Tomo 1

1 Introducción

2 Tipología de edificios administrativos

3 Criterios de diseño estructural

4 Cálculo y dimensionamiento de elementos estructurales

5 Diseño de uniones

6 Forjados

7 Protección de la estructura

ITEA

Guía de Diseño para edificios con estructura de Acero

segunda edición: agosto 1.999 /1.000
Pol. Industrial de Ordizia
C/ Mallutz,s/n - Oficinas 57 y 58
E-202040 Ordizia / Gipuzkoa
Tels .: + 34 - 943 88 74 76 / 943 88 21 29
Fax : + 34 - 943 88 76 22
e-mail: itea@itea.es
http://www.itea.es
Derechos reservados. Prohibida la reproducción
total o parcial sin los permisos correspondientes
I.S.B.N.: 84-605-6134-8
Depósito Legal: SS-691/99

Nuestro agradecimiento a las personas que, colaboraron como expertos en el ordenamiento de criterios y revisión del trabajo:

D. Eduardo Bayo - Catedrático de Estructuras de la ETS de Arquitectura de la Universidad de Navarra
D. Amando Castroviejo - Ingeniero Industrial
D. Felipe García Chacón - Ingeniero Industrial
D. Ignacio Garay - Dr. Ingeniero Industrial
D. Ángel Martín - Dr. Ingeniero de Telecomunicaciones
D. Juan Carlos Sancho - Ingeniero Industrial
D. Miguel Ángel Serna - Catedrático de Estructuras de la ETSII de la Universidad de Navarra

y a todas las empresas socios del ITEA que han aportado su valiosa colaboración para la realización de esta guía.

ITEA

ITEA

PRÓLOGO

El **Instituto Técnico de Estructura en Acero** - ITEA - fue creado con el objetivo básico de promocionar la utilización de estructuras en Acero, allí donde puedan ofrecer **ventajas competitivas**.

ITEA desarrolla un amplio espectro de actividades para permitir el mejor uso del **Acero en Construcción**. Además quiere contribuir a la mayor cualificación de todos los proyectos, utilizando la potencialidad de las numerosas calidades disponibles, y la extensa **gama de Perfiles Estructurales**.

El **Instituto** se propone la difusión de cuanta información se precise para adoptar soluciones innovadoras y de impacto económico atractivo.

Por ello, ha realizado la presente **Guía de Diseño** para Edificios con Estructura en Acero, que recoge cuantos aspectos se necesitan para construir estas estructuras **de forma sencilla, rápida, segura e innovadora**.

La *Guía* pretende introducir a todos los profesionales y estudiosos de este campo en el **diseño de edificios modulares**, recomendando una serie de disposiciones constructivas y proporcionando una herramienta de cálculo, que posibilita el predimensionado de los elementos estructurales. Se trata de dotar a los interesados de un **manual didáctico**, que les sirva de base para su introducción en el atractivo campo de la construcción en acero.

ITEA quiere cooperar con todos los agentes del Sector de la Construcción desde el promotor hasta el usuario final, para posibilitar soluciones atractivas en su diseño y económicas en su ejecución.

La utilización adecuada de las calidades de acero, y el diseño innovador mediante el uso de los tipos más adecuados de Perfiles Estructurales, aportarán **soluciones muy económicas**, en muchas edificaciones, con claras ventajas sobre otros materiales alternativos.

A través de la difusión de esta guía, ITEA quiere facilitar asesoramiento técnico a prescriptores, constructores y promotores.

Por otra parte, a través de **Grupos de Mejora** quiere desarrollar un **Plan** que permita **optimizar el aprovechamiento de las prestaciones de la Estructura** en Acero.

ITEA espera que esta Guía sea de gran utilidad para todos los profesionales del Sector.

Juan José Aráztegi

Presidente del **ITEA**

1. INTRODUCCIÓN 9

1.1. Objeto de esta *guía* 9
1.2. El acero 9
1.3. Evolución histórica de las estructuras 10
1.4. Ventajas de la estructura de acero 13
1.5. Tendencias actuales en el uso de aceros 14

2. TIPOLOGÍA DE EDIFICIOS MODULARES 15

2.1. Modulación 15
2.2. Luces 15
2.3. Alturas y espacios para instalaciones 18
2.4. Fachadas 19

3. CRITERIOS DE DISEÑO 21

3.1. Soluciones estructurales 21
3.1.1. *Estructuras de nudos articulados* 22
3.1.2. *Estructuras de nudos rígidos* 23
3.1.3. *Estructuras con nudos rígidos y nudos articulados* 23
3.2 Arriostramiento general 23
3.3. Definición de elementos estructurales 26
3.3.1. *Pilares* 26
3.3.2. *Vigas* 26
3.3.3. *Uniones* 28
3.3.4. *Elementos de celosía para absorber esfuerzos horizontales* 29

4. CÁLCULO Y DIMENSIONAMIENTO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES 32

4.1. Normativa de aplicación 32
4.2. Bases de cálculo 32
4.2.1. *Tipos de acero. Resistencias de cálculo* 34
4.2.2. *Aciones a considerar* 35
4.3. Predimensionado de elementos estructurales 38
4.3.1 *Vigas* 38
4.3.2. *Pilares* 43
4.3.3. *Elementos para absorber esfuerzos horizontales* 44

5. DISEÑO DE UNIONES....46

5.1. Medios de unión....46
5.2. Unión entre pilares....46
5.3. Unión entre vigas....48
5.3.1. *Empalmes*....48
5.3.2. *Embrochalado de vigas*....48
5.4. Unión de pilar con viga....50
5.4.1. *Unión de pilar continuo con viga continua, sin transmisión de momentos*....50
5.4.2. *Unión de pilar continuo con viga apoyada*....50
5.4.3. *Unión rígida de viga con pilar*....53
5.5. Base de pilares....53

6. FORJADOS....56

6.1. Forjados mixtos de hormigón y chapa de acero....56
6.2. Forjados de losas aligeradas....58
6.3. Forjados con estructura embebida (slimfloor)....58
6.4. Otros tipos de forjado....59

7. PROTECCIÓN DE LA ESTRUCTURA....60

7.1. Protección de las estructuras de acero contra la corrosión....60
7.1.1. *Protección con pintura*....60
7.1.2. *Otras protecciones*....61
7.2. Protección contra el fuego....62
7.2.1. *Efectos del fuego*....62
7.2.2. *Prevención*....62
7.2.3. *Estabilidad ante el fuego de los elementos estructurales*....62
7.2.4. *Protección contra el fuego de los elementos estructurales*....63

1. INTRODUCCIÓN.

1.1. Objeto de esta guía.

La construcción metálica, de tan arraigada tradición en los países desarrollados, está alcanzando un papel significativo en el campo de las estructuras de edificación, sobre todo en aquellos proyectos en que la disposición de espacio útil y la versatilidad de la distribución interior son condicionamientos esenciales. Este es el caso concreto de las estructuras multiplanta para usos varios : administrativos, docentes, exposiciones, oficinas, hoteles... o cualquier otro no previamente fijado.

Aunque la literatura sobre la construcción metálica es abundante y extensa, no lo es tanto en cuanto a su aplicación práctica al tipo de edificios mencionados anteriormente, por lo que creemos que esta *Guía*, puede ser un instrumento útil y eficaz, tanto para la elección como para el proyecto de una estructura de las características que estos edificios requieren.

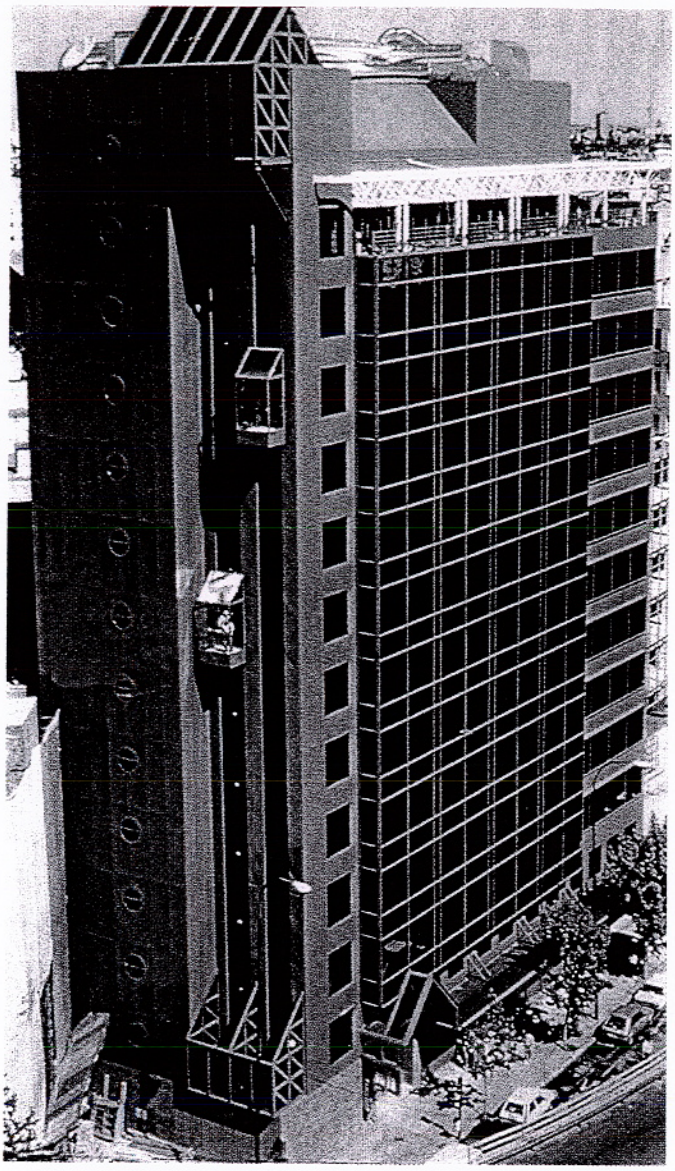
En sus páginas se van a exponer tanto las ideas básicas que el diseño inicial requiere, como los conocimientos y datos fundamentales necesarios para el dimensionado previo de todos sus elementos.

Este conocimiento previo de las dimensiones aproximadas de las vigas y pilares de la estructura permite determinar el espacio disponible y las eventuales interferencias con otros elementos constructivos o con las instalaciones auxiliares previstas o previsibles. Asimismo ayuda a obtener una estimación bastante aproximada de su peso y coste, con lo que puede decidirse su adopción definitiva, o el tanteo de otra variante.

Este predimensionado deberá necesariamente ser comprobado mediante un cálculo exacto, para el cual puede utilizarse alguno de los numerosos programas existentes en el mercado, partiendo de las dimensiones previas obtenidas con auxilio de esta *Guía*.

1.2. El acero.

La norma UNE 36004 define el acero como el material en el que el hierro es predominante y cuyo contenido en carbono es generalmente inferior al 2%, y contiene además otros elementos. Aunque un



limitado número de aceros puede tener contenidos de carbono superiores al 2%, éste valor es el límite habitual que separa el acero de la fundición.

A pesar de que ya en el siglo XVII a. de C., los pueblos ribereños del Mar Negro consiguen utensilios y armas a partir del mineral de hierro, puede decirse que la siderurgia tiene su inicio a mediados del siglo XIX, al perfeccionarse los sistemas de afino del exceso de carbono del arrabio (metal líquido), mediante la insuflación de aire en su masa. La evolución, en la segunda mitad del siglo XX, de los métodos de producción ha permitido la obtención de aceros de una gran calidad, así como la consecución de un producto económicamente competitivo frente a otros materiales.

La maleabilidad del acero permite su conformado, especialmente en caliente, mediante forja o laminación. La laminación hace posible la fabricación en grandes cantidades de elementos o productos de secciones y características prefijadas.

Actualmente, los productos de acero más utilizados en estructuras son los perfiles y las chapas. Las técnicas de prefabricación en taller, mediante soldadura, y el montaje en obra mediante tornillos, son las más utilizadas por la garantía que se obtiene en la calidad final, y por la menor presencia de personal en obra.

España ocupa un destacado lugar entre los países productores de acero. Sin embargo la penetración del acero en el mercado de la construcción es bastante baja, comparada con la de los países desarrollados tales como Gran Bretaña, Estados Unidos o Japón.

1.3. Evolución histórica de las Estructuras.

Las primeras construcciones que realizó el hombre cuando su evolución social le sacó de las cavernas, fueron recintos formados con muros de piedra y cubiertos con troncos y ramaje. Su primera función era la protección frente a los agentes exteriores, el frío y la lluvia principalmente. La necesidad de obtener mayores espacios comunicados entre sí, en construcciones de carácter religioso o social, lleva a la apertura de huecos en los muros por medio de arcos, que con las columnas, vigas de madera y contrafuertes son los primeros sistemas estructurales utilizados por el hombre. Con la evolución de los mismos se llega en algunos casos a reducir el papel de los muros a meros elementos de separación o cerramiento, confiando la misión resistente a los otros sistemas que adquieren entidad propia, como estructura de la construcción.

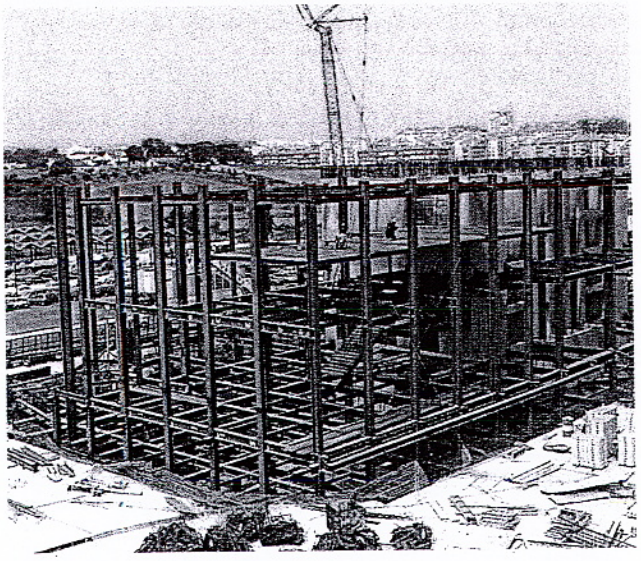
Durante mucho tiempo, además de la piedra, fué la madera el único material apto para ser utilizado como elemento estructural, principalmente en elementos en que la resistencia a flexión o tracción era necesaria, con la consiguiente limitación de luces que este material imponía. Esta restricción y el hecho de ser la madera un material poco duradero bajo la acción de múltiples agentes exteriores, condujo al hombre a la incesante búsqueda de otros materiales de mayor resistencia y durabilidad, que fructificaron en tiempos relativamente recientes con la aparición de las estructuras de hierro y acero y posteriormente las de hormigón armado. Estos materiales constituyen la inmensa mayoría de los distintos sistemas estructurales actuales, aprovechando así sus características funcionales específicas.

