Ejemplo:

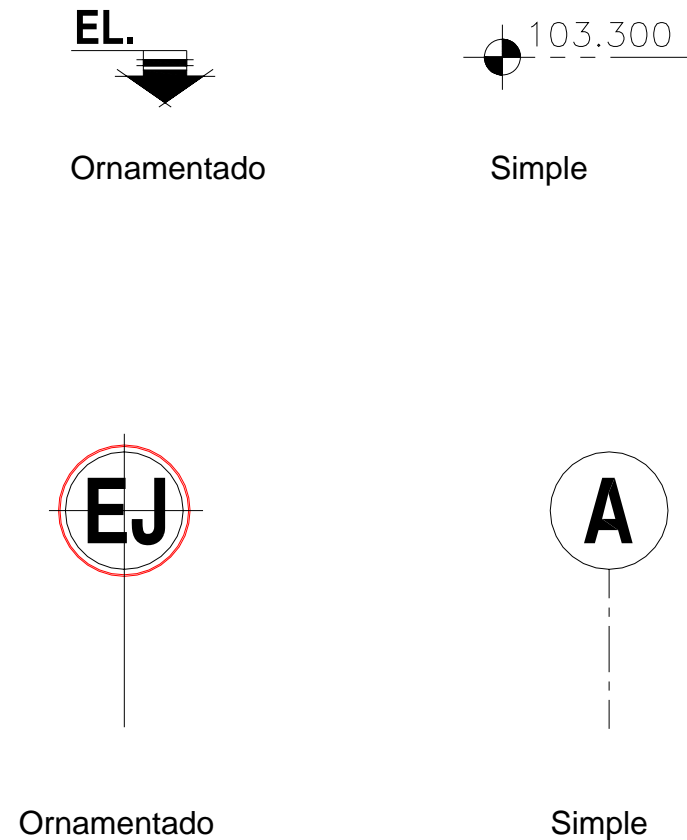


Ilustración VI.6

### **Sistema de Proyecciones Ortográficas**

Aunque los dibujos isométricos o gráficos pueden tener su lugar en la transmisión y desarrollo de ideas no contribuyen a brindar información útil en los planos de taller. Contrario a lo que se piensa, es conveniente evitar este tipo de dibujos en planos de taller.

El sistema que se usa en la industria de la construcción, es el llamado “Sistema de Proyecciones Ortográficas”, la base de este método es mostrar todas las características de un objeto usando tantas vistas acotadas como sea necesario. Las vistas muestran la forma del objeto como si se observara desde diferentes ángulos, asimismo cada vista está relacionada a otras por la posición que tiene en el dibujo y por sus dimensiones (ver ilustración VI.7)

### **Selección de Vistas Ortográficas**

La vista principal de cualquier miembro estructural debería ser aquella que contenga la mayor información relacionada a cortes, agujeros y uniones, entre menos elementos ocultos aparezcan en la vista principal más se contribuye a la claridad. Para el caso de las vigas tipo WF y canales generalmente la vista principal es aquella en la que se logra ver el alma.

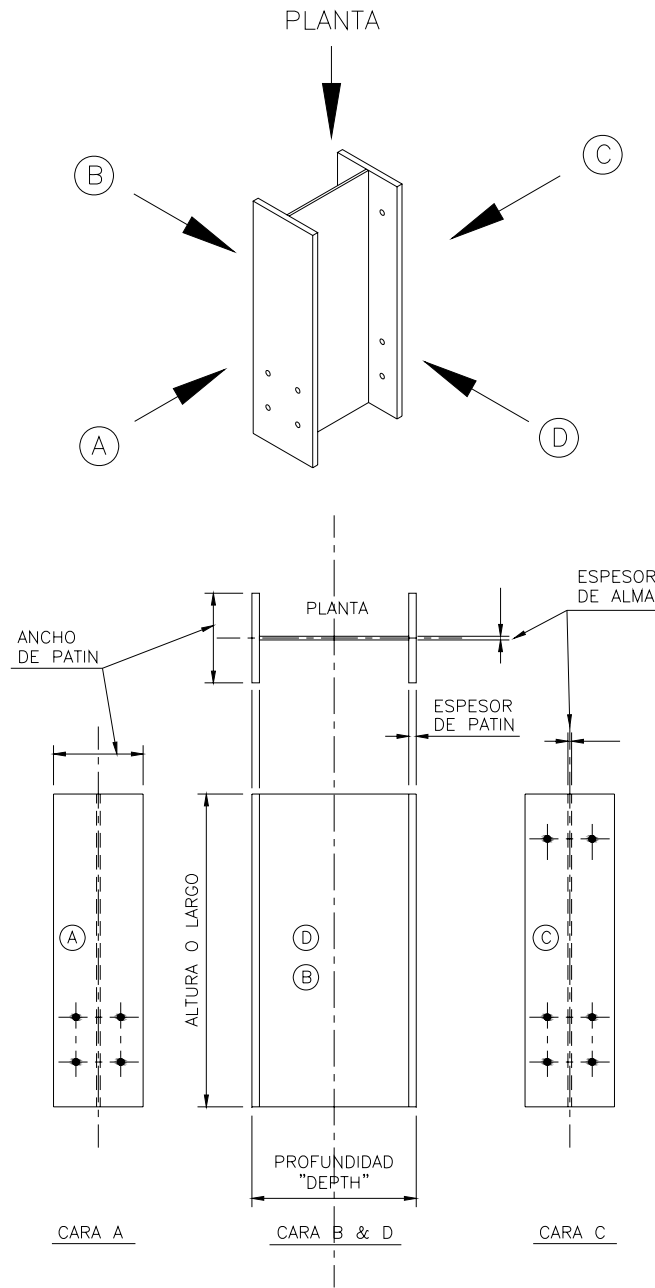


Ilustración VI.13

Una excepción a la regla resultan ser los canales (channel), pues se acostumbra dibujarlos vistos desde “la espalda”, esto se hace con el fin indicar al taller cómo trazar más fácilmente el corte en la pieza.

Mostrar bordes o líneas ocultas es una práctica generalmente aceptada en los planos de taller, pero se debería evitar aquellas líneas ocultas demasiado largas pues esto podría originar confusión.

Las vistas proyectadas deberían contribuir a la claridad y comprensión del dibujo. Si la parte superior, inferior o el extremo de un elemento no se necesitan dibujar para dar indicaciones al taller, entonces simplemente no se deben dibujar.

Debido a que la forma de las WF, S, C y L son ampliamente conocidas por todos aquellos relacionados con la fabricación de piezas de acero, aquellos dibujos que meramente ilustran su forma pueden ser omitidos.

### ***Orientación de las Vistas en el Dibujo***

La vista principal debe ser dibujada en el plano en la misma posición que el miembro tendrá en la estructura final. Una regla general es leer los planos de taller desde abajo hacia arriba y desde el lado derecho hacia el izquierdo. Las vigas son dibujadas horizontalmente y las columnas son dibujadas desde abajo hacia arriba. Las armaduras son detalladas colocando su lado derecho, en el lado derecho de la hoja de papel, indicando por medio de ejes su orientación.

### ***Secciones***

Se podría dibujar un elemento viéndolo desde su parte superior hacia su parte inferior incluyendo todos los detalles de uniones y piezas adheridas, pero como el lector imaginará, podría tener

dificultades para comprenderlo. Este problema se resuelve fácilmente por medio de dibujar vistas separadas del mismo objeto.

Cuando se necesita mostrar o dimensionar un detalle interior que no es visible desde las vistas tradicionales (superiores e inferiores), entonces se acostumbra desarrollar una sección del objeto ubicada convenientemente cerca del detalle que deseamos mostrar. La posición del corte se establece por una línea que representa imaginariamente el plano de corte, se adicionan además flechas que muestran la dirección de la vista.

Es muy importante tener presente que las secciones deben proyectarse desde la vista principal de la misma forma que las vistas de extremo o las vistas superiores. La práctica aceptada es observar que las secciones se extienden hacia abajo o hacia la izquierda. Si debido al espacio en el formato, la vista tiene que ser desplazada de su posición standard, siempre debería retener su orientación apropiada y en ningún caso rotarla a 90° o 180° grados, como sucede muchas veces en dibujos no desarrollados por profesionales.

La etiqueta o nombre que identifica a cada vista o sección, se debe abreviar a una simple letra o número. La simplificación del nombre favorece la realización de varias vistas.

### ***Vistas Auxiliares***

Cuando sea necesario representar y dimensionar una superficie que tenga pendiente con respecto al plano frontal, lateral, superior o inferior, entonces se puede desarrollar una vista auxiliar. Esta vista es perpendicular al plano en pendiente, de forma al dibujarse no presenta distorsión.

### ***Líneas de Cortes Cortos***

En los planos de taller, la línea de corte corto o “break lines” se usan para cerrar el extremo de un elemento que se muestra parcialmente en el dibujo. Estas líneas no deberían usarse para acortar vigas, columnas o secciones. Un caso especial es la dibujo de tubería en donde se usa esta línea para acortar el elemento.

