2

Construcción en acero

Introducción al diseño

Instituto Técnico
de la Estructura
en Acero



ITEA

ÍNDICE DEL TOMO 2

CONSTRUCCIÓN EN ACERO: INTRODUCCIÓN AL DISEÑO

Lección 2.1: Proceso de Diseño 1

1 INTRODUCCIÓN: OBJETIVOS DEL DISEÑO 4

2 ¿CÓMO ENFOCA EL PROYECTISTA UN NUEVO PROYECTO? 6

3 ¿CÓMO DESARROLLA EL PROYECTISTA EL SISTEMA ESTRUCTURAL? 8

3.1 Plantear un concepto inicial que pueda satisfacer bien las necesidades funcionales 8

3.2 Reconozca los principales sistemas estructurales y considere la resistencia y rigidez necesarias 11

3.3 Valore las cargas con precisión y estime las dimensiones de los elementos principales 13

3.4 Análisis estructural completo, utilizando elementos de dimensiones estimadas con diseño adecuado de uniones, relativo a detalles reales 14

3.5 Comunique el objeto del diseño mediante planos y especificaciones 15

3.6 Supervise la ejecución 15

3.7 Realice un mantenimiento regular 15

3.8 Diferencias de énfasis en el enfoque del diseño respecto al diseño de un edificio de tamaño medio 15

3.8.1 Viviendas unifamiliares 15

3.8.2 Puentes 16

3.8.3 Plataformas petrolíferas 16

4 RESUMEN FINAL 17

5 BIBLIOGRAFÍA 19

APÉNDICE 1: El juego de rol “La casa del Mono” para un grupo de estudiantes en un seminario, figura 16 19

Lección 2.2.1: Principios de diseño 23

1 INTRODUCCIÓN 26
2 LAS INCERTIDUMBRES EN DISEÑO ESTRUCTURAL 28
3 DISEÑO PARA EVITAR EL COLAPSO 30
3.1 Antecedentes 30
3.2 Estabilidad 31
3.3 Robustez 32
4 OTROS OBJETIVOS DEL DISEÑO 33
4.1 Deformación 33
4.2 Vibración 33
4.3 Resistencia al incendio 34
4.4 Fatiga 34
4.5 Ejecución 35
4.6 Mantenimiento 35
5 RESPONSABILIDADES DEL PROYECTO 36
6 RESUMEN FINAL 37
7 BIBLIOGRAFÍA 37

Lección 2.2.2: Bases de Diseño en Estado Límite y Coeficientes de Seguridad 39

1 INTRODUCCIÓN 40
2 BASES DE DISEÑO EN ESTADO LÍMITE 43
3 ACCIONES 46
3.1 Valores característicos de las acciones (G_k, Q_k y A_k) 46
3.2 Valores hipotéticos de las acciones (G_d, Q_d y A_d) 47
4 PROPIEDADES DEL MATERIAL 48
4.1 Valores característicos de las propiedades del material 48
4.2 Valores teóricos de las propiedades del material 48
5 DATOS GEOMÉTRICOS 49
6 COEFICIENTES PARCIALES DE SEGURIDAD 51
7 ESTADO LÍMITE ÚLTIMO 51
8 ESTADO LÍMITE DE SERVICIO 52
8.1 Flechas 52
8.2 Efectos dinámicos 52

9 MODELOS DE DISEÑO ESTRUCTURAL 54
10 RESUMEN FINAL 55
11 GLOSARIO 56
12 BIBLIOGRAFÍA 57
13 BIBLIOGRAFÍA RELACIONADA 57
APÉNDICE: Coeficientes parciales de seguridad para las acciones 59

Lección 2.3: Bases para la Determinación de Cargas 63

1 INTRODUCCIÓN 66
2 ACCIONES PERMANENTES 68
2.1 Cargas permanentes 68
3 ACCIONES VARIABLES 71
3.1 Cargas impuestas 71
3.2 Reducciones permitidas en la carga impuesta 72
3.3 Cargas superimpuestas en puentes 72
3.4 Cargas generadas por una grúa 73
3.5 Cargas climáticas 73
3.6 Cargas de viento 74
3.7 Cargas de nieve 77
3.8 Carga de las olas 77
3.9 Efectos de la temperatura 78
3.10 Material contenido 78
3.11 Cargas sísmicas 78
3.12 Cargas accidentales 78
4 RESUMEN FINAL 79
5 BIBLIOGRAFÍA 79
6 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 79

Lección 2.4.1: Historia del Hierro y del Acero en Estructuras 81

1 INTRODUCCIÓN 84
2 EVOLUCIÓN DE LOS METALES FÉRRICOS 85

2.1 Hierro de forja 85
2.2 Hierro fundido o colado 85
2.3 Hierro forjado industrial 85
2.4 Acero..... 85
3 LOGROS ALCANZADOS CON HIERRO Y ACERO ESTRUCTURALES 87
4 EL PERIODO DE LA FUNDICIÓN (1780-1850) 88
4.1 Puentes de fundición en arco 88
4.2 La fundición en los edificios 88
4.3 Combinación de fundición y hierro forjado en la construcción 90
4.4 Puentes colgantes 91
5 EL PERIODO DE HIERRO FORJADO (1850-1900) 92
5.1 El hierro en los puentes 92
5.2 El hierro forjado en los edificios 93
6 EL PERIODO DEL ACERO (1880-ACTUALIDAD) 95
7 TÉCNICAS ACTUALES Y PERSPECTIVAS DE FUTURO 96
8 RESUMEN FINAL 97

Lección 2.4.2: Historia del Diseño en Acero 99

1 HISTORIA DEL DISEÑO EN ACERO: ESTADO DEL CONOCIMIENTO DE ESTRUCTURAS EN EL SIGLO XVIII Y ANTERIORES 102
2 ESTADO DEL CONOCIMIENTO ESTRUCTURAL EN GRAN BRETAÑA A PRINCIPIOS DEL SIGLO XIX 103
3 CONOCIMIENTO DE LA MADERA A PRINCIPIOS DEL SIGLO XIX 104
4 CONOCIMIENTOS DE LA FUNDICIÓN A PRINCIPIOS DEL SIGLO XIX 105
5 CONOCIMIENTO DEL HIERRO FORJADO A PRINCIPIOS DEL SIGLO XIX 107
6 LOS AÑOS DE LOS ENSAYOS 1820-1850 108
7 TERMINOLOGÍA DEFORMACIÓN, TENSIÓN, COHESIÓN, ETC. 110
8 EL DISEÑO ESTRUCTURAL ENTRE 1850 Y 1900 111
9 ANOTACIÓN SOBRE EL SIGLO XX 114
10 RESUMEN FINAL 115
11 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 116

Lección 2.4.3: Historia del Hierro y el Acero en Edificios 117

1 INTRODUCCIÓN 120
2 PRIMEROS USOS ESTRUCTURALES DEL HIERRO EN EDIFICIOS 121
3 EDIFICIOS INDUSTRIALES Y FÁBRICAS 123
4 CUBIERTAS DE GRAN LUZ 127
5 ESTRUCTURAS DE EDIFICIOS DE VARIAS PLANTAS 132
5.1 Construcción de forjados 133
5.2 Vigas y pilares 133
5.3 Construcción de pórticos 133
5.4 Estructuras arriostradas para carga de viento 134
6 EVOLUCIÓN DEL DISEÑO DE EDIFICIOS CON ESTRUCTURA DE ACERO 136
7 RESUMEN FINAL 142
8 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 142

Lección 2.4.4: Historia del Hierro y el Acero en Puentes 143

1 INTRODUCCIÓN 146
2 PUENTES EN ARCO 147
3 PUENTES CON ESTRUCTURAS DE VIGAS DE CELOSÍA, DE ALMA LLENA Y DE CAJÓN 151
4 PUENTES COLGANTES 161
5 RESUMEN FINAL 168
6 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 168

Lección 2.5.1: Introducción al Diseño de Edificios Industriales 169

1 TIPOS DE EDIFICIOS INDUSTRIALES 172
2 ESTRUCTURA DE ACERO PARA EDIFICIOS INDUSTRIALES 173
3 ELECCIÓN DE UN EDIFICIO INDUSTRIAL 174
4 FORMAS DE LOS EDIFICIOS INDUSTRIALES 175
5 LA ESTABILIDAD DE LOS EDIFICIOS INDUSTRIALES 178
6 ANÁLISIS GLOBAL 179
7 RESUMEN FINAL 180

Lección 2.5.2: Introducción al Diseño de Edificios Industriales Singulares 181

1 TIPOS DE EDIFICIOS INDUSTRIALES SINGULARES 184
2 MÉTODOS DE MANIPULACIÓN 185
3 ILUMINACIÓN NATURAL 187
4 SERVICIOS 188
5 CARGAS ESPECIALES EN CUBIERTA 189
6 MANTENIMIENTO 190
7 PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS 191
8 ALGUNOS EJEMPLOS DE EDIFICIOS ESPECIALES 192
8.1 Centrales térmicas de carbón 192
8.2 Hangar de mantenimiento de aeronaves 193
8.3 Fábrica de leche en polvo 196
8.4 Complejo industrial 197
9 RESUMEN FINAL 199

Lección 2.6.1: Introducción al Proyecto de Puentes de Acero y Mixtos I 201

1 FUNDAMENTOS 204
2 LA ESTRUCTURA DE APOYO 206
3 INTRODUCCIÓN A LA SUPERESTRUCTURA 208
4 PUENTES DE ACERO 210
4.1 Aspectos generales 210
4.2 Sistemas de tablero 211
5 PUENTES DE VIGAS ARMADAS 215
6 PUENTES DE VIGAS DE CELOSÍA 217
7 PUENTES DE VIGAS CAJÓN 219
8 RESUMEN FINAL 223
9 BIBLIOGRAFÍA 223

Lección 2.6.2: Introducción al Proyecto de Puentes de Acero y Mixtos: Parte 2

1 INTRODUCCIÓN 228
2 PASARELAS PEATONALES 229
3 PUENTES MÓVILES 231
3.1 Generalidades 231
3.2 Puentes basculantes 231
3.3 Puentes giratorios 232
3.4 Puentes levadizos 233
3.5 Otros tipos de puentes móviles 234
4 PUENTES DE SERVICIOS 235
5 GUÍA PARA EL DISEÑO INICIAL 237
5.1 Selección de la forma del puente 237
5.2 Selección de la luz 239
6 RESUMEN FINAL 240
7 LECTURAS ADICIONALES 241

Lección 2.7.1: Introducción al Diseño de Edificios de Varias Plantas: Parte 1 243

1 INTRODUCCIÓN 246
2 EL ESQUEMA ESTRUCTURAL 247
3 PILARES 248
4 VIGAS 250
5 ESTRUCTURAS DE FORJADO 252
6 ARRIOSTRAMIENTO 254
7 SISTEMAS ESTRUCTURALES 256
8 REQUISITOS DEL DISEÑO 259
9 RESUMEN FINAL 262
10 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 262

Lección 2.7.2: Introducción al Diseño de Edificios de Varias Plantas: Parte 2 263

1 INTRODUCCIÓN 266

2 DE LOS EDIFICIOS DE VARIAS PLANTAS A LOS RASCACIELOS 267
3 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS EDIFICIOS DE ACERO DE POCA ALTURA 270
4 SISTEMAS ESTRUCTURALES PARA EDIFICIOS DE GRAN ALTURA 272
5 MODELOS DE CÁLCULO 277
5.1 Hipótesis básicas 277
5.2 Estructura articulada 278
5.3 El arriostramiento de viga de celosía 279
6 REQUISITOS SÍSMICOS DE LAS ESTRUCTURAS DE ACERO 283
7 COMPORTAMIENTO CON CARGAS HORIZONTALES 284
8 RESUMEN FINAL 287
9 BIBLIOGRAFÍA 287
10 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 287

Lección 2.8: Aprender de los errores 289

1 INTRODUCCIÓN 292
2 ANÁLISIS DE ALGUNOS ERRORES ESTRUCTURALES 293
2.1 Generalidades 293
2.2 La relación contractual 293
2.3 Colapsos estructurales 294
2.3.1 Puentes de viga cajón 294
2.3.2 Puentes de vigas armadas 297
2.3.3 Estructuras de láminas 301
2.3.4 Edificios 303
3 RESUMEN FINAL 307
4 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 307
DIAPOSITIVAS COMPLEMENTARIAS 309

ESDEP TOMO 2
CONSTRUCCIÓN EN ACERO: INTRODUCCIÓN AL DISEÑO

Lección 2.1: Proceso de Diseño

OBJETIVOS/CONTENIDO

Presentar el desafío que supone el diseño creativo y explicar los métodos para su consecución.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

Se presupone un conocimiento general de la mecánica básica aplicada. Se recomienda leer los tres libros de J. E. Gordon [1,2,3].

LECCIONES AFINES

Al tratar esta lección del proceso de diseño en términos generales, casi todas las demás lecciones están relacionadas con ella de alguna manera, siendo las que más afines: 2: Introducción al Diseño, 16: Sistemas Estructurales: Edificios, 17: Sistemas Estructurales: Plataformas Petrolíferas, 18: Sistemas Estructurales: Puentes, y 19: Sistemas Estructurales: Otras Estructuras.

RESUMEN

La lección empieza con una definición del diseño y con la enumeración de algunos objetivos. En ella se explica de qué forma un proyectista puede enfocar un nuevo problema, en general, y cómo un proyectista de estructuras, en concreto, puede desarrollar un sistema estructural. Termina haciendo énfasis en los distintos enfoques del diseño para las diferentes clases de estructuras.

1. INTRODUCCIÓN: OBJETIVOS DEL DISEÑO

Los resultados de un buen proyecto de construcción pueden ser apreciados y utilizados por todo el mundo (véase la figura 1).