El hierro comienza a utilizarse como elemento estructural a finales del siglo XVIII en la construcción de puentes. Posteriormente, durante el siglo XIX, se utiliza en edificación como producto alternativo a la piedra y a la madera.

Si no tenemos en cuenta algunas imperfectas tentativas anteriores, puede afirmarse que el primer puente de hierro fué el puente en arco de fundición construido entre 1773 y 1779 sobre el río Severn en Coalbrookdale. Posteriormente hicieron su aparición los puentes colgantes con tablero suspendido de cadenas metálicas. Entre ellos, el Menai Bridge (1819-24), con sus dos características torres de sillería, fué durante muchos años el puente de mayor longitud de Gran Bretaña.

En 1850, Stephenson realizaba, combinando con maestría materiales laminados y perfilados, el puente Britannia, de cuatro tramos (los dos extremos de 71,90 m y los dos centrales de 141,73 m cada uno), que fué la primera realización en grandes vigas cerradas autoportantes.

En USA, y en la década de los cuarenta, se construyen los puentes colgantes de Wheeling, Pittsburg y Cincinnati, sustituyendo ya las cadenas por cable metálico. Entre 1869 y 1883 se construye el archiconocido, sobre todo a través del cine, puente de Brooklyn en Nueva York, que como alguno de los citados anteriormente sigue actualmente en servicio.



En España son numerosos los puentes de hierro construidos en el siglo pasado diseminados por toda la geografía nacional. Ejemplo de ellos son los puentes de Belmonte (Asturias) y Ormaíztegui (Guipúzcoa).

Respecto al empleo del hierro en la edificación, ya en 1770 se utilizan en Liverpool elementos de hierro para soportar las Galerías de St.Anne, y en 1781, Soufflot coloca una cubierta de hierro sobre el vestíbulo de la escalera de acceso a la Grande Galerie del Louvre. En 1797 se construye en Shrewsbury la fábrica Benyons, Marshall & Bage, con pilares, vigas y montantes de fundición de hierro.

Estas realizaciones tímidas no ponían todavía de manifiesto las grandes posibilidades de los materiales férricos para la construcción.

No es hasta el s.XIX, y en sus últimas décadas, cuando se realizan grandes y espectaculares construcciones combinando el vidrio y el hierro. Invernaderos, pabellones para exposiciones, estaciones de ferrocarril y grandes naves industriales, muestran como la adopción del hierro permite ganar a este tipo de construcciones en diafanidad y amplitud de luces.

El Palacio de exposiciones es el verdadero edificio emblemático del Progreso que este siglo, orgulloso de sus invenciones y descubrimientos, quiere mostrar como símbolo de la nueva sociedad y del espíritu de intercambio cultural que se extiende por ella. De entre todos ellos destacan dos, distanciados en el tiempo como corresponde a las dos Exposiciones Universales que representaron: el Palacio de Cristal de Paxton para la 1ª Exposición Universal de Londres de 1851, y el Palais des Machines para la Exposición Universal de París de 1889.

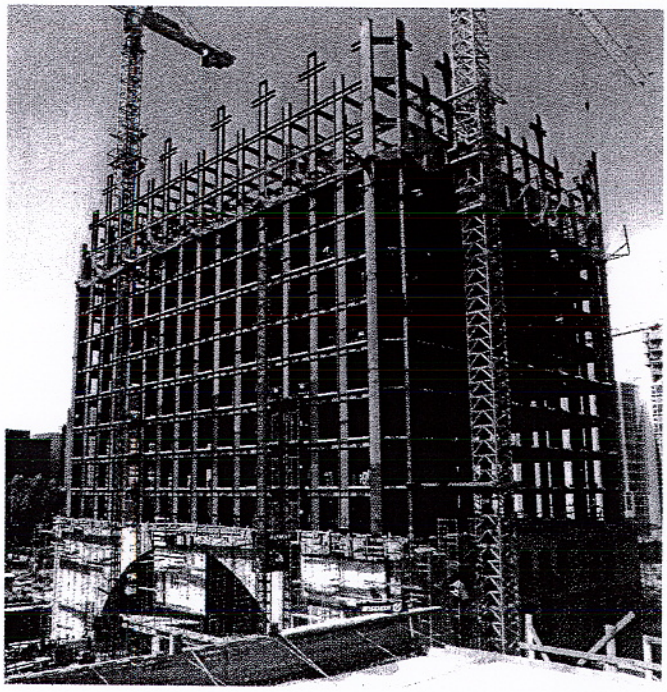
El Palacio de Cristal de 1851 significó el punto de partida para toda una serie de edificios similares construidos en otras capitales europeas, caracterizados por el nuevo espacio arquitectónico abierto y luminoso que la ligereza de la estructura y el cerramiento de vidrio permitían. La concepción del sistema estructural con elementos repetitivos tanto en vigas como en columnas, permitió una verdadera obra maestra de la estandarización, posibilitando la fabricación en serie de todos estos elementos metálicos tan sólo en tres meses, lo que juntamente con su montaje en otros tres, resultó una hazaña insólita e inaudita para aquellos tiempos.

Le Palais des Machines de la exposición de 1889 era un edificio notable, aunque su celebridad fué oscurecida por la famosa Torre Eiffel, verdadero monumento a la construcción metálica y que fué la estructura más alta del mundo hasta la construcción, años más tarde del Empire State Building en Nueva York. El Palacio constaba de una nave principal de 420 x 115 m., flanqueada por otras laterales de menor luz, y su estructura principal la componían veinte arcos triples, con cerramientos continuos de vidrio, lo que le daba una gran amplitud y luminosidad.

En nuestro país magníficos ejemplos del alto nivel alcanzado por la arquitectura en acero son el Palacio de Cristal del Parque del Retiro y la gran nave de la Estación de Atocha en Madrid.

Dentro del s.XIX y en la década de los 40, se construyeron con estructura de acero varios edificios de acero en Inglaterra: uno de los primeros fué un pequeño edificio de Watling Street en Londres. En 1849, J.Bogardus construyó los almacenes Laing en Nueva York, un edificio de cuatro plantas con pilares y dinteles vistos en fachada de hierro fundido.

En las décadas de 1880 y 1890, en Norteamérica, los edificios de gran altura para oficinas, de estructura de acero, empiezan a invadir las grandes ciudades americanas, convirtiéndose en símbolo e imagen de la nueva potencia mundial. Richardson y Sullivan son referencia obligada de la arquitectura de este período.



El Movimiento moderno adopta el acero como uno de sus materiales más apreciados. Dentro de él, Mies Van der Rohe lo convierte en su material normal de trabajo, que le permite conseguir plantas diáfanas y susceptibles de adaptarse a diferentes funciones con su simple subdivisión por medio de mamparas. El Pabellón alemán de la Exposición de Barcelona de 1929, obra de Mies, sintetiza perfectamente las ideas de aquel momento tendente a la consecución de espacios abiertos con estructuras repetitivas. Entre las grandes obras de este genial arquitecto cabe también destacar la Nueva Galería Nacional de Berlín (1962-68), en la que utiliza una estructura bidireccional apoyada en ocho pilares interiores y cruciformes para cubrir un espacio cuadrado de 65 m de lado. Dentro de este Movimiento Moderno cabe destacar en nuestro país el Dispensario Central Antituberculoso construido en Barcelona en 1935 y el Pabellón de España de la Exposición de París de 1937.

En las últimas décadas la Arquitectura presenta una gran diversidad de procedimientos constructivos. Sin embargo se manifiesta una tendencia clara, por motivos indudablemente económicos, hacia la prefabricación en taller y el posterior ensamblaje en obra. Este procedimiento ya fué iniciado por Paxton en el siglo pasado, y posteriormente desarrollado al máximo en la construcción de los grandes rascacielos.

La estandarización del diseño estructural es de la mayor importancia en las estructuras de edificios funcionales como son los destinados a oficinas, por la reducción de costes y la rapidez de la ejecución. Similares beneficios se consiguen en los grandes edificios singulares con la repetición del módulo estructural.

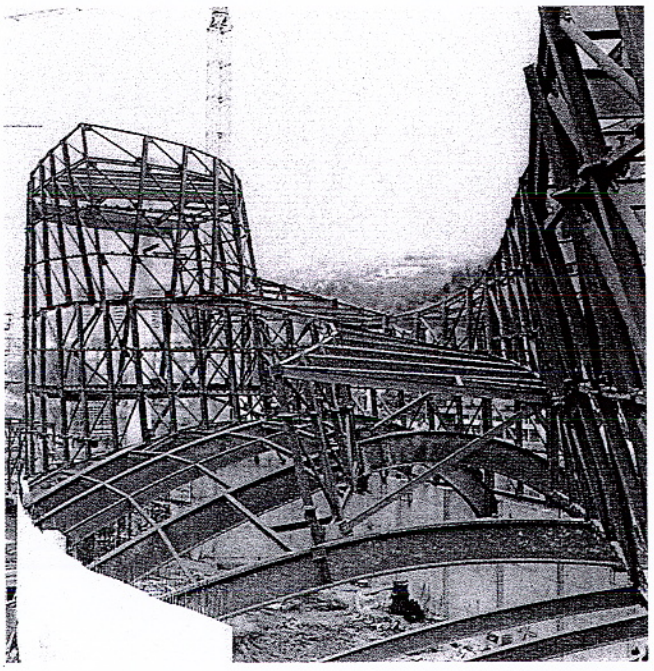
En nuestros días la estructura de acero es adoptada casi indiscutiblemente en construcciones que requieren grandes espacios diáfanos, como estadios, pabellones, naves industriales o aeropuertos, siendo su solución más habitual estructuras unidimensionales como pórticos de gran luz. En espacios amplios de dimensiones comparables en planta, se emplean frecuentemente estructuras bidimensionales como los entramados espaciales de doble cara o las cúpulas geodésicas o de paralelos de superficie simple o doble.

La ausencia de productos laminados de acero tras la Guerra Civil, abrió, en nuestro país, un amplio paréntesis en el uso del acero en la edificación. Muestras de su retorno a la arquitectura son, la cubierta del estadio de San Mamés (1954) y el Palacio de los Deportes de Madrid (1960), realizaciones tan espectaculares como era de esperar de la capacidad de nuestros proyectistas y de las características de un material tan lleno de posibilidades para su inquietud e imaginación.

En los últimos quince años se ha incrementado hasta límites insospechados el uso estructural del acero en la edificación, sobre todo en los edificios de gran altura, siendo de destacar en Madrid el edificio del BBV en la Castellana , que combina la estructura de acero con la de hormigón, la Torre Castelar y la Torre Picasso y en Barcelona la Torre Mapfre .

El año olímpico, (1992), fué ocasión para demostrar las grandes posibilidades del acero en la realización de grandes plantas diáfanas, como el Palau Sant Jordi de Barcelona o el Palacio de los Deportes de Badalona.

En el mismo año la Exposición Universal de Sevilla constituyó un gran escaparate mundial de la construcción tanto para España como para los distintos países participantes, y fué demostración excepcional de la riqueza tecnológica del acero y su adaptabilidad a tan diversas soluciones estructurales como se mostraron en los diversos pabellones o en los bellísimos puentes sobre el Guadalquivir. Fuera del ámbito de la exposición, uno de los más claros ejemplos de las virtudes del acero como elemento estructural es el edificio del Museo Guggenheim en Bilbao, que presenta una espectacular estructura adaptada a los imaginativos volúmenes que conforman el conjunto.



1.4. Ventajas de la estructura de acero.

Las ventajas de la utilización del acero en las estructuras frente a otros materiales tradicionales son muchas. Aunque algunas ya se han mencionado, resulta interesante realizar un compendio de las más importantes.

Prefabricación

En primer lugar, la posibilidad de prefabricación de los elementos que componen la estructura. Esto permite, por una parte, solapar los plazos de ejecución de las infraestructuras con los de prefabricación en taller, acortando el plazo global.

Por otra parte, la realización del máximo trabajo en taller, ejecutando en él todas las soldaduras necesarias y dejando todos los elementos dispuestos para su ensamblaje en obra mediante uniones atornilladas, garantiza un estricto control de calidad, reduciendo en gran medida el posible fallo humano y el eventual efecto negativo del frío, el viento y la lluvia en las operaciones de soldadura.

Asimismo, se consigue una gran rapidez de montaje en obra, limpieza en su ejecución y exactitud dimensional.

Gran resistencia - Grandes luces

La capacidad resistente del acero permite su utilización en estructuras de grandes luces para la consecución de plantas diáfanas, resultando más ligeras y esbeltas que las que se consiguen con otros materiales. Debido a ello, los elementos auxiliares de montaje necesarios, que pueden llegar a ser determinantes en edificios de gran altura o de difícil acceso, resultan más económicos.

