



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Arquitectura

CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DEL SISTEMA
ESTRUCTURAL Y SU APLICACIÓN AL DISEÑO
ARQUITECTÓNICO

Ciudad de Guatemala, Agosto de 2006

Juan Pablo Samayoa García



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Arquitectura

**CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN
DEL SISTEMA ESTRUCTURAL
Y SU APLICACIÓN AL DISEÑO ARQUITECTÓNICO**

Proyecto de Graduación
Que al conferírsele el título de

ARQUITECTO

Presenta

JUAN PABLO SAMAYOA GARCÍA

Ciudad de Guatemala, Agosto de 2006

Juan Pablo Samayoa García



DEDICATORIA

- A la memoria de mi madre, Gladis G. García Alfaro, no puedo decirte más que todo lo que soy y lo que algún día pueda llegar a ser, te lo debo ti, a tu amor, a tus palabras, a tus consejos y a que fuiste un ejemplo para mí, sé que desde el cielo compartes mis alegrías y mis tristezas. TE QUIERO.
- A Silvia S. R. García Alfaro, mi tía, te agradezco de todo corazón lo que has hecho por mí, por tu cariño, tu apoyo y por todos esos sacrificios que has hecho para traerme hasta aquí; has sido mi fuerza y mi ejemplo.

S
a
m
u
a
y
n
a
P
a
b
l
o
c
i
a





AGRADECIMIENTOS

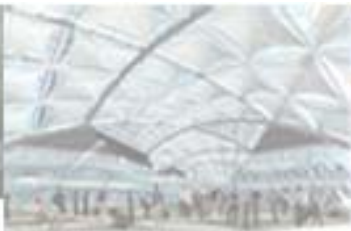
- A Dios, porque sin Ti no sería lo que soy.

*Te ofrezco mi vida, mi mente, mi corazón y mi alma,
Que todo lo que sea, lo sea por ti y para ti,
Guíame en el camino de la vida;
Dame la sabiduría para encontrar mi destino
Y la fuerza para llegar a él,
Para llegar a Ti.*

- A mi familia, por darme su apoyo y su confianza.
- A mis amigos, porque gracias a ustedes he podido salir adelante, por estar ahí, por compartir una risa a mi lado, una lágrima, una palabra; no hacen falta nombres ni apellidos, ustedes saben quienes son y lo que significan para mí.
- A la Universidad de San Carlos de Guatemala y en especial a la Facultad de Arquitectura.
- A todos mis catedráticos por compartir sus conocimientos y muy especialmente a mi asesor, Arq. Jorge Escobar y mis consultores Arq. Raúl Monterroso y Arq. Jorge López Medina.

S
a
j
m
u
a
y
n
o
a
P
a
b
l
o
c
i
a





JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Arq. Carlos Valladares Cerezo
SECRETARIO	Arq. Alejandro Muñoz Calderón
VOCAL I	Arq. Jorge González Peñate
VOCAL II	Arq. Raúl Monterroso Juárez
VOCAL III	Arq. Jorge R. Escobar Ortiz
VOCAL IV	Br. Pool Enrique Polanco Betancourt
VOCAL V	Br. Eddy Alberto Popa Ixcot

TRIBUNAL EXAMINADOR

DECANO	Arq. Carlos Valladares Cerezo
SECRETARIO	Arq. Alejandro Muñoz Calderón
EXAMINADOR	Arq. Jorge Escobar Ortiz
EXAMINADOR	Arq. Jorge López Medina

ASESOR DE TESIS

Arq. Jorge Escobar Ortiz

CONSULTORES

Arq. Raúl Monterroso y Arq. Jorge López Medina

S
a
j
m
u
a
y
n
o
a
P
a
b
l
o
c
i
a





ÍNDICE



CONTENIDO

PAGINA

GENERALIDADES

Introducción	I
Antecedentes	II
Justificación	III
Objetivos	IV
Delimitación del Tema	V
Metodología	VI

PRIMERA PARTE: CONCEPTOS FUNDAMENTALES

CAPITULO I: CONCEPTOS FUNDAMENTALES

1.1 Estructura	1
1.2 Protección y Espacios Cerrados	1
1.3 División del Espacio Interior	2
1.4 Generación de Espacios Libres	2

CAPITULO II: PRINCIPALES ELEMENTOS ESTRUCTURALES 3

CAPITULO III: TIPOS DE ESTRUCTURAS 8

CAPITULO IV: TEMAS BÁSICOS EN EL ANÁLISIS Y DISEÑO DE ESTRUCTURAS

4.1 Fenómenos Estructurales Fundamentales	11
4.2 Miembros en Tensión, Compresión, Flexión, Corte, Torsión Y Orientación: Una Introducción	11

**S
a
j
m
u
a
y
n
o
a
P
a
G
b
a
l
o
c
i
a**





4.3 Principios de Mecánica	13
4.3.1 Fuerzas, Momentos y Equilibrio	13
4.3.2 Reacciones	14
4.3.3 Acciones	15

CAPITULO V: CARGAS

5.1 Orígenes de las Cargas	17
5.2 Características de las Cargas	18
5.3 Cargas Vivas y Muertas	
5.3.1 Carga Muerta	19
5.3.2 Cargas Vivas	19
5.3.3 Cargas de Nieve, Lluvia, Granizo y Hielo	20
5.3.4 Efectos de Cambios Volumétricos	20
5.3.5 Efectos del Viento	20
5.3.6 Otras Acciones Accidentales	21
5.3.7 Sismos	21
5.5 Comparación entre Fuerzas Estáticas y Fuerzas Dinámicas	23

CAPITULO VI: MATERIALES ESTRUCTURALES

6.1 Propiedades de los Materiales	24
6.2 Consideraciones Generales	24
6.3 Madera	25
6.4 Acero	26
6.5 Concreto	27
6.6 Aluminio	28
6.7 Mampostería	29
6.8 Plásticos	29
6.9 Materiales Diversos	30
6.10 Suelos	30





SEGUNDA PARTE: CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS ESTRUCTURALES

CRITERIOS GENERALES

CAPITULO VII: ANÁLISIS Y PROCESO DE DISEÑO

7.1 El Ámbito del Diseño Estructural	31
7.2 Diseño con Respecto al Comportamiento Estructural	33
7.3 Investigación del Comportamiento Estructural	34
7.4 El Proceso del Diseño Estructural	34
7.5 Características de los Sistemas Estructurales	36

CAPITULO VIII: CRITERIOS GENERALES PARA SELECCIÓN DEL SISTEMA ESTRUCTURAL

8.1 Resistencia	38
8.2 Factibilidad	39
8.3 Eficiencia	39
8.3 Construcción	39
8.4 Optimización	40
8.5 Integración	40
8.6 Seguridad	40
8.7 Relaciones Forma-Escala	41
8.8 Relación Edificio-Suelo	44

SISTEMAS ESTRUCTURALES

CAPITULO IX: ARMADURAS

9.1 Principios Generales	47
9.2 Análisis Cualitativo de las Fuerzas	48
9.3 Análisis de las Armaduras	49
9.4 Diseño Estructural de Armaduras	49
9.5 Configuraciones	50
9.6 Dimensiones de las Armaduras	52





9.7 Consideraciones en el Diseño de los Miembros	52
9.8 Armaduras Planas o Tridimensionales	53
9.9 Estructuras Espaciales	53
9.10 Criterios para la Selección y Aplicación de las Armaduras	55

CAPITULO X: ESTRUCTURAS FUNICULARES: CABLES Y ARCOS

10.1 Principios Generales de las Formas Funiculares	57
10.2 Análisis y Diseño de Estructuras con Cables	58
10.2.1 Cables Suspendidos: Cargas Concentradas	58
10.2.2 Cables Suspendidos: Cargas Distribuidas Uniformemente	59
10.2.3 Diseño de Estructuras con Cables	59
10.2.4 Cables Simplemente Suspendidos	59
10.2.5 Flechas en los Cables	60
10.2.6 Elementos de Soporte	60
10.2.7 Sistemas de Doble Cable	60
10.2.8 Estructuras Soportadas por Cables	61
10.3 Análisis y Diseño de Arcos	
10.3.1 Arcos de Mampostería	62
10.3.2 Arcos Parabólicos Rígidos: Cargas Uniformemente Distribuidas	63
10.3.3 Diseño Estructural de los Arcos	63
10.3.4 Arcos Triplemente Articulados	64
10.3.5 Comparación entre Arcos Doblemente y Triplemente Articulados	64
10.4 Criterios para la Selección y Aplicación de Arcos	65