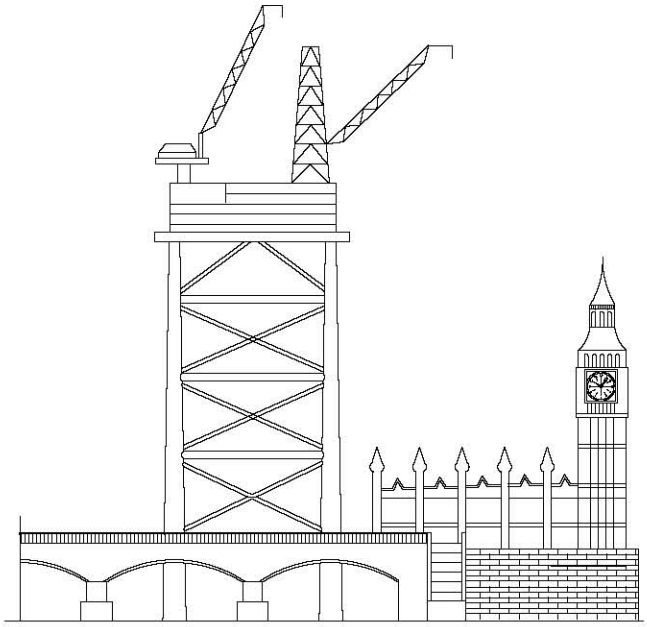


Figura 1 Escalas comparadas: edificios, puentes y plataformas petrolíferas

La cuestión es: ¿Cómo pueden los proyectistas profesionales desarrollar y producir proyectos mejores que los ya existentes, que beneficien y mejoren la realización de actividades humanas? En concreto, se trata de ver cómo puede utilizarse el acero eficazmente en estructuras para:

- viajar más fácilmente por un terreno abrupto en el que son necesarios puentes.
- hacer que funcionen procesos industriales básicos que requieran, por ejemplo, soportes para maquinaria, diques o instalaciones de plataformas de prospección petrolífera.
- ayudar en las comunicaciones que requieren postes.
- cerrar espacios en edificios, como en la figura 2.

El diseño es "el proceso mediante el cual se definen los medios de fabricación de un producto para satisfacer una necesidad determinada". Abarca desde las primeras ideas conceptuales, pasando por el estudio de las necesidades humanas, hasta las fases detalladas técnicas y de fabricación, así como las ideas y los estudios plasmados en planos, textos y maquetas.

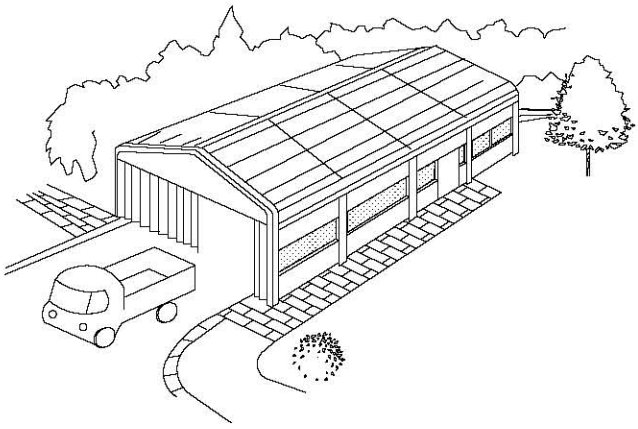


Figura 2 Garaje acabado

¿Diseñadores? Todos somos capaces de tener ideas conceptuales creativas; continuamente estamos procesando información y efectuando selecciones imaginativas conscientes provocando cambios.

Los objetivos buscados en el diseño estructural son asegurar lo más y mejor posible:

- el buen funcionamiento del objeto diseñado durante el tiempo de vida útil deseado.
- un sistema de construcción seguro, ejecutado a tiempo y ajustado al presupuesto original.
- una solución imaginativa y agradable tanto para los usuarios como para los observadores.

Estas premisas pueden cumplirse de dos maneras:

- realizando simplemente una copia exacta de un objeto anterior, o
- "reinventando la rueda", diseñando desde el principio todos los sistemas y componentes.

Ninguno de estos dos enfoques extremos serán, con toda seguridad, completamente satis-

factorio. En el primer caso, las condiciones pueden ser algo diferentes, y así, en el caso de que tomemos como modelo un puente original para diseñar otro nuevo, puede haber sucedido que aquél haya inducido un tráfico mayor de lo previsto, o por que el peso de los vehículos haya aumentado. Las condiciones económicas y materiales pueden también haber cambiado; los costes de mano de obra en la fabricación de pequeños elementos y uniones incorporadas de acero pueden haberse visto incrementados en comparación con los de los grandes elementos laminados o realizados con soldadura continua; asimismo, los aceros resistentes a la corrosión han reducido los costes de conservación al hacer innecesarios algunos tratamientos superficiales. Con el tiempo puede que se hayan descubierto deficiencias de rendimiento, tales como roturas por fatiga provocada por vibraciones en las uniones. Las condiciones de consumo de energía pueden haber cambiado, por ejemplo en relación con la descarga global de ciertos productos químicos, el coste de fabricación de ciertos materiales o la necesidad de un mayor control térmico de un espacio cerrado. Por último, una repetición excesiva de una solución visual puede haber provocado hastío y una respuesta cultural adversa; por ejemplo, si todos los edificios adyacentes se han construido en el "Estilo Postmoderno".

En relación con el segundo enfoque, "la vida es a menudo demasiado corta" para encontrar la solución óptima y, mientras ésta se busca, el cliente se impacienta. Los proyectos de estructuras e ingeniería civil son, por lo general, de gran envergadura y se presentan con poca frecuencia, y un cliente decepcionado no efectuará, lo más seguro, un segundo encargo. La realización de ideas teóricas nuevas e innovaciones requiere, invariablemente, mucho tiempo: la historia así lo demuestra una y otra vez. Así pues, el análisis metódico de los riesgos y errores potenciales debe atemperar el ánimo innovador del entusiasta.

Deben buscarse y hallarse soluciones creativas positivas para todos los aspectos de cada nuevo problema. Las soluciones incorporarán elementos de los extremos mencionados: tanto de principios fundamentales como de desarrollos recientes. Sin embargo, a lo largo de todo el proceso de diseño, lo prudente es mantener una visión clara de los objetivos finales y utilizar medios y soluciones técnicas relativamente sencillas.

2. ¿CÓMO ENFOCA EL PROYECTISTA UN NUEVO PROYECTO?

Al comienzo de un nuevo proyecto, puede producirse un momento de pánico ciego. Existen diversos Métodos de Diseño que ayudan a avanzar [4, 5] en el nuevo proyecto, aunque se sugiere el siguiente enfoque metodológico:

1. Reconocer que existe un reto y definir claramente los objetivos generales de un proyecto (véase la figura 3).

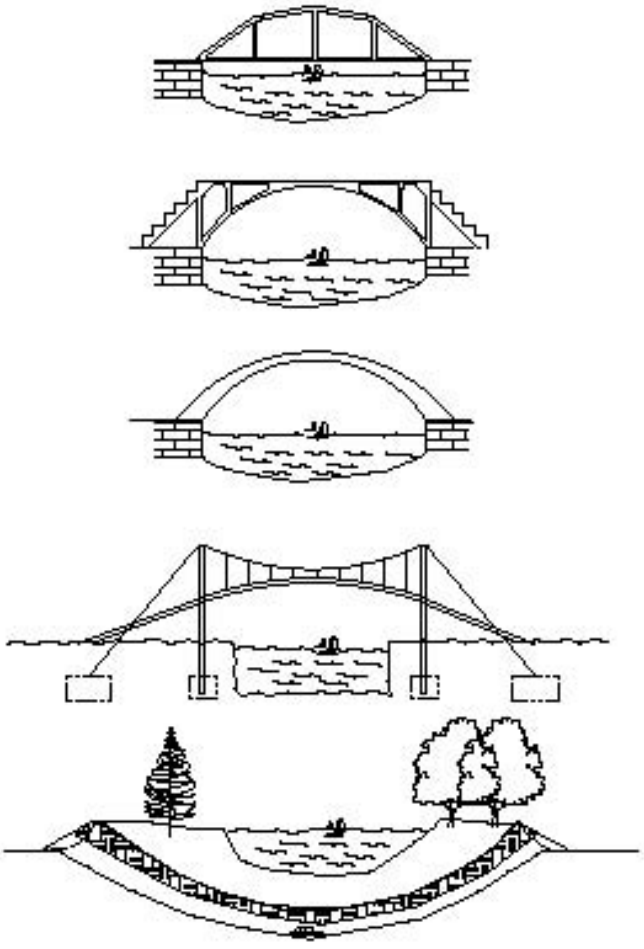


Figura 3 "Define el objetivo gobal" (según E. Torroja)

2. Investigar acerca del proyecto y recoger información que pueda ser relevante (Análisis).

3. Deducir posibles soluciones del proyecto (Síntesis).

4. Decidir cuál es la mejor solución y perfeccionarla (Evaluación), estableciendo prioridades de acción claras (en términos de fabricación, construcción, utilización y mantenimiento).

5. Comunicar las decisiones tomadas a otras personas involucradas en el proyecto.

A primera vista, estas cinco fases se presentan como una cadena lineal simple; de hecho, el proceso de proyectar es altamente complejo, ya que ninguno de los factores del diseño es, en mayor o menor grado, independiente. Así existirán numerosos pasos y bucles dentro y entre las diversas fases, tal como se muestra en la figura 4. En el primer recorrido rápido por las fases 1, 2 y 3 se decidirá si existe algún problema; por ejemplo, ¿Justifica el volumen de tráfico estimado la realización de un puente cómodo pero de alto coste?

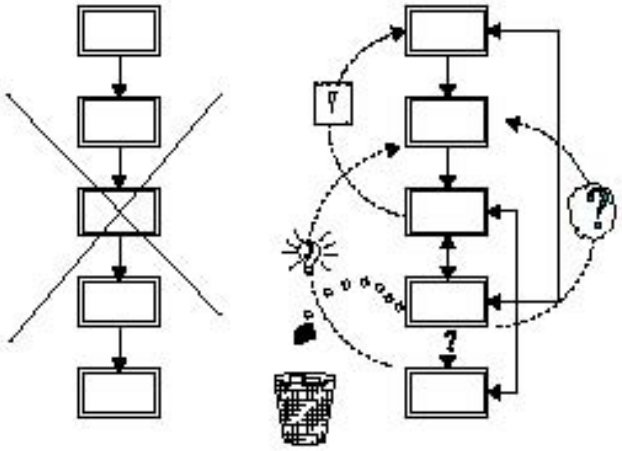


Figura 4 Repetición en la fase de diseño

Desde la idea hasta los detalles, todos los factores y combinaciones deben explorarse exhaustivamente, ajustando detenidamente numerosos compromisos para llegar a una solución factible. Las ideas pueden desarrollarse: verbalmente, por ejemplo, mediante una "tormenta de ideas" o por el método "razonamiento lateral" de Edward de Bono [6], gráficamente, numéricamente o físicamente. Una valoración cualitativa debe seguir siempre a la evaluación cuantitativa.

Así, el punto de partida del análisis puede ser la noción actual preconcebida del proyectista o la imaginación visual, pero la síntesis revelará la flexibilidad de su mente para asimilar nuevas ideas de forma crítica, sin prejuicios.

Un proyectista puede prepararse a sí mismo para los compromisos, los cambios de parecer y la interacción con otros miembros del equipo de diseño que conducirán al éxito de la síntesis, mediante "Juegos de Rol" (véase por ejemplo el juego "La Casa del Mono" en el apéndice 1).

3. ¿CÓMO DESARROLLA EL PROYECTISTA EL SISTEMA ESTRUCTURAL?

Observaremos, brevemente y a modo de ejemplo, el concepto constructivo y las diferentes fases de decisión para el diseño de un edificio para un garaje, con capacidad para dos camiones, dotado de oficina, lavabo y cafetería, que se muestra terminado en la figura 2. En este caso hipotético se presupone que el cliente ya ha tomado la decisión inicial de hacer proyectar y construir un edificio con estos requisitos.

3.1 Plantear un concepto inicial que pueda satisfacer bien las necesidades funcionales

La observación de las funciones y del uso a que va estar destinada la estructura a cuyo diseño se enfrenta, es, sin duda alguna, la mejor idea para comenzar. Haga una lista de funciones individuales; seguidamente, genere un diagrama de flujos de las relaciones entre las diferentes áreas funcionales para decidir las posibles localizaciones e interconexiones (véase la figura 5); Encuentre o suponga superficies de planta adecuadas y alturas libres mínimas de cada volumen. Puede resultar indicado, entonces, un plan de conjunto, anotando cualquier complicación particular del local, como puede ser la forma de la planta, la proximidad de edificios antiguos, la pendiente o la consistencia del suelo.



Figura 5 Diagrama de "burbuja"

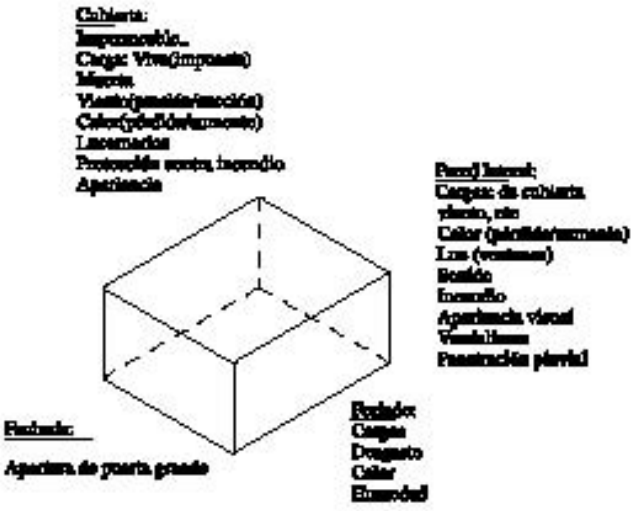
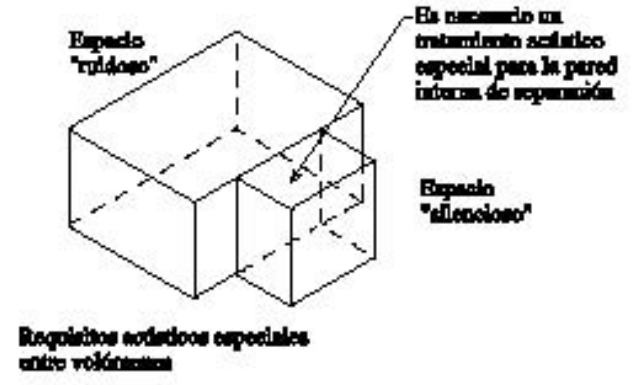


Figura 6 Volúmenes de espacio

Existirán otras muchas disposiciones posibles del conjunto que deberán ser consideradas rápidamente en esta fase.