Secciones reducidas

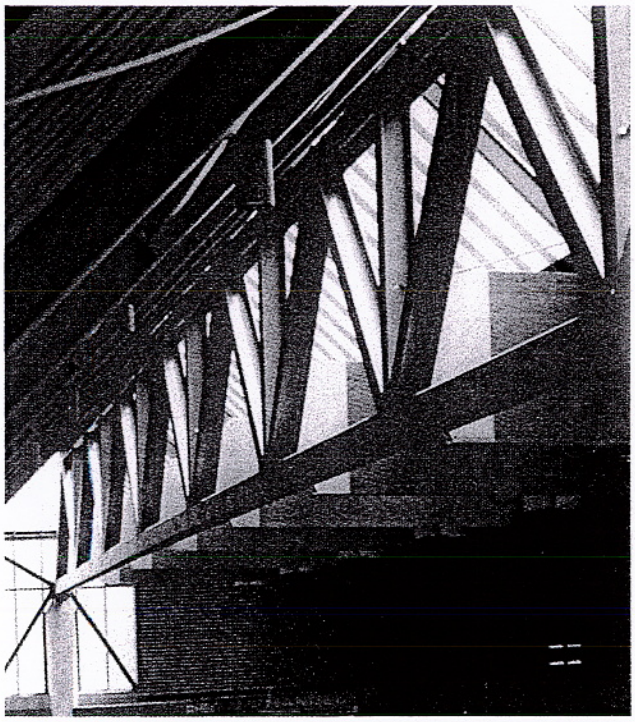
Debido a su ligereza y a las reducidas secciones necesarias para un mismo edificio frente a otros materiales, el aprovechamiento del espacio es máximo, posibilitando además el ocultamiento de la estructura en fachadas, tabiquerías, forjados,..., consiguiendo espacios limpios.

Adaptabilidad

Las estructuras de acero pueden adaptarse a cualquier solución estructural deseada por el proyectista, por medio de entramados rígidos o articulados. Esto hace que la adaptación al tipo de terreno portante sea muy flexible. En terrenos con posibilidad de futuros asentamientos, las soluciones articuladas se comportan mejor. Igualmente, es posible amoldarse a cualquier distribución en planta.

Ensamblaje con otros elementos

Una gran ventaja es la sencillez que presenta el ensamblaje de elementos no estructurales y la calidad de su ejecución, fundamentalmente de los elementos que conforman la piel del edificio, como son los materiales de fachada y las carpinterías.



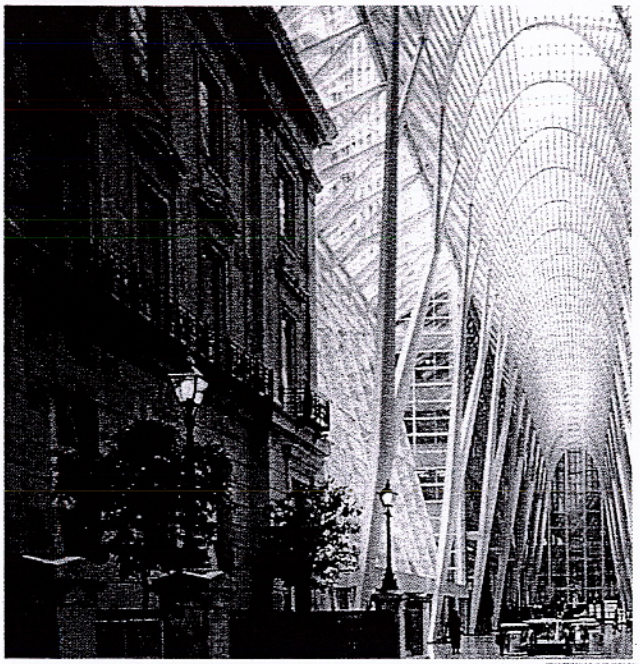
Igualmente presenta gran facilidad para combinar con cualquier tipo de forjado, comportándose especialmente bien con los formados por chapa nervada colaborante y con placas prefabricadas aligeradas.

La opción de dejar la estructura vista, puede contribuir a dotar de personalidad al edificio.

Reducción de costos

Los factores económicos que pueden resultar determinantes en la elección del tipo de material estructural, ayudan también a decidirse por el acero. Como dato orientativo, el costo de la estructura en un edificio de oficinas viene a suponer entre un 10 y un 15% del costo total, incluyendo las instalaciones auxiliares.

A la similitud de precios que presentan las estructuras de acero con las de otros materiales constructivos, hay que añadir un factor fundamental: la rapidez de ejecución de las estructuras de acero que, garantizada por un correcto plan de obra, conlleva un ahorro en los costes financieros de la construcción. Igualmente, su mayor ligereza estructural implica una disminución en el coste de las cimentaciones.



Un punto muy importante para la reducción de costos estriba en la necesaria estandarización de los sistemas constructivos para la producción de elementos en serie. En las naves industriales se ha conseguido una gran aproximación a este ideal, y se ha comenzado a aplicar esta experiencia en los edificios de altura.

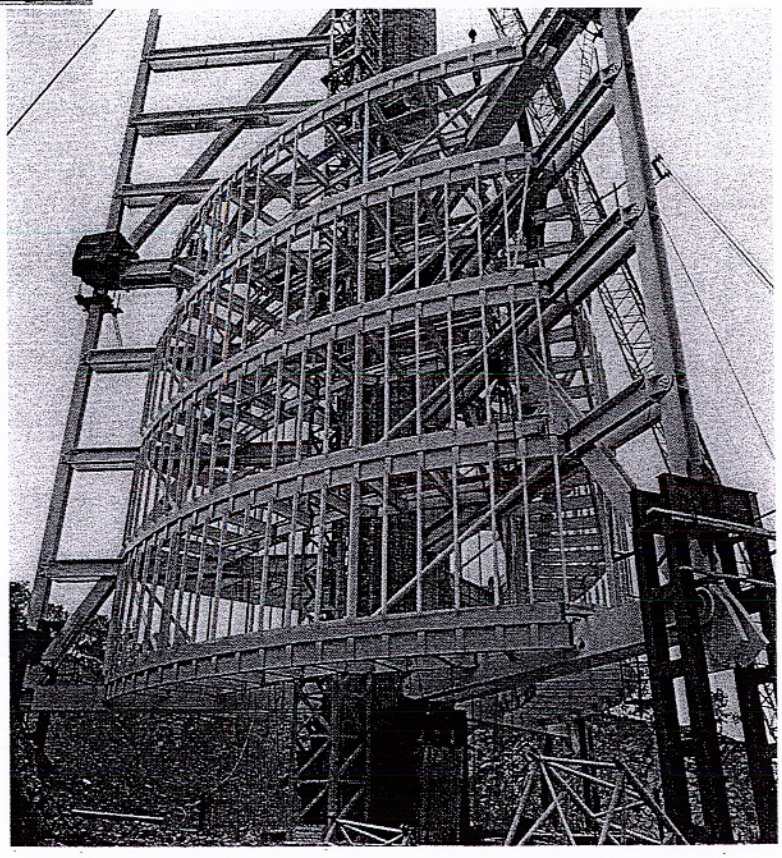
Facilidad de reformas

En último lugar cabe citar que la estructura de acero admite reformas posteriores a la construcción del edificio, realizables con relativa sencillez. También debe anotarse que el acero es un material reciclable, conservando, por tanto, siempre cierto valor, y que no genera residuos contaminantes.

1.5. Tendencias actuales en el uso de aceros.

Actualmente se está incrementando considerablemente el uso de aceros de alto límite elástico para algunos elementos de las estructuras. Su aprovechamiento óptimo se da en piezas poco esbeltas y sin restricciones importantes impuestas por las deformaciones o flechas.

Se debe reseñar brevemente que entre los tipos de acero incluidos en la normativa española A-37, A-42 y A-52 (denominaciones según NBE-EA-95), el empleo de este último presenta un aumento constante, por lo que los perfiles laminados de dicho tipo son cada vez más habituales en el mercado. El acero A-42, cuya existencia se enmarca únicamente en el mercado nacional, tiende a ser sustituido por el acero A-44, tipificado en las normas UNE, que han actualizado también las denominaciones de los aceros, como se puede observar en el capítulo correspondiente.



2. TIPOLOGÍA DE LOS EDIFICIOS MODULARES.

Una característica general de los edificios, a los que genéricamente se ha denominado edificios modulares, es el hecho frecuente a lo largo de su vida, de sufrir un cambio de destino o uso a otro distinto del original para el que fueron construidos. Es cada vez más habitual que edificios docentes, sanitarios o en general de oficinas, deban albergar funciones para las que no se proyectaron, con necesidades de disposición y compartimentación de espacios completamente diferentes de las iniciales.

Estas circunstancias conducen a que los edificios de este tipo se conciban y proyecten como contenedores vacíos de geometría sencilla y clara en los que el cerramiento, concebido como una piel envolvente, y la estructura son, en muchos casos, los únicos elementos que se van a mantener invariables a lo largo de tiempo. El acierto en la modulación estructural elegida y las posibilidades de consecución de plantas diáfanas son, por tanto, dos de los aspectos más importantes de un buen proyecto.

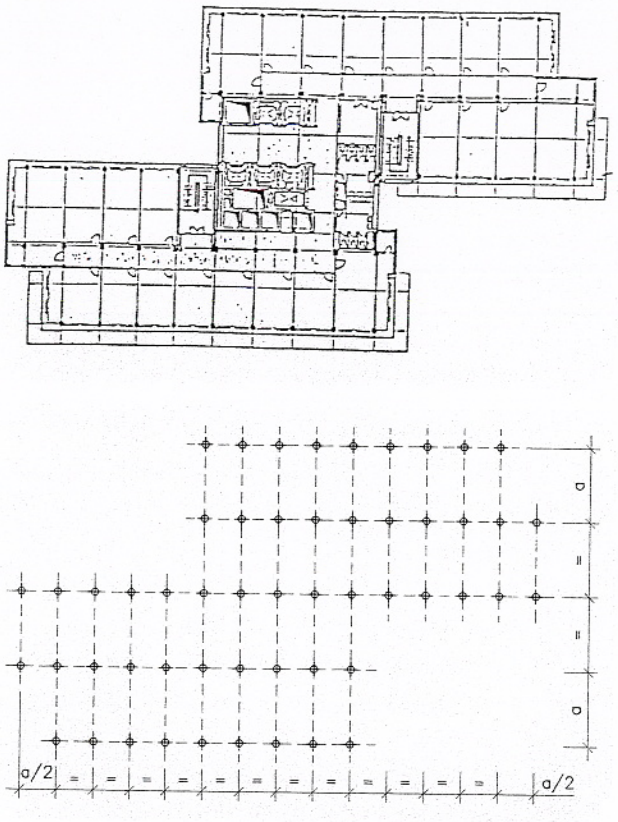
En este contexto, la estructura metálica es la gran aliada del proyectista: la amplia gama de perfiles laminados de gran canto y la infinita posibilidad de secciones armadas, permiten salvar grandes luces, adecuando la estructura a esa versatilidad funcional preconizada.

No pretende esta *guía* fijar con carácter exclusivo tipologías estructurales o valores determinados paras luces y secciones, sino simplemente apuntar posibles soluciones a los problemas que más frecuentemente se presentan, ya que por muy profusa que sea la casuística encerrada en cualquier manual, nunca puede suplir la imaginación y oficio del proyectista.

2.1 Modulación.

Como ya se ha apuntado, la elección de un módulo básico, cuya repetición pueda adaptarse a los diferentes usos, es una decisión importante que puede permitir la construcción estandarizada de los elementos de la estructura. Esta modulación, generalmente posible de establecer, resulta más sencilla cuando el edificio presenta planta rectangular.

Es interesante fijar una dimensión básica que con sus múltiplos y submúltiplos pueda servir para el dimensionado de los distintos elementos. Una dimensión muy utilizada para elementos de falsos techos modulares, suelos técnicos desmontables, luminarias, etc. es la de 60 cm o sus múltiplos (Fig. 2.1.)



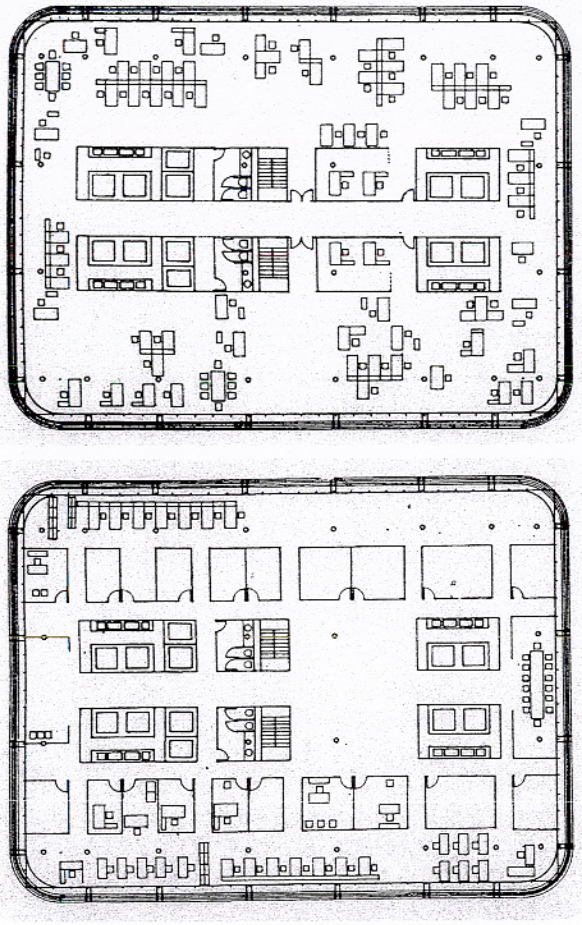
Edificio de oficinas para la compañía PHILIPS. MADRID.
Composición en planta en base a un módulo "a"
(Fig. 2.1.)

Así, se puede partir, por ejemplo, de módulos en planta de 1,20 m ó 1,80 m, para los elementos de techo y suelo antes señalados, y adoptar como luz principal la de 6,00 m ó 7,20 m, que permite perfectamente la subdivisión en elementos iguales para la prefabricación.

2.2. Luces.

Como se ha indicado anteriormente, luces entre pilares de 6,00 m ó de 7,20 m son habituales en este tipo de edificios. A veces, buscando mayores espacios diáfanos pueden adoptarse luces superiores, como 12,00 m ó 14,40 m con modulaciones de 1,20 m ó de 1,80 m respectivamente. Luces mayores son posibles, pero sólo se adoptan en casos excepcionales.

La elección de las luces libres está condicionada siempre por factores funcionales y económicos. Cuando lo que prima es la funcionalidad, las luces tienden a ser mayores que cuando el criterio es puramente económico. En ocasiones, deben combinarse ambientes privados o cerrados con ambientes abiertos de uso general. En estos casos puede ser aconsejable emplear luces diferentes en las zonas respectivas ya que, generalmente, el aumento del número pilares y la reducción de luces, dentro de ciertos límites, hace más económica la estructura (Fig. 2.2.).