CAPITULO XI: ESTRUCTURAS MEMBRANÁCEAS Y REDES

11.1 Estructuras Neumáticas	67
11.1.1 Estructuras Soportadas por Aire	69



S
a
j
m
u
a
y
n
o
a
P
a
G
b
a
l
r
o
c
i
a





11.1.2 Estructuras Infladas

70

11.2 Análisis y Diseño Estructural de Redes y Tiendas

11.2.1 Curvaturas

70

11.2.2 Condiciones de Soporte y Apoyo

70

11.2.3 Determinación de la Forma

71

11.3 Materiales

72

11.4 Criterios Para la Selección y Aplicación de Estructuras Membranáceas y Redes

72

CAPITULO XII: CÁSCARAS

12.1 Acción de las Membranas en las Cáscaras

75

12.2 Cáscaras Esféricas

76

12.2.1 Tipos de Esfuerzos en las Cáscaras Esféricas

76

12.2.2 Condiciones de Apoyo: Anillos de Tensión y Compresión

77

12.2.3 Otras Consideraciones

77

12.3 Cáscaras Cilíndricas

77

12.4 Cáscaras: Hiperbólicas y Paraboloides

78

12.5 Estructuras de Placas Plegadas

78

12.6 Criterios para la Selección y Aplicación de Cáscaras

79

CAPITULO XIII: ESTRUCTURAS MASIVAS

13.1 Principios Generales

81

13.2 Vigas

82

13.2.1 Retícula de Vigas

82

13.3 Columnas

84

13.4 Marcos

85

S
a
j
m
u
a
y
n
o
a
P
a
G
b
a
l
r
o
c
i
a





13.4.1 El Uso del Voladizo 87
 13.4.2 Marcos Vierendeel 88

13.5 Análisis de Marcos Rígidos 90
 13.6 Selección del Tipo de Marco 90
 13.7 Losas 90

13.7.1 Losas Macizas Planas 91
 13.7.2 Losas Nervuradas 92

13.8 Líneas Isostáticas 94
 13.9 Criterios para la Selección y Aplicación de Estructuras Masivas 94

CAPITULO XIV: ESTRUCTURAS VERTICALES

14.1 Sistema Reticular 98
 14.2 Sistema Perimetral 98
 14.3 Sistema de Núcleo Central 99
 14.4 Sistema de Muros de Corte 99
 14.5 Sistema de Muros de Carga 101
 14.6 Otras Consideraciones 101
 14.7 Criterios para la Selección y Aplicación de Estructuras Verticales 103

TERCERA PARTE: APLICACIÓN AL DISEÑO ARQUITECTÓNICO

CAPITULO XVI: ERRORES Y ESTETICA ESTRUCTURAL

15.1 Errores Estructurales
 15.1.1 Errores Históricos 107
 15.1.2 Causas Principales de Error Estructural 107
 15.1.3 Fallas en el Diseño Estructural 107
 15.1.4 Fallas en la Coordinación y la Supervisión 111
 15.1.5 Errores de Materiales 112





15.1.6 Consecuencias de los Errores Estructurales

113

15.2 Estética Estructural

15.2.1 Estética y Estructuras

114

15.2.2 Mensajes Semióticos

114

15.2.3 Orígenes del Mensaje Estructural

115

15.2.4 Escala y el Mensaje Estructural

116

15.2.5 Estética y Corrección Estructural

117

15.2.6 El Mensaje de la Estructura

118

CAPITULO XVI: APLICACIÓN AL DISEÑO ARQUITECTÓNICO

16.1 Armaduras

16.1.1 Estación de Trenes en Dresden, Alemania

119

16.1.2 Museo de Arte, Quenn, EE. UU.

123

16.1.3 Estadio de Munich, Alemania

125

16.2 Estructuras Funiculares: Arcos y Cables

16.2.1 Puente Alamillo, Sevilla, España

127

16.2.2 Puente Trinity River, Dallas, Texas. EE.UU.

128

16.3 Estructuras Membranáceas y Redes

16.3.1 Estacion de Trenes en Florencia

129

16.4 Cascaras

16.4.1 Centro Cultural Zenit en St. Etienne, Francia

131

16.4.2 Sala de Conciertos, Brujas, Bélgica

133

16.4.3 Instituto de Artes y Ciencias, Staten Island, EE.UU.

135

S
a
j
m
u
a
y
n
a
P
a
G
b
l
o
c
i
a





16.5 Estructuras Masivas

16.5.1 Oficinas Centrales Hearst, Nueva York, EE.UU.	136
16.5.2 Renaissance Rom Extension To The Royal Ontario Museum: The Crystal	138
16.5.3 Ciudad de las Artes, Valencia, España.	140
16.5.4 Beehive, Culver City, California, EE.UU.	142
16.5.5 Museo Guangdong, Guangzhou, China	143

16.6 Estructuras Verticales

16.6.1 City Tower de Moscú	146
16.6.2 Rascacielos Retorcido, Malmo, Suecia	148
16.6.3 Torre de Apartamentos, Nueva York, EE. UU	150
16.6.4 Torre Residencial Zlota 44, Varsovia, Polonia	151
16.6.5 Gateway Art Tower, Cultver City, EE. UU.	153

CONCLUSIONES	155
---------------------	-----

RECOMENDACIONES	156
------------------------	-----

BIBLIOGRAFÍA	157
---------------------	-----





ÍNDICE DE GRÁFICAS

CONTENIDO

PAGINA

FIGURA 1: Viga simplemente apoyada y Columnas	3
FIGURA 2: Marco Rígido	3
FIGURA 3: Diferentes composiciones de Armaduras	4
FIGURA 4: Tipos de Arcos	4
FIGURA 5: Disposición común de muros y losa	5
FIGURA 6: Bóveda o Superficie de cañón	6
FIGURA 7: Superficies Esféricas y Domos	6
FIGURA 8: Ejemplos de estructuras soportadas por cables.	7
FIGURA 9: Ejemplo de membrana.	7
FIGURA 10: Clasificación de los sistemas estructurales por su rigidez y geometría.	8
FIGURA 11: Clasificación de los sistemas estructurales por su rigidez y geometría.	9
FIGURA 12: Elemento lineal sometido a tensión.	11
FIGURA 13: Elemento lineal sometido a compresión.	12
FIGURA 14: Elemento lineal sometido a flexión.	12
FIGURA 15: Elemento lineal sometido a torsión.	12
FIGURA 16: Diferentes tipos de armaduras.	47
FIGURA 17: Configuración Inestable y Estable en Armaduras.	47
FIGURA 18: Análisis cualitativo de las fuerzas.	48
FIGURA 19: Analogía entre armaduras cables y arcos.	48

S
a
j
m
u
a
y
n
o
a
P
a
b
l
o
c
i
a





FIGURA 20: La falta de triangulación provoca inestabilidad.	49
FIGURA 21: Conformación estable debido a la triangulación.	49
FIGURA 22: Otros tipos de composiciones en armaduras.	50
FIGURA 23: Armaduras de barras paralelas.	51
FIGURA 24: Armaduras de forma funicular.	51
FIGURA 25: Armaduras de forma lenticular, con y sin diagonales.	52
FIGURA 26: Intersección de armaduras de barras paralelas.	54
FIGURA 27: Intersección de armaduras de barras paralelas.	54
FIGURA 28: Concepción de una estructura espacial partiendo de la intersección de armaduras planas.	54
FIGURA 29: Estructura espacial.	55
FIGURA 30: Elementos de soporte en estructuras con cables.	60
FIGURA 31: Funcionamiento de los sistemas de doble cable.	60
FIGURA 32: Estructura soportada por cables.	61
FIGURA 33: Arco de mampostería.	62
FIGURA 34: Diferentes tipos de estructuras membranáceas.	67
FIGURA 35: Comparación y ejemplificación del funcionamiento de las estructuras soportadas por aire y estructuras infladas.	68
FIGURA 36: Ejemplos de formas resultantes en estructuras infladas.	69
FIGURA 37: Estructura conformada por red y membrana.	70
FIGURA 38: Formas de sustentación de estructuras membranáceas.	71
FIGURA 39: Configuración volumétrica de una estructura membranácea.	71
FIGURA 40: Ejemplo de una cáscara.	74
FIGURA 41: Cáscaras esféricas.	76



S
a
j
m
u
a
y
n
o
a
P
a
G
b
a
l
r
o
c
i
a





FIGURA 42: Aplicación de las cáscaras.	78
FIGURA 43: Estructura conformada por placas plegadas.	79
FIGURA 44: Retícula ortogonal de vigas.	83
FIGURA 45: Retícula oblicua de vigas.	84
FIGURA 46: Apoyos en V y Y.	84
FIGURA 47: Marco de dos articulaciones.	85
FIGURA 48: Marco de tres articulaciones.	86
FIGURA 49: Marco múltiple.	86
FIGURA 50: Comportamiento y ejemplos del voladizo.	87
FIGURA 51: Marco Vierendeel.	88
FIGURA 52: Aplicación de los marcos Vierendeel.	89
FIGURA 53: Diferentes tipos de marcos Vierendeel.	89
FIGURA 54: Losa plana y bordeportante.	92
FIGURA 55: Losa nervurada y reticular.	93
FIGURA 56: Líneas isostáticas.	94
FIGURA 57: Tipos de estabilización en edificios.	97
FIGURA 58: Sistema reticular y perimetral.	99
FIGURA 59: Sistemas de muro de corte y núcleo central.	100
FIGURA 60: Estabilización de edificios.	102
FIGURA 61: Comportamiento del edificio como viga empotrada.	102
FIGURA 61: Configuraciones estructurales en edificios.	104
FIGURA 62: Configuraciones estructurales en edificios.	104
FIGURA 63: Configuraciones estructurales en edificios.	105
FIGURA 64: Configuraciones estructurales en edificios.	105