### ***Líneas Auxiliares que indican continuidad***

Cuando se detallan elementos muy largos (por ejemplo vigas de puentes) donde se requiere más de una hoja, el dibujo puede ajustarse de manera que a una escala adecuada se dibuje un tramo y en otra hoja se continúe con los tramos restantes. Para esto se utilizan las líneas auxiliares que indican continuidad. Estas líneas pueden estar situadas en puntos de fácil identificación (por ejemplo: ejes de angulares o agujeros, etc.) Se deben colocar números o letras para identificar o unir de forma consecutiva el elemento.

## FABRICACIÓN DE PROYECTOS

### *Estimación y Contratación*

Un contratista de acero esta interesado principalmente en suplir todo el acero estructural que requiera un proyecto en conformidad con las normas del AISC, sin embargo, hay ocasiones cuando el contratista se enfrenta a proyectos donde el acero representa el costo principal pero existen otros rubros que tienen que ser considerados. Sea cual sea el caso, las responsabilidades del contratista estarán definidas en las especificaciones técnicas y generales del proyecto.

Los tratos o pláticas relacionadas con el proyecto se llevan a cabo entre el contratista del acero y el propietario del proyecto o en su lugar con su representante legal. En estos casos, el propietario o representante emplean a ingenieros y arquitectos para preparar los planos y especificaciones del proyecto.

El primer paso para la contratación del proyecto es llegar a un acuerdo en precio. Lograr un precio adecuado regularmente implica tener existencias en materia prima (rollos de lámina o vigas de molino), cotizar la materia prima con proveedores extranjeros y tener la maquinaria necesaria en taller. Es necesario además saber qué costos indirectos se deberán agregar a la compra de materia prima en el extranjero.

Es el departamento de ventas el encargado de cuantificar y estimar los costos mediante la preparación de listas donde se describe todo el acero a usar así como su peso.

Existen varias formas de presupuestar el trabajo en acero, a continuación se presentan algunas:

### *Costo por Porción (Lump-sum price)*

Cuando la base del pago es por “porción” o “por paquete” es particularmente importante hacer un análisis exacto de todo el trabajo que se realizará<sup>16</sup>, ya que el costo o precio será fijo. La omisión o adición de un simple *ítem* en particular podría resultar en la pérdida del contrato.

### *Precio por Libra (pound-price)*

Esta es la forma más usual en nuestro medio, se calcula el peso en libras del trabajo y se multiplica por un costo por libra de acero montado. Esta forma es adecuada para aquellos trabajos o diseños incompletos o si se estiman que habrá adiciones y cambios.

### *Precio por Porcentaje (Cost-plus price)*

En ocasiones se puede estimar un porcentaje de ganancia fijado por el contratista a lo cual se le suma los costos directos e indirectos de trabajo.

Los costos por tonelada de acero A-36 generalmente se distribuyen en los siguientes rubros:

#### *Por material:*

1. Precio de materia prima
2. Transporte al taller
3. Costos por diseño y planificación
4. Costos de fabricación
5. Costo por tipo de pintura
6. Transporte al sitio de montaje o campo

<sup>16</sup> Este trabajo a veces no está representado en planos, por ejemplo: para fundiciones especiales en concreto se podría requerir formaleas metálicas especiales que habrían que integrarse en el precio final.

*Por Instalación:*

1. Desembarco
2. Erección y Grúa
3. Pernos en Campo
4. Equipo de erección

Los costos de fabricación del acero deberán integrar por lo menos los siguientes rubros:

Costo por material prima por tipo:

- Vigas de molino
- Planchas de acero
- Costaneras
- Canales
- Lámina labrada
- Lámina perforada

Costo por platinas metálicas

Pernos A325 ó A490

Equipo

Electrodo

Costo por pulgada lineal de cortes

Costo por pulgada lineal de dobléz

Electricidad

Pintura

Imprevistos

Gastos Fijos de Administración

Porcentaje de utilidad

Impuestos

Dada la experiencia del contratista y la información de costo de proyectos similares, se puede determinar el costo de preparar los planos o dibujos de taller (aprox. 3% del valor de la tonelada) a Considere los siguientes ejemplos:

- Una estructura de bodega de 12.00 m de luz y modulación de marcos @ 6.00 m, con altura de columnas de 6.00 m y pendiente de cubierta del 25%, puede pesar entre 24 y 27# por metro cuadrado.
- Una estructura de bodegas entre 30 y 40 metros de luz con modulación de marcos @ 6.00 m y altura de columnas de 6.00 m y pendiente de cubierta del 25%, puede pesar entre 35 y 45# por metro cuadrado
- Un entrepiso de oficinas, generalmente oscila entre 95 a 110# por m<sup>2</sup>.
- Un entrepiso para parqueos oscila entre 120 y 135# por m<sup>2</sup>.

Los costos generalmente se determinan por toneladas o libras, por ejemplo el costo necesario para rolar una lámina de acero de 6' x 20' x ¼" se puede determinar fácilmente si llamamos a algún taller nacional y preguntamos el precio de rolaje. Este dato (el precio) podríamos dividirlo entre el peso de la lámina lo cual nos daría el costo por libra de acero rolado. Sin duda, el taller determinaría sus costos en base al pago de los obreros, la depreciación de la maquinaria, cualquier otro costo directo e indirecto. Teniendo el precio por libra de acero rolado podremos determinar el precio para rolar cualquier cantidad de láminas.

Antes de ser aprobado, el contratista o el departamento de ventas tiene reuniones con los propietarios del proyecto, con sus arquitectos e ingenieros. Cuando es aprobado, entonces toda la información se pasa al departamento de ingeniería y diseño el cual se encargará de hacer toda la planificación en base al calendario de trabajo acordado.

Para preparar los dibujos de taller y montaje, el dibujante debe trabajar de forma muy cercana con el ingeniero o arquitecto encargado del proyecto para lograr la aprobación final de los

dibujos de diseño arquitectónico, posteriormente estos pueden ser desarrollados por el propio departamento de diseño del contratista.

El contratista es el responsable ante el propietario del buen desarrollo de todo el proyecto y será el encargado de mantener informado a todas las personas involucradas en el proyecto.

Como primera etapa de control se debe asignar al proyecto un número de control. Este número se usa para identificar todos los dibujos, papeles, materia prima y finalmente las piezas terminadas del proyecto. Por razones relativas al tiempo de ejecución o montaje, el proyecto puede ser dividido en contratos separados. En estos casos, se deberá asignar un número diferente para cada contrato logrando de esta forma separar todo el flujo de trabajo a través del departamento de diseño, dibujo, producción y montaje.

En la mayoría de talleres, el departamento de contrataciones prepara una hoja de datos de operación (algunas veces se llama: hoja de trabajo, orden de producción o memorando de contrato), en esta hoja debería aparecer la siguiente información:

- Proyecto
- Número de Contrato
- Cliente
- Propietario
- Ingeniero
- Arquitecto
- Planos de Contrato
- Especificaciones Generales
- Especificaciones Técnicas

Igualmente se debería tener un resumen de la siguiente información:

- ¿Qué grado de acero se usará?
- ¿Qué tipo de pintura será requerido?
- ¿Qué tipo de acabado en las conexiones de campo deberán dejarse?
- ¿Quién tendrá a cargo la supervisión del proyecto?
- ¿Hay criterios unificados en los tiempos de entrega?
- ¿Qué tipo de método se usará para transportar las piezas?
- ¿Cuáles serán las bases de pago?
- ¿Qué tipo de información adicional se necesita para crear los dibujos de taller?
- ¿Se requerirán certificados del grado de acero a usar?
- ¿Quiénes deberán aprobar los dibujos de taller?
- ¿Cómo se subdividirá los envíos del acero?
- ¿Qué ítem se excluirán del contrato?
- ¿Qué requerimientos se deberán considerar para el montaje final?
- ¿Cómo se tratarán las desviaciones del diseño original?

La mayoría de esta información se provee en la planificación y en las especificaciones técnicas.

La práctica relativa al diseño, fabricación y montaje de estructuras de acero está normada y descrita en el *AISC Code of Standard Practice for Steel Buildings and Bridges*. En un contrato internacionales este código podría ser parte de los documentos del contrato.

Todos los documentos del contrato deberán estar disponibles para todos los involucrados en el proyecto.

### DEPARTAMENTO DE DIBUJO

Todas las órdenes de fabricación empiezan con los planos elaborados por el departamento de diseño o dibujo. Este departamento debe tener establecido un proceso funcional que ordena el flujo de la información hacia el taller de fabricación. Se requiere una gran cantidad de papel para desarrollar todo este trabajo.

Debido al constante flujo de información cuyo origen puede ser “el cliente” debe tenerse un equipo revisor de planos. Muchas veces, esta tarea recae sobre el jefe del departamento de dibujo (arquitecto o ingeniero). Deberá tratarse de formar un grupo idóneo de *dibujantes*<sup>17</sup>, de esta forma ellos mismos podrán revisarse mutuamente los trabajos.