BANCO BIBAO VIZCAYA. AZCA. MADRID
Distintas posibilidades de distribución
(Fig. 2.2.)

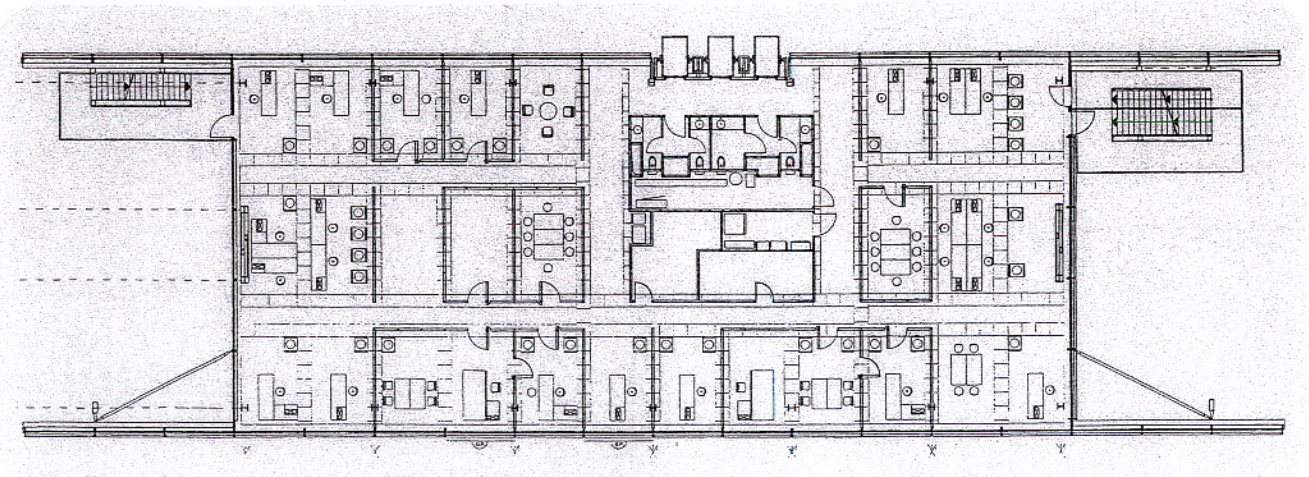
El juego entre funcionalidad y economía es el problema principal que se plantea en el diseño de la estructura. La búsqueda de su óptimo equilibrio es una de las misiones principales del proyectista.

Atendiendo a la de la distancia entre pilares, los edificios modulares pueden dividirse en:

• Edificios de luces normales, con jácenas o vigas principales del orden antes indicado de 6,00 m ó 7,20 m que se realizan con perfiles tipo IPE o, excepcionalmente, en casos de limitación de cantos con perfiles HEA ó HEB. Los cantos no suelen nunca sobrepasar los 500 mm.

• Edificios de grandes luces con jácenas iguales o superiores a 12,00 m ó 14,40 m en las que pueden emplearse perfiles laminados de cantos hasta 1.000 mm ó vigas armadas ó de celosía.

Las modulaciones, luces y tipos de perfiles indicados son puramente orientativos y convenientes en numerosos casos. Sin embargo, no pueden elevarse a regla general, pues los múltiples condicionantes que rodean a cada proyecto, pueden hacer necesaria o conveniente la búsqueda de soluciones distintas (Fig. 2.3.).



FUNDACIÓN CARTIER.
Planta libre de crujía única, vigas en sentido longitudinal y correas en sentido transversal
(Fig. 2.3.)



2.3. Alturas y espacios para instalaciones.

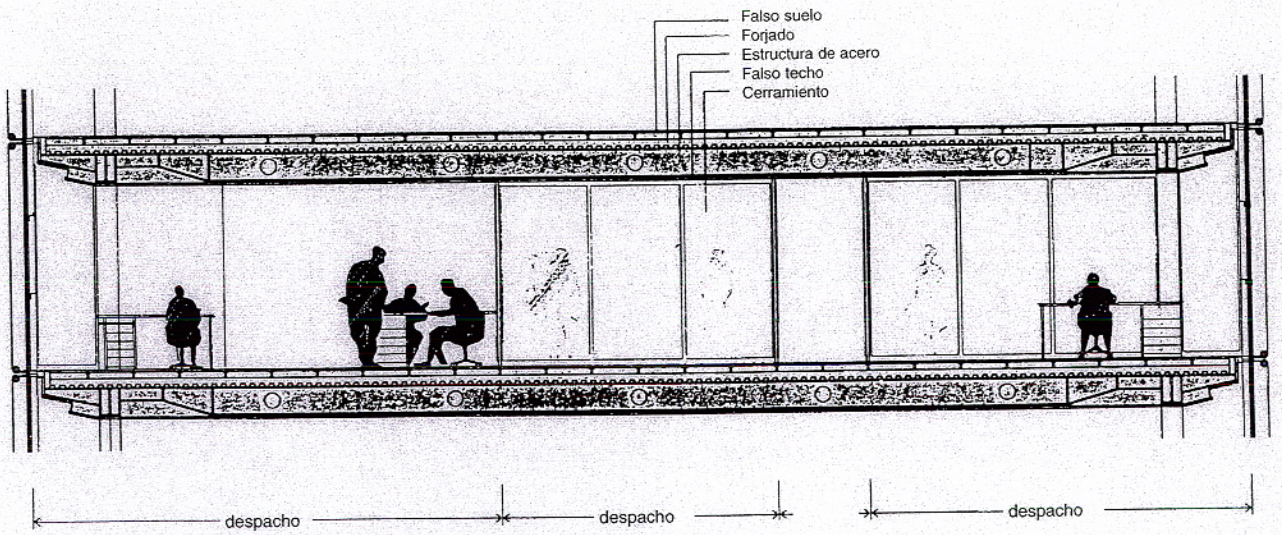
Hasta ahora sólo se han tenido en cuenta los condicionamientos en planta del edificio para la definición de su estructura. Es evidente que los espacios necesarios para instalaciones y servicios y las alturas libres entre suelo y techo son otros parámetros que hay que considerar en dicha definición. En esta clase de edificios puede afirmarse, con carácter general, que una altura entre plantas de 4.00 m es funcionalmente adecuada.

El reparto de esta altura puede efectuarse asignando 0,20 m a un suelo técnico elevado, 2,70 m a la altura libre entre suelo y techo (legalmente podría reducirse hasta 2,50 m) y los 1,10 m restantes al falso techo y al forjado. La reserva de espacio entre el falso techo y la cara inferior del forjado es, cada vez más, una necesidad funcional del edificio dada la tendencia a la instalación de gran número de servicios de gran complejidad. En cada caso concreto habrá que estudiar la altura total entre pisos y el reparto de ésta entre los distintos usos (Fig. 2.4.).

Sin embargo, hay que tener en cuenta que, en muchas ocasiones, el aprovechamiento máximo de las parcelas o solares, las limitaciones en altura de algunas normativas urbanísticas, o los condicionantes económicos, pueden hacer necesaria una reducción de la altura antes considerada a costa del tándem falso techo - forjado. En estos casos es de la mayor importancia utilizar vigas y elementos de forjado de poco canto.

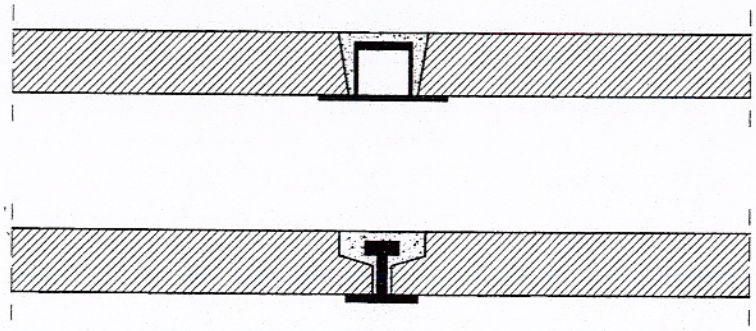
Una posible solución para reducir la altura total del conjunto viga - forjado consiste en embeber las placas de forjado en el canto de la viga (fig. 2.5.). Esta solución, muy extendida en distintos países europeos, es mucho más sugestiva para cantos de vigas y espesores de forjado similares, en cuyo caso no sobresalen las vigas por debajo del forjado, quedando el techo plano.

En los edificios definidos como de luces normales (6,00 m - 7,20 m), los forjados de placas aligeradas o forjados colaborantes de chapa perfilada y hormigón pueden ser ventajosos respecto a otros sistemas, por su canto reducido y la limpieza de su ejecución.



Sección transversal de la planta tipo

FUNDACIÓN CARTIER. PARIS.
La introducción de vigas metálicas con el alma perforada permite conjugar grandes luces con el paso de instalaciones y servicios
Fig. 2.4.



Forjado sustentado por vigas de sección armada. Acabado plano de techos.
(Fig. 2.5.)

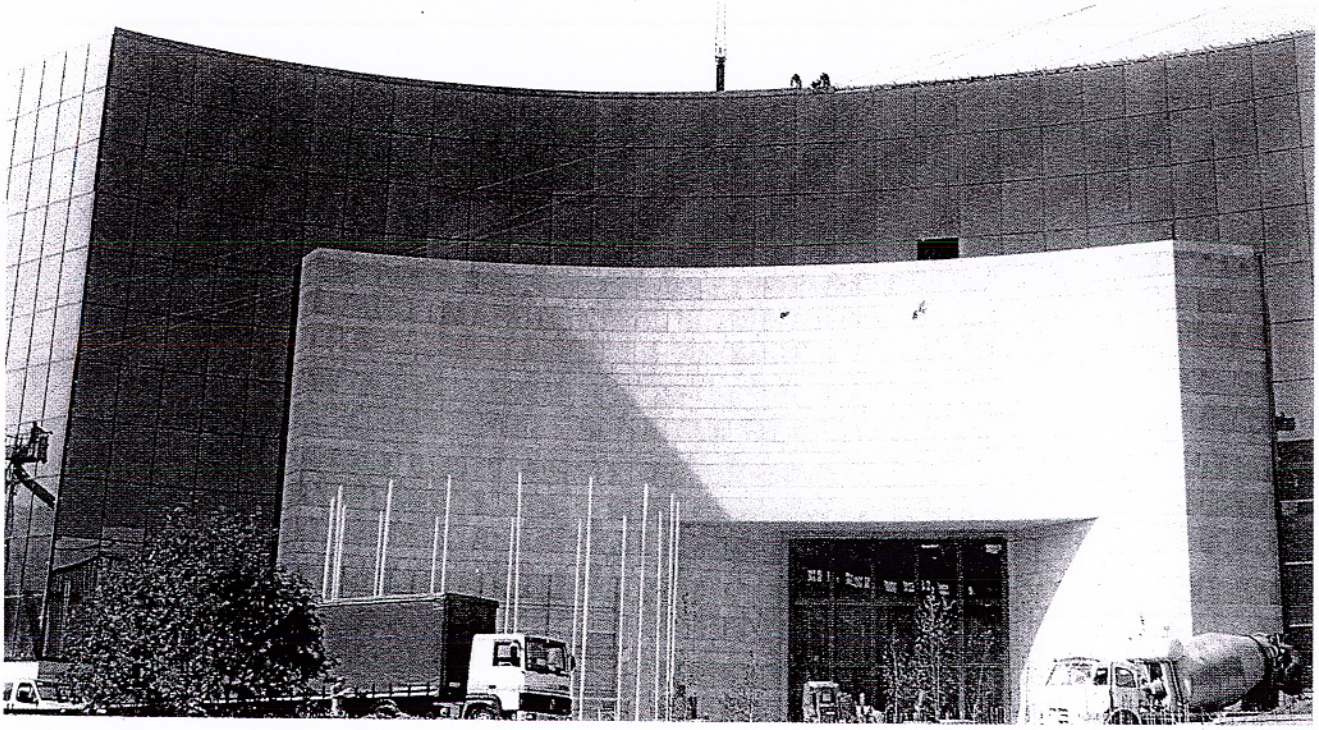
En el capítulo dedicado a forjados se trata con más extensión este tema.

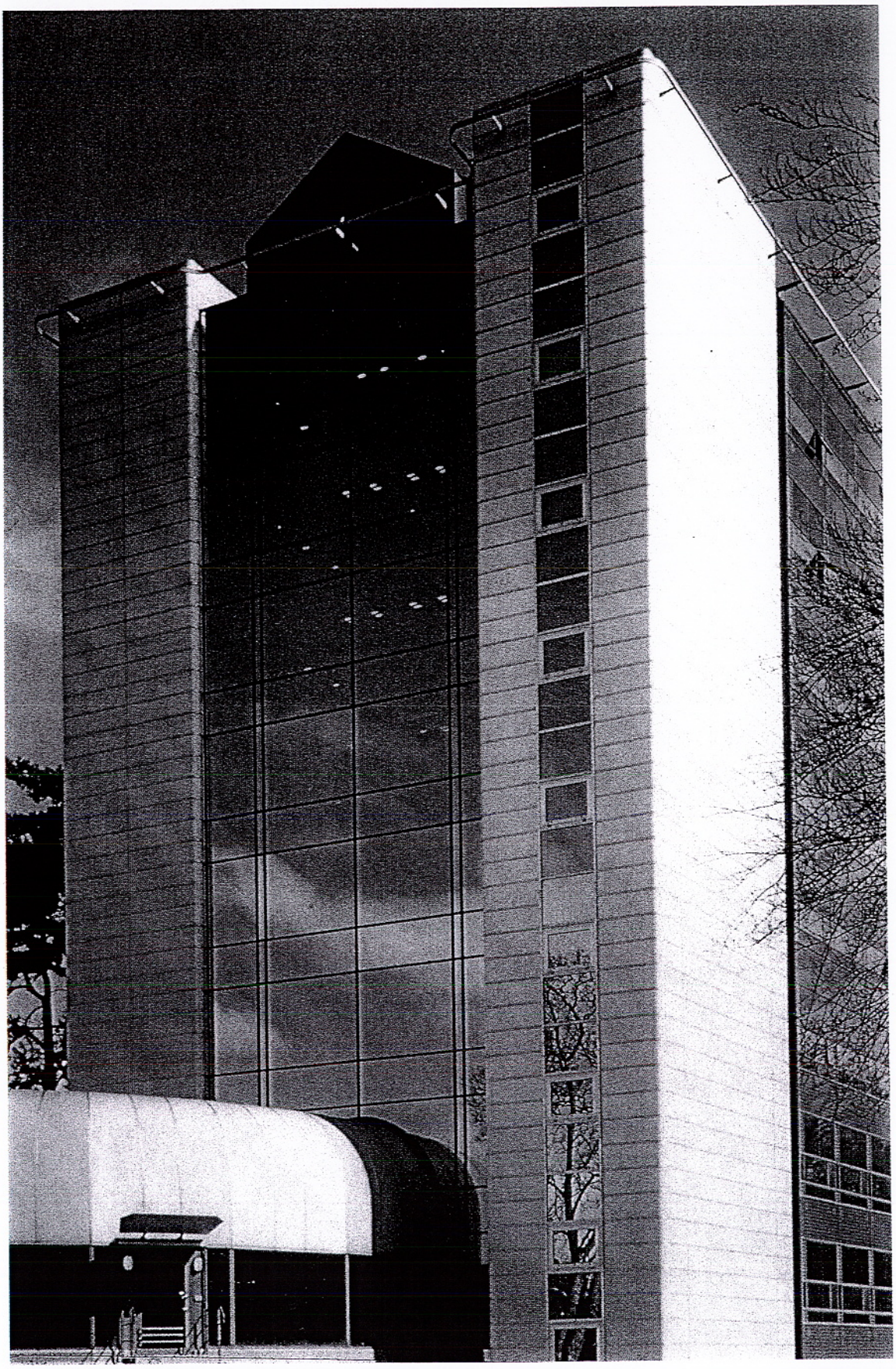
2.4. Fachadas.