S
a
m
u
a
y
n
o
a
P
a
G
b
l
r
o
c
i
a





FIGURA 65: Interior de la estación de Dresden.	120
FIGURA 66: Vista exterior de la estación.	121
FIGURA 67: Configuraciones estructurales en edificios.	121
FIGURA 68: Vista interior de la estación.	122
FIGURA 69: Concepción y bocetos del proyecto.	123
FIGURA 70: Vista interior del edificio.	123
FIGURA 71: Sección del proyecto.	124
FIGURA 72: Vista aérea del proyecto.	125
FIGURA 73: Vista interior del estadio.	125
FIGURA 74: Elevación lateral.	126
FIGURA 75: Maqueta del proyecto.	126
FIGURA 75: Vista panorámica.	127
FIGURA 76: Vista panorámica.	128
FIGURA 77: Vista lateral.	128
FIGURA 76: Vista exterior de la estación.	129
FIGURA 77: Vista interior.	129
FIGURA 78: Perspectiva interior.	130
FIGURA 79: Diferentes vistas del proyecto.	131
FIGURA 80: Vista lateral del Zenit.	132
FIGURA 81: Sección.	132
FIGURA 82: Planta arquitectónica.	132
FIGURA 83: Perspectiva exterior.	133
FIGURA 84: Vista interior de la sala de conciertos.	133
FIGURA 85: Perspectiva exterior.	134

S
a
j
m
u
a
y
n
o
a
P
a
G
b
l
r
o
c
i
a





FIGURA 86: Perspectiva interior.	134
FIGURA 87: Vista exterior.	135
FIGURA 88: Perspectiva interior del instituto.	135
FIGURA 89: Corte perspectivado.	136
FIGURA 90: vista exterior.	137
FIGURA 91: Vista exterior de El Cristal.	138
FIGURA 92: Perspectiva interior del museo.	139
FIGURA 93: Vista exterior.	139
FIGURA 93: Vista frontal del auditorio.	140
FIGURA 94: Perspectiva interior.	140
FIGURA 95: Perspectiva exterior.	140
FIGURA 96: Perspectiva exterior.	141
FIGURA 97: Perspectiva interior del instituto.	142
FIGURA 98: Vista exterior del Beehive.	142
FIGURA 99: Vista exterior del museo Guangdong.	143
FIGURA 100: Composiciones conformantes de la propuesta.	143
FIGURA 101: Disposición volumétrica de los elementos.	144
FIGURA 102: Vista exterior del museo.	144
FIGURA 103: Perspectiva interior.	145
FIGURA 104: Vista exterior.	146
FIGURA 105: Diferentes vistas del City Tower.	147
FIGURA 106: Vista exterior.	148
FIGURA 107: Vista exterior.	148
FIGURA 106: Vista exterior.	149



S
a
j
m
u
a
a
y
n
o
a
P
a
G
b
l
r
o
c
i
a





FIGURA 106: Vista exterior.	149
FIGURA 110: Perspectiva exterior.	150
FIGURA 111: Analogía con una armadura de barras paralelas.	150
FIGURA 112: Vista del modelo.	150
FIGURA 113: Vista de conjunto	151
FIGURA 114: Perspectiva exterior.	152
FIGURA 115: Perspectiva interior.	153
FIGURA 116: Vistas exteriores del edificio.	154
FIGURA 117: Plantas de la torre Gateway.	154



S
a
j
m
u
a
y
n
o
a
P
a
G
b
l
r
o
c
i
a





Generalidades



INTRODUCCIÓN

La práctica y concepción de la Arquitectura ha de llevar consigo la concepción de proyectos íntegros y completos, enfocados no solo en la forma, la función o en la estructura, por lo cual el conocer y entender cada una de estas partes es de vital importancia para el diseño arquitectónico.

Durante el proceso de formación del arquitecto se presta mucha atención al correcto funcionamiento de los proyectos, a la forma que estos presenten, las luces, sombras y poco a poco va dejándose de lado la concepción estructural, olvidando que es la estructura la que hace posible la realización de cualquier proyecto, y puede ser ésta un elemento tanto funcional como formal, dándole así un valor agregado al proyecto.

Este trabajo pretende formular criterios sencillos y de simple aplicación en el proceso de diseño, por lo cual se divide en tres partes, la primera, expone los conceptos fundamentales para el correcto entendimiento de las estructuras; la segunda, presenta tanto los criterios generales, aplicables a cualquier proyecto y sistema estructural, como los criterios propios de cada sistema; y la tercera, explica el funcionamiento estructural de diferentes proyectos y la aplicación de los criterios formulados.





ANTECEDENTES

En el Diseño Arquitectónico se da frecuentemente que la concepción de un proyecto arquitectónico se centra únicamente en la función o la forma o en la combinación de ambas, dejando a un lado la estructura así como la posibilidad de lograr un proyecto íntegro que combine estos tres aspectos, y más que combinarlos complementarlos, ya que la estructura puede convertirse en un elemento formal y funcional que corresponda al carácter y la naturaleza del proyecto.

En el proceso de diseño tiende a concebirse el sistema estructural una vez definido todo el proyecto, en lugar de incorporar en el proceso creativo la concepción del sistema estructural ideal correspondiente a los principios de diseño utilizados. Logrando con esto un proyecto completo integrado por la función, la forma y la estructura.

Ahora bien, para lograr esa integración entre los sistemas estructurales y la concepción funcional/formal que han de conformar el proyecto arquitectónico es necesario conocer y comprender el funcionamiento de estos sistemas así como poseer ciertos criterios que nos guíen a la selección apropiada del sistema.





JUSTIFICACIÓN

Uno de los principales problemas que enfrenta el estudiante al encarar un proyecto es ¿Cómo estructurarlo? Enfrentando con esto un problema que puede interferir en el proceso creativo de diseño, ya que si bien existe una amplia variedad de bibliografía en cuanto a sistemas estructurales, en las cuales se exponen los diferentes sistemas y su funcionamiento, es mínimo el material que exponga en concreto criterios simples y sencillos que lleven a los estudiantes a una selección apropiada de el sistema estructural dando con esto pie a que se logre una concepción íntegra del proyecto arquitectónico, ya que una vez identificados y comprendidos estos criterios concretos es más sencillo aplicarlos al proceso de diseño logrando una relación directa entre función, forma y estructura.

Basado en lo anterior considero que es importante elaborar un documento de apoyo en donde el estudiante encuentre estos criterios, así como una explicación sencilla de su aplicación y su relación con el diseño.

S
a
m
u
a
y
n
a
P
a
b
l
i
c
i
a





OBJETIVOS

GENERALES

- Actualizar la información en el tema estructural, limitada en este trabajo a la parte conceptual y cualitativa de los sistemas estructurales (sin abordar la parte matemática y cuantitativa de los mismos), abriendo así la posibilidad a diferentes respuestas formales y funcionales basadas en la comprensión de las diferentes opciones estructurales.

ESPECIFICOS

- Establecer y formular criterios claros y sencillos que ayuden a la selección del sistema estructural, basados en la comprensión del funcionamiento y características particulares de cada sistema estructural y de los elementos que lo componen.
- Establecer una relación clara entre los criterios estructurales y su aplicación al diseño arquitectónico, para lograr la concepción del proyecto como un todo, no como el resultado de partes aisladas.
- Simplificar la explicación del funcionamiento de los diferentes sistemas estructurales, logrando con esto un mejor entendimiento y aplicación en el proceso de diseño.
- Ejemplificar la aplicación de los criterios mediante el análisis de proyectos de arquitectura.





DELIMITACIÓN DEL TEMA

El presente estudio se ha de enfocar en los sistemas estructurales y materiales más comunes; en sistemas nuevos por la importancia que tiene su conocimiento, procurando dar siempre prioridad a aquellos sistemas que sean factibles para su aplicación en Guatemala. Dentro de estos sistemas se pueden enumerar los siguientes:

- Armaduras
- Estructuras funiculares: Cables y Arcos
- Estructuras Membranáceas y Redes
- Cáscaras
- Estructuras masivas
- Estructuras verticales

S
a
j
m
u
a
y
n
a
P
a
G
b
l
r
o
c
i
a






METODOLOGÍA

La realización de la investigación ha de ser de carácter teórico/analítico, ya que basado en una investigación teórica de los sistemas estructurales se llegará a la formulación de los criterios particulares mediante un análisis de los mismos.

Basado en lo anterior la investigación se dividirá en tres partes principales, la primera una exposición de los sistemas estructurales y su funcionamiento; la segunda sería el análisis y la formulación de los criterios para la selección del sistema estructural, parte medular de esta propuesta de estudio; y la tercera sería una ejemplificación de la aplicación de los criterios ya definidos, mediante gráficos, bocetos y la elaboración de ejemplos que ilustren los resultados de la investigación. Estos ejemplos se constituirían en proyectos arquitectónicos teóricos, con una función y forma definida que tengan como resultado el lograr ejemplificar el por qué del uso de uno u otro sistema estructural basándose en los criterios formulados en la segunda parte de esta propuesta. Cada uno de estos ejemplos sería acompañado de todo un estudio grafico que facilite su comprensión.