Estas son las actividades que realiza el departamento de dibujo, el orden obedece a las secuencias:

- Preparar órdenes de compra de los materiales requeridos<sup>18</sup>

<sup>17</sup> Más apropiadamente “detalladores” del inglés “detailers”. Estas personas deberán ser capacitadas en los procesos de producción, soldadura, tener nociones de cómo se comportan las estructuras y tener la suficiente creatividad para proponer o definir uniones de fácil fabricación.

<sup>18</sup> En barco, desde Miami a Puerto Barrios generalmente se toman entre 2 y 3 semanas.

- Desarrollar planos de Montaje
- Preparar el sistema de marcas, índice y numeración de hojas
- Preparar detalles típicos, hojas de trabajo estándares y hojas de cálculo
- Hacer y Chequear planos de taller<sup>19</sup>
- Escribir las listas de materiales
- Asegurarse de la aprobación de los dibujos
- Preparar lista de requerimientos de montaje
- Cálculo de los pesos
- Preparar lista de envíos
- Preparar los datos de ingresos para el equipo controlado por computadora<sup>20</sup>

<sup>19</sup> Es importante dibujar todas las piezas con sus dimensiones reales y ver su interrelación con otras, debido a que estos planos deberán indicar cortes exactos, localización de agujeros y todas las características necesarias sería difícil lograrlo si no se desarrollan dibujos exactos.

<sup>20</sup> En nuestro país la empresa Aceros Prefabricados, S. A. utiliza máquinas semi-automáticas para el taladrado de agujeros en vigas. Además se cuenta con cortadora de plasma y oxidas las cuales son alimentadas por información numérica.

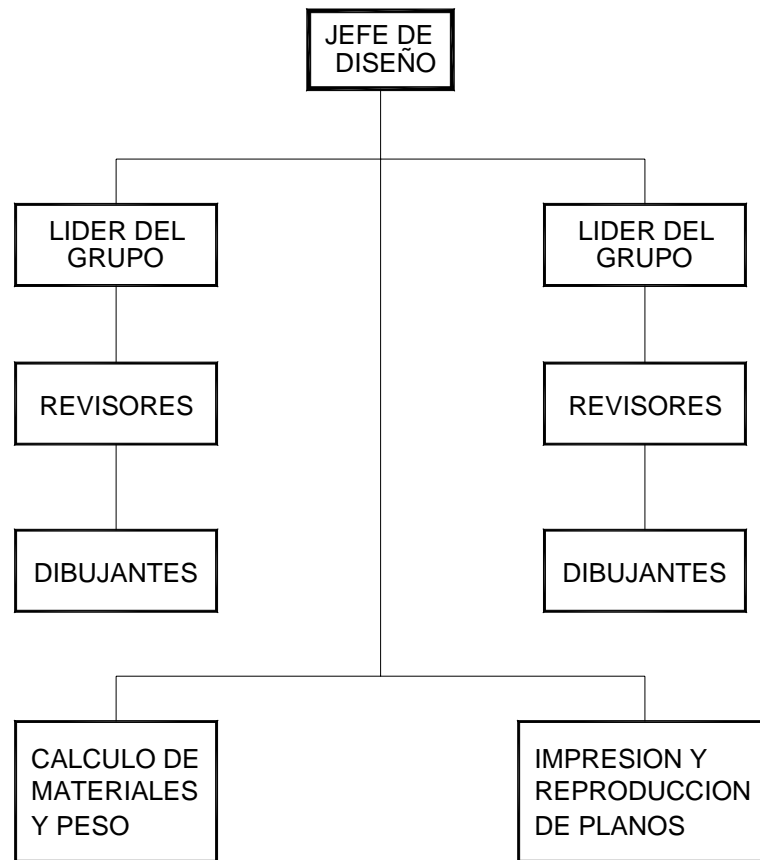


Ilustración VI.14

### **Planos de Montaje**

Si es necesario, se deberán preparar los planos de montaje que deberán incluir los nombres de todas las marcas o miembros nombrados con su nombre de envío. Asimismo, se indicará el tipo de uniones y el tipo de soldadura de campo a usar. En algunos

casos especiales, será necesario mostrar cómo la grúa deberá izar ciertas marcas muy pesadas y de difícil colocación.

Los planos de montaje incluyen una planta de anclajes en donde se localizan el tipo de pernos y el tipo de columnas a ubicar. Este es uno de los primeros planos que se realizan para el proyecto.

Para ahorrar tiempo, se usan los planos de producidos por el departamento de ingeniería a los cuales con el tiempo y el desarrollo del proyecto se les va agregando la información respectiva. La preparación de este plano debería preceder a los planos de taller.

Para proyectos de gran magnitud, el proyecto se divide en etapas de montaje, los planos de montaje deben indicar la información relativa al punto de inicio de montaje o los criterios establecidos. La utilidad de tener clara toda esta información favorece la utilización de grúas en el proyecto, pues se pueden localizar y estimar el tiempo de trabajo en un localización determinada. El avance de la producción de piezas en el taller, debería armonizar con la programación de montaje.

### **Sistema de Marcas, Hojas Índice y Numeración de Planos**

El uso de algunos sistemas de prefijos y sufijos en la numeración de los planos de taller y marcas de envío facilita de manera notable las operaciones del taller. A menudo reduce la cantidad de tiempo de fabricación y la información que debe ser pintada en las marcas o piezas de envío.

### **Sistema de Marcas e Items**

Consiste en la utilización de un nombre o marca para una pieza que pueda ser transportada como una sola unidad en un low boy<sup>21</sup>.

<sup>21</sup> Estas dimensiones pueden ser de 12.00 hasta 14.00 metros de largo por 3.00 de alto y 1.80 de ancho (con señales hasta 2.50 m). Sin embargo, es importante considerar la



Todas las piezas de un proyecto son debidamente consideradas para su transporte y a partir de esta información se pueden detallar de forma separada.

Las marcas, están compuestas de varios ítem o artículos que están soldados, pernados, ajustados o unidos entre sí. La configuración estructural de varios ítem conforman la marca. Para comprender este sistema se ha adjuntado en el presente capítulo un pequeño techo de estacionamiento.

Tomemos por ejemplo una columna o viga de acero, sus ítem pueden ser platinas, angulares, la misma sección WF y cualquier accesorio que deba incluirse para su correcta utilización en montaje. A todo este conjunto de piezas se le llama con un nombre o marca. El plano de montaje debe indicar como ubicar, rotar, transportar, soldar y dar los acabados finales a todo el conjunto de marcas del proyecto.

En ocasiones se requerirán de piezas pequeñas que se pueden enviar de forma separada (este es el caso de pernos o material aislante, cables, etc.) En este caso estas piezas también deben tener su marca.

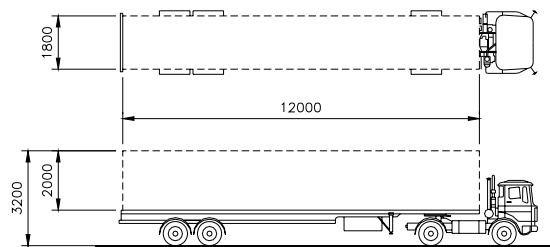


Ilustración VI.15 Capacidad de transporte típica

capacidad de resistencia de los puentes y cualquier obstáculo físico para el transporte en estas dimensiones. Esto es particularmente importante para construir estructuras como techos, puentes o tanques en el interior de la República.

### **Hojas Índice**

Cuando el número de plano no es parte de la marca de envío, se necesita preparar un índice que consiste en un dibujo maestro que indique la cantidad total de marcas y la designación de la numeración de planificación. Esta información es útil para el fabricante y sus proveedores. De esta forma, todas las personas involucradas pueden comparar, revisar y chequear que toda la información que se esté generando armonice con la obra.

La utilidad de las hojas índice puede verse al construir un edificio, un complejo comercial o cualquier proyecto de gran magnitud. Todo el proyecto se puede subdividir por sectores o niveles y cada plano puede tener un prefijo destinado al sector o nivel donde se trabaje, de esta forma se pueden detallar piezas fácilmente identificables al sector.

### **Numeración de Planos**

La numeración de planos debe ser un asunto establecido en razón a la envergadura del proyecto aunque algunos conceptos generalmente pueden ser fácilmente aplicados.

Primeramente, se debería tener una visión global de todos los rubros implicados en el desarrollo y montaje del proyecto:

1. Cimientos
2. Obra Civil
3. Columnas
4. Anclajes
5. Vigas Principales
6. Vigas Secundarias
7. Techos
8. Ventajas
9. Tuberías
10. Drenajes

## 11. Instalaciones

Cada uno de estos grandes rubros podría representar un número o sección del nombre de cada plano, de esta forma se identifica fácilmente un grupo de planos.

Por ejemplo, supongamos que tenemos proyectado la construcción de 6 edificios diferentes en un mismo complejo.