Las soluciones arquitectónicas para las fachadas vienen condicionadas por el presupuesto disponible para su realización en mayor proporción que para otras partes del edificio. Dentro de este condicionamiento general, debe de huirse tanto de la frialdad y de la monotonía, como del recargado excesivo y la ostentación.

Además de las tradicionales fachadas de fábrica de ladrillo, el mercado ofrece hoy día al proyectista múltiples opciones de elementos constructivos industrializados de calidad garantizada y de gran rapidez de ejecución. Entre ellos se pueden mencionar: paneles sandwich formados por chapas de acero galvanizadas o pintadas; placas de otros metales como titanio o aluminio; vidrio en todas sus variantes; placas de hormigón; y chapeados de madera de todas clases.

Cuando estos elementos se emplean constituyendo muros cortina, la estructura metálica presenta especiales ventajas respecto a la de hormigón, debido a la facilidad con que puede ejecutarse el amarre entre fachada y estructura.





3. CRITERIOS DE DISEÑO.

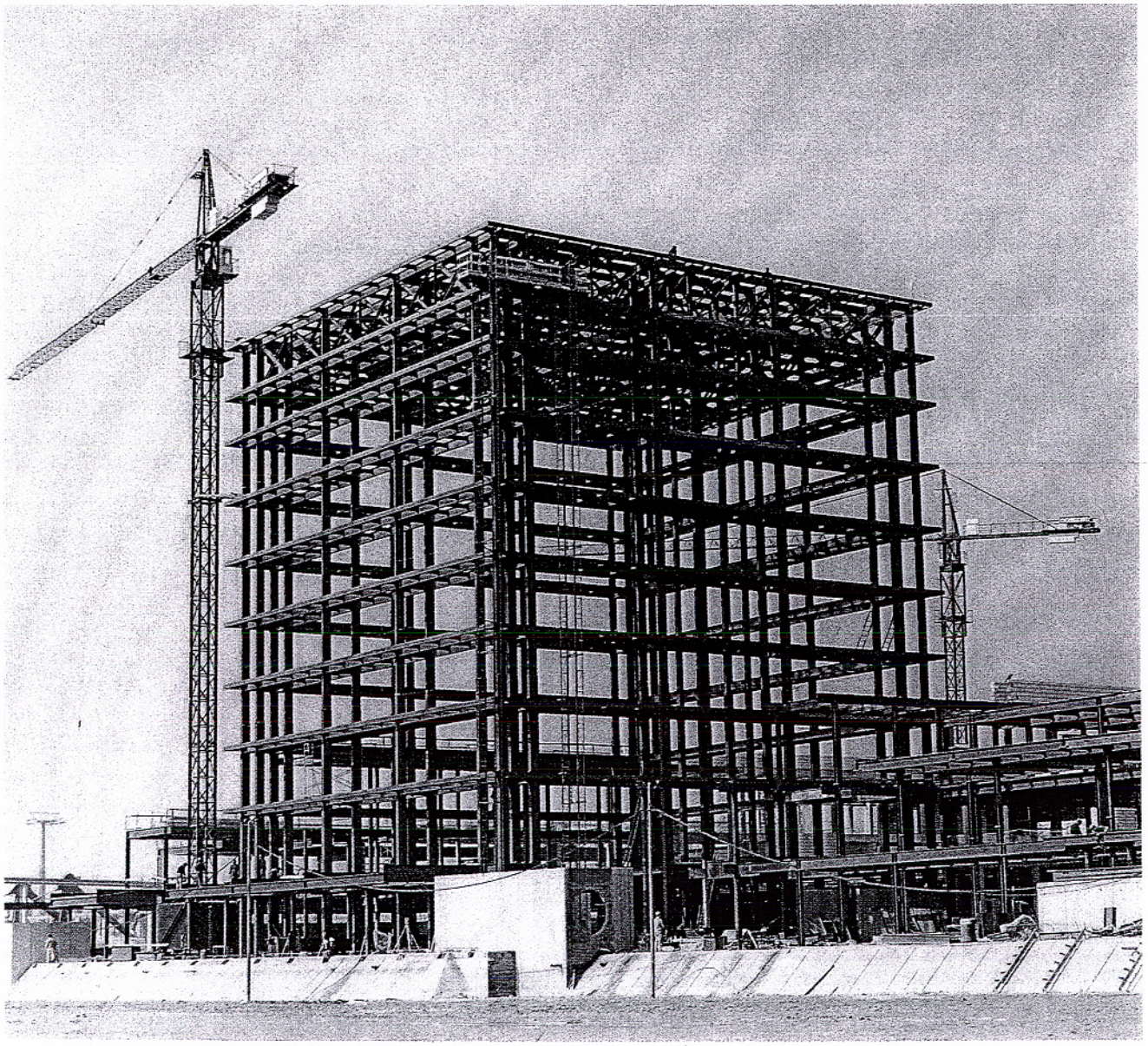
3.1. Soluciones estructurales.

Decidida la configuración general del edificio se diseña el esquema de la estructura que se adapta al mismo y se definen sus características esenciales. Entre éstas, una de las más importantes es la tipología de los nudos, es decir su mayor o menor rigidez al giro, que puede oscilar desde la libre articulación hasta el empotramiento perfecto. Esto es algo que en la estructura metálica puede materializarse con una adaptación casi exacta al modelo teórico.

En la mayoría de los casos, el sistema estructural puede descomponerse en una serie de pórticos planos, arriostrados entre sí, cuyo estudio y cálculo puede acometerse independientemente.

Los elementos básicos de este tipo de estructura son los pilares que llevan las cargas, que les transmiten las vigas, hasta los cimientos y que, a su vez, han sido transmitidas a las vigas por los forjados de piso o por los cerramientos. La estabilidad del conjunto y la transmisión de los esfuerzos horizontales a las cimentaciones se consigue por medio de los forjados y de los arriostramientos que se establecen entre los pórticos.

A continuación se analizan las diferentes soluciones estructurales, en función de los posibles tipos de unión entre vigas y pilares.



3.1.1. Estructuras de nudos articulados.

Son aquéllas en las que no se transmiten momentos entre las barras que concurren en los nudos (Fig. 3.1).

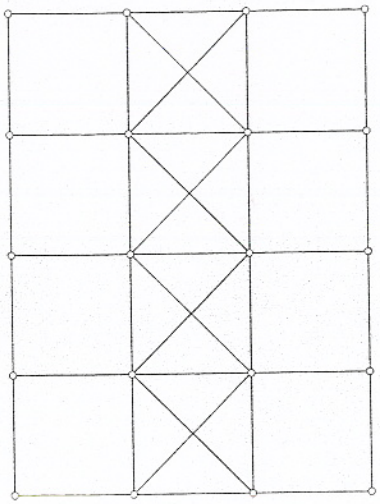


Fig. 3.1.

Su esquema estructural es el más sencillo. En él todas las uniones entre pilares y entre vigas y pilares se consideran articuladas, por lo que cada pórtico es un mecanismo que debe ser estabilizado por medio de arriostramientos. De este tipo se derivan los sistemas a y b que se exponen a continuación:

a. Estructura con pilares continuos y vigas apoyadas (Fig. 3.2.).

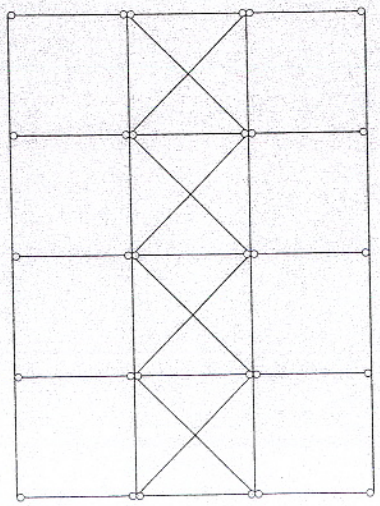


Fig. 3.2.

Es una solución muy utilizada en la práctica. Elimina la mayor parte de las uniones entre pilares en cada planta, reduciéndolas a las imprescindibles debidas a la limitación de su longitud por el transporte y el montaje. Estas uniones deben garantizar la continuidad del pilar. En general, se trata de uniones sencillas que permiten, si es necesario, la reducción de la sección del perfil conforme se avanza en altura. Las uniones de las vigas a los pilares son también de fácil ejecución.

Debido a su gran sencillez, esta solución es sumamente competitiva, aunque el peso de la estructura no sea el óptimo.

A efectos de las cargas verticales, las vigas trabajan como biapoyadas a flexión simple y los pilares, principalmente, a compresión simple o compuesta considerando los momentos que la excentricidad de las sobrecargas, y eventualmente de las cargas de peso propio, producen en ellos.

Este diseño es especialmente adecuado en terrenos en que puedan producirse asientos diferenciales, por su buena adaptación a estos efectos.

La resistencia ante esfuerzos horizontales (viento, sísmicos u otros), así como la estabilidad del conjunto, puede conseguirse por medio de triangulaciones, como se indica en el esquema u otras disposiciones (pantallas, muros, pórticos rígidos ..) que los transmitan a la cimentación. Para la ubicación de estos elementos suelen utilizarse cajas de ascensores o de escaleras o medianerías que se consideren que nunca van a sufrir modificaciones. También pueden colocarse en las fachadas, siempre que su inserción sea compatible con la arquitectura general del edificio.

b. Estructuras con pilares continuos y vigas continuas, con apoyo simple entre ellos (Fig. 3.3.).

Este diseño presenta la ventaja sobre el anterior de la reducción del canto de las vigas, especialmente si éstas han tenido que ser dimensionadas por flecha, con las consiguientes disminuciones en el peso de la estructura y de la altura del edificio. Igual que en el sistema anterior son necesarios arriostramientos para la absorción de los esfuerzos horizontales.

Para su realización, es necesario resolver el problema del cruce de vigas y pilares en los nudos manteniendo la continuidad de ambos sin transmitir momentos entre ellos. Este problema puede resolverse de varias formas, siendo la más habitual realizar uno de los dos, viga o pilar, con una sección com-

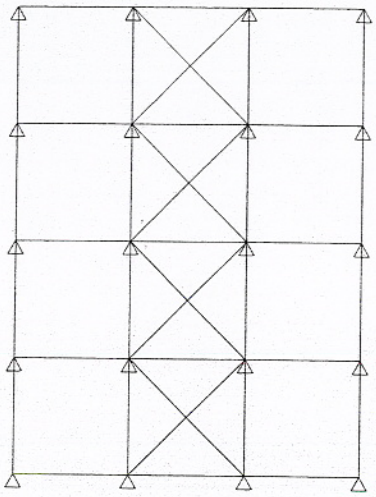


Fig. 3.3.

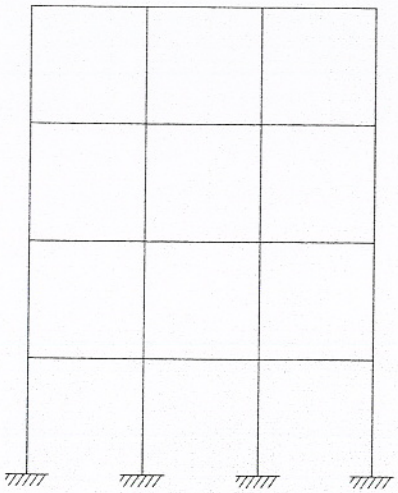


Fig. 3.4.

puesta de dos perfiles dejando un hueco entre ellos por el que pueda pasar el otro elemento, pilar o viga. Ello permite, en general, eliminar la excentricidad de las cargas transmitidas por las vigas a los pilares (circunstancia inevitable con la solución anterior) lo que, junto con la continuidad de las vigas, proporciona un ahorro de peso en el total de la estructura. Sin embargo, la constitución de un elemento compuesto de dos perfiles, resulta menos económico y puede anular la reducción del costo obtenido por el ahorro de peso. Es, como siempre, el proyectista el que, en cada caso y circunstancia, debe escoger la mejor solución.

3.1.2. Estructuras de nudos rígidos.

Son aquellas en que las uniones entre vigas y pilares constituyen nudos rígidos, capaces de transmitir momentos entre sí, constituyendo pórticos capaces de resistir esfuerzos horizontales, transmitiéndolos a la cimentación (Fig. 3.4.). El proyectista debe diseñar con detalle estos nudos para asegurarse de que en su realización son realmente rígidos y, por tanto, funcionan de acuerdo con las hipótesis de cálculo.