Los requisitos de cada volumen y sus interconexiones deben examinarse bajo todos



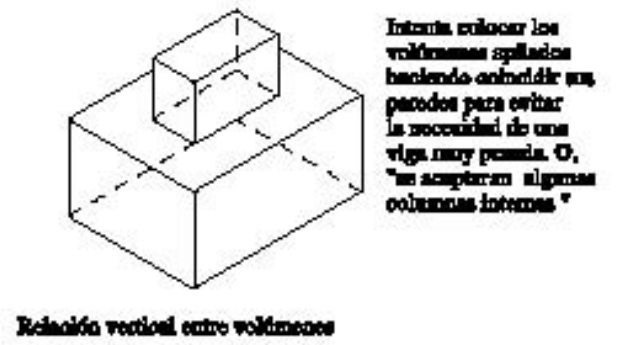


Figura 7 "Incompatibilidades de diseño"

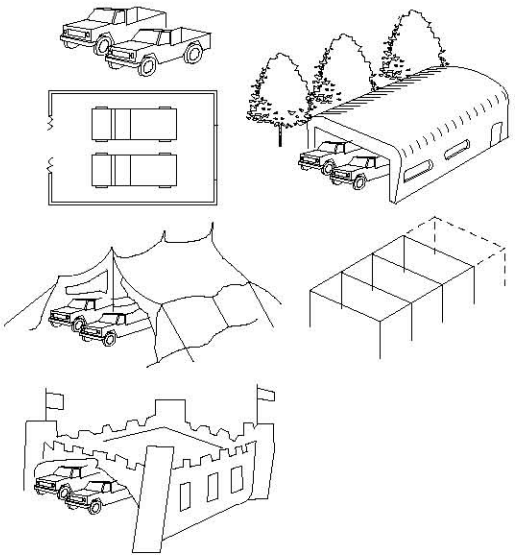


Figura 8 Conceptos iniciales

los criterios funcionales, de coste y estéticos. Como ejemplo, habrá que considerar qué cargas no permanentes estructurales aplicadas deben resistir o qué requisitos de calefacción, ventilación, iluminación y acústicos pueden ser precisos (véase la figura 6).

Los criterios principales se reconocen con facilidad, y pueden ser aplicados y probados mediante análisis numérico. Las incompatibilidades se pueden despejar reordenando los espacios planificados o adoptando otros compromisos (véase la figura 7); por ejemplo, ¿Aceptaría Vd. un teléfono de oficina situado muy cerca del taladro del taller o del motor de los camiones, sin aislamiento acústico?

Prepare un conjunto de hipótesis iniciales de posibles materiales y del sistema estructural de carga [7] de pórticos, de elementos planos o de membrana, que pueda ser compatible con los volúmenes, tal como se muestra en la figura 8. Estas hipótesis estarán basadas en conocimientos previos, en la comprensión de construcciones reales [8-13], o en la teoría estructural (véase la figura 9 a-d), así como en la disponibilidad de materiales y mano de obra cualificada en la zona. Pueden ser necesarias consultas iniciales con proveedores y fabricantes, p.ej. para grandes cantidades o calidades especiales de acero.

La estructura de acero, con sus características de resistencia, isotropía y rigidez, y sus elementos lineales rectos y compactos, conduce por si misma a sistemas de pórticos (véase la figura 9 e) que recogen y transmiten las principales cargas estructurales lo más directamente posible a los cimientos, lo mismo que un árbol recoge las cargas de sus hojas, ramas y tronco principal y las transmite hasta las raíces.

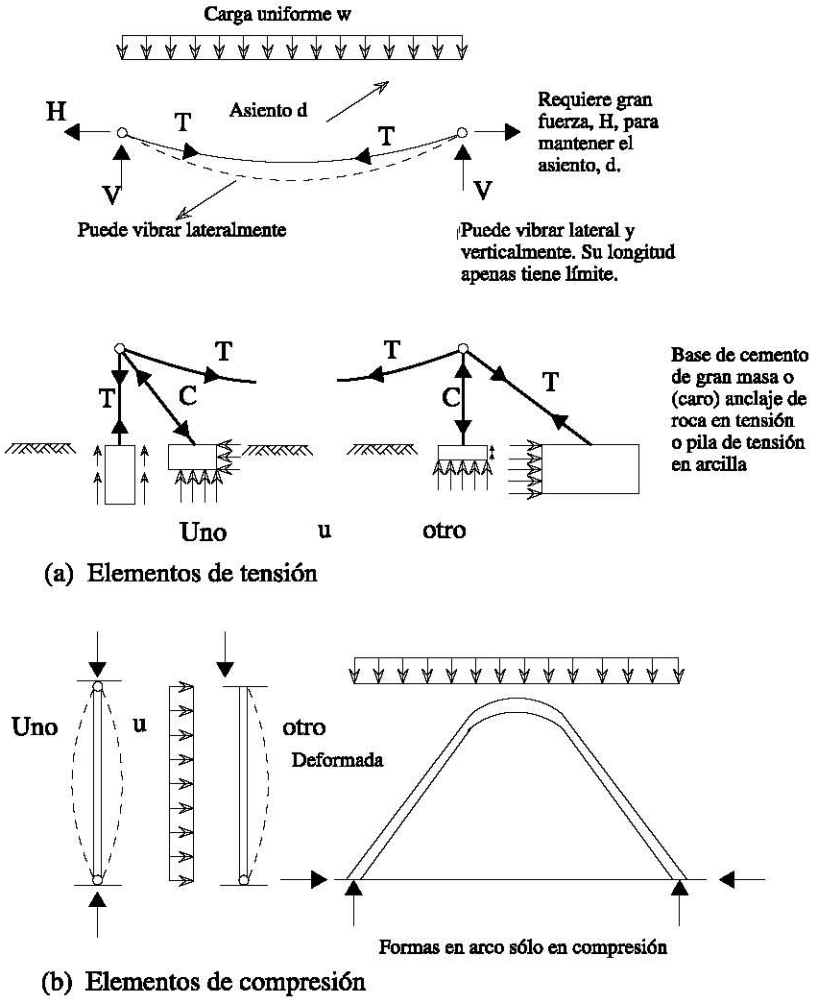


Figura 9a Conceptos de carga

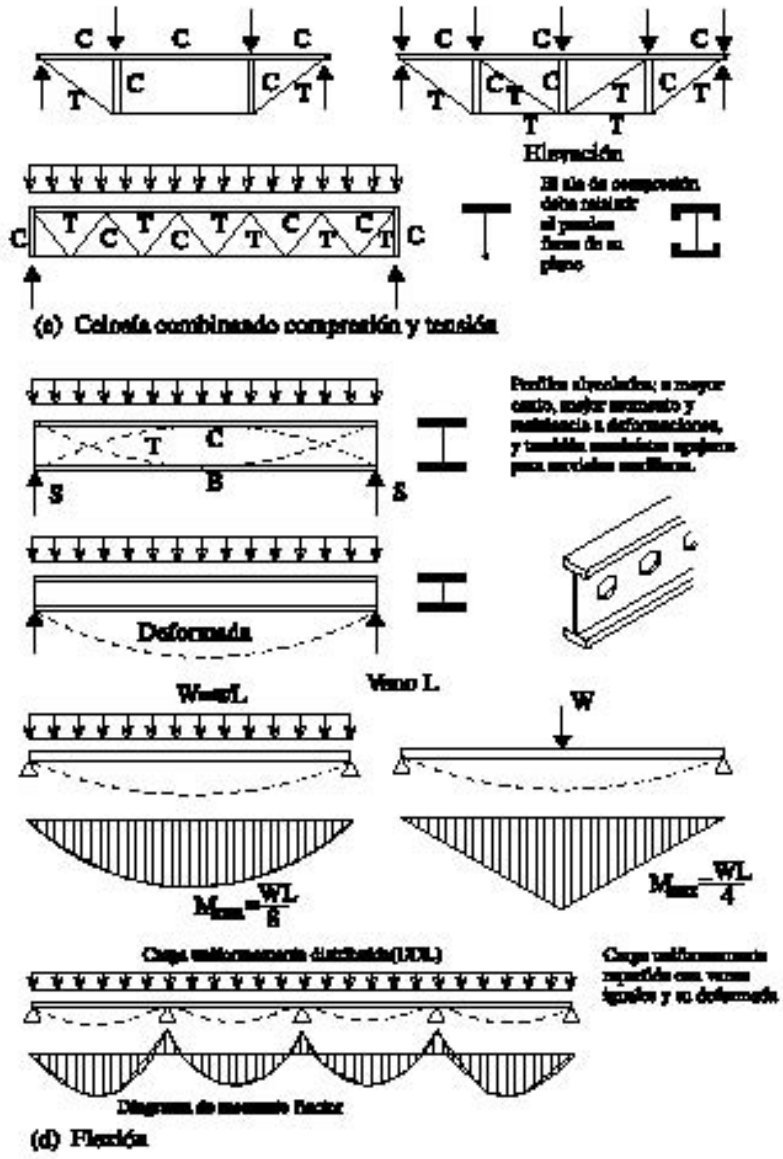


Figura 9b Conceptos de carga

Seguidamente (y de forma continua), ponga en claro y pruebe sus ideas realizando bocetos rápidos en tres dimensiones o maquetas sencillas para explorar la probable compatibilidad y el efecto estético.

Debe desarrollar una gama de dibujos evocadores y estimulantes vistos a diferentes distancias, desde los edificios, a su alrededor y del interior:

Gran Distancia
: el dibujo de la silueta o "croquis panorámico"

Media distancia
: cuando puede verse la totalidad del objeto construido

Cerca
: cuando puede verse claramente un detalle

Muy cerca
: cuando puede verse la textura de los materiales.

La mayoría de las veces deben cumplirse todas estas condiciones, especialmente en los edificios muy grandes. Algunas personas pueden hallar deficiencias si sus condiciones sociales mejoran o se producen fenómenos naturales o cambiantes; por ejemplo, la luz durante la puesta del sol da repentinamente un aspecto y un color completamente diferente o, cuando el sol se ha puesto la iluminación interior crea efectos que no se habían observado anteriormente.

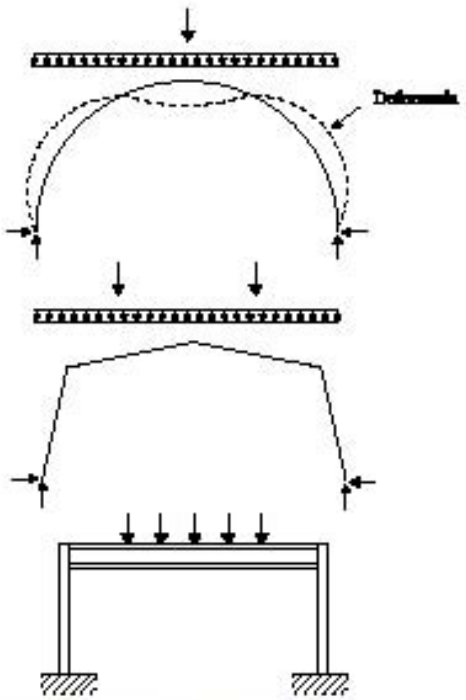


Figura 9c Pórticos en 2-D bajo carga vertical

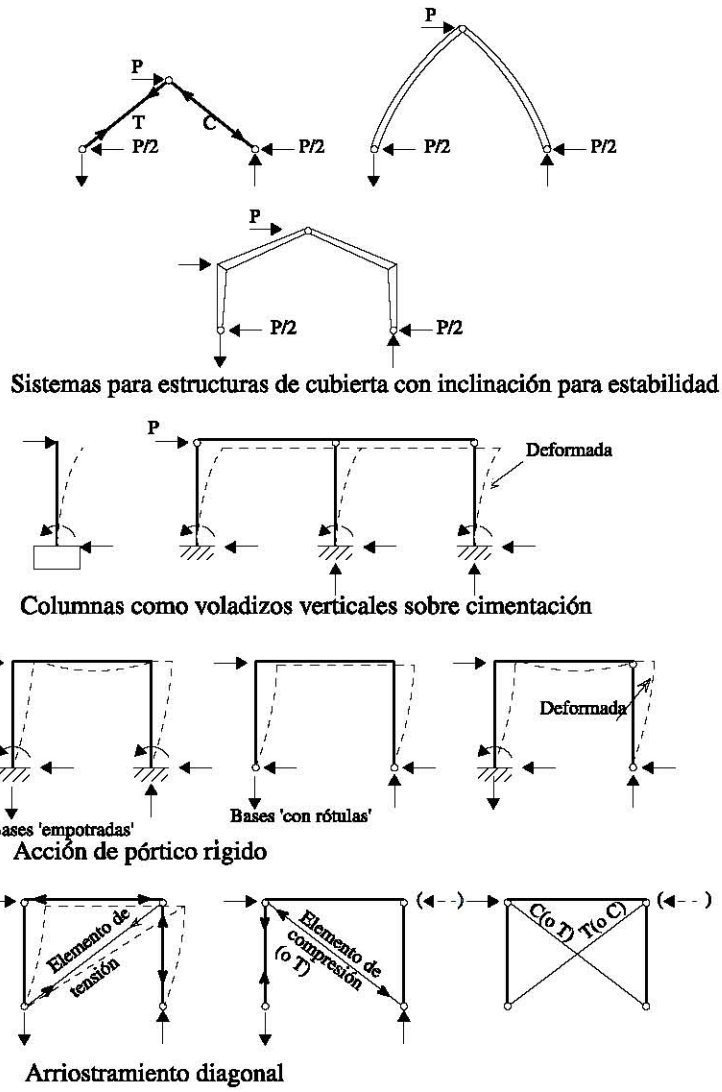


Figura 9d Pórticos en 2-D bajo carga horizontal

Con la utilización hábil del acero se pueden conseguir forma, color, calidad y definición, especialmente con elementos a "escala humana", aunque la repetición no tardará en provocar hastío; pero los elementos deben considerarse únicamente como parte de una experiencia sensorial completa que debe incluir soluciones elegantes en todos los aspectos, especialmente en aquéllos fácilmente visibles, de la totalidad del proyecto del edificio.

Es muy importante que todos los profesionales (arquitectos, ingenieros de estructuras y de servicios de evaluación del impacto ambiental, así como los principales proveedores y fabricantes, que deberán tener unos conocimientos comunes de los principios básicos del diseño) colaboren y se comuniquen libremente entre sí -y también con el cliente- en esta fase conceptual del proyecto. No resulta fácil ni económico rectificar en las fases más detalladas del proyecto las decisiones incorrectas tomadas al principio.