Primera Parte: Conceptos Fundamentales



"... pues aun cuando puedan confiar el cálculo de una estructura a un especialista, primero deben ser capaces de inventarla y de darle proporciones correctas. Solo entonces, habrá nacido una estructura sana, vital y, en lo posible, hermosa."¹

Pier Luigi Nervi

CAPITULO I

CONCEPTOS FUNDAMENTALES

1.1 ESTRUCTURA

Un concepto sencillo de estructura podría ser "la unión de elementos cuyo objetivo es resistir cargas y transmitir las al suelo." Las estructuras están relacionadas a nuestras vidas de tantas maneras que no podemos ignorarlas ya que tanto los edificios como nosotros mismos poseemos una estructura, el esqueleto es la estructura que nos mantiene en pie; en arquitectura existen diferentes tipos de estructura y su aplicación no es sino el resultado de su conocimiento y comprensión.

Las funciones arquitectónicas principales que se relacionan con la estructura son:

- Necesidad de protección y espacios cerrados.
- Necesidad de definición de espacios interiores, subdivisión y separación.
- Necesidad de espacio interior libre.

Además de su función básica de resistencia a las cargas, la estructura debe servir para generar las formas del edificio que se relacionen con estas necesidades básicas de uso.

1.2 PROTECCIÓN Y ESPACIOS CERRADOS

Normalmente, las superficies exteriores del edificio forman una barrera entre su interior y el ambiente exterior. Esto se requiere generalmente para lograr seguridad e intimidad y, a menudo, para proteger en contra de



¹ Mario Salvadori y Robert Heller. **Estructuras para Arquitectos**. Pag. 10. Editorial Kliczkowski Publisher. Madrid 1998.



condiciones externas hostiles (térmicas, acústicas, calidad del aire, precipitación, etc.).

En algunos casos, los elementos que sirven para fines estructurales también cumplen algunas de las funciones de filtro, y las propiedades distintas de las estrictamente estructurales se deben considerar en la elección de materiales y detalles de la estructura.

Cuando existe la necesidad de un espacio cerrado completo, la estructura debe proporcionar directamente, o bien, facilitar la adición de otros elementos que la satisfagan. Los muros sólidos y domos son ejemplos de estructuras que proporcionan naturalmente superficies cerradas.

Sin embargo, los sistemas de armaduras generan estructuras abiertas a la cuales se deben agregar elementos de revestimiento separados para desarrollar la función de cerrar espacios. En algunos casos el revestimiento puede interactuar estructuralmente con la armadura; en otros casos puede agregar poco al comportamiento básico estructural.

1.3 DIVISIÓN DEL ESPACIO INTERIOR

La mayoría de los edificios tienen división de espacios interiores con cuartos separados y, a menudo, niveles separados. Los elementos estructurales utilizados para generar el interior se deben relacionar con los requerimientos de espacios individuales y con las necesidades de separación. En edificios de varios niveles, los elementos estructurales que constituyen el piso para un nivel, deben formar simultáneamente el techo de los espacios inferiores. Como en el caso del revestimiento del

edificio, la selección de la construcción se debe hacer tomando en cuenta todas las funciones necesarias.

1.4 GENERACIÓN DE ESPACIOS LIBRES

El desarrollo de actividades en lugares cerrados crea la necesidad de producir espacios interiores libres. Estos espacios pueden ser muy pequeños (baños) o muy grandes (gimnasios). Para la generación de espacios abiertos es necesaria la función estructural básica de cobertura de claros, la magnitud del problema de cobertura se determina por la carga y el claro; a medida que aumenta el claro, se incrementa rápidamente el esfuerzo requerido por la estructura, y se reducen las opciones para el sistema estructural.

S
a
m
u
a
y
n
o
a
P
a
b
a
r
o
c
i
a





CAPITULO II

PRINCIPALES ELEMENTOS ESTRUCTURALES

La mayoría de los edificios consiste en combinaciones de tres elementos básicos: muros, columnas y vigas, techos y pisos. Estos elementos se conjuntan para crear tanto divisiones de espacio como espacios libres.

ELEMENTOS: los elementos rígidos comunes incluyen vigas, columnas, arcos, superficies planas, superficies curvadas simples, así como cáscaras con diferentes curvaturas. Los elementos flexibles incluyen cables y membranas (planas, simple y doblemente curvadas). Adicionalmente, sin número de otros tipos de estructuras (marcos, armaduras, domos geodésicos, redes, etc.) son derivadas de estos elementos.

VIGAS Y COLUMNAS: las estructuras resultantes de colocar un elemento rígido horizontal sobre un elemento rígido vertical son comunes, usualmente llamadas vigas y columnas. Las vigas resisten las cargas que son aplicadas perpendicularmente y las transmiten a los soportes verticales o columnas. Las columnas, soportadas axialmente por las vigas, transmiten las cargas al suelo (Fig 1).

MARCOS: los marcos son similares en apariencia a las vigas y columnas, pero tienen un comportamiento estructural diferente debido a las juntas rígidas entre los elementos verticales y horizontales que lo conforman (Fig 2). Esta rigidez provee en cierta medida estabilidad ante fuerzas laterales, característica no presente en el sistema de vigas y columnas. En un sistema de marcos, tanto las vigas como las columnas son deformadas por flexión como consecuencia de las cargas ejercidas en la estructura. Como

con las vigas y columnas, las dimensiones y largos de sus elementos individuales son limitados. Como consecuencia, los miembros son usados de manera repetitiva en los edificios.

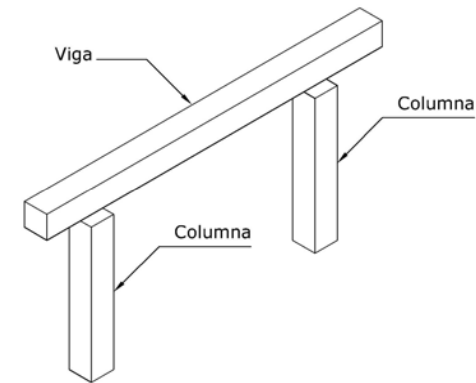


FIGURA 1: Viga simplemente apoyada y Columnas

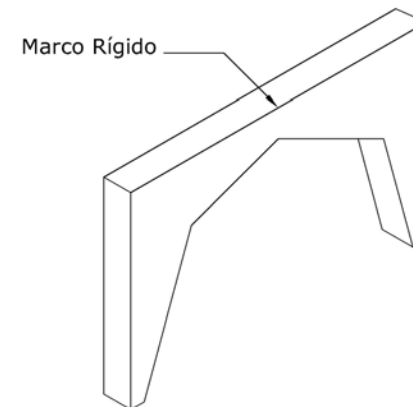


FIGURA 2: Marco Rígido

S
a
j
m
u
a
y
n
o
a
P
a
b
a
l
o
c
i
a





ARMADURAS: las armaduras son elementos estructurales resultantes de la unión de elementos cortos y rígidos en patrones triangulares. La estructura resultante es rígida producto de la exacta colocación de sus miembros individuales (Fig. 3). Algunos modelos (modelos cuadrados más que triangulares) no necesariamente tienen como producto una estructura rígida (a menos que las uniones sean tratadas de la misma manera que en los marcos rígidos). Una armadura compuesta por elementos discretos es afectada por las cargas como un todo y no cada elemento de manera individual, sin embargo cada uno de estos elementos es sometido a tensión o compresión según sea el caso.

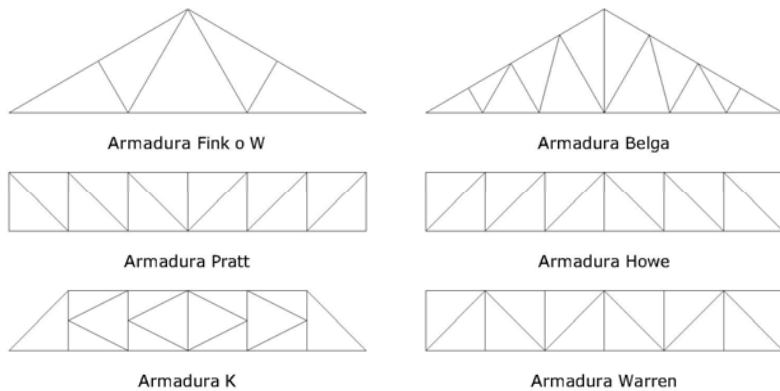


FIGURA 3: Diferentes composiciones de Armaduras

ARCOS: un arco es curvo, un elemento lineal que se extiende sobre dos puntos. La imagen común de un arco es la de una estructura compuesta por elementos en forma de cuña soportados entre sí por la presión ejercida por la carga. La forma exacta de la curva y la naturaleza de la

carga son determinantes para la estabilidad del conjunto. Cuando las formas son el resultado del apoyo simple de bloques rígidos, la estructura resultante es funcional y estable sólo cuando la acción de la carga es tal que causa una compresión uniforme. Estructuras de este tipo no pueden soportar cargas que causen deformaciones excesivas en sus miembros (Fig. 4).