En este tipo no son necesarias estructuras triangulares de arriostramiento, lo que, en muchos casos, puede ser un condicionamiento decisivo. La estructura es más compleja de ejecución debido principalmente a los nudos, y su peso, es generalmente, más elevado.

En casos de terrenos con asientos previsibles, su alto grado de hiperestaticidad las hace menos adecuadas que las anteriores.

3.1.3. Estructuras con nudos rígidos y nudos articulados.

Cuando en un edificio, por su funcionalidad y disposición estructural, no es posible utilizar arriostramientos triangulares, pueden sustituirse éstos por pórticos o marcos rígidos. Esta solución es válida tanto en plantas bajas como intermedias.

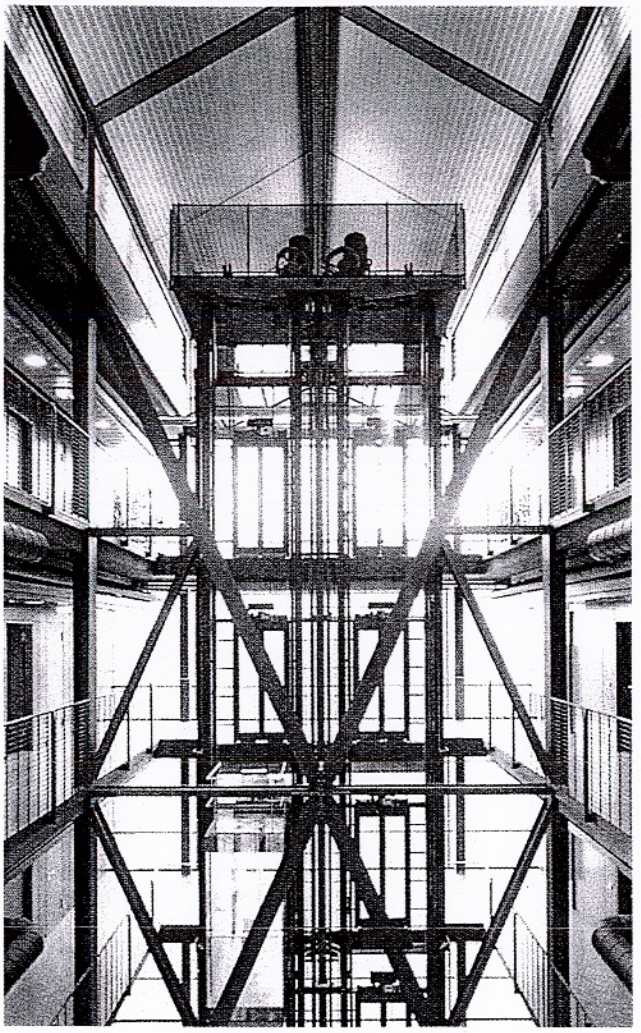
Los distintos sistemas estructurales descritos pueden aparecer combinados en un mismo edificio, aprovechando las ventajas que cada uno de ellos puede ofrecer en diferentes zonas o plantas.

3.2. Arriostramiento general.

Como ya se ha indicado anteriormente, los sistemas estructurales de nudos articulados son inestables e incapaces de absorber por sí mismos esfuerzos horizontales. Para conseguirlo, es preciso complementarlos con otros elementos estabilizadores que hagan de arriostramiento.

Hay que tener en cuenta que los sistemas de arriostramiento deben establecerse en los dos planos perpendiculares de un edificio de planta rectangular, con el fin de poder resistir los esfuerzos horizontales cualquiera que sea su dirección, descomponiéndolos en sus componentes según los dos planos del edificio.

En ocasiones, la situación de las estructuras de arriostramiento viene determinada, por exclusión antes que por razones de idoneidad estructural.



En la elección de su número y distribución debe tenerse en cuenta:

• Deben situarse de manera que sean capaces de resistir fuerzas horizontales en cualquier dirección, lo que, en la práctica, supone poder absorber fuerzas en las dos direcciones principales del edificio.

• Si en una dirección no puede disponerse más que una estructura de arriostramiento, en la otra deberán disponerse al menos dos, para poder resistir el momento de torsión que la excentricidad de las fuerzas horizontales actuantes pueda producir (figs. 3.5. - 3.6.).

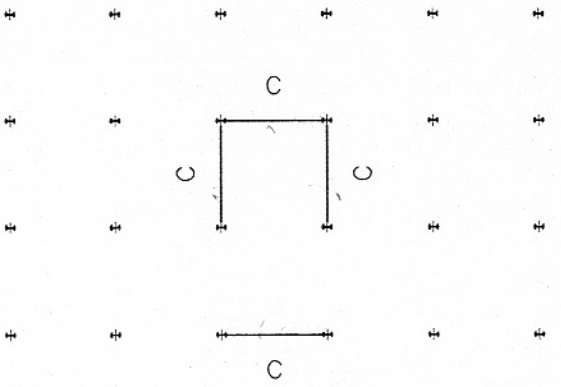


Fig. 3.5.

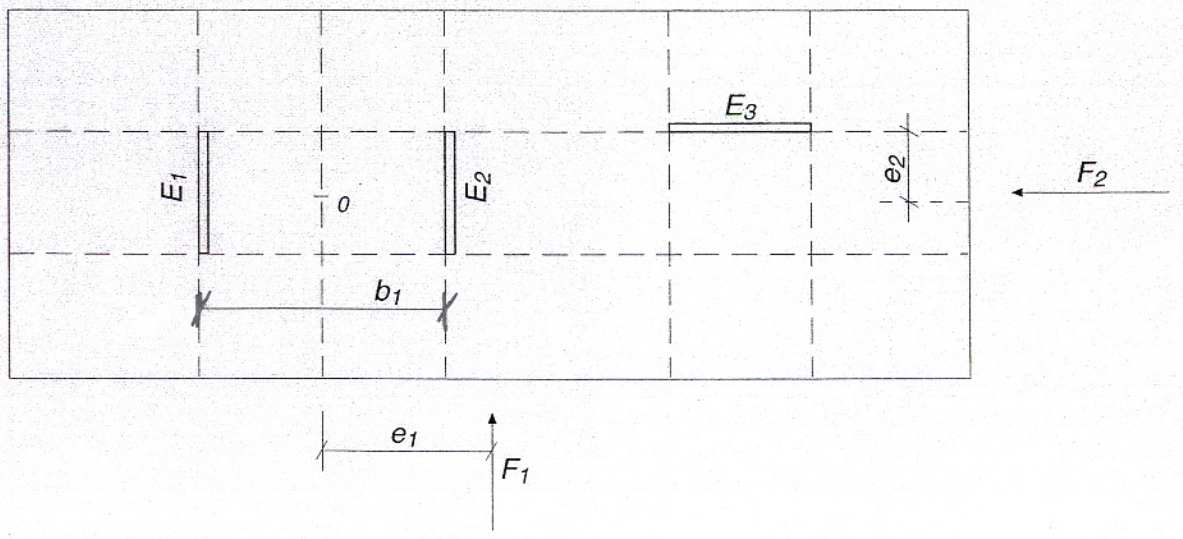


Fig. 3.6.

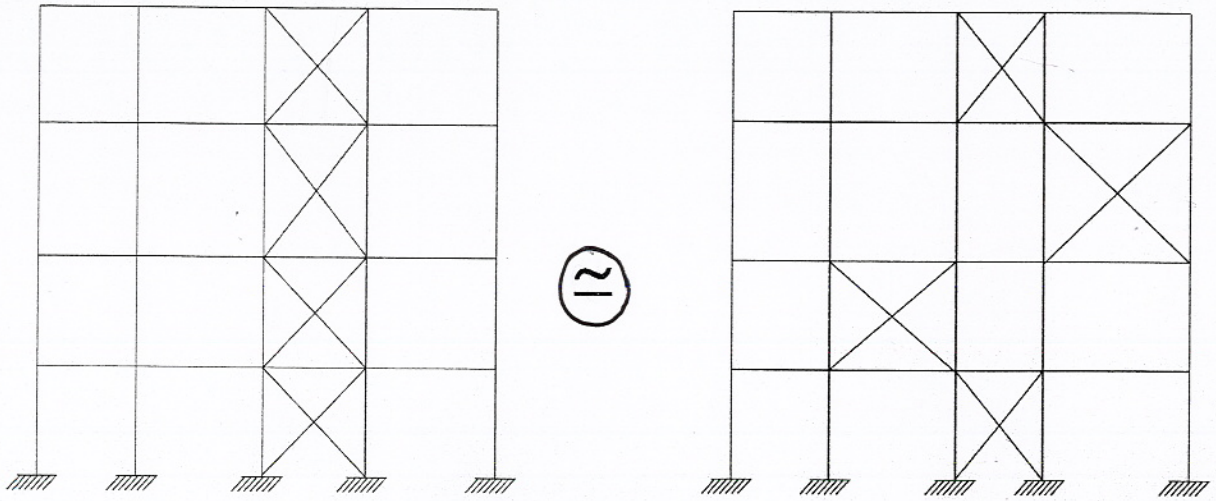


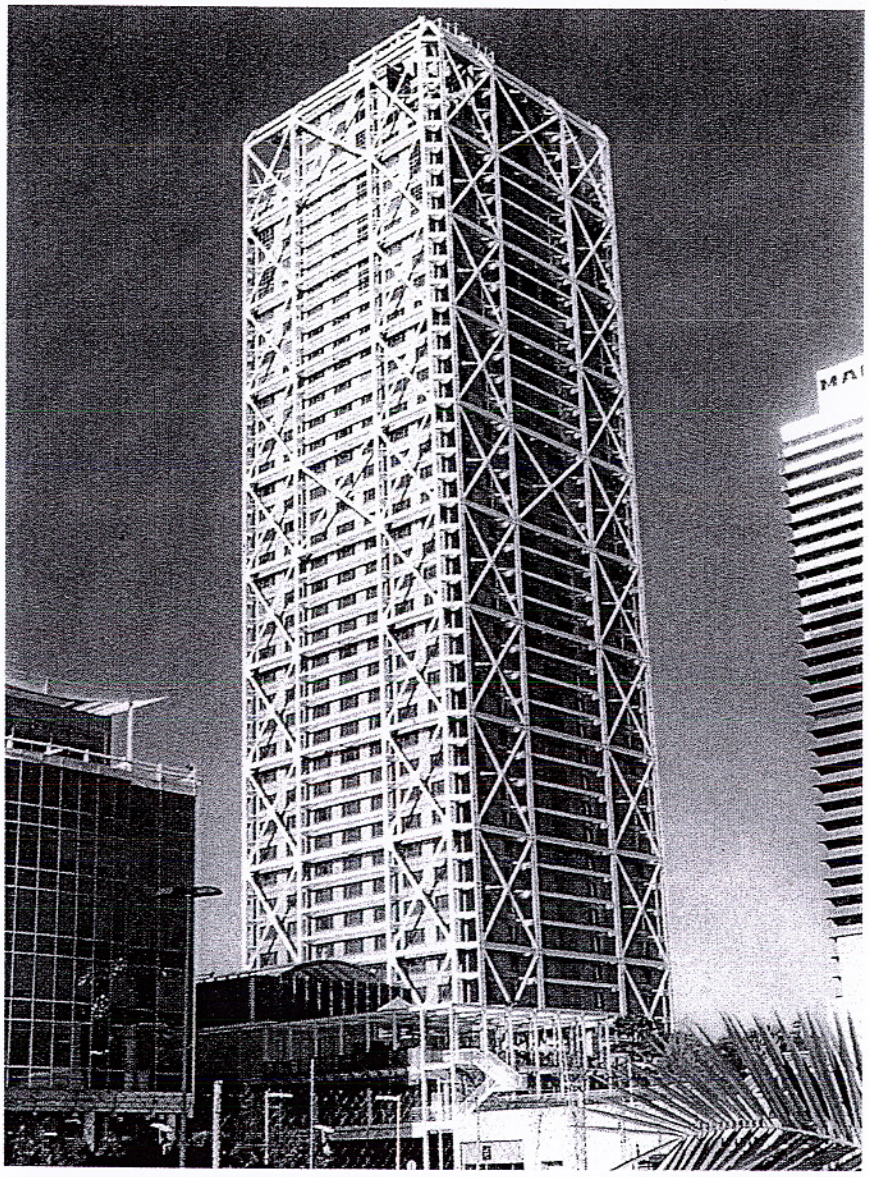
Fig. 3.7.

• En el caso de dos estructuras paralelas, para la absorción de una fuerza horizontal centrada con las dos, la solicitación de cada una de ellas será directamente proporcional a sus rigideces relativas. Ello se justifica por la rigidez (prácticamente infinita) de los forjados.

• Análogas dificultades para la ubicación de las estructuras de arriostramiento en planta, pueden darse para su materialización vertical.

Para poder resolver esta cuestión debe tenerse en cuenta que, dada la rigidez de los forjados y su papel de diafragmas transmisores de los esfuerzos horizontales, una estructura de arriostramiento puede distribuirse entre varias plantas en distintas crujías, teniendo en cuenta, obviamente, las compresiones o tracciones que ello origine en las vigas intermedias (fig. 3.6.).

• Si, en algún edificio especial, en alguna planta no existiese forjado en algunos vanos o en este se abriesen huecos importantes, sería necesario un estudio especial, que podría consistir en el establecimiento de vigas horizontales, como arriostramiento en el plano del forjado en cuestión.



3.3. Definición de elementos estructurales.

A continuación se presentan algunos de los elementos constructivos básicos, necesarios para materializar una estructura (pilares y vigas), dando unas recomendaciones para la elección del tipo de perfil más adecuado en cada caso. También se indican una serie de uniones habituales. Finalmente se exponen soluciones para la materialización de los elementos de estabilidad horizontal.

3.3.1. Pilares.

Los pilares o soportes son elementos que transmiten las cargas a la cimentación. La flexión, generalmente, es pequeña (excepto en los sistemas de nudos rígidos), pudiendo incluso ser prácticamente nula en los casos de nudos articulados.

El perfil más conveniente es la sección H (HEB, HEA, HEM), por requerir una menor cantidad de mano de obra y porque, debido a ser un perfil abierto, sus uniones son más sencillas. Su utilización como perfil simple es adecuada debido a que sus radios de giro son del mismo orden de magnitud en ambas direcciones. No obstante, en casos de compresión centrada, pueden existir perfiles tubulares simples con mayor aprovechamiento, pero la complejidad de las uniones en éstos, hace que los perfiles en H sean , en general, la mejor elección.