Esté preparado para modificar el concepto fácilmente (utilice lápices 4B) y trabaje con rapidez. Los tiempos para un concepto inicial de proyecto (diseño) estructural se miden en segundos y minutos, pero serán necesarias horas para discutir y comunicar con los demás en busca de una idea de proyecto completo inicial.

3.2 Reconozca los principales sistemas estructurales y considere la resistencia y rigidez necesarias

Considere las cargas no permanentes aplicadas desde cubiertas,

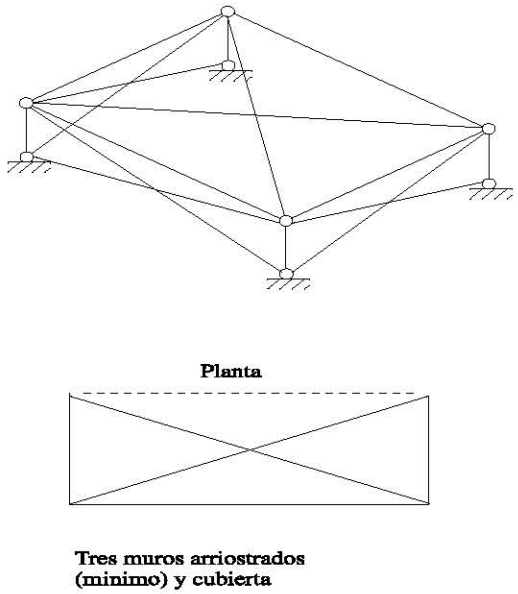


Figura 9e Pórticos en 3-D

pisos o paredes y trace "líneas de carga" a través del conjunto integral tridimensional de elementos hasta los cimientos (véase la figura 10).

El tejado debe estar formado por una cubierta de perfiles de acero, el agua de lluvia debe pasar a los lados y una tabla de datos del fabricante indicará el ángulo de inclinación que se le debe dar (4° - 6° como mínimo) y la separación necesaria entre correas. Esta separación, a modo de ejemplo, suele ser de 1,4 m a 2,6 m. entre si, y deben estar soportadas, normalmente, cada 3 m - 8 m, por una viga principal o cercha inclinada, extendiéndose generalmente sobre la dirección más corta en planta y apoyada en columnas estabilizadas en tres dimensiones.

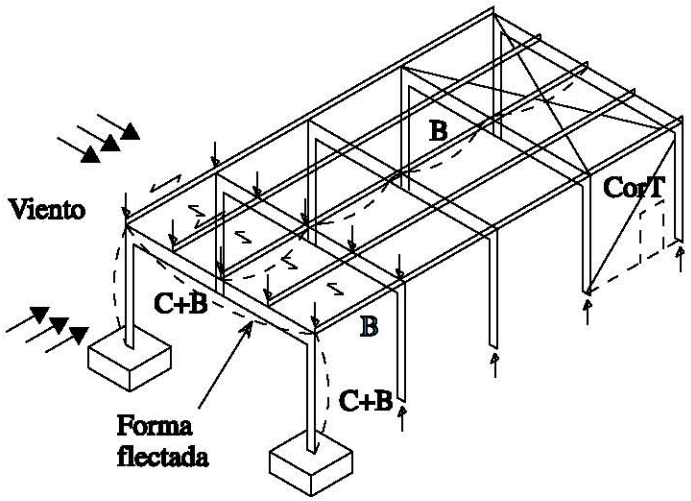


Figura 10 Sistema estructural principal

Las cargas del viento en el lado más largo del edificio pueden ser soportadas por un cerramiento que se extienda directamente hasta los pilares principales o a los carriles de las paredes laterales entre pilares. Los pilares pueden resistir el vuelco:

- mediante arriostramiento en cruz de San Andrés (en este caso una puerta grande de entrada quedaría obstruida).

- o fijando rígidamente los pilares a los cimientos ("pilares de extremo libre conectados"); ¿Puede el terreno resistir un efecto adicional de vuelco en la base?

- o fijando rígidamente la parte superior de los pilares a las vigas principales (creando "pórticos") y utilizando cimientos más pequeños, económicos y "articulados".

Las cargas del viento sobre el lado corto abierto del edificio pueden resistirse mediante la puerta de apertura que se extiende por la parte superior o inferior o de lado a lado. En el lado corto cerrado las cargas del viento pueden resistirse mediante un cerramiento que se extienda directamente entre los pilares secundarios en los extremos de la pared o sobre los carriles hasta dichos pilares.

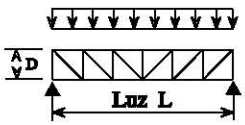
Valores indicativos		L/D	
Perfiles laminados en caliente		< 20	
Celosías: (luz de un vano)	Carga pesada	12-15	Usar valores mayores cuando se utilicen uniones rígidas
	Carga media	15-18	
	Carga ligera (cubierta)	18-21	
Losas y forjados:		15-45	con uniones soldadas

Figura 11 "Regla del pulgar" para estimación muy preliminar del tamaño

En ambos extremos del edificio, es probable que se produzcan esfuerzos longitudinales en la parte superior de los pilares. Pueden introducirse arriostramientos reforzados, generalmente en ambos extremos de la chapa de la cubierta, para transmitir estas cargas a la parte superior de una nave de pilares en el lado largo, que debe entonces arriostrarse al suelo.

Identifique la acción de las fuerzas principales (compresión C;

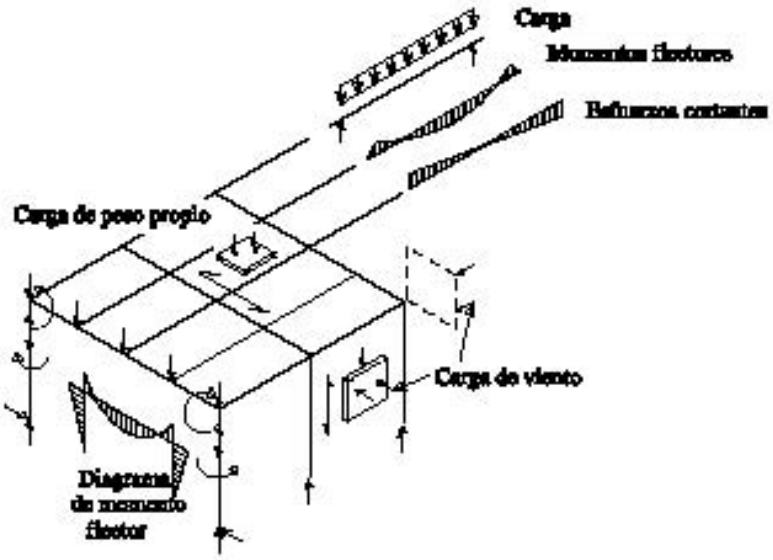


Figura 12 Dimensionado aproximado del tamaño de elementos

tracción T; flexión B) en los elementos y las formas probables de las deformaciones generales por flexión y de los elementos para todas las cargas aplicadas, tanto por separado como cuando se combinen.

Resulta siempre útil dibujar los elementos a una escala aproximada, lo cual se puede hacer fácilmente utilizando las tablas de datos de cubiertas y cerramientos facilitadas por el fabricante, mediante la observación de edificios similares existentes o utilizando "procedimientos empíricos"; por ejemplo, la relación vano/canto para una viga apoyada en los extremos es aproximadamente igual a 20 para una carga uniforme de una cubierta ligera (véase la figura 11).

En esta fase el diseño estructural se hace más preciso (utilice lápiz B) y requiere más tiempo. Escala de tiempos: minutos.

3.3 Valore las cargas con precisión y estime las dimensiones de los elementos principales

Estime la carga permanente de la construcción y, con las cargas no permanentes, calcule lo siguiente (véase la figura 12):

- reacciones de las vigas y cargas de los pilares (llevando medio vano a uno de los lados de un pilar interno).
- momentos de flexión máximos, por ejemplo $wL^2/8$ para una viga apoyada en los extremos, sometida a carga uniforme.
- esfuerzos cortantes máximos en las vigas.
- valores de flecha, por ejemplo $(5/38^*)wL^4/EI$ para una viga apoyada en los extremos con carga uniforme.

Las dimensiones de los pilares que soportan un momento escaso pueden estimarse a par-

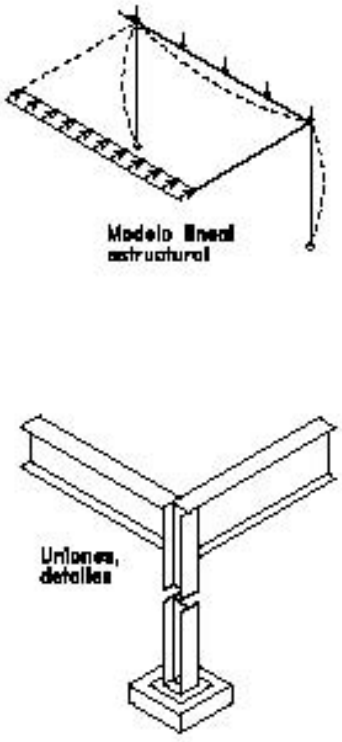


Figura 13 Análisis final y detalles

tir de Tablas de Carga Admisible, utilizando una longitud de pandeo adecuada. Deben preverse momentos de flexión importantes mediante un incremento adecuado, por ejemplo, dos veces o más, en el momento resistente de la sección transversal para el eje de flexión.

Las dimensiones de las vigas deben estimarse comprobando la resistencia a la flexión y la rigidez con flechas máximas. La integración en la estructura de conductos de servicio o tuberías puede requerir que las vigas tengan mayor o menor canto y altura y taladros en el alma.

Los métodos probables de unión deben considerarse detenidamente: ¿deberá la viga estar simplemente apoyada o completamente continua, y cuáles son las implicaciones de fabricación, montaje y costes?

Los cálculos estructurales van a realizarse ahora (utilice un lápiz HB con una regla de cálculo, una calculadora sencilla o un ordenador), y requerirán más tiempo. Escala de tiempos: minutos/horas.

3.4 Análisis estructural completo, utilizando elementos de dimensiones estimadas con diseño adecuado de uniones, relativo a detalles reales

Realice un análisis estructural completo de la estructura, plástica o elásticamente. Puede utilizarse un ordenador, aunque algunas técnicas "manuales" resultarán a menudo adecuadas; el primero de los análisis resulta apropiado cuando se requieren flechas precisas (véase la figura 13).

Para el análisis de estructuras estadísticamente indeterminadas, una estimación inicial de la rigidez (I) de los elementos y de las uniones debe determinarse según la tercera fase anterior, antes de que sea posible hallar la disposición de los momentos de flexión y las flechas. Si la posterior comprobación del diseño de los elementos conduce a cambios importantes en la rigidez de los elementos, deberá repetirse el análisis. El papel de las alas y almas de cada elemento en la resistencia a las fuerzas locales dentro de las conexiones también debe considerarse muy atentamente cuando se determinen las dimensiones finales de los elementos. Una rigidización excesiva en perfiles ligeros puede ser prohibitiva en cuanto a costes.

El análisis no puede terminar sin una integración estructural cuidadosa y la consideración de la compatibilidad del conjunto del sistema de construcción, incluidos sus detalles de fabricación.

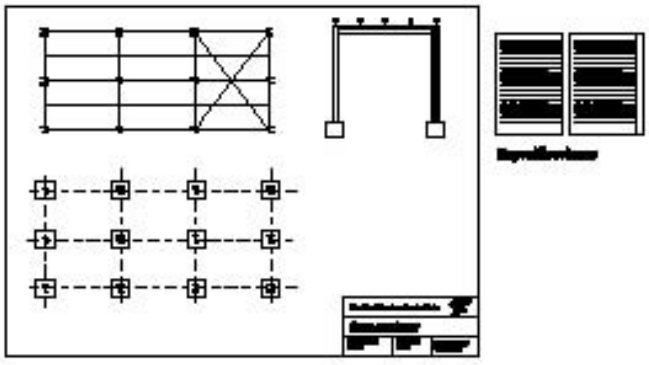


Figura 14 Comunicaciones

Las uniones de elementos, por lo general, se prepararán en fábrica mediante soldadura y las uniones de elementos grandes no transportables se terminarán normalmente con tornillos en la obra. Los arriostramientos, cubiertas y revestimientos, por lo general, se fijarán en la obra con tornillos o tornillos autorroscantes. Es importante recordar que las roturas más frecuentes se producen por uniones incorrectas, detalles y su integración.

Ahora los cálculos estructurales y los detalles avanzan (utilice un lápiz HB con regla de cálculo, calculadoras y ordenadores). Escala de tiempos: horas/días.

La repetición de las fases 1- 4 anteriores será sin duda necesaria, en particular para asegurarse de que las primeras decisiones estructurales sean compatibles con las subsi-

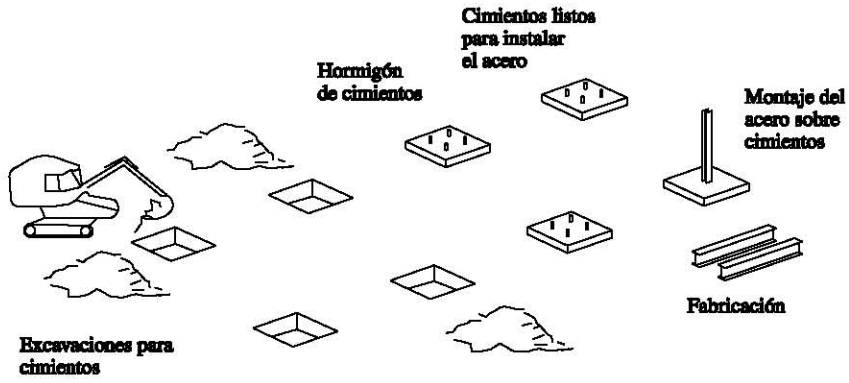


Figura 15 Ejecución

3.6 Supervise la ejecución

En todas las fases de la ejecución debe asegurarse la estabilidad de la estructura (véase la figura 15). En el lugar y el momento apropiados debe disponerse de componentes de alta calidad y montadores expertos, lo que requiere una organización muy cuidada. Si todo va según los planes cada pieza se ajustará en el conjunto completo.

guientes investigaciones relativas a los aspectos funcionales, medioambientales, económicos y estéticos. Debe considerarse el efecto de cualquier cambio en la totalidad del proyecto. Normalmente, los cambios requerirán un proyecto parcial.