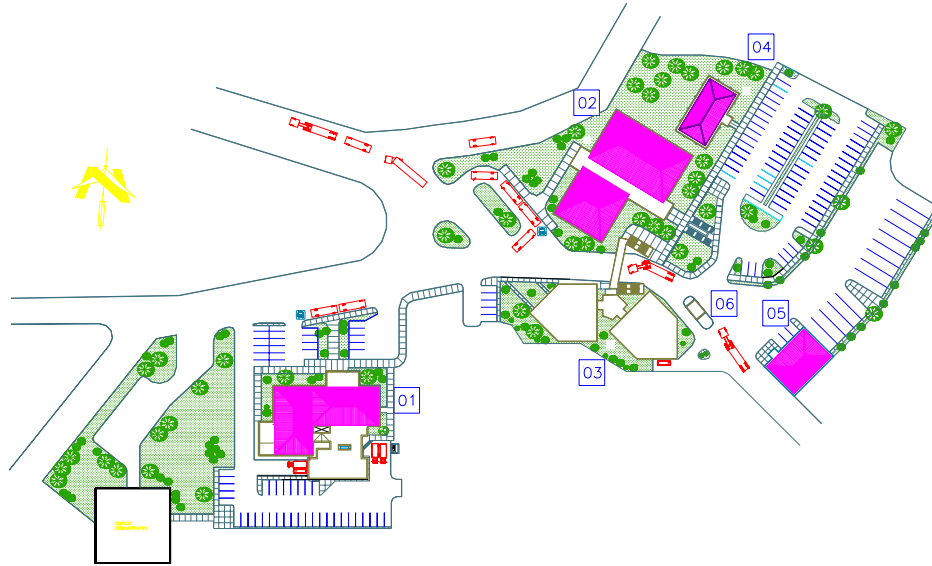


Ilustración VI.16 Servicios de Personal "Cementos Progreso"

Y en cada edificio tenemos los rubros anteriormente descritos. Entonces podemos definir un sistema de planificación de la siguiente forma:

Podemos asignar un número de proyecto según nuestro correlativo de trabajo interno (supongamos que es nuestro trabajo número 25 del presente año 06). Además podemos agregar dos dígitos más los cuales ubicará el número de edificio a trabajar. Posteriormente

podemos describir el área de trabajo con otros dos dígitos. Finalmente podemos indicar el número de revisión del plano con otros dos dígitos.

*Entonces nuestro sistema de planificación queda:*

025-06-01-01-00

*Lo cual significa el plano de cimientos del edificio 01 del proyecto 025 del año 06.*

### **Lista de Materiales**

Para ayudar al taller a fabricar todas las piezas, se debe suplir con cada plano de taller una lista de materiales en donde se puedan tener las características de todas las piezas que se usarán para la elaboración.

Esta lista de materiales debe contener:

- El Nombre de la Marca y cantidad
- El Numero de Ítem de cada marca y su cantidad
- Características del acero a usar
- Dimensiones de cada pieza
- Peso (si es requerido)
- Lista de pernos y cualquier accesorio que deba ser incluido

## CAPÍTULO VI. CRITERIOS PARA EL DISEÑO ARQUITECTÓNICO CON ACERO

LISTA DE MATERIALES						
Marca No.	Item No.	# Req.		No. Req. Por Ensemb.	Descripcion de Item	Descripcion del Material
		U1	U2			
VL-1		1			VIGA VOLADIZO POR DETALLE	
	1			1	ALMA	0.21 M <sup>2</sup> X 6 [1/4"]
	2			1	PATIN INFERIOR	10 [3/8"] X 102 X 1490
	3			1	PATIN SUPERIOR	10 [3/8"] X 102 X 1495
	4			4	PORTACOSTANERA	CANAL 50 X 45 X 1.5 [1/16"] X 450
	5			1	PLACA	10 [3/8"] X 130 X 260
VL-2		2			VIGA VOLADIZO POR DETALLE	
	1			1	ALMA	0.17 M <sup>2</sup> X 6 [1/4"]
	2			1	PATIN INFERIOR	10 [3/8"] X 102 X 1290
	3			1	PATIN SUPERIOR	10 [3/8"] X 102 X 1295
	4			4	PORTACOSTANERA	CANAL 50 X 45 X 1.5 [1/16"] X 450
	5			1	PLACA	10 [3/8"] X 130 X 260
VL-3		7			VIGA VOLADIZO POR DETALLE	
	1			1	ALMA	0.64 M <sup>2</sup> X 6.35 [1/4"]
	2			1	PATIN INFERIOR	10 [3/8"] X 102 X 2991
	3			1	PATIN SUPERIOR	10 [3/8"] X 102 X 3000
	4			6	PORTACOSTANERA	CANAL 50 X 45 X 1.5 [1/16"] X 450
	5			1	PLACA	10 [3/8"] X 130 X 400
CV-1		1			CANAL SOPORTE VOLADIZO	
	1			1	CANAL	CANAL 152 X 51 X 6 [1/4"]
	2			3	PORTACOSTANERA	CANAL 50 X 45 X 1.5 [1/16"] X 100
	3			3	PLACA A PARED	10 [3/8"] X 150 X 260
SF-13		1			SOPORTE FORRO Y FLASHING	C 8" AMERICAN X 1/16" X 3593
SF-14		5			SOPORTE FORRO Y FLASHING	C 8" AMERICAN X 1/16" X 980
SF-15		1			SOPORTE FORRO Y FLASHING	C 8" AMERICAN X 1/16" X 4435
SF-16		1			SOPORTE FORRO Y FLASHING	L 100 X 50 X 1.5 [1/16"] X 33000
CP-1		1			COLUMNA PARA PARED	
	1			1	CANAL	W8X15 X 3730
	2			1	PLACA	10 [3/8"] X 225 X 150
PC-1		14			PORTACOSTANERA TIPICO	10 [3/8"] X 225 X 150

Ilustración VI.17 Ejemplo de lista de materiales

### **Cálculo de pesos**

Es importante conocer cómo calcular los pesos en las estructuras de acero. Esto puede ser requerido en cualquier momento por efectos de cotización, transporte, montaje o simplemente por efectos de fabricación.

El Manual de AISC contiene los pesos de todo el acero que se produce en los molinos<sup>22</sup> (Vigas de cualquier tipo, canales, angulares, planchas, etc). Sin embargo, muchas veces se requieren piezas de diferentes formas y dimensiones que tienen que ser fabricadas o roladas en el taller, para lo que necesitaremos calcular el peso respectivo.

Una forma práctica de averiguar el peso de cualquier pieza es conocer el peso por pie lineal de una pulgada cuadrada de acero (3.40 libras por pie lineal). Entonces, a cualquier sección de acero le podemos sacar su área en pulgadas cuadradas, y luego multiplicarlo por el factor de 3.40 y tendremos su peso por pie, posteriormente si sabemos su longitud en pies, sabremos el peso total de la pieza.

**Notas Importantes al ejemplo de planificación en Acero mostrado a continuación:**

### **Plano 1**

Nótese la uniformidad de textos (tipos y alturas). El texto deberá ser lo más claro posible para lograr una buena reproducción. El ejemplo muestra el tipo "romans" con una altura de 2 mm en un plano A2 (reducido).

<sup>22</sup> La nomenclatura de vigas de molino nos indica el peso, por ejemplo: W10X15. El primer número "10", nos indica el peralte de la viga, el segundo número "15" nos indica el peso por pie lineal.

El primer plano, muestra en el área central la “Elevación Lateral” y utiliza una vista auxiliar para mostrar el techo. Esto logra ubicar y comprender en solamente 2 vistas perfectamente el objeto de diseño.

Nótese que mediante círculos e indicaciones de flecha, se llevan los detalles mostrados en la Elevación Lateral a un grado más amplio de detalle. Esta indicación resulta de fácil comprensión, pues evita nombrar con números o letras los detalles, dejando éstos últimos a dibujos más complejos.

Cuando se requieren dibujos detallados más complejos, se utilizan un triángulo como simbología (puede ser cualquier otra) para mostrar el número de detalle y la hoja de plano en donde se podrá encontrar. De manera que el detalle 1/1 llevará al lector al detalle #1 de la hoja #1.

Estos detalles deben ser mostrados en la forma que se miran de dónde se extraen: por ejemplo, nótese el detalle 2/1 de la marca 9-053-J1. Si es necesario para mayor claridad constructiva, se pueden desarrollar cuantas vistas auxiliares u ortogonales sean necesarias. Lo más importante debe ser transmitir la información de la manera más clara posible.

La nomenclatura mostrada en el plano indica que todas las secciones son nombradas por letras del alfabeto y todos los detalles son numerados.

En este ejemplo se uso el número de plano “9-053”, como parte integrante de la marca de envío. Esto se requiere cuando el taller fabrica piezas para muchos proyectos.

Cada “marca” representa un objeto construido o fabricado en taller que puede contener muchas piezas individuales (o *ítems*) y que al ser transportado al campo se va conformado en una sola pieza. Sin embargo, también abran marcas individuales (es decir

conformadas por un solo elemento) que se envían sueltas al campo. El ejemplo muestra las siguientes marcas: 9-053-M1, 9-053-V1, 9-053-J1, 9-053-T1, 9-053-BR1

Nótese la forma en que la acotación muestra puntos geométricos importantes en el trabajo. (Ver la acotación general en la “Elevación Lateral”).