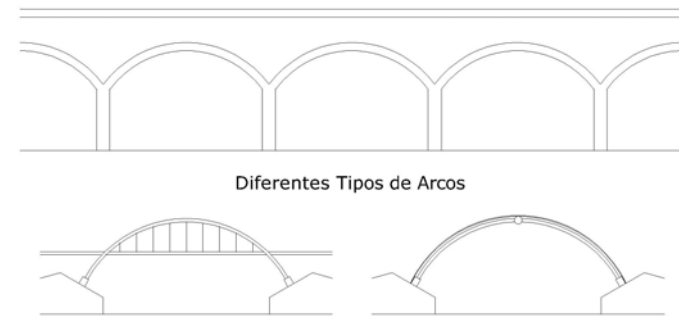


FIGURA 4: Tipos de Arcos

Los *arcos rígidos* son comúnmente usados en edificios modernos. Son curvos de manera similar a los conformados por bloques pero son hechos por una pieza continua de un material rígido. El arco rígido es más factible cuando se presentan variaciones en las cargas.

MUROS Y LOSAS: los muros y losas son estructuras formadas por superficies rígidas. Un muro puede soportar tanto las cargas verticales como laterales. Las losas son usualmente horizontales y soportan cargas por flexión; normalmente están hechas de concreto reforzado. Dentro de las funciones desempeñadas por las losas se encuentran las de piso o azotea, por lo cual se mencionan de esa manera a continuación.





Generalmente, los muros son verticales y su función potencial es la de soportar techos y pisos (Fig. 5). Es por esto que en el diseño de estructuras para cubrir claros con sistemas de techo y piso, se debe comenzar con la consideración de los sistemas de muros sobre los cuales se cubre el claro.

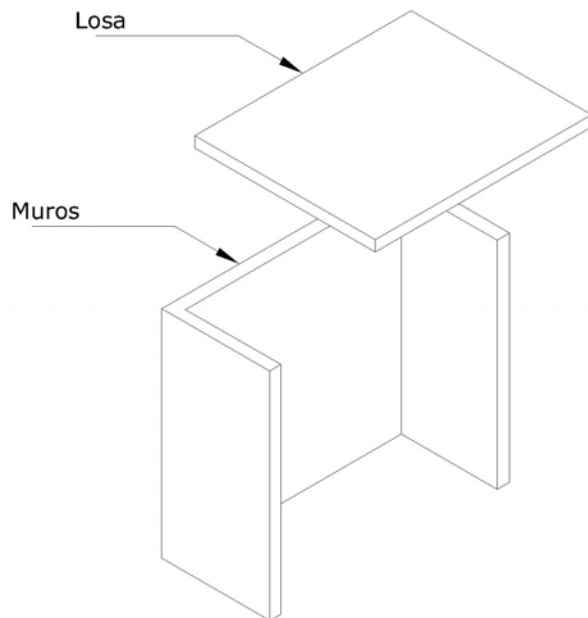


FIGURA 5: Disposición común de muros y losa

Los muros se pueden clasificar basándose en sus funciones arquitectónicas y estructurales, las cuales influyen en muchas de las decisiones de diseño respecto a la elección de materiales y detalles. Algunas categorías básicas son:

Muros estructurales: estos cumplen funciones esenciales en el sistema estructural general del edificio. Los muros de carga soportan techos, pisos y otros muros.

Muros no estructurales: actualmente, ningún elemento se considera como muro no estructural, si se piensa que lo mínimo que puede hacer un muro es sostenerse a si mismo. Sin embargo, el término "no estructural" se usa para describir muros que no contribuyen al sistema estructural general del edificio; es decir que no soporta cargas ni proporcionan rigidez a otras partes del edificio. Cuando éstos se ubican en el exterior se llaman *muros de cortina*, y si están en el interior se llaman *muros divisorios*.

Muros exteriores: como parte del revestimiento del edificio, los muros exteriores tienen generalmente cierto número de funciones necesarias, incluyendo las de barrera y filtro. El viento produce presiones tanto hacia adentro como hacia fuera (succión) que los muros exteriores deben transmitir al sistema de contraventeo lateral del edificio. Normalmente, los muros exteriores son permanentes, en comparación con algunos muros interiores que se pueden reubicar si no son estructurales o de carga.

Muros interiores: aunque generalmente cualquier muro requiere realizar algunas funciones de barrera, los muros interiores no necesitan ser separaciones entre los medios interior y exterior y no resisten las presiones directas del viento. Pueden ser permanentes, como cuando encierran escaleras, elevadores, ductos o baños, pero con frecuencia son esencialmente divisiones y se pueden construir como tales.

En muchos muros se pueden incorporar puertas o ventanas o generar espacios ocultos para colocar elementos





como ductos, cableados o tuberías. Los muros construidos con materiales huecos proporcionan estos útiles espacios ocultos, mientras que aquellos construidos con materiales sólidos pueden presentar problemas en este aspecto.

SUPERFICIES CILÍNDRICAS Y BÓVEDAS: las bóvedas y superficies de cañón son ejemplos de superficies de curvatura simple. Una superficie de cañón se extiende de manera longitudinal así como la curva es perpendicular a la dirección de la extensión (Fig. 6 superior). Cuando es suficientemente larga, una superficie de cañón se comporta de manera similar a una viga de sección curva. Una bóveda, en contraste, es una superficie curva simple que se extiende transversalmente, puede ser concebida como un arco continuo (Fig. 6 inferior).

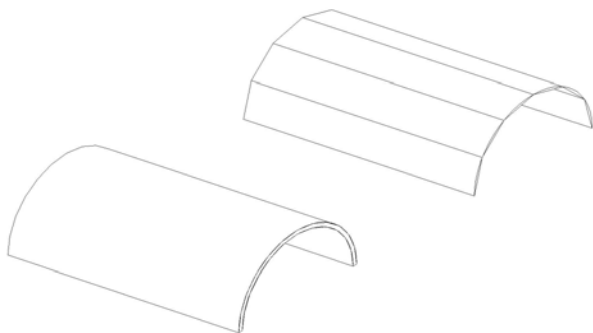


FIGURA 6: Bóveda o Superficie de cañón

SUPERFICIES ESFÉRICAS Y DOMOS: una amplia variedad de superficies de doble curvatura son usadas actualmente incluyendo estructuras que son porciones de esferas así como paraboloides hiperbólicos. Probablemente la forma mas común es la cúpula, es conveniente pensar en

estas superficies como arcos en rotación. Esta comparación sin embargo no refleja la forma en que son tratadas las cargas ya que en estas superficies se inducen cargas circulares no presentes en los arcos. Los domos y superficies esféricas son sumamente eficientes, capaces de cubrir grandes luces con poco material. Las superficies curvas pueden estar conformadas por elementos repetidos en un patrón, tal es el caso de los domos geodésicos.

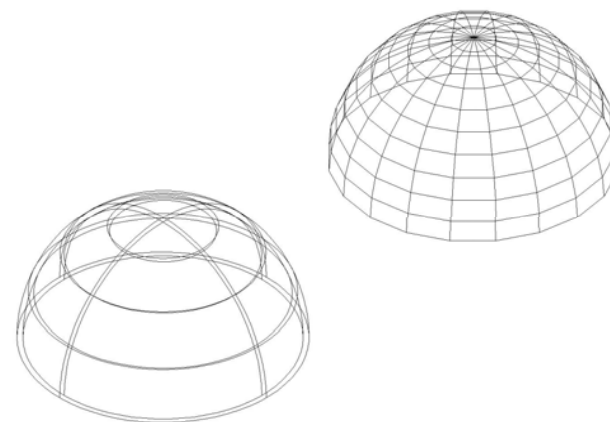


FIGURA 7: Superficies Esféricas y Domos

CABLES: los cables son elementos estructurales flexibles. La forma que toman depende de la naturaleza y magnitud de la carga. Cuando un cable se extiende sobre dos puntos y soporta únicamente su propio peso, esta deformación es llamada *catenaria*. Cuando el cable soporta cargas uniformemente distribuidas, se deforma de una manera parabólica.





empleará un mecanismo complementario para mantener su forma.

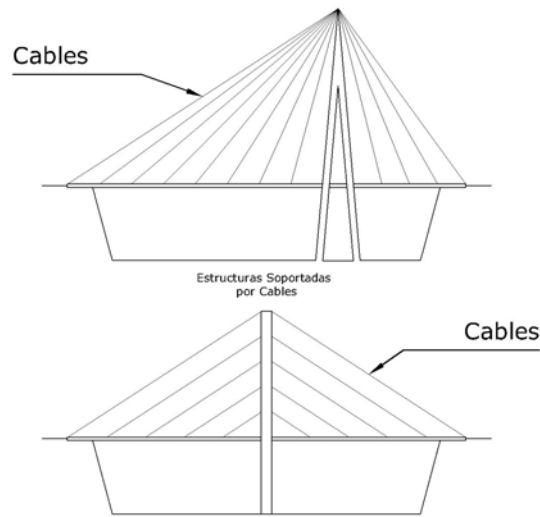


FIGURA 8: Ejemplos de estructuras soportadas por cables.