3.5 Comunique el objeto del diseño mediante planos y especificaciones

Prepare planos detallados y pliegos de condiciones para las licitaciones de fabricantes (véase la figura 14). Puede ser de nuevo necesaria la repetición del proyecto, debido a desviaciones en los precios y/o métodos de los fabricantes (por ejemplo el equipo de soldadura disponible, dificultades para manipular estructuras de acero en el taller de fabricación o para su transporte y montaje). Los cambios e innovaciones en el proyecto deben comunicarse y especificarse muy cuidadosa y explícitamente.

En muchos casos es una práctica frecuente que un Ingeniero Consultor de Estructuras prepare proyectos preliminares con una selección de secciones principales, dejando que un fabricante de estructuras metálicas finalice el proyecto de detalle y el sistema de uniones, antes de comprobarlo con el Consultor.

El diseño estructural ya se está terminando (utilice lápices de 2 a 4 H y plumas, u ordenadores). Escala de tiempos: días/semanas.

En este momento se ponen en práctica las ideas de la concepción (utilice botas de goma). Escala de tiempos: semanas/meses.

3.7 Realice un mantenimiento regular

Únicamente será necesario el mantenimiento regular planificado por completo en el proyecto, con algún cambio y renovación ocasionales necesarios por los cambios de uso u ocupación. No debe ser necesaria la corrección de defectos de diseño debidos a innovaciones y errores.

Ésta es la fase de utilización. ¡Adopte una visión serena de la vida! Escala de tiempos: años/décadas.

3.8 Diferencias de énfasis en el enfoque del diseño respecto al diseño de un edificio de tamaño medio

3.8.1 Viviendas unifamiliares

La mayor parte de las viviendas construidas de forma tradicional incluyen algunos elementos estándar de acero. P.ej. vigas de acero laminado en caliente para los vanos de espacios grandes o para soportar paredes, pilares de sección hueca para cajas de escale-

ras, dinteles laminados en frío sobre aperturas de ventanas, así como clavos, tornillos y placas de refuerzo.

Pueden incorporarse perfiles de acero galvanizado laminado en frío en vigas de celosías y reemplazar a la madera en el caso de elementos repetitivos. Pueden incorporarse secciones similares en paredes, pero la protección contra incendios de las secciones de pared delgada requiere una gran atención, especialmente en las casas de varias plantas.

En las casas puede utilizarse una viga principal estructural de acero, pero debe proyectarse apropiadamente la integración de los servicios, la protección contra incendios en edificios de varias plantas, la corrosión y los costes de fabricación de uniones portantes. Para el exterior pueden utilizarse varios tipos de cerramientos en perfiles o en paneles compuestos.

3.8.2 Puentes

Las magnitudes de las cargas de gravedad son a menudo relativamente mayores en los puentes, y deben valorarse pautas de carga particulares; asimismo, se producirán series de cargas por ruedas, con un marcado efecto dinámico. Los efectos dinámicos de las cargas de viento son importantes en las estructuras de grandes vanos. La accesibilidad del lugar, la viabilidad de la ejecución de cimientos de gran masa, el tipo de estructura de tableros y los costes de conservación regular determinarán el sistema adoptado. Es importante la estética para los usuarios y otros observadores; la escala a larga distancia debe ser adecuadamente esbelta, pero psicológicamente fuerte; es necesaria una atención particular a la visión muy cerca de los estribos y la parte inferior del tablero.

3.8.3 Plataformas petrolíferas

La escala de todo proyecto será muchas veces superior a la de un edificio en tierra. La carga de gravedad, la velocidad del viento, la altura de las olas y la profundidad del agua constituyen parámetros de diseño importantes para la magnitud y la estabilidad de la estructura (en este caso, los elementos mayores provocan mayores cargas de viento y olas). La escala de la estructura plantea asimismo problemas especiales de control de fabricación, botadura, anclaje en profundidad realizado por buzos y, no menos importante, coste (véase la figura 1). Posteriormente, al término de la vida útil de la estructura, los problemas de desmantelamiento deben verse facilitados si se han tenido en cuenta durante el diseño inicial.

4. RESUMEN FINAL

- En esta lección se presenta el reto del proyecto creativo y se sugiere una estrategia global para proyectar estructuras de acero. Se pretende responder a preguntas sobre lo que un diseñador está intentando conseguir y cómo puede empezar a poner la pluma sobre el papel. Se ilustra cómo repetir con éxito el proyecto desde las ideas cualitativas hasta la verificación cuantitativa y la ejecución final.
- El diseño creativo e imaginativo de estructuras resulta fascinante y divertido. Ahora inténtelo de nuevo y gane confianza en sí mismo. No tenga miedo de cometer errores. Éstos sólo se eliminarán repitiendo y explorando muchas otras soluciones. Asegúrese de que el diseño es correcto antes de construir, utilizando sus propios mecanismos personales de comprobación.

5. BIBLIOGRAFÍA

[1] Gordon, J. E. "The New Science of Strong Materials", Pelican.

[2] Gordon, J. E. "Structures", Pelican.

[3] Gordon, J. E. "The Science of Structures and Materials", Scientific American Library, 1988.

[4] Jones, J. C. "Design Methods", Wiley 2nd Edition 1981.

Un buen compendio de los métodos y técnicas generales de diseño.

[5] Broadbent, G. H. "Design in Architecture", Wiley, 1973.

[6] De Bono, E. eg: "Lateral Thinking" or "Practical Thinking" or "The Use of Lateral Thinking", Pelican.

Los capítulos 2, 13, 19 y 20 resultan útiles para diseñar edificios.

Un buen tratado sobre el diseño funcional y los factores humanos que afectan a la creación de artefactos: sin ilustraciones profusas.

[7] LeGood, J. P, "Principles of Structural Steelwork for Architectural Students", SCI, 1983 (Amended 1990).

Una introducción general y guía de consulta de edificios para estudiantes.

[8] Francis, A. J, "Introducing Structures, Pergamon, 1980.

Un buen compendio de texto, especialmente el capítulo 11 sobre el Diseño de Estructuras.

[9] Lin, T. Y. and Stotesbury, S. D, "Structural Concepts and Systems for Architects and Engineers", Wiley, 1981.

Los capítulos 1- 4 proporcionan un enfoque sencillo y completo al diseño total de estructuras, especialmente para edificios altos.

[10] Schodek, D. L, "Structures", Prentice Hall, 1980.

Un buen enfoque claro e introductorio a la comprensión estructural de conceptos simples, también especialmente el capítulo 13 sobre emparrillados y dibujos estructurales para edificios.

[11] Otto, F, "Nets in Nature and Technics", Institute of Light Weight Structures, University of Stuttgart, 1975.

Uno de los excelentes libros de Otto en el que se observan dibujos de la naturaleza y se realizan o sugieren posibles formas de diseño.

[12] Torroja, E, "Philosophy of Structures", University of California Press, 1962.

Sigue siendo un libro de consulta único.

[13] Mainstone, R. J, "Developments in Structural Form", Allen Lane, 1975.

Un excelente trabajo histórico erudito, también el capítulo 16 sobre "Comprensión y Diseño Estructurales".

APÉNDICE 1

El juego de rol "La Casa del Mono" para un grupo de estudiantes en un seminario, figura 16

Se crean entre 10 y 12 roles de acción, uno por cada estudiante del grupo, para considerar los requisitos e interacciones del diseño. Cada participante ve un croquis general de un posible edificio y dispone de unos 3 minutos para preparar los requisitos de su rol, lo que le gusta y lo que no le gusta. Seguidamente expone estos requisitos durante 2/3 minutos a los demás participantes que no le interrumpen y que anotan los puntos de acuerdo/desacuerdo. Cuando todos los participantes han hablado, los participantes discuten y exploran en general los numerosos conflictos durante unos 30 minutos. Seguidamente la persona que dirige el juego busca una conclusión: ¿para quién es realmente La Casa del Mono?

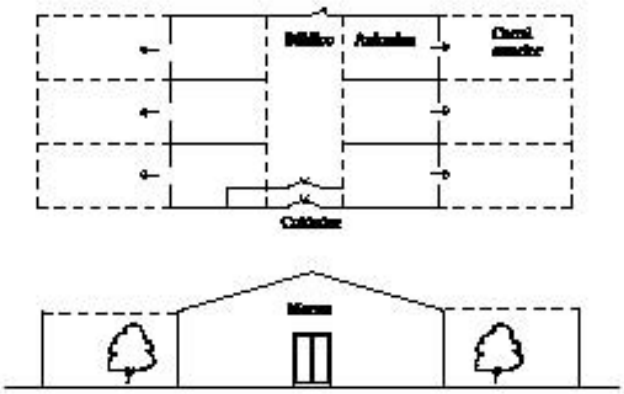


Figura 16 La casa del mono: un divertido juego para todo el año

ESDEP TOMO 2
CONSTRUCCIÓN EN ACERO: INTRODUCCIÓN AL DISEÑO

Lección 2.2.1: Principios de Diseño

OBJETIVOS/CONTENIDO

Explicar los objetivos del diseño estructural y su problemática; reseñar cómo pueden influir en el diseño las diferentes prioridades y describir diferentes enfoques para cuantificar el proceso de diseño.

LECCIONES AFINES

Lección 2.1:	Proceso de Diseño
Lección 2.3:	Bases para la Determinación de Cargas
Lección 2.8:	Aprender de los Errores
Lección 3.4:	Calidades y Tipos de Acero
Lección 3.5:	Selección de la Calidad del Acero

RESUMEN

Se explican los objetivos fundamentales del diseño estructural. Se consideran los problemas asociados, el diseño de las estructuras en términos de carga y propiedades del material. Se repasa brevemente el desarrollo de métodos de diseño estructural en relación con aspectos del diseño tales como flechas, vibración, resistencia a las fuerzas y fatiga. Se incluyen temas de construcción y mantenimiento. Se hace hincapié en la importancia de considerar estos aspectos y otros, como la adaptación de servicios y los costes de revestimiento, en el desarrollo de un diseño eficaz. Se consideran las responsabilidades del proyectista y la necesidad de una comunicación efectiva.

1. INTRODUCCIÓN

Los objetivos concretos del diseño estructural varían de un proyecto a otro. En todos los casos, la prevención del colapso es un requisito importante - tal vez el más importante- y , por ello, debe adoptarse un coeficiente de seguridad adecuado. En este contexto, la estructura debe ser proyectada para cumplir con los requisitos de resistencia y estabilidad. Estos conceptos se ilustran en la figura 1, en la que se muestra una barra larga y delgada sometida a tracción (figura 1a) y compresión (figura 1b). En el caso de la tracción, la resistencia a la carga de la barra está regida por la capacidad del material para resistirla sin romperse. La barra sólo puede soportar esta carga en compresión si permanece estable, es decir, si no se deforma significativamente en una dirección perpendicular a la línea de acción de la carga aplicada. La rigidez de la estructura es otra característica importante que tiene que ver más con la resistencia a la deformación que con el colapso. Ello resulta de particular importancia en el caso de las vigas, cuya flecha bajo una carga particular está relacionada con su rigidez (figura 1c). Las grandes deformaciones no están necesariamente asociadas con el colapso, y algunos materiales frágiles, como el vidrio, pueden romperse con una escasa deformación previa. Puede ser necesario incluir otras consideraciones en el proceso de diseño. Éstas son: comportamiento cuantificable como deformación, fatiga, resistencia al incendio y comportamiento dinámico; consideraciones como la corrosión y la adaptación de servicios que pueden influir tanto en los detalles como en el concepto general, pero de una forma más cualitativa; y la estética, que depende en gran medida de valoraciones subjetivas. Además, es muy probable que las consideraciones económicas influyan considerablemente en la gran mayoría de los diseños estructurales. En este contexto son relevantes los aspectos de rapidez y facilidad de construcción, los costes de mantenimiento y de explotación, así como los costes básicos del edificio. La importancia relativa de cada uno de estos factores variará según las circunstancias.

Del enfoque del diseño estructural se trata en la lección 2.1, en la que se describe cómo el

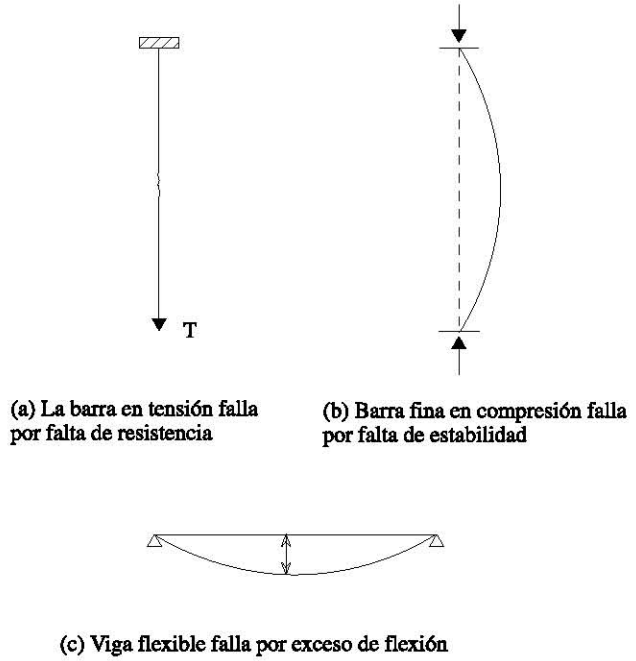


Figura 1 Tipos de fallos

proyectista puede empezar a acomodar gran cantidad de requisitos diferentes, muchos de los cuales ejercerán presiones conflictivas. Esta lección se centra en la forma de conseguir un diseño estructural satisfactorio a través de un análisis racional de diversos aspectos del comportamiento de la estructura. Vale la pena hacer hincapié en el hecho de que el proceso de diseño estructural en su conjunto puede considerarse integrado por dos grupos de fases estrechamente interrelacionadas. En el primer grupo se define la forma general de la estructura, por ejemplo pórtico rígido o muros de carga, la disposición de los elementos estructurales (normalmente en términos de un emparrillado estructural) y el tipo de elementos y materiales estructurales que se van a utilizar, por ejemplo vigas y columnas de acero y suelos compuestos. Se requiere un alto grado de creatividad. La síntesis de una solución se desarrolla sobre la base del profundo conocimiento de un amplio abanico de temas. Estos temas incluyen el comportamiento de las estructuras y los materiales, así como un sentido de las implicaciones detalladas que tendrán las decisiones que se tomen en esta fase, por ejemplo, reconocer el canto que deberá tener una viga para una función en particular. Los métodos for-

malizados resultan escasamente útiles en esta fase. Una solución satisfactoria depende en mayor medida de la capacidad creativa del proyectista.