Otro sistema para el diseño de pilares consiste en la combinación de dos o más perfiles laminados, tipo UPN ó IPE, formando lo que se denomina sección compuesta. Se realiza uniendo los perfiles directamente entre sí por medio de un cordón de soldadura, (continuo para evitar oxidaciones en el interior) (Fig. 3.8.), o solidarizando los perfiles por medio de presillas (Fig. 3.9.) o elementos de celosía. En estos pilares compuestos puede conseguirse que las esbelteces sean las idóneas en las dos direcciones, obteniendo un óptimo resultado en el caso de compresión centrada.

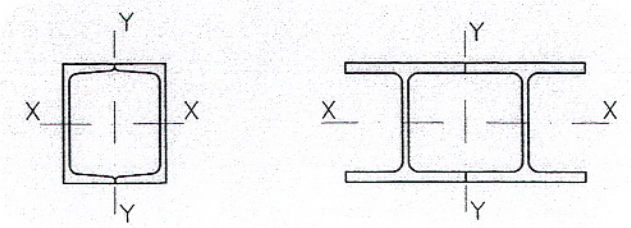


Fig. 3.8.

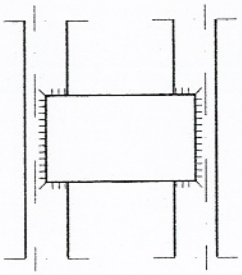


Fig. 3.9.

Como en el caso de los perfiles tubulares, en estos perfiles compuestos las uniones son más complejas que en los perfiles simples.

Pueden utilizarse también secciones compuestas formadas por perfiles y chapas. Únicamente en los casos en los que las solicitaciones sean muy elevadas es recomendable su utilización.

Se insiste en el empleo de perfiles simples abiertos por la facilidad que presentan sus uniones, así como la menor aportación de mano de obra que conlleva su elaboración.

En el cálculo de un pilar inciden además de la solicitación, el tipo de acero, la longitud entre los nudos inicial y final, y las propias vinculaciones de sus extremos. Estos factores se analizan en el capítulo de cálculo de elementos.

3.3.2. Vigas.

Las vigas o jácenas o dinteles son elementos que reciben las cargas de los forjados y las transmiten a los pilares, trabajando principalmente a flexión.

El perfil ideal, trabajando a flexión, que proporciona el máximo rendimiento es aquel que tiene la masa material alejada del c.d.g. La materialización más apropiada de este ideal se produce en los perfiles laminados en doble T (Fig. 3.10). Por ello, se recomienda la utilización, siempre que sea posible, de



Fig. 3.10.

perfiles tipo IPE. En los casos en los que la reducción del canto es un gran condicionante pueden usarse perfiles en H, a pesar de su menor rendimiento.

En los casos de vigas de grandes luces y con cargas elevadas, cuando los perfiles laminados no proporcionen la resistencia y la rigidez requeridas, deben utilizarse vigas armadas, abiertas o en cajón (Fig. 3.11. y 3.12.).

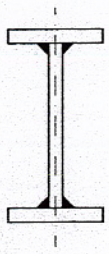


Fig. 3.11.

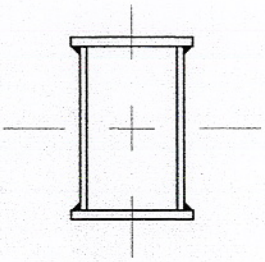


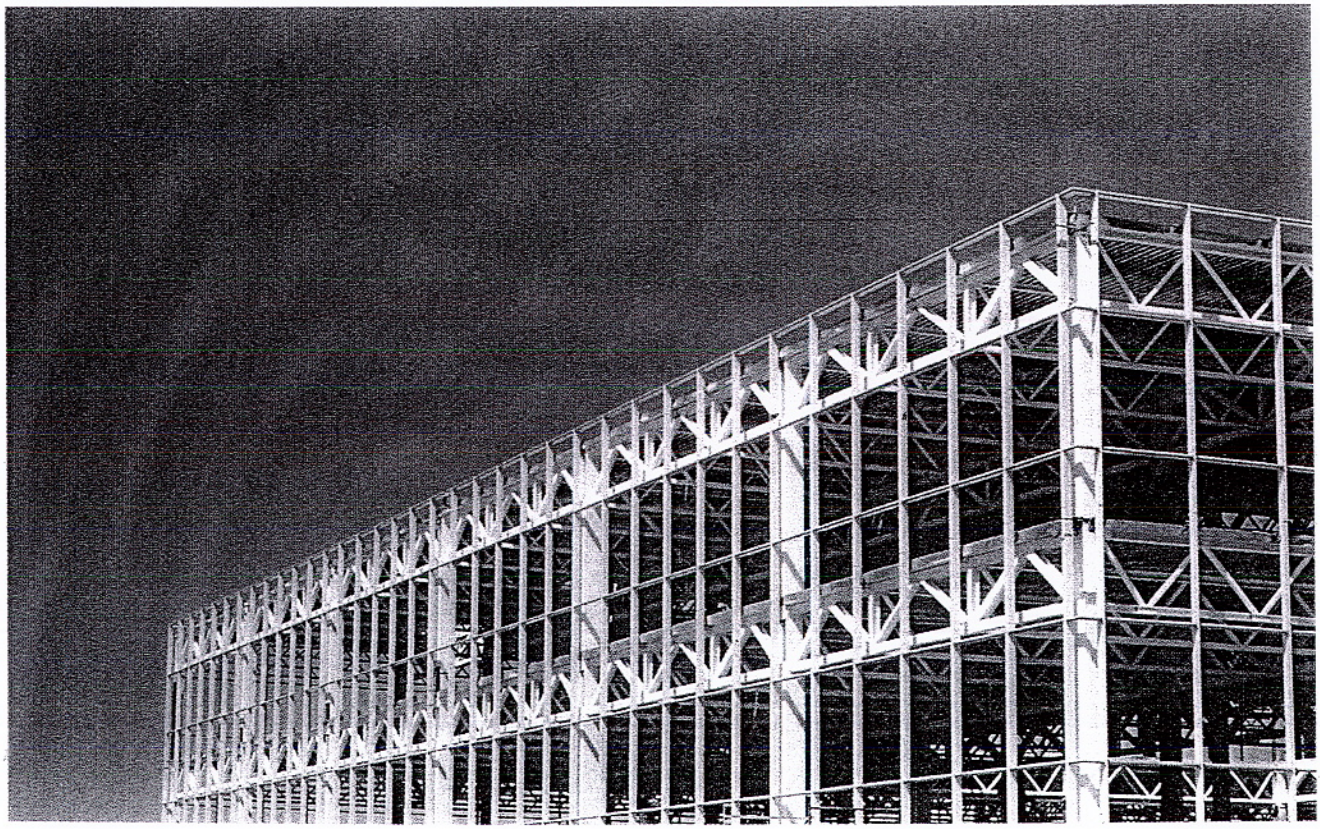
Fig. 3.12.

En el cálculo de estas vigas, además de la comprobación de la resistencia y la rigidez necesaria de las mismas, deben hacerse, en algunos casos, las siguientes:

• Comprobación al pandeo lateral cuando este pueda producirse (en la mayoría de los casos no es necesario, ya que el forjado lo impide).

• Comprobación del abollamiento del alma. No es necesaria, en general, en los perfiles laminados. Lo es en las vigas armadas, en las cuáles deben comprobarse también las soldaduras entre alas y alma.

En los puntos de aplicación de fuertes cargas puntuales deben colocarse rigidizadores verticales.



3.3.3. Uniones.

Como ya se ha indicado anteriormente, del correcto diseño de las uniones depende que el trabajo de la estructura sea acorde al del modelo previsto para el cálculo y que, por tanto, las solicitaciones obtenidas para sus elementos correspondan a las reales.

Las uniones pueden calificarse como rígidas, semirígidas o articuladas dependiendo de su capacidad de giro. Esta viene determinada por el grado de empotramiento K definido por el cociente entre el momento real que es capaz de absorber la unión y el momento de empotramiento perfecto que correspondería al extremo de la pieza estudiada (viga o pilar).

Según dicho coeficiente K, las uniones se clasifican en:

- Uniones rígidas $K \geq 90\%$
- Uniones semirígidas $20\% < K < 90\%$
- Uniones articuladas $K \leq 20\%$

La imprecisión existente en el análisis estructural al considerar el grado de empotramiento de cada unión dificulta su cálculo. Por ello, en lo que sigue a continuación se incluyen únicamente uniones cuyo diseño garantiza unos comportamientos próximos a los teóricos (rígidos o articulados exclusivamente). Existe bibliografía específica que debe consultarse si se desea calcular con uniones semirígidas (Eurocódigo 3).

Por todo lo anterior, el estudio de las uniones debe realizarse meticulosamente, teniendo en cuenta su gran influencia en el costo total de la obra.

Tanto bajo el punto de vista económico como de garantía de calidad, se va a dar el máximo protagonismo a las uniones atornilladas como el sistema preferencial de uso en obra, siguiendo las tendencias actuales.

El uso de uniones soldadas en obra no está proscrito, pero debe limitarse al máximo.

En el capítulo 5 y en el anexo III se desarrollan estas uniones (fig. 3.13. y 3.14.).

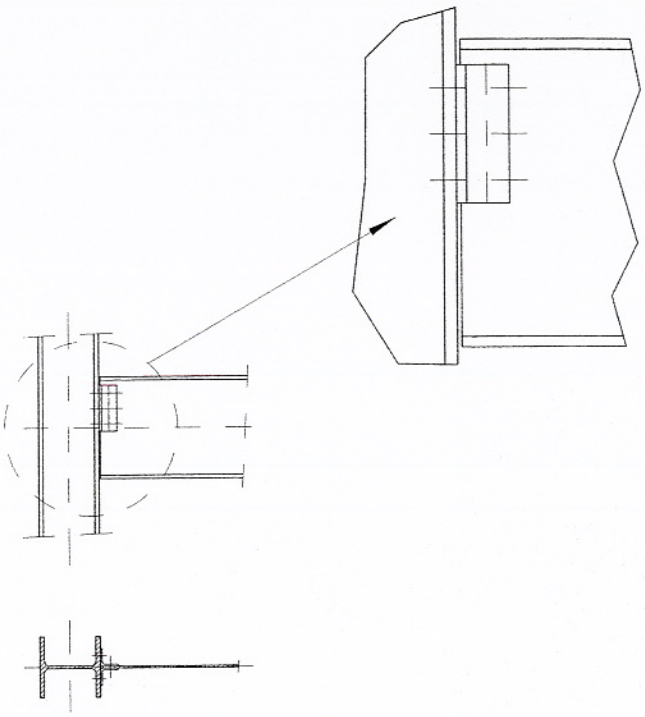


Fig. 3.13

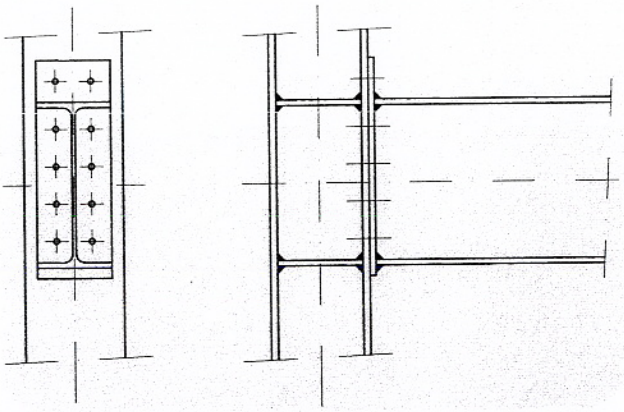
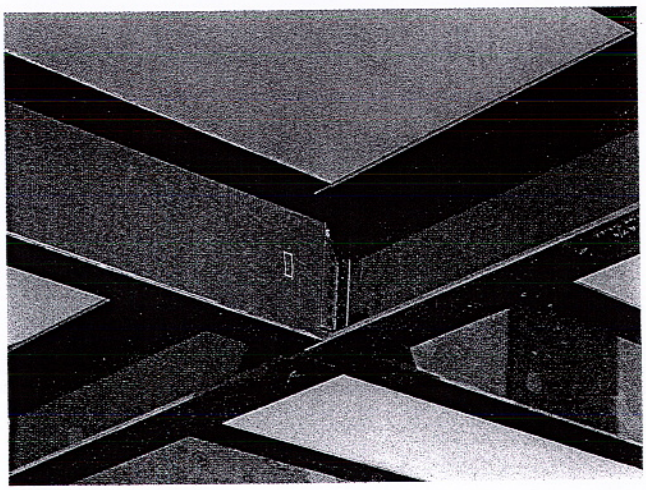


Fig. 3.14





3.3.4 Elementos de celosía para absorber esfuerzos horizontales.

La forma habitual que se adopta para estos elementos es la de celosías trianguladas que con los pilares y vigas adyacentes, forman un conjunto que, anclado en la cimentación, trabaja como ménsula. De estas celosías la más simple y de uso más generalizado es la de forma de cruz de San Andrés.

Estas estructuras conformadas por diagonales en los dos sentidos son hiperestáticas. Sin embargo, se supone que las diagonales sólo trabajan a tracción (hipótesis admisible dada su gran esbeltez para el trabajo a compresión), por lo que cada una de estas estructuras equivale a dos estructuras isostáticas trabajando cada una de ellas en un solo sentido (Fig. 3.15.).

Estas estructuras pueden adoptar otras disposiciones para permitir la existencia de huecos en su plano. Entre ellas las representadas en los esquemas adjuntos (fig. 3.16).

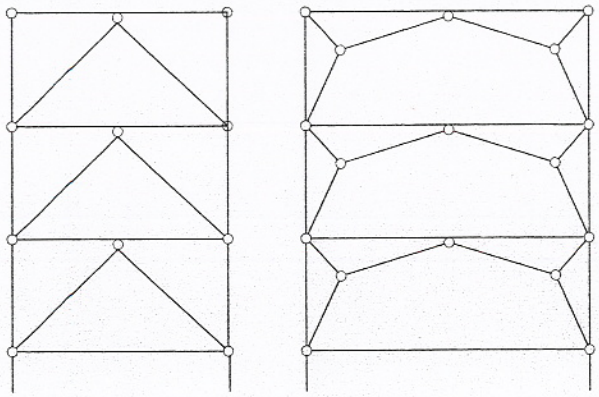


Fig. 3.16.