Nótese el detallado de los ítems 1 al 5 de la marca 9-053-M1, en la elevación derecha del detalle 1/1 no se muestra ninguna acotación, sino simplemente la colocación exacta de los ítems.

La forma de acotación de los ítems 1 al 5 muestra una forma que ayuda a reducir los errores de fabricación. Las cotas interiores no se “cierran”, esto es para permitir una tolerancia en la fabricación mostrando las ubicaciones (de pernos o dimensiones) que son más importantes.

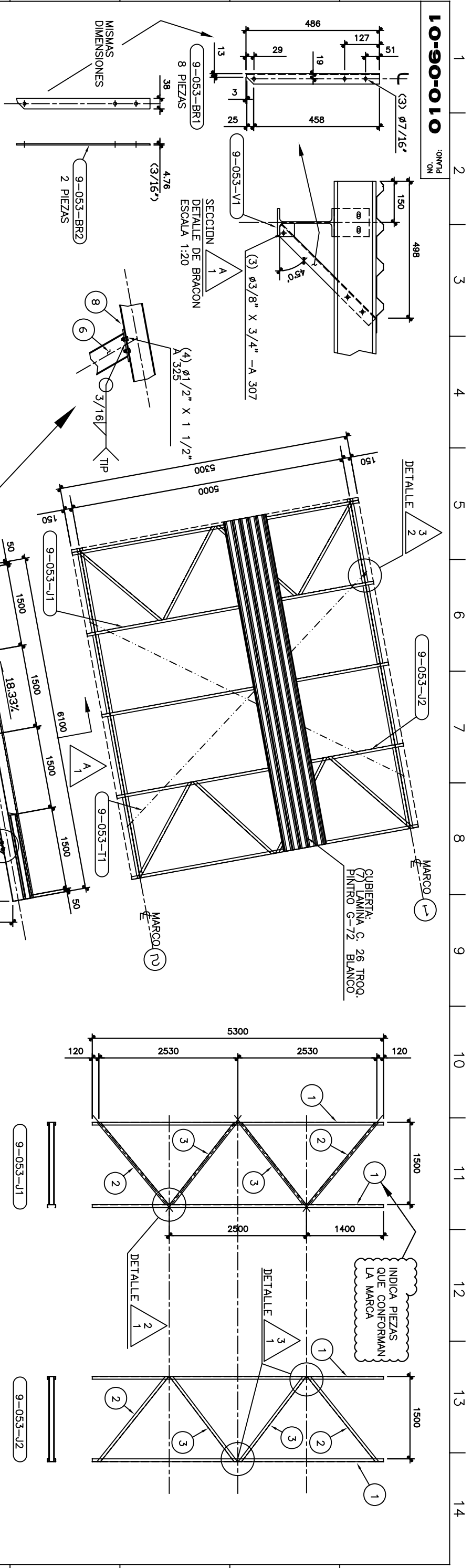
## **Plano 2**

Este plano muestra mediante vistas ortogonales la ubicación y cortes de marcas e ítems.

Todos los elementos dibujados deben representar exactamente la geometría real. Es decir, todas las láminas deben ser representadas con su espesor real, igualmente las costaneras y cualquier tipo de pieza. No se deben permitir representaciones simplificadas.