En las fases posteriores se determinan con más detalle las dimensiones de los componentes estructurales y las uniones entre ellos. A estas alturas, el problema ya está claramente definido y el proceso se puede formalizar más. En el caso de las estructuras de acero, el proceso comprende, por lo general, la selección de una magnitud apropiada de los perfiles normalizados, aunque en algunas circunstancias el proyectista puede desear utilizar un perfil no normalizado cuya ejecución requerirá, generalmente, soldar chapas o perfiles normalizados para formar vigas de alma llena o de celosía.

Las normas de diseño desempeñan un papel importante en esta fase del diseño detallado de los elementos. Su intención es ayudar a garantizar que los edificios se proyecten y construyan de forma que sean seguros y cumplan su función. Esta normativa puede variar considerablemente en su alcance y contenido. Puede basarse simplemente en normas de rendimiento, dejando al proyectista una gran flexibilidad en cuanto a cómo alcanzar una solución satisfactoria. Un ejemplo de ello son las leyes de construcción publicadas por el Rey Hammurabi de Babilonia en torno al 2200 a.C.. Están conservadas en forma de escritura cuneiforme en una tabla de arcilla e incluyen disposiciones tales como “Si un constructor construyere una casa para un hombre y no hiciere su construcción firme, y si la casa que ha construido se colapsare y provocare la muerte de su propietario, ese constructor será ejecutado. Si provocare la muerte del hijo del propietario de la casa, se ejecutará a un hijo del constructor. Si provocare la muerte de un esclavo del propietario de la casa, el constructor entregará al propietario un esclavo del mismo valor”. El peligro, y al mismo tiempo el atractivo, de tal enfoque es que depende en gran medida de la capacidad del proyectista. No incluye exigencias formales basadas en el buen criterio actual y el ingeniero tiene libertad para justificar el diseño de cualquier manera.

El otro extremo lo constituye un conjunto de normas de diseño altamente preceptivas que proporcionan “recetas” para soluciones satisfactorias. Puesto que éstas pueden incorporar los resultados de la experiencia previa acumulada a lo largo de muchos años, y complementados por trabajos de investigación más recientes, podrían parecer más seguras. Sin embargo, este enfoque no puede aplicarse a las fases conceptuales del diseño y existen muchos casos en los que las circunstancias reales a las que se enfrenta el proyectista difieren, de alguna manera, de las previstas en las normas. Existe asimismo el riesgo psicológico de que a tales normas de diseño se les presuponga una validez “absoluta” y se adopte una fe ciega en los resultados que se vayan a obtener utilizándolas.

Está claro que ambos enfoques tienen su papel que desempeñar. Quizá lo mejor sería especificar unos criterios de rendimiento satisfactorio para reducir al mínimo la posibilidad de colapso o de cualquier otro tipo de fallo. Los ingenieros tendrían entonces libertad para cumplir con los criterios de diferentes maneras, pero también disponer de datos para utilizarlos si fuese preciso. El aspecto más importante es, quizás, la actitud del ingeniero, que debe basarse en el sentido común e incluir un elemento de saludable escepticismo en cuanto a las propias normas de diseño.

2. LAS INCERTIDUMBRES EN DISEÑO ESTRUCTURAL

La simple cuantificación del proceso de diseño, utilizando sofisticadas técnicas analíticas y potentes ordenadores, no elimina las incertidumbres asociadas al diseño estructural, aunque puede reducir algunas.

Estas son:

- cargas
- leyes constitutivas del material
- modelización de la estructura
- imperfecciones estructurales

Las cargas se explican con mayor detalle en la lección 2.3. Aunque es posible cuantificar las cargas de una estructura, es importante reconocer que en la mayoría de los casos estas cargas representan poco más que una estimación de la intensidad probable de la carga máxima a la que una estructura estará expuesta. Algunas cargas, como el peso propio de la estructura, pueden resultar más fáciles de definir que otras, como la carga del viento o las ondas de gravedad en las estructuras marítimas. Sin embargo, existe un alto grado de incertidumbre asociado a todas las cargas y esto debe reconocerse siempre.

Las leyes constitutivas se basan normalmente en los resultados de ensayos realizados con muestras pequeñas. Por comodidad, la representación matemática del comportamiento, por ejemplo en forma de curva de tensión-deformación, se considera de forma simplificada a los efectos del diseño estructural. En el caso del acero, la representación normal es el comportamiento elástico lineal hasta el límite elástico con comportamiento plástico a deformaciones mayores (figura 2). Aunque esta representación da una medida razonable del comportamiento del material, está claro que no es absolutamente precisa. Además, todo material presentará una variabilidad natural, normalmente, dos muestras tomadas del mismo lote fallarán a tensiones diferentes en los ensayos. Comparado con otros materiales, el acero es notablemente consistente a este respecto pero, no obstante, las desviaciones existen y representan otra fuente de incertidumbre.

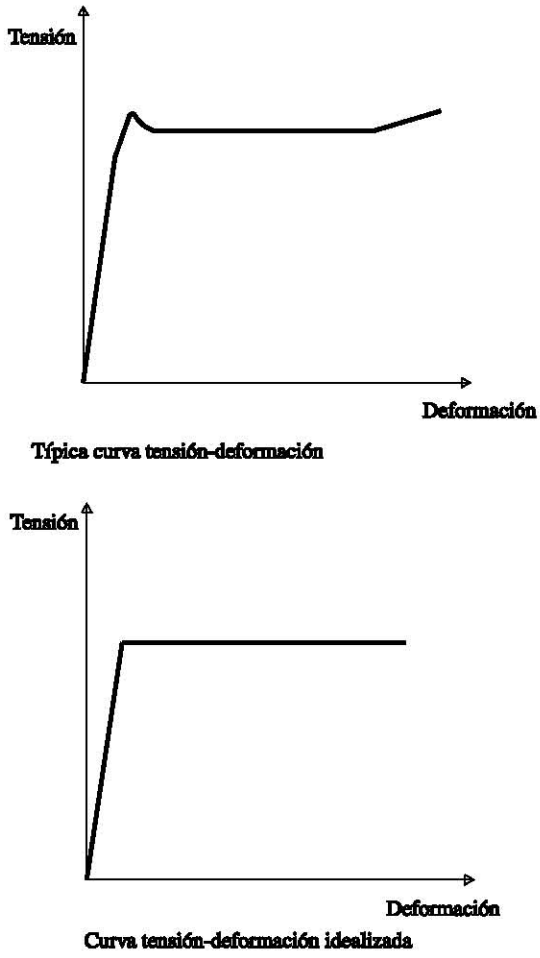


Figura 2 Propiedades mecánicas del acero

Los métodos de análisis del comportamiento de las estructuras han avanzado significativamente en los últimos años, en particular gracias al desarrollo de las técnicas informatizadas. A pesar de ello, el análisis estructural se basa siempre en una cierta idealización del comportamiento real. En algunos casos, como las vigas aisladas soportadas en apoyos simples, la idealización puede ser bastante precisa. En otras circunstancias, sin embargo, la diferencia entre el modelo y la estructura real puede ser bastante significativa. Un ejemplo de ello es la cercha a la que, normalmente, se le suponen uniones articuladas, aunque de hecho las uniones pueden ser bastante rígidas y algunas barras pueden ser continuas. La presunción de que las cargas se aplican solamente en los nudos puede no ser realista. Aunque estas simplificaciones pueden resultar adecuadas en la

modelización del comportamiento general, deben reconocerse las implicaciones, al menos en lo que se refiere a efectos secundarios.

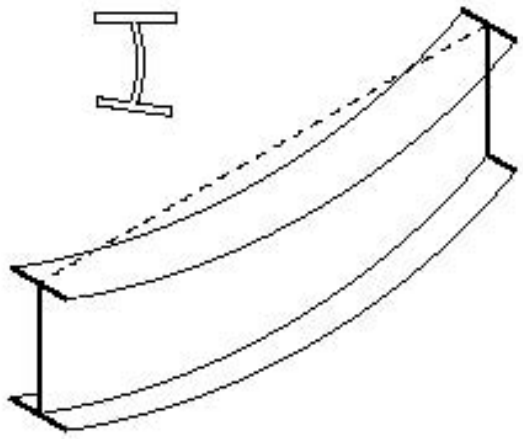


Figura 3 Imperfecciones geométricas en sección transversal y a lo largo de la longitud de perfiles laminados (exageradas)

Otra fuente de incertidumbre procede de las imperfecciones de la estructura, que son de dos tipos: geométricas, es decir, desviación de la rectilineidad o desajuste, y mecánicas, es decir, tensiones residuales debidas a los procesos de trabajo de taller o a la falta de homogeneidad de las propiedades del material. No es posible fabricar perfiles de acero conforme a dimensiones absolutas; el desgaste de la maquinaria y las inevitables desviaciones en el proceso de fabricación provocarán pequeñas desviaciones que deben reconocerse. Del mismo modo, aunque la construcción en acero se realiza con unas tolerancias mucho más estrechas que en la mayoría de los materiales estructurales, se producirán algunas desviaciones (por ejemplo en la alineación de barras individuales) (figura 3).

Al adoptar un enfoque cuantificado del diseño estructural deben reconocerse y tenerse en cuenta todas estas incertidumbres. Se prevén con los medios siguientes:

- especificando niveles de carga que, basados en la experiencia previa, representen las peores condiciones que puedan darse en un tipo particular de estructura.
- especificando un procedimiento de toma de muestras, un plan de ensayos y límites en las propiedades del material.
- especificando límites o tolerancias de fabricación y de ejecución.
- utilizando métodos de cálculo apropiados, reconociendo la diferencia entre el comportamiento real y el comportamiento idealizado.

Estas medidas no eliminan las incertidumbres, sino simplemente ayudan a controlarlas dentro de límites definidos.

3. DISEÑO PARA EVITAR EL COLAPSO

3.1 Antecedentes

El diseño estructural no es algo nuevo. Desde que el hombre empezó a construir (viviendas, lugares de culto, puentes) siguió alguna filosofía de diseño, aunque a menudo de forma inconsciente diseños anteriores. Cuando se introducían innovaciones o modificaciones, las técnicas de tanteo era lo único de lo que se disponía. Como resultado de ello, muchas de las estructuras que se construían, o se construían parcialmente ,o colapsaban ,o sus prestaciones eran inadecuadas. Aún así, estos fallos resultaban positivos en la medida en que contribuían a acumular conocimientos sobre lo que era viable o no.

Este enfoque empírico persistió durante muchos siglos. Incluso hoy en día forma parte del enfoque adoptado en el diseño. A menudo se utilizan reglas y recomendaciones empíricas basadas ampliamente en la experiencia previa. La técnica de la construcción tampoco está libre de fallos en la actualidad, a pesar de la aparente sofisticación de los métodos de diseño y de la potencia de los ordenadores. Los colapsos dramáticos de puentes de vigas en cajón a principios de los años setenta fueron una triste muestra de lo que puede ocurrir cuando los nuevos desarrollos van demasiado por delante de la experiencia existente.

La aparición de nuevos materiales, especialmente el hierro colado y pudelado, hicieron necesario una nueva orientación y el desarrollo de métodos más científicos. El nuevo enfoque incluía ensayos de muestras de material y pruebas de carga de componentes y conjuntos estructurales. De este modo se justificaban a veces también nuevos conceptos, por ejemplo en el caso del puente Forth Rail.

Los primeros pasos para racionalizar el diseño de estructuras de un modo cuantitativo se produjeron a principios del siglo XIX con el desarrollo del análisis elástico. Este tipo de análisis permitió a los ingenieros determinar el efecto (sobre componentes estructurales individuales) de las fuerzas aplicadas a una estructura completa.

Los ensayos de materiales proporcionaron información sobre la resistencia y, en el caso del hierro y el acero, otras características como el límite elástico. Naturalmente, a menudo se daban grandes desviaciones en los valores medidos, como ocurre incluso en la actualidad con algunos materiales. Normalmente, al objeto de garantizar un diseño seguro, en los resultados de los ensayos se adoptaba para la resistencia un límite inferior, un valor por debajo del cual no caían los datos experimentales. Reconociendo algunas de las incertidumbres asociadas a los métodos de diseño basados en el cálculo, las tensiones en condiciones de carga máxima de servicio se limitaban a un valor igual al límite elástico dividido por un factor de seguridad. Este factor de seguridad se especificaba de una forma aparentemente arbitraria, siendo los valores de 4 o 5 algo bastante normal.

Este enfoque proporcionó las bases para casi todo el cálculo estático estructural hasta hace muy poco y, para algunas aplicaciones, se sigue utilizando en la actualidad. A medida que el conocimiento del comportamiento de los materiales ha aumentado y se han racionalizado más los factores de seguridad, las especificaciones de resistencia también han cambiado. Los cambios en la práctica de construcción y el desarrollo de materiales nuevos y más resistentes han impuesto modificaciones detalladas de las normas de diseño, en particular respecto al comportamiento a pandeo. No obstante, el enfoque básico siguió siendo el mismo hasta hace muy poco, cuando ciertas limitaciones del diseño clásico, basado en la resistencia admisible, se hicieron aparentes. Estas limitaciones pueden resumirse del modo siguiente:

i no se reconocen diferentes niveles de incertidumbre asociados a los diferentes tipos de carga.

ii tipos diferentes de estructura pueden tener coeficientes de seguridad muy distintos en

términos de colapso y estas diferencias no se evidencian de ninguna forma cuantificable.

iii no se reconoce la ductilidad ni la reserva de resistencia posterior al límite elástico característica de las estructuras de acero.

La última de estas limitaciones fue superada por el trabajo de Baker [1] y sus colaboradores en los años treinta, cuando se desarrolló el cálculo plástico. Este método se basaba en asegurar un coeficiente global de seguridad contra el colapso, previendo el "fallo" localizado con una redistribución de las tensiones de flexión. Beal [2] aporta una comparación del cálculo elástico y el cálculo plástico.

Una vez reconocidos los inconvenientes del método de diseño basado en la tensión admisible, se ha adoptado un enfoque alternativo conocido como el diseño basado en estados límites. En la actualidad, para la mayoría de los tipos y materiales estructurales, hay procedimientos bien establecidos de diseño basado en estados límites. El enfoque reconoce la inevitable variabilidad e incertidumbre en la cuantificación de las prestaciones estructurales, incluidas las incertidumbres de las características de los materiales y los niveles de carga. Idealmente, cada incertidumbre se trata normalmente de una forma similar empleando técnicas estadísticas para identificar valores típicos o característicos y el grado de desviación que se puede esperar de esta norma [3]. Entonces es posible derivar factores de seguridad parciales que son consistentes, uno para cada aspecto de incertidumbre del diseño. Así, por ejemplo, a diferentes tipos de carga se les aplican coeficientes diferentes. Seguidamente se examinan varios estados límites de la estructura. En ese caso, la estructura se proyecta para fallar en condiciones de carga ponderadas, lo que da una idea de los márgenes de seguridad más clara de la que se tenía anteriormente con el cálculo de la tensión admisible.