La suspensión de cables puede ser usada en distancias extremadamente largas, son muy comunes en los puentes (Fig. 8).

MEMBRANAS, TIENDAS Y REDES: una membrana es una hoja delgada y flexible. Una tienda común esta hecha por superficies de membrana. Formas simples y complejas pueden ser creadas a partir de las membranas. Para superficies de doble curvatura, sin embargo, tales como superficies esféricas, la superficie real deberá ser hecha por el ensamblaje de segmentos mucho más pequeños, debido a que las membranas normalmente son rectangulares. Una implicación de utilizar membranas flexibles es que para crear una superficie se tendrá un lado convexo apuntando hacia abajo o si el lado cóncavo apunta hacia arriba, se

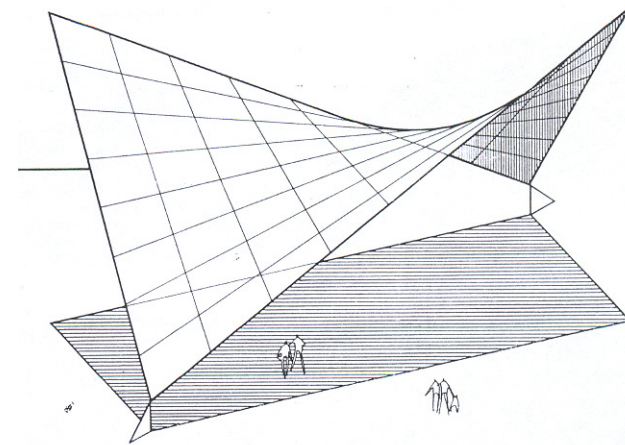


FIGURA 9: Ejemplo de membrana.

Las estructuras neumáticas o "infladas" son de las más actuales de este tipo; la forma de la estructura es mantenida por la presión interna del aire. Otra variación es aplicar elementos que estiren la membrana para lograr la forma deseada. La necesidad de tensión de la membrana, sin embargo, impone serias limitaciones en la forma, por ejemplo, superficies esféricas son muy difíciles de lograr por tensión. Las redes son superficies tridimensionales conformadas por una serie de cables curvos cruzados. Las redes son análogas a las membranas. Permitiendo la apertura en la red según la necesidad, muchas formas pueden resultar. Una ventaja del uso de cables cruzados es que la posición de los cables mitiga las deformaciones causadas por el viento o presiones.





CAPITULO III

TIPOS DE ESTRUCTURAS

PRINCIPALES CLASIFICACIONES

Fundamental para el entendimiento de cualquier campo es el conocimiento de cómo éste está conformado, ordenado y nombrado. El conocimiento del criterio tomado para realizar esta clasificación es de similar importancia, esta parte introduce diferentes métodos de clasificación de los elementos y sistemas estructurales; de acuerdo con su forma y principales propiedades constructivas.

Por su Geometría: En términos básicos, las formas estructurales pueden ser definidas como *elementos lineales* o como *elementos de superficie*. Los elementos lineales pueden ser divididos en rectos o curvos, así como los elementos de superficie pueden ser divididos en planos y curvos, dentro de los elementos curvos se pueden distinguir de simple o doble curvatura.

Estrictamente hablando no existe ningún elemento conformado por líneas, porque todos presentan grosor, pero es una manera sencilla de clasificar los sistemas.

Por su Rigidez: La división que se aplica en este caso es en elementos rígidos y flexibles, dentro de los elementos rígidos encontramos las vigas y columnas. Los elementos flexibles, por ejemplo, cables, son aquellos que cambian drásticamente su forma cuando la naturaleza de las cargas cambia, manteniendo su integridad física.

A menudo la rigidez de un elemento está asociada al material que lo compone. Muchos materiales, como la

madera, son inherentemente rígidos, otros, como el acero, pueden usarse tanto en elementos rígidos como en elementos flexibles. Un ejemplo de lo anterior puede ser una viga de acero, naturalmente rígida, no así un cable o una cadena.

		Elementos Lineales		Elementos de Superficie		
		Rectos	Curvos	Planos	Curvos	
					Simple Curvatura	Doble Curvatura
No Rígidos	Elementos Lineales No Rígidos					
	Elementos de Superficie No Rígidos					

FIGURA 10: Clasificación de los sistemas estructurales por su rigidez y geometría.





		Elementos Lineales		Elementos de Superficie		
		Rectos	Curvos	Planos	Curvos	
					Simple Curvatura	Doble Curvatura
Rígidos	Elementos Lineales Rígidos					
	Elementos de Superficie Rígidos					

FIGURA 11: Clasificación de los sistemas estructurales por su rigidez y geometría.

Elementos En Uno, Dos o Tres Sentidos: Una forma muy básica de distinguir las estructuras es acorde a la organización espacial del sistema de soporte usado y la

relación de la estructura con los puntos de apoyo. En un sistema de un sentido, el mecanismo básico de transmisión de cargas es únicamente en una dirección, logrado por la ubicación en paralelo de sus apoyos. En un sistema en dos sentidos, la transmisión de cargas es más compleja, ya que involucra dos direcciones y más puntos de apoyo (muros perimetrales, vigas y columnas, etc.). Un sistema tridimensional serían las armaduras espaciales, ya que la triangulación de sus miembros no produce reacciones o fuerzas en un sentido vertical u horizontal únicamente sino en tres dimensiones.

Por los Materiales que lo Conforman: Se puede dar una clasificación basada en el material (madera, concreto, acero, etc.) pero no sería de utilidad en este estudio ya que, por ejemplo, un marco rígido puede estar conformado ya sea por madera o por acero, no tomando en cuenta la función y naturaleza de la estructura.

Una clasificación bastante interesante y muy útil para entender el funcionamiento de las estructuras es la empleada por Heinrich Engel como se presenta a continuación:

1. *Estructuras que actúan principalmente mediante su forma material:*
 - *sistemas de forma activa o sistemas estructurales en estado de tracción o compresión simples.*
2. *Estructuras que actúan principalmente mediante la colaboración de los miembros en compresión y tracción:*
 - *sistemas de vector activo o sistemas*





estructurales en estado de tracción y compresión ejercidos simultáneamente.

3. *Estructuras que actúan principalmente debido a la masa y continuidad de la materia:*
 - *sistemas de masa activa o sistemas estructurales en estado de flexión.*
4. *Estructuras que actúan principalmente mediante su continuidad superficial:*
 - *sistemas de superficie activa o sistemas estructurales en estado de tensión membrana.*
5. *Estructuras que actúan principalmente mediante transmisión vertical de las cargas:*
 - *sistemas estructurales verticales.²*

S
a
m
u
a
y
n
o
a
P
a
b
a
i
r
o
c
i
a

² Engel, Heinrich. **Sistemas de Estructuras**. H. Blume Ediciones. España, Última edición. 1998.





CAPITULO IV

TEMAS BÁSICOS EN EL ANALISIS Y DISEÑO DE ESTRUCTURAS

4.1 FENÓMENOS ESTRUCTURALES FUNDAMENTALES

En la sección anterior, se trataron los diferentes sistemas y elementos estructurales básicos, pero además del conocimiento de estas formas y componentes deben tomarse en cuenta otros aspectos, tales como:

- El primer grupo de aspectos son aquellos relacionados a la estabilidad del todo. Una estructura puede voltearse, deslizarse o girarse sobre su base, particularmente cuando son afectadas por las acciones del viento o sismos. Las estructuras que son relativamente altas y de base pequeña tienden a sufrir los efectos del volteo. Las fuerzas generadas por los terremotos o sismos tienden a causar volteos o deslizamientos, los cuales dependen de la magnitud del sismo.
- Un segundo grupo de aspectos son aquellos relacionados con la estabilidad interna y su relación, si las partes de una estructura no están debidamente ensambladas e interconectadas la estructura entera colapsa. Hay diversos mecanismos para lograr la estabilidad interna de la estructura, tales como: paredes, marcos, breizas, etc.
- Un tercer grupo de aspectos se relacionan a la fuerza y rigidez de la estructura y sus elementos. La falla de las partes puede o no causar el colapso de toda la estructura, y estas fallas pueden derivarse de

excesiva tensión, flexión, compresión, torsión, etc. O por deformaciones causadas por las cargas.

4.2 MIEMBROS EN TENSION, COMPRESION, FLEXION, CORTE, TORSION Y ORIENTACION: UNA INTRODUCCION

Los estados de fuerzas internas más comunes que se establecen son la tensión, compresión, flexión, corte y torsión. Asociado con cada una de estos estados de fuerzas están relacionados con tensiones internas y estiramientos.

Las fuerzas de tensión tienden a separar un elemento (Fig. 12). La fuerza de un miembro de tensión depende del área intersección de un miembro y del material del que está hecho. Los miembros en tensión pueden ser muy fuertes, evidenciado por la gran cantidad de cables utilizados en estructuras de gran envergadura. La fuerza de un miembro de tensión es generalmente independiente de su largo.