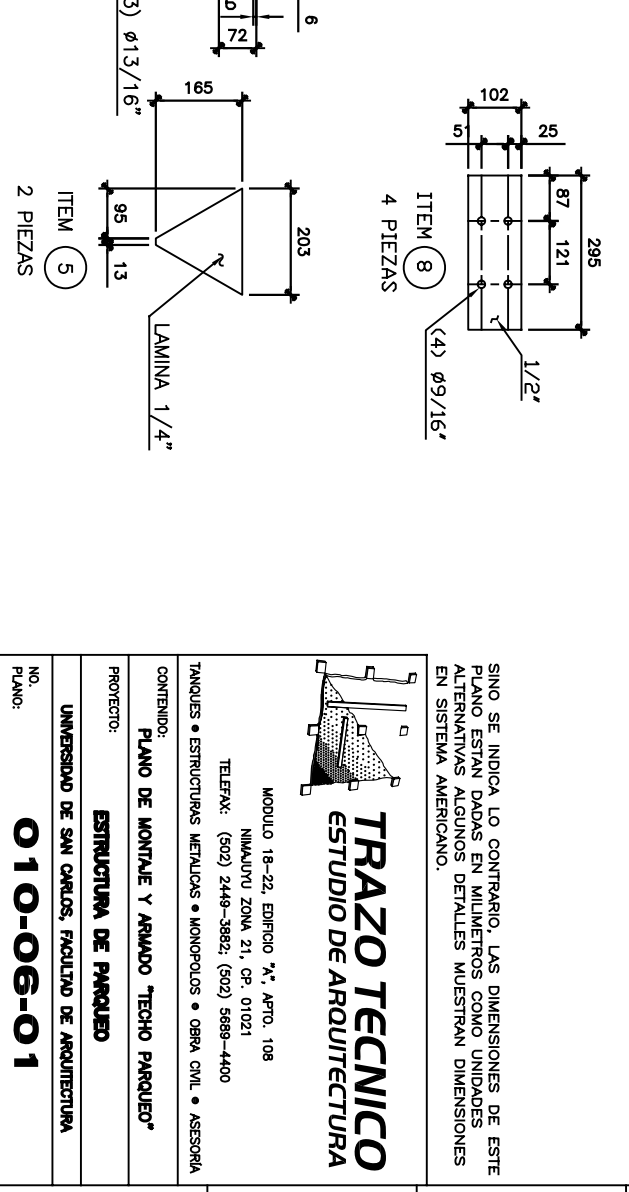
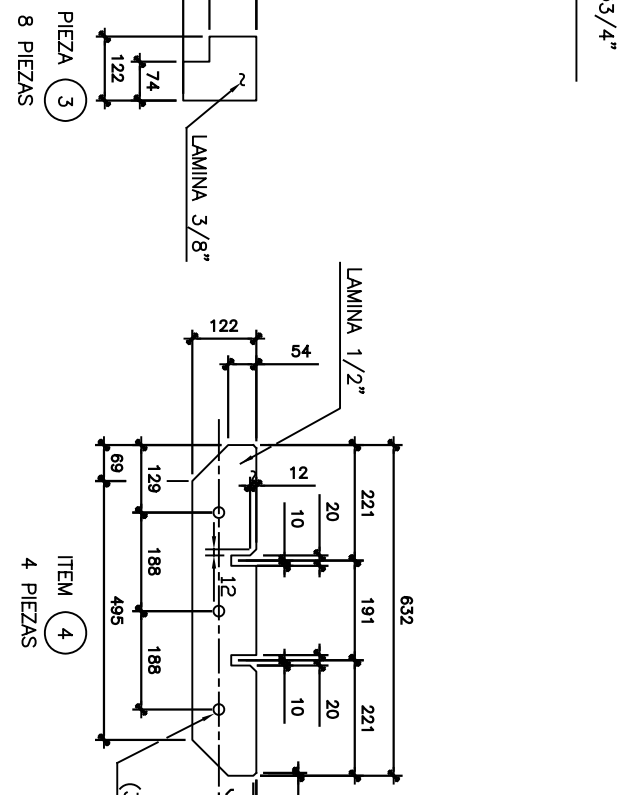
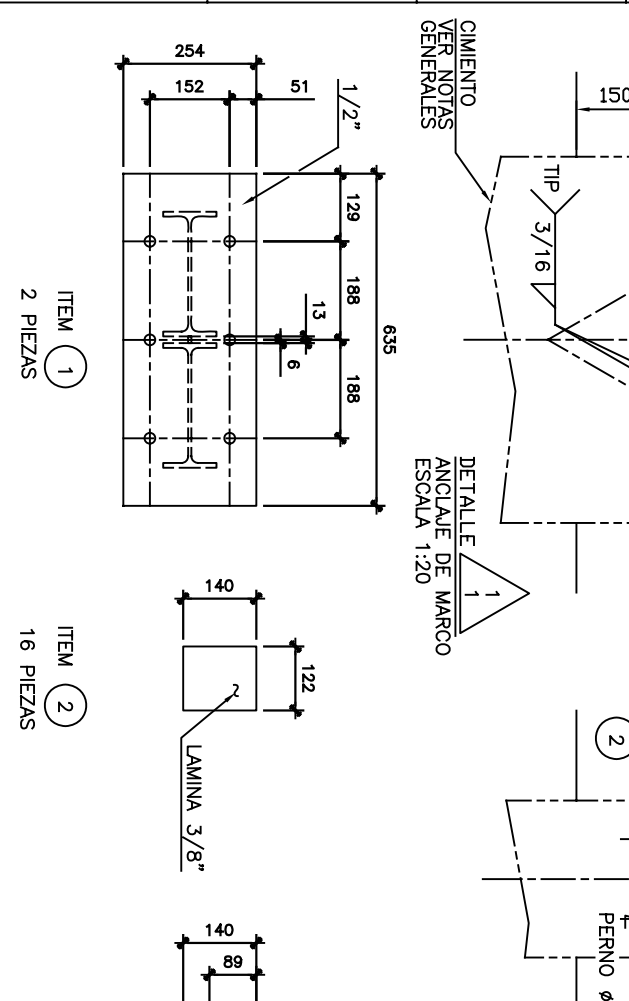
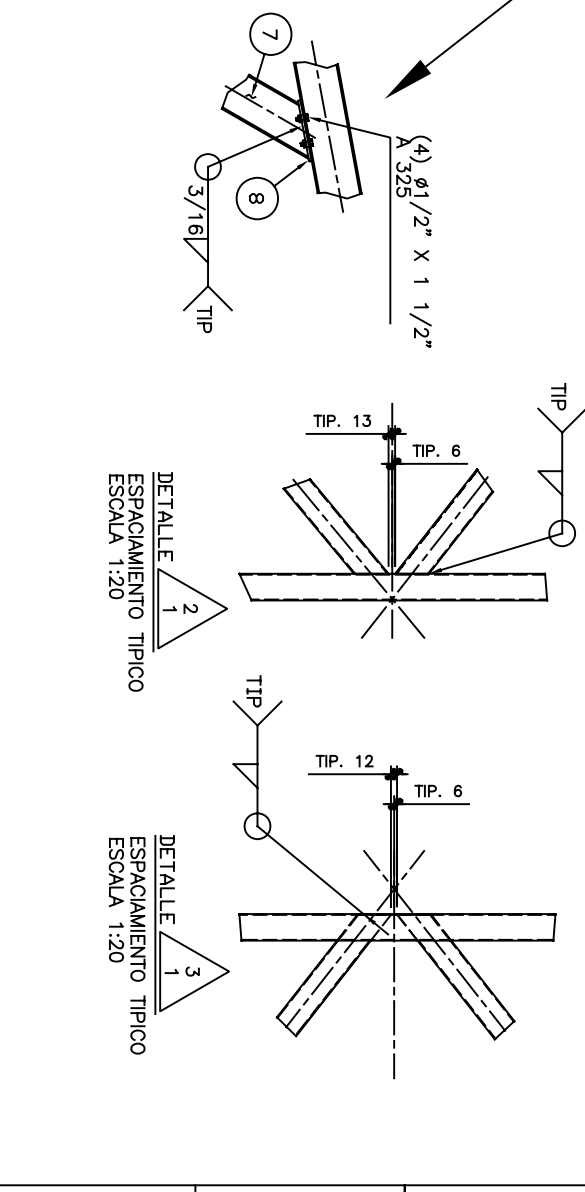
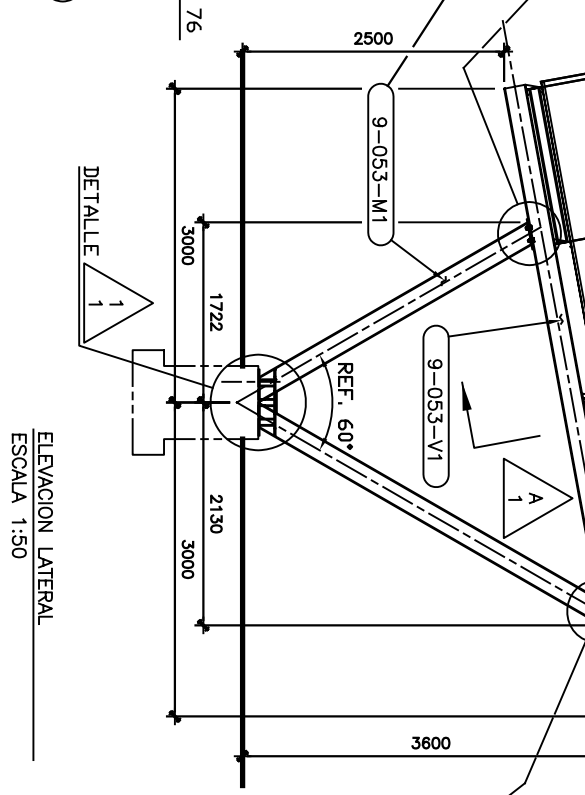
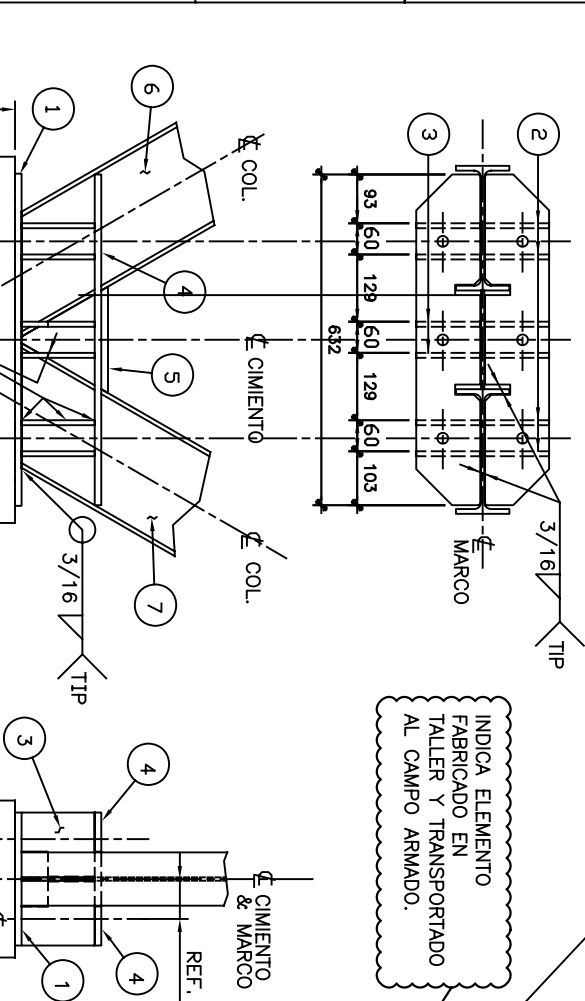
Todas las notas: Generales, al Taller y al Montaje, deberán estar claramente identificadas.

La lista de materiales muestra claramente los nombres de las marcas y su número. Así como la cantidad de ítems que pertenecen a cada marca. Se encuentra su descripción y el elemento que la conforma con sus largos y norma de fabricación.



INDICA ELEMENTO FABRICADO EN TALLER Y TRANSPORTADO AL CAMPO ARMADO.

INDICA PIEZAS QUE CONFORMAN LA MARCA



SINO SE INDICA LO CONTRARIO, LAS DIMENSIONES DE ESTE PLANO ESTAN DADAS EN MILIMETROS COMO UNIDADES ALTERNATIVAS ALGUNOS DETALLES MUESTRAN DIMENSIONES EN SISTEMA AMERICANO.