3.2 Estabilidad

Una resistencia inadecuada no es la única causa de colapso. En particular, el proyectista debe asegurar una estabilidad adecuada, tanto de la estructura completa (en función de su forma general) como de cada parte de la misma (dependiendo de las proporciones y materiales de cada barra). Esta última se resuelve generalmente modificando la resistencia del material según las condiciones individuales. La estabilidad general resulta mucho más difícil de cuantificar y debe estudiarse cuidadosamente en la fase inicial del diseño de la estructura. En este sentido, la estabilidad de la estructura puede definirse por las condiciones en las cuales una estructura ni se colapsará (completa o parcialmente) debido a cambios menores, por ejemplo de su forma, estado o carga normal, ni será indebidamente sensible a acciones accidentales. En la figura 4 se muestran algunos ejemplos.

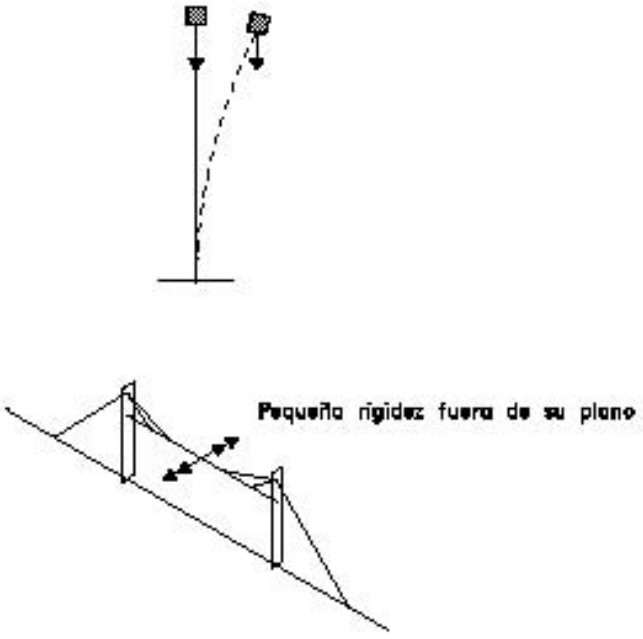


Figura 4 Ejemplos de disposiciones estructurales potencialmente inestables

En el estudio de la estabilidad, la posición de los principales elementos de apoyo debe proporcionar una vía claramente definida para la transmisión de cargas, incluidos los efectos del viento y sísmicos sobre los cimientos. Al considerar las cargas del viento en los edificios es importante prever arriostramientos en dos planos verticales ortogonales, distribuidos de forma que se eviten efectos de torsión indebidos, y reconocer el papel de la estructura del forjado en

la transmisión de cargas del viento a estas áreas arriostradas (figura 5). El arriostramiento puede efectuarse de varias maneras, por ejemplo mediante elementos de arriostramiento transversales o la acción de un pórtico rígido.

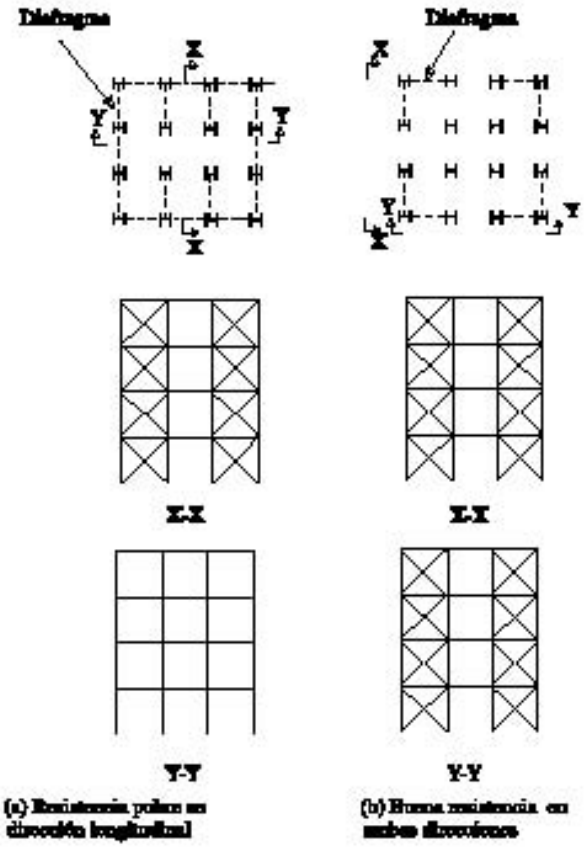


Figura 5 Estabilidad en dirección transversal

La consideración de acciones accidentales como explosiones o impactos resulta más difícil, pero el principio consiste en limitar la extensión de los daños causados. Los daños pueden limitarse previendo cargas muy altas (no apropiadas generalmente) o previendo múltiples líneas de carga. En el diseño se deben considerar los daños locales que dejan ineficaces elementos individuales de la estructura, asegurándose de que el resto de la estructura es capaz de soportar la nueva distribución de las cargas, aunque con un factor de seguridad menor. Las estrategias alternativas deben prever la disipación de acciones accidentales, por ejemplo dando salida a las explosiones, y proteger la estructura, por ejemplo instalando protecciones para evitar el impacto de vehículos en las columnas (figura 6).

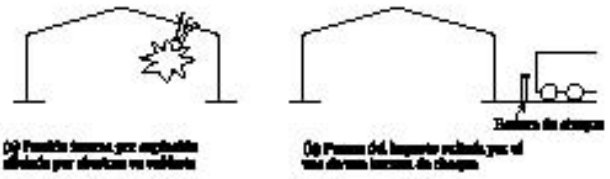


Figura 6 Estratégias alternativas para tratar con acciones accidentales

Naturalmente, debe asegurarse la estabilidad estructural cuando se realizan alteraciones en las estructuras existentes. En todos los casos debe considerarse muy cuidadosamente la estabilidad durante la ejecución.

3.3 Robustez

La robustez se asocia a la estabilidad de muchas maneras. Formas de construcción que cumplen con la función primaria de acomodar condiciones de carga normales –altamente idealizadas a efectos del diseño– pueden no satisfacer una función secundaria cuando la estructura está sometida a condiciones de carga reales. Por ejemplo, normalmente se supone que el forjado de un edificio debe transmitir las cargas del viento en el plano horizontal a las posiciones arriostradas. La transmisión de las cargas del viento sólo se consigue si existe una conexión adecuada entre el forjado y otras piezas de la estructura y fábrica del edificio y si la forma de construcción del propio forjado es adecuada.

4. OTROS OBJETIVOS DEL DISEÑO

Aunque el colapso es una consideración principal para el ingeniero de estructuras, existen muchos otros aspectos que deben ser considerados. Ninguno de estos aspectos puede cuantificarse y sólo algunos de ellos se aplicarán normalmente. No obstante, para lograr una solución con éxito, el proyectista debe decidir qué consideraciones se pueden ignorar, cuáles son los criterios más importantes en el desarrollo del proyecto y cuáles se pueden comprobar simplemente para asegurar unas prestaciones satisfactorias.

4.1 Deformación

La flecha de una estructura tiene mucho más que ver con la rigidez que con la resistencia. Una flecha excesiva puede provocar varios efectos indeseables. Estos incluyen daños en los acabados (en particular cuando se utilizan materiales frágiles como vidrio o escayola), estancamiento de agua en cubiertas planas (que puede provocar fugas e incluso el colapso en casos extremos), alarma visual a los usuarios y, en casos extremos, cambios en el comportamiento estructural suficientes para provocar el colapso. Quizá el ejemplo más frecuente de los efectos de la flecha se da en las columnas, que se diseñan principalmente para cargas de compresión pero que pueden verse sometidas a efectos de pandeo importantes cuando la columna se deforma en un plano horizontal, el llamado efecto P-delta.

El enfoque normal en el diseño consiste en comprobar que las flechas calculadas no superan los niveles admisibles, que dependen del tipo de estructura y de los acabados empleados. Por ejemplo, los límites de la flecha de las estructuras de cubiertas normalmente no son tan severos como los de las estructuras de los forjados. Al efectuar estas comprobaciones es importante reconocer que la flecha total $\delta_{máx}$ está formada por varios componentes, como se muestra en la figura 7, esto es:

$$\delta_{máx} = \delta_1 + \delta_2 - \delta_0$$

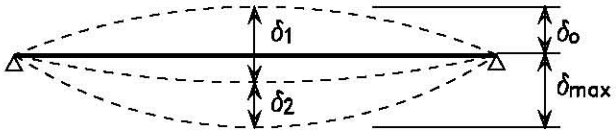


Figura 7 Componentes de flexión a considerar

donde

δ_1 es la flecha debida a cargas permanentes
δ_2 es la flecha debida a cargas variables
δ_0 es la contraflecha (en su caso) de la viga sin carga.

Al controlar las flechas, a menudo es necesario considerar tanto $\delta_{máx}$ como δ_2, aplicándose los límites más severos en el segundo caso.

Aunque las flechas calculadas no proporcionan necesariamente una predicción precisa de los valores probables, sí dan una medida de la rigidez de la estructura. Por lo tanto, constituyen una guía razonable de las prestaciones de la estructura a este respecto. Con la tendencia hacia vanos mayores y materiales de mayor resistencia, en los últimos años el diseño basado en la flecha ha adquirido más importancia. En muchos casos, esta consideración dicta la magnitud de los elementos estructurales más que su resistencia. En el caso de ciertas estructuras el control de la flecha tiene una importancia máxima. Ejemplos de ello son las estructuras que soportan grúas elevadas y las que alojan equipamientos sensibles. El diseño basado en la flecha es probablemente la condición crítica en tales casos.

4.2 Vibración

Al igual que el comportamiento de la flecha, las características de vibración de una estructura dependen de la rigidez más que de la resistencia. El principio del diseño consiste en adoptar una solución para la cual la frecuencia

de la vibración sea lo bastante diferente de la de cualquier fuente de excitación, por ejemplo una máquina, para evitar la resonancia. La mayor longitud de los vanos, las estructuras más ligeras y una reducción de la masa y la rigidez de los tabiques y revestimientos han contribuido a reducir de forma generalizada las frecuencias naturales para las estructuras de los edificios. Se han registrado casos de incomodidad humana y el Eurocódigo 3 [4] especifica ahora una frecuencia natural mínima de 3 ciclos por segundo para los suelos en uso normal y 5 ciclos por segundo para los suelos de pistas de baile.

Puede asimismo ser necesario considerar las oscilaciones excitadas por el viento en estructuras inusualmente flexibles como las de edificios muy esbeltos y altos, puentes de gran luz, cubiertas grandes y elementos inusualmente flexibles como tirantes ligeros. En estas estructuras flexibles deben estudiarse, con cargas de viento dinámicas, las vibraciones en el plano de la dirección del viento y perpendiculares a la misma, así como las vibraciones inducidas por las rachas y torbellinos. Las características dinámicas de la estructura pueden ser el criterio principal del diseño en tales casos.

4.3 Resistencia al incendio

En el Tomo 6 se explican las previsiones de seguridad en el caso de incendio. Un requisito común es que se mantenga la integridad estructural durante un periodo especificado a fin de que los ocupantes del edificio puedan abandonarlo y puedan realizarse las operaciones de lucha contra el incendio sin peligro de colapso de la estructura. En el caso de estructuras de acero pueden adoptarse estrategias de diseño alternativas para cumplir este requisito. El enfoque tradicional ha consistido en completar el diseño de la estructura en frío y prever algún tipo de aislamiento para la estructura de acero. Este enfoque puede representar una solución costosa y, en la actualidad, se han desarrollado métodos alternativos que permiten la reducción, y en algunos casos la eliminación completa, de la protección contra incendios. Para llevar a cabo estas alternativas de manera eficaz, es importante que en una fase inicial del proyecto se considere cómo se va a obtener la resistencia al incendio de la estructura de acero. La adopción de una solución de diseño que puede resultar relativamente ineficiente en términos de peso de acero en condiciones normales puede verse ampliamente compensada por el ahorro en protección contra el incendio (figura 8).

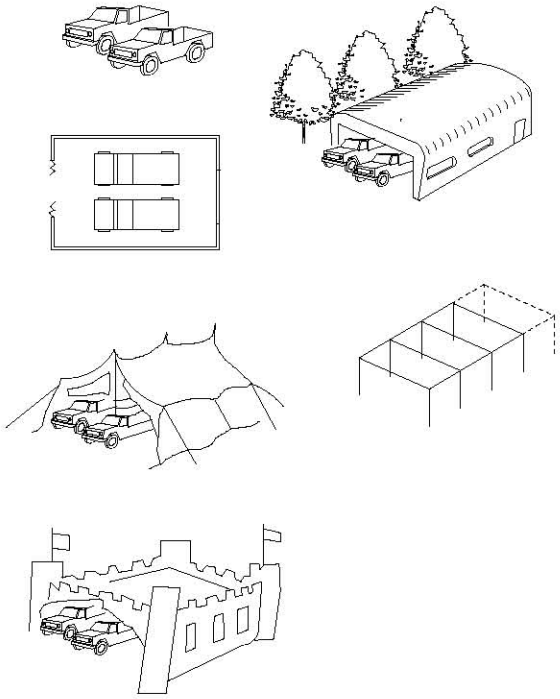


Figura 8 Conceptos iniciales

Los edificios situados junto a otros locales pueden requerir una consideración especial a fin de prevenir la propagación del incendio a los locales adyacentes debido a un colapso estructural. También para estos casos se han desarrollado procedimientos de diseño cuantitativos [5].

4.4 Fatiga

Cuando una estructura, o elementos individuales de la misma, están sometidos a fluctuaciones importantes de tensión, puede producirse un colapso por fatiga después de un cierto número de ciclos de carga a niveles de tensión muy por debajo de la resistencia estática normal. Los principales factores que afectan al comportamiento en fatiga son el

campo de tensiones experimentadas, el número de ciclos de carga y el entorno. Las estructuras que requieren una consideración particular a este respecto son las vigas carril, los puentes de carreteras y ferrocarril, y las estructuras sometidas a ciclos repetitivos de vibración procedente de maquinaria u oscilaciones inducidas por el viento. El Eurocódigo 3 [4] incluye orientaciones para el diseño.