FIGURA 12: Elemento lineal sometido a tensión.

Las fuerzas de compresión tienden a aplastar o doblar un elemento. Los miembros cortos tienden a comprimirse y a tener mayores fuerzas comparables a los miembros en tensión (Fig. 13). La capacidad de llevar cargas de un miembro de compresión largo, sin embargo, tiende a disminuir con longitudes mayores. Los miembros de compresión largos pueden resultar inestables y pueden soltarse inesperadamente por debajo de una carga en





ciertos niveles críticos de carga. Esta inesperada inhabilidad de llevar carga adicional, típicamente ocurre sin ninguna alteración evidente del material. El fenómeno es llamado pandeo y debido a esto, miembros de compresión largos no son capaces de llevar cargas muy grandes.



FIGURA 13: Elemento lineal sometido a compresión.

La flexión es un estado de fuerza complejo asociado con la curvatura elástica de un miembro (típicamente una viga) bajo una carga aplicada transversalmente. La acción de deformación provoca fibras en una de las caras del miembro a alargarse, y que por lo tanto está en tensión y fibras en la cara opuesta a comprimir. Por lo tanto, ambas fuerzas, de tensión y compresión se desarrollan en la misma sección cruzada. Estas tensiones actúan perpendicularmente a la superficie de la sección (Fig. 14). Un miembro sujeto a flexión puede llevar solamente una sorprendentemente pequeña cantidad de carga en relación a su tamaño en comparación con un miembro que lleva puramente fuerzas de tensión. La fuerza de un miembro en flexión es altamente dependiente de la cantidad y distribución de material en una sección cruzada, así como también del tipo de material.

El corte es un estado de fuerza asociado con la acción de las fuerzas opuestas que tienden a provocar que una parte de la estructura se deslice con respecto de una parte adyacente. Se desarrollan tensiones que actúan

tangencialmente a la superficie de deslizamiento. Las tensiones de corte son comunes en las vigas.

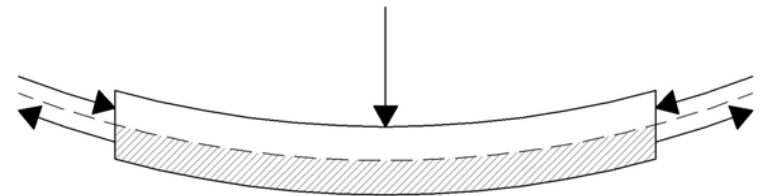


FIGURA 14: Elemento lineal sometido a flexión.

La torsión es una distorsión por retorcimiento. En un miembro sujeto a torsión normalmente se desarrollan ambas fuerzas de tensión y compresión (Fig. 15).

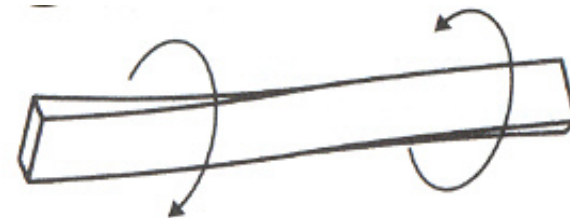


FIGURA 15: Elemento lineal sometido a torsión.

Las deflexiones provocadas en los miembros por cargas deben limitarse a valores permitidos. Otras tensiones más complejas e interacciones de tensiones también se desarrollan en los miembros.

S
a
m
u
a
y
n
o
a
P
a
b
a
i
r
o
c
i
a





4.3 PRINCIPIOS DE MECÁNICA

La mecánica es una rama de la ciencia que analiza las fuerzas y los movimientos. Es fundamental en este campo la definición de equilibrio, es la condición existente en un sistema cuando las fuerzas actuando en él mantienen un balance. El término de estática se refiere al área de la mecánica que estudia la relación entre las fuerzas actuantes sobre elementos rígidos que se encuentran en equilibrio. El término dinámica se refiere a la parte de la mecánica que estudia los elementos rígidos en movimiento.

4.3.1 FUERZAS, MOMENTOS Y EQUILIBRIO

FUERZA: una fuerza es la interacción directa entre dos cuerpos. La interacción de fuerzas tiene el efecto de causar cambios en la forma o movimiento de los cuerpos involucrados.

MOMENTOS

Momento de una Fuerza: una fuerza aplicada a un cuerpo tiende a causar que el cuerpo se traslade en dirección de la fuerza. Dependiendo del punto de aplicación de la fuerza, ésta también puede hacer que el cuerpo gire. Esta tendencia a causar giro es llamada Momento.

Momento de una Carga Distribuida: las cargas son frecuentemente uniformes a lo largo del elemento. El momento de una fuerza distribuida puede situarse en un punto simétrico del elemento y multiplicarse por la distancia a la cual se ubica.

Momento de Varias Fuerzas: el efecto rotacional producido por varias fuerzas no es más que la suma algebraica de los momentos individuales.

Momento sobre una Línea: el efecto rotacional en un elemento rígido causado por fuerzas múltiples sobre una línea, pero no sobre el mismo plano, es el mismo que si todas las fuerzas actuaran en el mismo plano.

Momento Par: un par es un sistema de fuerzas conformadas por dos fuerzas de igual magnitud, paralelas, pero con sentido opuesto. Un par tiende a causar solo efectos rotacionales y no de traslación. El momento de un par es simplemente el producto de una de las fuerzas y la distancia perpendicular entre ambas.

FUERZAS Y MOMENTOS INTERNOS

Las fuerzas y momentos pueden ser tanto internos como externos. Las fuerzas o momentos aplicados a una estructura son descritos como externos. Fuerzas y momentos que son desarrollados en una estructura en respuesta a las fuerzas externas que son aplicadas en ella son descritos como internos.

EQUILIBRIO: un cuerpo está en equilibrio cuando las fuerzas que actúan sobre él no producen ni rotación ni traslación; en consecuencia, el cuerpo se encuentra en balance. El equilibrio existe en sistemas de fuerzas concurrentes (sistemas en los cuales todas las fuerzas actúan sobre un único punto) cuando la resultante del sistema es igual a cero. Un sistema de fuerzas concurrentes cuya resultante no sea cero puede alcanzar el equilibrio al añadir una fuerza de igual magnitud a la resultante pero en sentido contrario.





4.3.2 REACCIONES

El buen funcionamiento de la estructura al resistir diversas cargas, envuelve dos consideraciones. La estructura debe tener suficiente resistencia interna y rigidez para dirigir las cargas a sus apoyos, sin generar esfuerzos indebidos sobre los materiales o una deformación excesiva de la que no pueda recuperarse, en la forma de flecha, contracción, torsión, etc. Además, los apoyos de la estructura deben evitar que ésta se mueva o colapse. Estas fuerzas en los apoyos se llaman *reacciones*.

Las cargas aplicadas y las reacciones de los apoyos en una estructura constituyen el sistema de fuerzas externas que se aplican sobre una estructura. Este sistema de fuerzas es, de alguna manera, independiente de la capacidad de la estructura para responder. Es decir, las fuerzas externas deben estar en equilibrio para que la estructura sea funcional, sin importar los materiales, resistencia, rigidez, etc., de la propia estructura. Sin embargo, la forma de los detalles de la estructura puede afectar la naturaleza de las reacciones requeridas. El claro y las cargas aplicadas pueden ser las mismas para una viga, un marco a dos aguas, un arco, un cable y un marco rígido, pero las reacciones requeridas dependerán de la estructura específica.

FUERZAS INTERNAS

En respuesta a los efectos externos de cargas y reacciones, se generan ciertas fuerzas internas dentro de la estructura, a medida que el material de la estructura logra resistir la deformación inducida por los efectos externos. Estos efectos de fuerza interna se generan por *esfuerzos* en el material de la estructura. Los esfuerzos son realmente

fuerzas dentro del material que se incrementan y producen deformaciones crecientes llamadas *deformaciones*.

Cuando una estructura se somete a fuerza externas, se flexiona, se tuerce, se estira, se acorta, etc.; o bien, para ser más técnicos, produce esfuerzos y se deforma, tomando así nueva forma a medida que las deformaciones se acumulan dentro de los cambios dimensionales generales. Aunque los esfuerzos no son visibles, las deformaciones que los acompañan sí lo son.

El pandeo se puede explicar como la manifestación de un fenómeno de deformación que acompaña a un fenómeno de esfuerzo. En este ejemplo, la causa principal de la deformación de la estructura es la resistencia a la flexión, denominada *momento flexionante interno*. Los esfuerzos asociados con la acción interna de la fuerza son compresión dirigida horizontalmente en la parte superior del tablón y tensión horizontalmente dirigida a la parte inferior.

En un tablón de madera delgada, la acción de la flexión y los efectos de la deformación serían muy notables. Si el tablón se reemplaza por una viga de madera gruesa, la deformación no sería visible. Sin embargo, aunque la flecha y la flexión interna son pequeñas, sí existen. Para realizar la investigación estructural se exageran los perfiles deformados, ya que se considera que las estructuras son mucho más flexibles de lo que son en realidad.