**TRAZO TECNICO**  
ESTUDIO DE ARQUITECTURA

MODULO 18-22, EDIFICIO "A", APTO. 108  
NIMAJUVU ZONA 21, CP. 01021

TELÉFAX: (502) 2449-3882; (502) 5889-4400

TANQUES • ESTRUCTURAS METÁLICAS • MONOPULOS • OBRA CIVIL • ASESORIA

CONTENIDO: **PLANO DE MONTAJE Y ARMADO "TECHO PARQUEO"**

PROYECTO: **ESTRUCTURA DE PARQUEO**

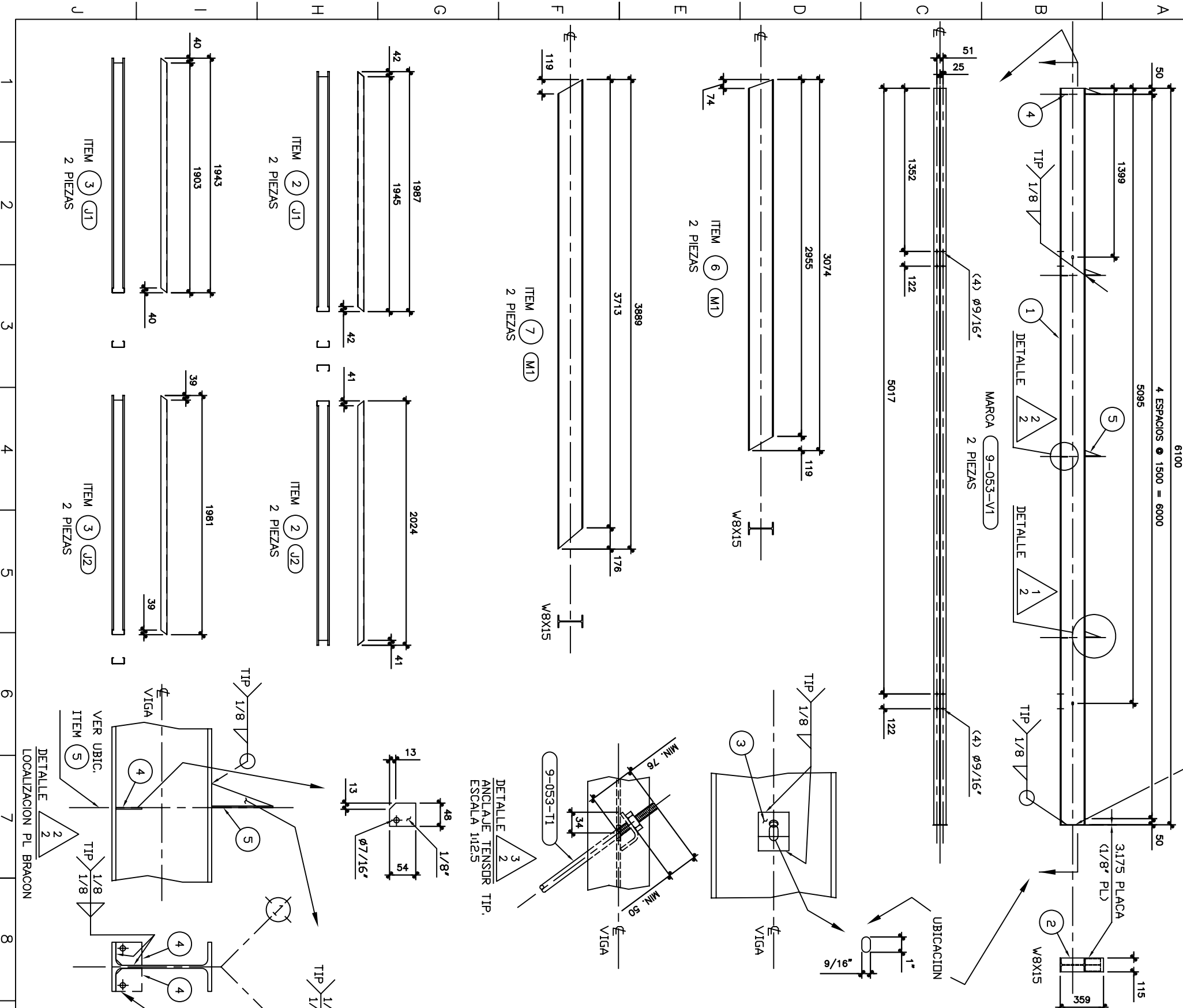
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS, FACULTAD DE ARQUITECTURA

NO. PLANO: **010-06-01**

Marca/Item No.	# Req. UJ	No. Req. Por Estruct.	Descripcion Item	Descripcion del Material	Espec. Mat.
M1	2		MARCO POR DETALLE		
1	1	1	PLATINA BASE	254 X 635 X 12.7 (1/2")	ASTM A36
2	8	1	ATIESADOR	122 X 140 X 9.525 (3/8")	ASTM A36
3	4	2	PLATINA (segun detalle)	122 X 140 X 9.525 (3/8")	ASTM A36
4	2	1	PLATINA (segun detalle)	122 X 632 X 12.7 (1/2")	ASTM A36
5	1	1	PLATINA (segun detalle)	165 X 203 X 6.35 (1/4")	ASTM A36
6	1	1	COLUMNA (segun detalle)	W8X15 X 3074	ASTM A36
7	1	1	COLUMNA (segun detalle)	W8X15 X 3889	ASTM A36
8	2	2	PLATINA UNION	102 X 295 X 12.7 (1/2")	ASTM A36
	16		PERNOS	Ø9/16" X 1 1/2"	A325
V1	2		VIGA POR DETALLE		
1	1	1	VIGA	W8X15 X 6100	ASTM A36
2	1	1	TAPA	115 X 359 X 3.175 (1/8")	ASTM A36
3	2	2	PORTATENSOR	ANG. FAB. 51 X 39 X 4.76 (3/16")	ASTM A36
4	4	4	PL BRACON	PL 48 X 54 X 3.175 (1/8")	ASTM A36
5	4	4	PORTACOSTANERA	1/8" - SEGUN DETALLE	ASTM A36
	46		PERNOS	Ø3/8" X 3/4"	A307
J1	1		JOIST POR DETALLE		
1	2	2	HORIZONTALES	COST. 6" X 1/16" X 5300 AMERICAN	ASTM A36
2	2	2	DIAGONALES	COST. 4" X 1/16" X 1987 AMERICAN	ASTM A36
3	2	2	DIAGONALES	COST. 4" X 1/16" X 1943 AMERICAN	ASTM A36
J2	1		JOIST POR DETALLE		
1	2	2	HORIZONTALES	COST. 6" X 1/16" X 5300 AMERICAN	ASTM A36
2	2	2	DIAGONALES	COST. 4" X 1/16" X 2024 AMERICAN	ASTM A36
3	2	2	DIAGONALES	COST. 4" X 1/16" X 1981 AMERICAN	ASTM A36
BR1	8		BRACON	ANG. FAB. 38 X 38 X 3.175 (1/8")	ASTM A36
BR2	2		BRACON	LAMINA 38 X 486 X 4.76 (3/16")	ASTM A36
T1	2		TENSOR	Ø1/2" X 6372 - 3" ROSCADO EN EXT. ASTM A36	

NOTAS GENERALES:

- LOS CIMIENTOS SERAN DISEÑADOS EN PLANTA VILLANUEVA.
  - A TODOS LOS PERFILES METALICOS EXCEPTO MATERIALES GALVANIZADOS, SE LES APLICARA 1 MANO DE ANTICORROSIVO ROJO OXIDO, MARCA FULLER, RETOCAR EN OBRA SI ES NECESARIO.
  - LA LAMINA DE CUBIERTA SERA TROQUELADA BLANCA G-72 CAL. 26 + ACCESORIOS DE FIJACION.
  - MARCAR DEBIDAMENTE LAS PIEZAS PARA SU TRANSPORTE E INSTALACION.
- NOTAS A TALLER:
- CADA SOLDADURA EN LAMINA Y PERFILES ESTRUCTURALES, ESTA EN CONFORMIDAD CON "THE AMERICAN WELDING SOCIETY" (AWS)
  - TODAS LAS DIMENSIONES ESTAN DADAS EN MILIMETROS, EXCEPTO LA SIMBOLOGIA DE SOLDADURA LA CUAL ES SEGUN AWS. DIAMETROS DE AGUJEROS ESTAN DADOS EN PULGADAS.



SINO SE INDICA LO CONTRARIO, LAS DIMENSIONES DE ESTE PLANO ESTAN DADAS EN MILIMETROS COMO UNIDADES ALTERNATIVAS ALGUNOS DETALLES MUESTRAN DIMENSIONES EN SISTEMA AMERICANO.

**TRAZO TECNICO**  
ESTUDIO DE ARQUITECTURA

MODULO 18-22, EDIFICIO "A", APTO. 108  
NIMAVIUVI ZONA 21, CP. 01021  
TELÉFAX: (502) 2449-3882; (502) 5889-4400

TANQUES • ESTRUCTURAS METALICAS • MONOPULOS • OBRA CIVIL • ASESORIA

CONTENIDO: **PLANO DE MONTAJE Y ARMADO "TECHO PARQUEO"**

PROYECTO: **ESTRUCTURA DE PARQUEO**

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS, FACULTAD DE ARQUITECTURA

NO. PLANO: **010-06-02**

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

No cabe duda que el pasado siglo ha sido testigo de un progreso tecnológico sin precedente que ha afectado todas las actividades humanas. En este trabajo, se ha examinado cómo hace apenas 100 años el uso del acero en la construcción mundial era considerado casi una utopía de construcción<sup>1</sup>. Hoy, sin embargo, sería difícil concebir la industria nacional y la construcción en general sin el uso de este material.

La historia del hombre sobre la tierra ha sido de constante transformación de la técnica para cubrir sus necesidades, desde la historia antigua hasta la actual. Esto quedó patente en el capítulo segundo de este trabajo en el cual se comentaron algunos factores y cambios sociales que produjeron un avance al uso del acero como material constructivo. La suma de procesos e inventos, propició la utilización del acero. Desde las grandes producciones del *Crystal Palace* o la Exhibición Mundial de París de 1889 hasta los proyectos recientes de las páginas 41 a la 44. Así, se ha logrado expresar mediante la arquitectura la tecnología constructiva del momento. De forma similar, en pequeña escala, en nuestro país ya se tienen los procesos industriales y la técnica necesaria para el desarrollo de proyectos de arquitectura en acero. Prueba de ello son la gran variedad de proyectos que se han realizado en los últimos años.

Las construcciones de acero ya forman parte de nuestra arquitectura, entonces en cierto sentido también forman parte de nuestra vida. Nuestra profesión nos ha dado el privilegio de ser participes en la modificación de nuestro entorno físico, por lo que debemos tomar conciencia de esa responsabilidad. Y ¿cuál es la mejor forma que conociendo más de cerca los diferentes aspectos (históricos, estructurales y técnicos) que pueden influir en la mejora de nuestros diseños?