4.5 Ejecución

Una de las principales ventajas de la estructura de acero es la rapidez a la que puede avanzar su ejecución. Para aprovechar al máximo esta ventaja, puede ser necesario adoptar una solución estructuralmente menos eficiente, por ejemplo utilizando el mismo perfil para todas las barras en la construcción de un forjado, incluso si unas viguetas reciben una carga menor que otras (figura 9). Debe evitarse el apuntalamiento temporal , al igual que los cambios posteriores de detalles que pueden afectar al trabajo de taller.

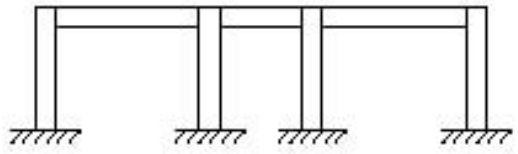


Figura 9 Adoptar el mismo perfil para todos los miembros de un forjado podría ser poco eficaz en cuanto a uso de material, pero economiza la construcción

La estructura no debe ser considerada de forma aislada, sino tratada como una parte de la construcción completa, junto con los servicios, el revestimiento y los acabados. Adoptando un enfoque coordinado en el diseño, integrando las partes y eliminando o reduciendo los trabajos de albañilería, puede incrementarse al máximo la velocidad de ejecución de la totalidad del proyecto. Un buen ejemplo de ello es el sistema de emparrillado continuo bidireccional utilizado para la sede central de BMW en Bracknell y otros proyectos [6].

La instalación de servicios puede tener implicaciones importantes en la rapidez, el coste y el detalle de construcción. En edificios con requisitos importantes de servicios, el coste de éstos puede ser considerablemente mayor que el coste de la estructura. En tales circunstancias, puede ser mucho mejor sacrificar la eficiencia estructural en aras de la facilidad para acomodar los servicios. El diseño de los forjados , incluidos los acabados, la estructura, la protección contra incendios y los servicios, tiene implicaciones en otros aspectos de la construcción del edificio. Cuanto más canto tenga el forjado, para un mismo número de plantas, mayor será la altura total del edificio, y, por tanto, la cantidad de revestimiento externo necesario. En numerosos edificios comerciales se utilizan sistemas de revestimiento muy sofisticados y costosos. El ahorro en sistemas de revestimiento puede compensar ampliamente el uso de una construcción de forjado mas fino, pero menos eficiente. Cuando existe un control estricto de programación de la altura total del edificio, puede incluso ser posible acomodar plantas adicionales de esta manera.

4.6 Mantenimiento

Todas las estructuras deben revisarse y mantenerse de forma regular, aunque es probable que algunas condiciones sean más exigentes a este respecto. Por ejemplo, una estructura de acero en un ambiente interior seco y con calefacción no sufrirá corrosión, mientras que la estructura de un puente en una zona costera requerirá planes de mantenimiento rigurosos. Algunas formas estructurales son más fáciles de mantener que otras y, cuando las condiciones de exposición son severas, la facilidad para la inspección y el mantenimiento debe ser un criterio importante. Los objetivos principales en este contexto son evitar zonas inaccesibles, disponer registros para suciedad y humedad y utilizar perfiles individuales laminados o tubulares preferiblemente a conjuntos tipo cercha compuestos por perfiles más pequeños.

5. RESPONSABILIDADES DEL PROYECTO

Un ingeniero tiene la responsabilidad de asegurar que el diseño y los detalles de todos los componentes sean compatibles y cumplan con los requisitos generales del proyecto. Esta responsabilidad es de la mayor importancia cuando diferentes diseñadores u organizaciones son responsables de partes individuales de una estructura como cimientos, superestructura y revestimiento. En este caso debería incluirse una valoración de los planos de trabajo y otros documentos para verificar, entre todos, que los requisitos de estabilidad se hayan sido incorporados en todos los elementos y que puedan cumplirse durante la fase de ejecución.

Antes y durante la ejecución es esencial la comunicación efectiva entre los componentes del equipo de diseño, así como entre el diseñador y el constructor. Una buena comunicación ayudará a evitar conflictos potenciales del proyecto, por ejemplo cuando deben penetrar servicios en la estructura, así como para la realización segura de la estructura conforme a los planos y pliego de condiciones. El constructor puede asimismo necesitar información sobre los resultados de los estudios de obra y de terreno, hipótesis de carga, resistencia a las cargas, límites de las posiciones de uniones de construcción y posiciones de elevación para barras que deban montarse como piezas individuales. Cuando sea necesario, debe elaborarse una memoria acompañada de croquis en la que se detalle cualquier requisito especial, por ejemplo cualquier diseño inusual o cualquier aspecto particularmente sensible de la estructura o la construcción. Esta memoria debe ponerse a disposición del fabricante para que adopte las medidas apropiadas en lo referente a obras temporales y métodos de ejecución.

El diseñador debe ser informado de los métodos de construcción propuestos, los procedimientos de montaje, el uso del equipo y las obras temporales. El programa de ejecución y la secuencia de montaje deben acordarse entre el proyectista y el constructor.

Una comunicación plana y efectiva entre todas las partes involucradas ayudará no sólo a promover una ejecución segura y eficaz, sino que puede mejorar también conceptos y detalles del proyecto. El diseño no debe contemplarse como un fin en si mismo, sino como una parte importante de cualquier proyecto de construcción.

6. RESUMEN FINAL

- Existen muchos problemas asociados al diseño estructural. Por muchas potentes herramientas que haya disponibles, el ingeniero debe reconocer siempre que el modelo de diseño no es más que una idealización y simplificación de las condiciones reales.
- Un enfoque cuantificado del diseño estructural puede adoptar formas diferentes con vistas a proporcionar un marco para soluciones satisfactorias. La aplicación de reglas de diseño debe combinarse con el sentido común y el conocimiento.
- En el diseño estructural deben considerarse muchos aspectos, tanto de rendimiento como de costes. La solución estructural más eficiente puede no ser la solución general más eficiente si no se consideran de forma coordinada otros aspectos interdependientes de la construcción.

7. BIBLIOGRAFÍA

[1] Baker, J.F., and Heyman, J. "Plastic Design of Frames 1: Fundamentals", Cambridge University Press, 1969.

[2] Beal, A.N. "What's wrong with load factor design?", Proc. ICE, Vol. 66, 1979.

[3] Armer, G.S.T., and Mayne, J.R. "Modern Structural Design Codes - The case for a more rational format", CIB Journal Building Research and Practice, Vol. 14, No. 4, pp. 212-217, 1986.

[4] Eurocódigo 3 "Design of Steel Structures" ENV1992-1-1: Part 1: General Rules and Rules for Buildings, CEN, 1992.

[5] Newman, G.J. "The behaviour of portal frames in boundary conditions", Steel Construction Institute.

[6] Brett, P.R. "An alternative approach to industrial building", The Structural Engineer, Nov. 1982.

ESDEP TOMO 2
CONSTRUCCIÓN EN ACERO: INTRODUCCIÓN AL DISEÑO

Lección 2.2.2: Bases de Diseño en Estado Límite y Coeficientes de Seguridad

OBJETIVOS/CONTENIDO

Explicar los principios de diseño basado en estados límite en el contexto del Eurocódigo 3: Diseño de estructuras metálicas. Proporcionar información sobre los coeficientes de seguridad parciales para cargas y resistencia y considerar cómo pueden justificarse los valores particulares.

LECCIONES AFINES

Lección 2.1:	Proceso de Diseño
Lección 2.3:	Bases para la Determinación de Cargas
Lección 2.8:	Aprender de los Errores
Lección 3.4:	Calidades y tipos de Acero
Lección 3.5:	Selección de la calidad del Acero

RESUMEN

Se explica la necesidad de las idealizaciones estructurales en el contexto del desarrollo de análisis cuantitativos y métodos de diseño. Se comentan formas alternativas de introducir márgenes de seguridad y el papel de las reglas de diseño. Se explican las bases de diseño estados límite y los valores apropiados de los coeficientes de seguridad para cargas y resistencia. Se incluye un glosario de términos.

1. INTRODUCCIÓN

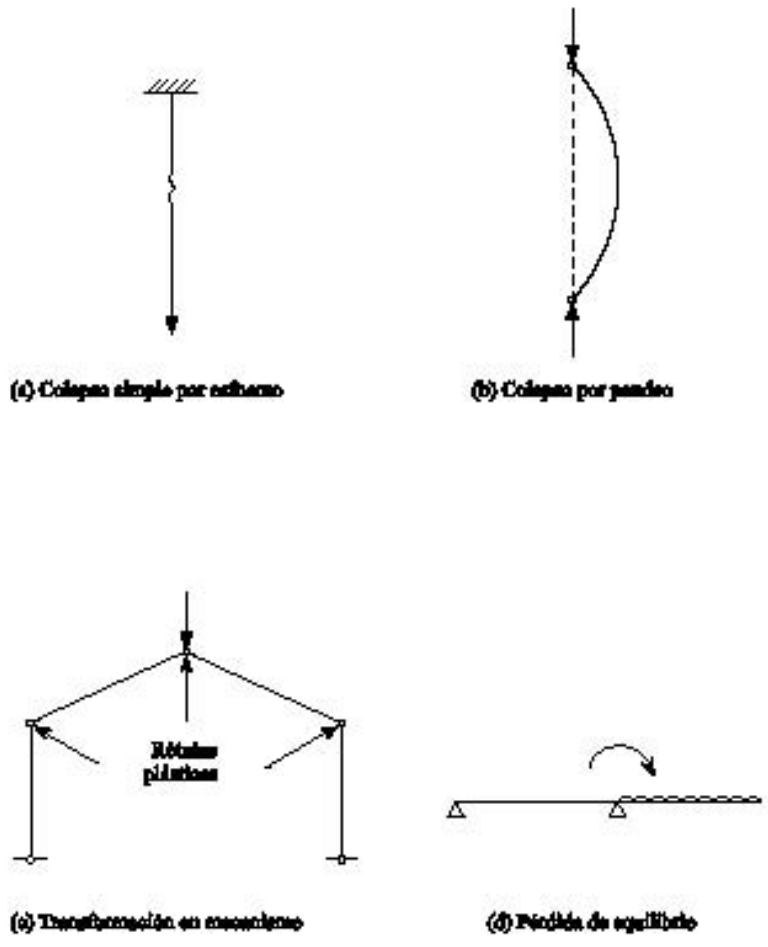
Los objetivos fundamentales del diseño estructural son proyectar una estructura funcional, que sea segura y útil, y cuya construcción y mantenimiento sean económicos. Todas las reglas de diseño, cualquiera que sean sus bases, están destinadas a ayudar al proyectista a satisfacer estos requisitos básicos. En el pasado, el diseño era altamente empírico. Inicialmente se basaba en la experiencia previa e inevitablemente se producía un número considerable de fallos. Posteriormente se desarrollaron métodos de ensayo físico como un medio de probar la eficacia de diseños innovadores.

Las primeras aproximaciones al diseño basado en métodos de cálculo empleaban la teoría de la elasticidad. Se han utilizado casi exclusivamente como la base de un diseño estructural cuantitativo hasta hace muy poco. En la actualidad, el diseño basado en estados límite está sustituyendo a los enfoques anteriores basados en la tensión admisible elástica y constituyen la base del Eurocódigo 3 [1] referido al diseño de estructuras metálicas. En los apartados siguientes se explican los principios del diseño basado en estados límite y se describe su puesta en práctica dentro de las reglas de diseño, en particular el Eurocódigo 3.

2. BASES DE DISEÑO EN ESTADOS LÍMITE

Los métodos de diseño basado en estados límite animan al ingeniero a examinar las condiciones que pueden considerarse como fallo - denominadas estados límites. Estas condiciones se clasifican en los estados límite últimos y estados limite de servicio. Dentro de cada una de estas clasificaciones puede ser necesario comprobar varios aspectos del comportamiento de la estructura metálica.

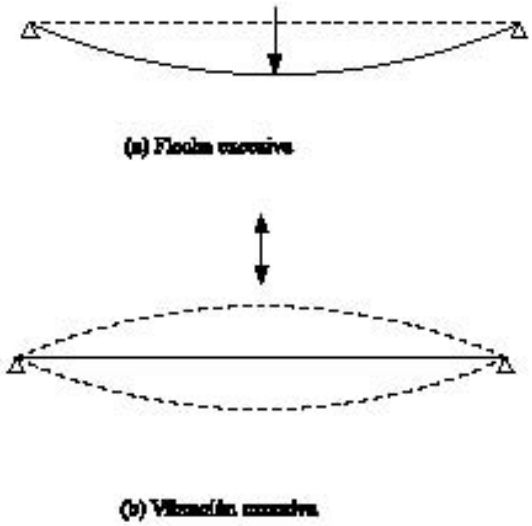
Los estados límites últimos se refieren a la seguridad, en cuanto a resistencia a las cargas y equilibrio, cuando la estructura alcanza un punto en el que es sustancialmente insegura para la función que se le supone. El proyectista comprueba que la resistencia máxima de una estructura (o elemento de la misma) sea adecuada para soportar las acciones máximas (cargas o deformaciones) a que estará sometida, con un margen razonable de seguridad. Para el cálculo de estructuras metálicas, los aspectos que se deben comprobar son, especialmente, la resistencia (incluida la fluencia, el pandeo y la transformación en un mecanismo) y la estabilidad contra el vuelco (figura 1). En algunos casos puede también ser necesario considerar otras posibles modalidades de rotura, como la rotura debida a la fatiga del material y la rotura frágil.



(a) Colapso simple por esfuerzo (b) Colapso por pandeo

(c) Transformación en mecanismo (d) Pérdida de equilibrio

Figura 1 Condiciones últimas de colapso



(a) Flecha excesiva

(b) Vibración excesiva

Figura 2 Colapso en condiciones de servicio

Los estados límites de uso se refieren a aquellos estados en los que una estructura, aunque aguanta, empieza a comportarse de una forma insatisfactoria debido, por ejemplo, a deformaciones o vibraciones excesivas (figura 2). Así pues, el proyectista comprobará que la estructura cumple satisfactoriamente con su función al ser sometida a las cargas de trabajo o servicio.

Puede ser necesario comprobar estos aspectos del comporta-