Los esfuerzos obtenidos en pilares y vigas como parte de las celosías aquí descritas, deben añadirse a los obtenidos en dichos elementos como entramado resistente a las cargas verticales, para el cálculo final de la sección.

La variedad de soluciones que pueden diseñarse es muy grande. A título de ejemplo presentamos las adoptadas en algunos edificios que pueden considerarse como emblemáticos.

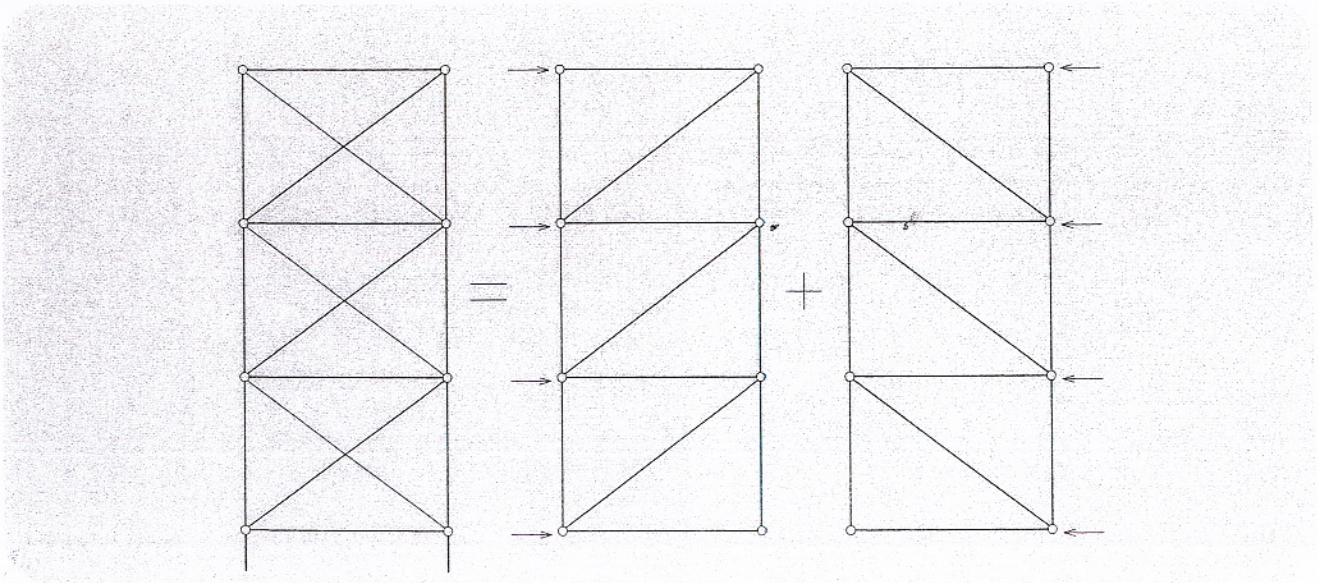


Fig. 3.15.

El Seagram Building (158 m de altura), diseñado por Mies Van der Rohe, presenta tres partes diferenciadas en altura con otros tantos sistemas estabilizadores. Hasta la planta 17, resuelve la estabilidad horizontal por medio de elementos de hormigón armado; entre las plantas 17 y 29, emplea celosías trianguladas en K; y a partir de ésta, se resuelve por medio de pórticos rígidos (Fig. 3.17.).

En el Toronto Dominion Center (224 m.) se recurre a celosías trianguladas en las paredes de las cajas de ascensores, añadiendo celosías de toda la anchura de la estructura en algunos pisos intermedios para darle mayor rigidez al conjunto y disminuir las flechas horizontales (3.18.).

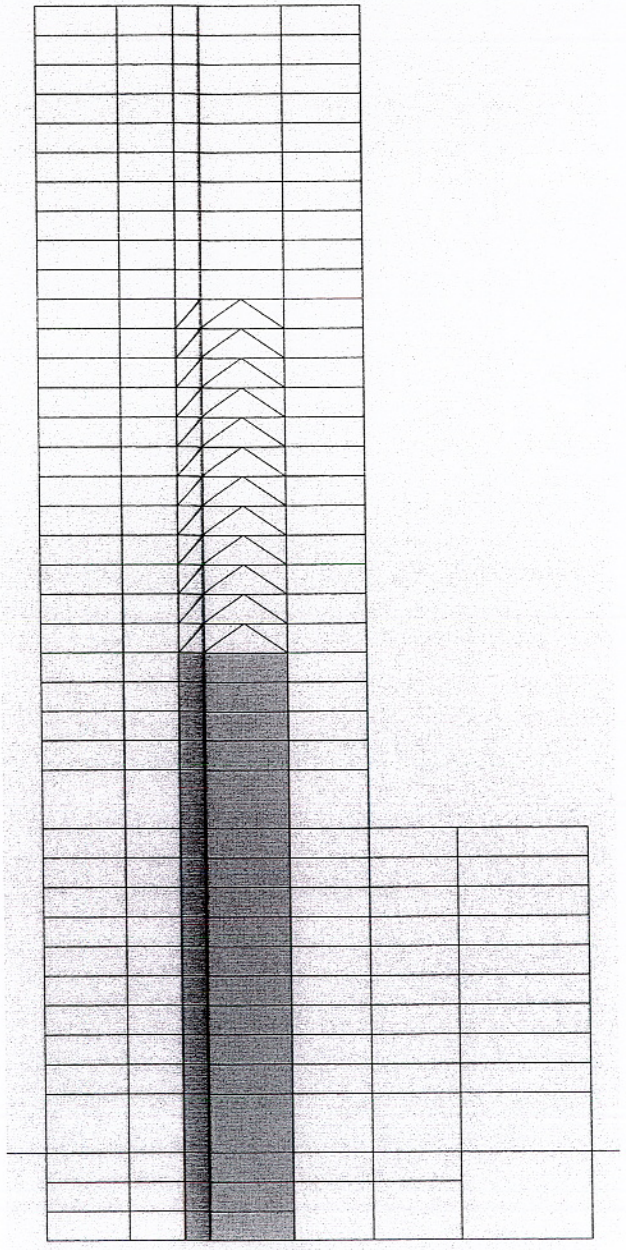


Fig. 3.17.

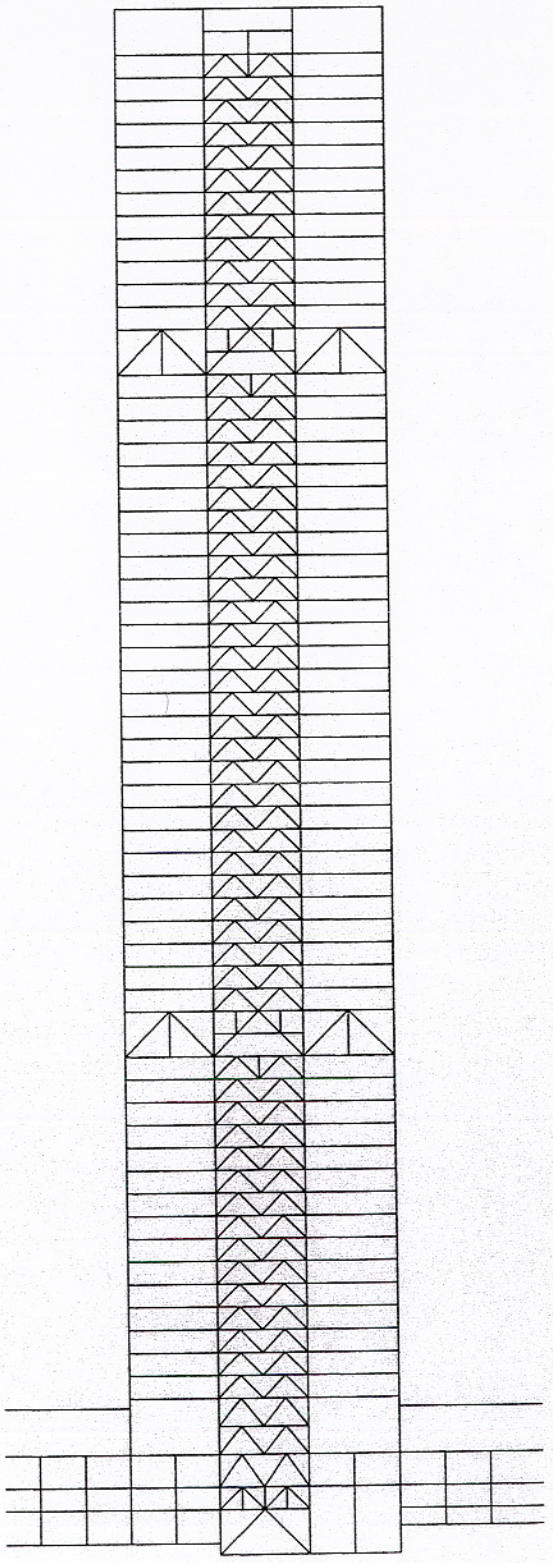


Fig. 3.18.

Por último el World Trade Center de Nueva York, diseñado por Yamasaki con sus 410 m de altura, utiliza un concepto de tubo estructural, con unión rígida de unos pilares de fachada muy próximos con las vigas de fachada, que dota a la estructura de una rigidez capaz de absorber todos los esfuerzos . La Torre Picasso de Madrid, del mismo arquitecto, presenta un diseño similar. En él, las uniones en obra se realizan en los puntos centrales de los vanos de las vigas, por medio de tornillos, levantándose el edificio en función de unos singulares elementos formados por el pilar, en tramos de dos plantas, atravesado por las vigas correspondientes a modo de voladizos.

Un ejemplo de un edificio de menor altura es el de las oficinas centrales de la Bewag en Berlín (Fig. 3.19). En él se han dispuesto cuatro entramados de arriostramiento transversal, y uno longitudinal. Las celosías transversales son de pequeña anchura (a/2), por lo cual los desplazamientos horizontales son grandes. A fin de conseguir la reducción de dichos desplazamientos, se han introducido unas diagonales pretensadas que dotan a la celosía de una rigidez considerablemente mayor.

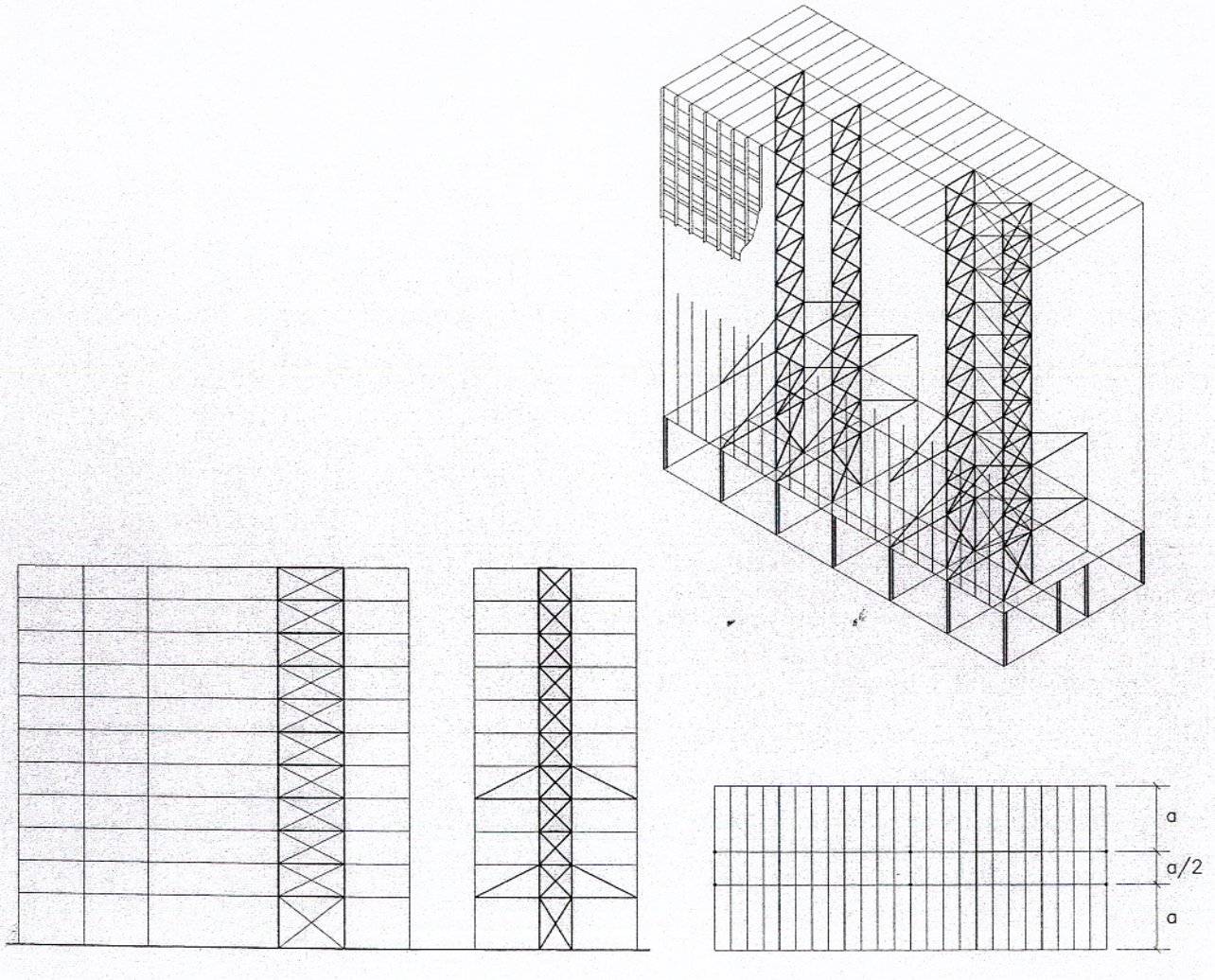


Fig. 3.19.