<sup>1</sup> Según el comentario de Walter Benjamín citado en el texto que aparece al inicio de este trabajo.

Recordar algunos conceptos estructurales fue el propósito del tercer capítulo, este conocimiento deberá afectar notablemente las propuestas arquitectónicas pues como aprendimos “el conocimiento en detalle del recorrido de cargas permite aclarar cómo las partes de que se compone una estructura resiste los esfuerzos internos. Este conocimiento [...], nos sirve para orientar la mejor configuración o forma estructural que debe tomar cada parte del recorrido de cargas”

Asimismo, lograr visualizar algunas configuraciones de estructuras a través de los ejemplos mostrados en el capítulo cuarto, deberá proporcionar un criterio estructural y espacial de qué estructura deberá ser apropiada para cubrir cierta necesidad. Estos ejemplos no deberían en ningún momento considerarse como *toda la información disponible*, sino por el contrario deberían de servir como una base primaria de investigación. Se encontrará mayor información en estándares de arquitectura, los mismos códigos estructurales o consultando con algún especialista en la materia. La información presentada a través de tablas e ilustraciones es simplemente una guía que nos puede proporcionar algunos criterios para nuestros proyectos de arquitectura.

En el capítulo quinto, se han examinado algunos proyectos de arquitectura de reconocido prestigio. El propósito sido lograr visualizar la integración de la estructura de acero en los proyectos de arquitectura y a la vez visualizar el carácter arquitectónico que se logró con la integración de la misma.

De esta forma el presente documento provee al estudiante criterios para lograr proyectos de arquitectura pensando en utilizar las estructuras de acero de forma adecuada y económica. Permitiendo a la vez acercar a los estudiantes a temas que se han orillado en los cursos de formación. Lo anteriormente expuesto nos permite concluir que el diseñador o arquitecto puede encontrar en el acero estructural un material constructivo que permite expresar su creatividad en una amplia variedad de proyectos, en forma económica y rápida. Asimismo, contrario a lo que se piensa, es un material sumamente flexible. Los diferentes proyectos que se han

mostrado en este trabajo corroboran ese hecho. Aún en nuestro medio nacional, los talleres son capaces de desarrollar proyectos de gran complejidad.

Es necesario por lo tanto que los estudiantes de arquitectura conozcan la técnica constructiva, y consideren que el acero les puede permitir desarrollar proyectos interesantes y competitivos, no solamente como solución a proyectos industriales, sino *cualquier tipo* de proyecto de arquitectura. Sin embargo, es necesario presentar soluciones estructuralmente adecuadas. El ejemplo de vivienda con marcos rígidos de la página 171 muestra cómo el desconocimiento de las características del material afecta la propuesta misma y por tanto encarece la construcción.

Como bien se ha expuesto en este trabajo, no se ha pretendido en ningún momento agotar el tema, sino más bien proporcionar una base de la cual trabajos posteriores puedan ahondar más en el tema.

#### Algunas ‘desventajas’ de uso del acero en nuestro medio

- Una ‘desventaja’ en el uso de las estructuras de acero en nuestro medio nacional es el desconocimiento por parte de muchos ingenieros y arquitectos de este sistema constructivo. Esto significa cuando se desea un proyecto en acero, hay que acudir a un arquitecto o ingeniero estructural debidamente capacitado. De manera que los proyectos no se prediseñan con acero y por tanto no se diseña arquitectónicamente con las ventajas del material.
- Los proyectos son desarrollados, construidos y montados por contratistas generales especializados en la construcción con acero. Esto aunque puede representar un ahorro considerable, también origina cierta exclusión económica al arquitecto diseñador.

- *Actualmente, el acero a elevado considerablemente su precio en el mercado mundial y grandes contratistas han tenido problemas económicos, esto se ha originado por las grandes construcciones en China<sup>2</sup> (situación que según algunos continuará hasta el año 2012). Sin embargo, a pesar de eso sigue siendo un material competitivo y que puede lograr soluciones económicas versus otros sistemas constructivos.*

#### Recomendaciones

- Cada estudiante de arquitectura debe ser consciente de su propia responsabilidad para indagar los sistemas constructivos disponibles en el país y no pensar en estos como de interés exclusivo de la ingeniería civil.
- Pensar en el acero estructural como parte de un sistema constructivo que puede ser una opción viable, creativa e innovadora.
- Buscar nuevas aplicaciones del material y el sistema constructivo con el afán de lograr economía y eficiencia a través de la correcta disposición de los elementos en los diversos problemas arquitectónicos.
- Proponer soluciones simples, mejoradas y adaptadas a la problemática del país para lograr economía en costo y tiempo de construcción.
- Las Facultades de Arquitectura debería poner más énfasis en los cursos de la línea de estructuras que tratan sobre el acero con el afán de proveer al estudiante herramientas para el uso correcto del sistema constructivo.

<sup>2</sup> enormes represas y el empuje de convertir a China en un país industrializado.



## BIBLIOGRAFÍA

### Obras Consultadas por Capítulos

#### **Capítulo I.- Conceptualización general de la investigación**

#### **Capítulo II.- Síntesis histórica de la evolución del acero como material constructivo**

Después del Movimiento Moderno. Arquitectura de la segunda mitad del siglo XX. Joseph María Montaner. Editorial Gustavo Gili, S. A. 1993.

Arquitectura Bioclimática. Editorial Gustavo Gili, S. A. 1993.

“Historia crítica de la arquitectura moderna”. Prefacio a la tercera edición por Kenneth Frampton. Editorial Gustavo Gili, S. A. Nueva York, 1991.

#### **Capítulo III.- Lineamientos generales de comportamiento estructural**

Historia crítica de la arquitectura moderna. por Kenneth Frampton, Sexta Edición ampliada. Editorial Gustavo Gili, S. A. 1993.

Después del movimiento moderno. Arquitectura de la segunda mitad del siglo XX. Por Joseph Maria Montaner. Arquitectura con Textos, Editorial Gustavo Gili, S. A. 1993.

Arquitectura del siglo XX. Por Peter Gossel y Gabriele Leuthauser, Editorial Taschen 1991.

Los orígenes de la arquitectura moderna y del diseño. Pevsner. Colección Arquitectura y Crítica. Editorial Gustavo Gili, S. A. 1968.

Detailing for Steel Construction 1983 por AISC. American Institute of Steel Construction. Chicago, Illinois, USA.

Perspicacia para comprender las escrituras. Publicado por Watch Tower Bible and Tract Society of New York, Inc. International Bible Student Association. Brooklyn, New York, USA. 1991

History of Cast Iron in Architecture. Por John Gloag & Derek Bridgwater. 1948.

The American Institute of Mining and Metallurgical Engineers “Composición y Microestructura de las Antiguas Fundiciones de Hierro” por Maurice L. Pinel, Thomas T. Thomas A. Wright.

The Construction Weekly ENR, Engineering News-Record 22 de marzo de 2004. Una publicación de *McGraw-Hill Companies*.

La Enciclopedia. Volumen I. Salvat Editores

Pequeño Larousse en color. Por Ramón García-Pelayo y Gross. Ediciones Larousse. París 1976.

#### **Capítulo IV.- Generalidades técnicas sobre la construcción con acero estructural**

Estructuras de Edificación. Malcom Millais © 1997. Celeste Ediciones, S. A.

Ingeniería Simplificada para arquitectos y constructores. Harry Parker. Editorial LIMUSA, México 1981.

#### **Capítulo V.- Integración de la estructura de acero con el diseño arquitectónico.**

Understanding Structures. Fuller Moore, Editorial WCB, McGraw-Hill. 1999.

Building Construction Illustrated. Francis D. K. Ching & Casandra Adams. Third Edition. John Wiley & Sons, Inc.

Architectural Graphic Standards CD-ROM version © John Wiley & Sons, Inc, New York, NY.

Detailing for Steel Construction 1983 por AISC. American Institute of Steel Construction. Chicago, Illinois, USA.

**Capítulo V.- Criterios para el diseño arquitectónico con acero.**

Understanding Structures. Fuller Moore, Editorial WCB, McGraw-Hill. 1999.

Modern Steel. Julio 1998, volumen 38, No. 7 publicada mensualmente por The American Institute of Steel Construction.

La venta del acero. Publicado por AISC 1995. Resumen de estudios publicados por diferentes instituciones americanas: *Bethlehem Steel Corporation, British Steel, Inc., Chaparral Steel Company, Northwestern Steel & Wire Company, Nucor-Yamato Steel Company y TradeARBED, Inc., así como del American Institute of Steel Construction, Inc. y de la Lincoln Electric.*

Understanding Structures. Fuller Moore, Editorial WCB, McGraw-Hill. 1999.

Detailing for Steel Construction 1983 por AISC. American Institute of Steel Construction. Chicago, Illinois, USA.

**Procedencia de ilustraciones:**

La procedencia de todas las ilustraciones está claramente indicada. Las ilustraciones de los proyectos del capítulo VI, son del autor.