Debido a que el esfuerzo y la deformación son inseparables, es posible definir el uno por la otra. Esto permite concebir la naturaleza de los efectos de la fuerza interna, si se imagina la forma exagerada de la estructura deformada bajo carga. Así, aunque los esfuerzos no se puedan ver, las deformaciones sí, y se puede conocer la naturaleza de los esfuerzos que las acompañan. Esta relación se puede usar





como un medio simple de determinación, o bien, aplicarse en pruebas reales de laboratorio donde se determinan esfuerzos cuantificados, mediante una cuidadosa medición de las deformaciones.

Para que funcione, toda estructura debe tener ciertas características. Como funciones del comportamiento estructural, debe tener resistencia adecuada para obtener un margen de seguridad aceptable y resistencia suficiente a la deformación dimensional. Asimismo, debe ser inherentemente estable, tanto interna como externamente. Estas tres características, estabilidad, resistencia y conservación de la forma, son los requisitos funcionales principales de las estructuras.

4.3.3 ACCIONES

Por *acciones* se entiende lo que generalmente se denominan cargas. Pero esta acepción más general incluye a todos los agentes externos que inducen en la estructura fuerzas internas, esfuerzos y deformaciones. Por tanto, además de las cargas propiamente dichas, se incluyen las deformaciones impuestas, como los hundimientos de la cimentación y los cambios volumétricos, así como los efectos ambientales del viento, temperatura, corrosión, etcétera.

Para que la edificación cumpla con las funciones para las cuales está siendo proyectada, es necesario que la respuesta de la estructura se mantenga dentro de límites que no afecten su correcto funcionamiento, ni su estabilidad. Debe definirse por tanto cuáles son en cada caso los límites admisibles de la respuesta estructural. Éstos dependen del tipo de construcción y de su destino y están definidos para las estructuras más comunes en los códigos de diseño.

Se llama *estado límite* de una estructura a cualquier etapa de su comportamiento a partir de la cual su respuesta se considera inaceptable. Se distinguen dos tipos de estados límite. Aquellos relacionados con la seguridad, se denominan *estados límite de falla* y corresponden a situaciones en las que la estructura sufre una falla total o parcial, o simplemente presenta daños que afectan su capacidad para resistir nuevas acciones. La falla de una sección por cortante, flexión, torsión, carga axial o cualquier combinación de esos efectos, que llamaremos *fuerzas internas*, constituye un estado límite de falla, así como la inestabilidad o falta de equilibrio global de la estructura, el pandeo de uno de sus miembros, el pandeo local de una sección y la falla por fatiga. El proyectista debe procurar que no se presenten estados límite de falla debidos no sólo a las acciones que ocurren durante la operación normal de la estructura, sino también a las acciones correspondientes a condiciones excepcionales.

El otro tipo de estados límite se relaciona con aquellas situaciones que, aun sin poner en juego la seguridad de la estructura afectan el correcto funcionamiento de la construcción. Éstos se denominan *estados límite de servicio* y comprenden las deflexiones, agrietamientos y vibraciones excesivas, así como el daño en elementos no estructurales de la construcción.

En términos de los conceptos aquí definidos, el objetivo del diseño estructural puede replantearse como sigue: *proporcionar una seguridad adecuada ante la aparición de estados límite de falla para las acciones más desfavorables que puedan presentarse durante la vida útil de la construcción y procurar que en las condiciones normales de operación no se sobrepasen los estados límite de servicio.*





Cabe recalcar la importancia de cumplir con ambas condiciones. Es frecuente que los proyectistas de la estructura se concentren exclusivamente en cumplir con los requisitos de seguridad y descuiden los de servicio, dando lugar a que se presenten situaciones que hacen inservible la estructura, aun cuando sea adecuada su seguridad. Los requisitos de servicio se relacionan principalmente con la rigidez de la estructura y de sus miembros; de ella dependen principalmente los movimientos, flechas (deformaciones verticales) y vibraciones que constituyen los aspectos de la respuesta que afectan más frecuentemente el correcto funcionamiento.

Conviene tratar ahora algunos aspectos de las acciones que son básicos para el planteamiento y justificación de los procedimientos de diseño especificados por los reglamentos. Los aspectos que es necesario tratar aquí se refieren a la definición de acciones deben considerarse en el diseño, cómo se clasifican, cómo se modelan para el análisis de sus efectos, qué magnitud de la acción debe considerarse en el diseño y cómo combinarse las diferentes acciones para considerar su conjunto.

Una de las primeras tareas del proyectista es la de hacer una determinación de todas aquellas acciones que pueden afectar la estructura en cuestión, ocasionando en ella efectos significativos. Pueden hacerse clasificaciones de las acciones de acuerdo con un sinnúmero de criterios diferentes: según el origen de las acciones, como cargas muertas, cargas de funcionamiento y efectos ambientales; según la forma en que actúan las acciones, en estáticas, dinámicas y de impacto. Desde el punto de vista de la seguridad estructural y de los criterios de diseño la más conveniente es la clasificación con base en la duración con que obran sobre la estructura con una intensidad cercana a

la máxima. Siguiendo este criterio se distingue los siguientes tipos de acciones:

Acciones permanentes: Son aquellas que obran en forma continua sobre la estructura y cuya intensidad puede considerarse que no varía con el tiempo. Entran en esta categoría: las cargas muertas, debidas al peso propio de la estructura y al de los elementos no estructurales de la construcción: el empuje estático de líquidos y tierras que tenga un carácter permanente; las deformaciones y los desplazamientos impuestos a la estructura, tales como los debidos al efecto del preesfuerzo, a movimientos diferenciales permanentes de los apoyos y a la contracción por fraguado del concreto.

Acciones variables. Son aquellas que obran sobre la estructura con una intensidad variable con el tiempo, pero que alcanzan valores significativos durante lapsos grandes. Se incluyen en esta categoría: las cargas vivas, o sea aquellas que se deben al funcionamiento propio de la construcción y que no tienen carácter permanente: los efectos de cambios de temperatura y los de cambios volumétricos que tienen carácter variable con el tiempo.

Acciones accidentales. Son aquellas que no se deben al funcionamiento normal de la construcción y que pueden tomar valores significativos sólo durante pequeñas fracciones de la vida útil de la estructura. Se incluyen en esta categoría acciones excepcionales, como sismos, viento, oleaje y explosiones.





CAPITULO V

CARGAS

5.1 ORÍGENES DE LAS CARGAS

El término *carga* se refiere a cualquier efecto que resulte de la necesidad de cierto esfuerzo resistente por parte de la estructura. Hay muchas acciones que originan las cargas y muchas maneras de clasificarlas. Los principales tipos y orígenes de las cargas sobre estructuras de edificios son los siguientes:

Gravedad

- *Origen.* Peso de la estructura y otras partes del edificio; peso de los ocupantes y contenido del edificio, peso de nieve, hielo o agua sobre el techo.
- *Cálculo.* Mediante la determinación del volumen, la densidad y el tipo de distribución de los elementos.
- *Dirección y sentido.* Verticalmente hacia abajo, constante en magnitud.

Viento

- *Origen.* Aire en movimiento, en su acción de flujo.
- *Cálculo.* De velocidades máximas de viento establecidas en los registros locales del clima.
- *Dirección y sentido.* Como presión (perpendicular a las superficies) o la fricción por deslizamiento paralelo a las superficies); básicamente, como una fuerza horizontal

uniformemente repartida que actúa sobre el edificio, aunque cualquier superficie puede ser afectada en relación a su propia geometría u orientación.

Terremotos (impacto sísmico)

- *Origen.* Sacudimiento del terreno debido a grandes fallas subterráneas, erupciones volcánicas o explosiones subterráneas.
- *Cálculo.* Por predicción de la probabilidad de ocurrencia con base en la geología de la región y los registros de actividades sísmicas anteriores. El principal efecto de esta fuerza es la acción del impulso horizontal provocado por la inercia de la masa propia del edificio.
- *Dirección y sentido.* Movimiento de un lado a otro y de arriba hacia abajo del suelo de apoyo; respuesta de la estructura del edificio con base en sus propiedades dinámicas.

Presión hidráulica

- *Origen.* Producida principalmente por las aguas freáticas, cuando la superficie libre está arriba de la parte inferior del cimiento.
- *Cálculo.* Como presión de fluidos, es proporcional a la profundidad del fluido.
- *Dirección y sentido.* Como presión horizontal sobre muros y como presión ascendente sobre pisos.

Presión del suelo (activa)

- *Origen.* Acción del suelo como un semifluido sobre objetos enterrados en él.





- **Cálculo.** Generalmente, considerando que el suelo es equivalente a un fluido, con una densidad igual a una fracción de la densidad del suelo.
- **Dirección y sentido.** Presión sobre muros (muros de contención).

Cambio de temperatura

- **Origen.** Variaciones de temperatura en los materiales del edificio, debidas a fluctuaciones en la temperatura exterior y a las diferencias entre las temperaturas interior y exterior.
- **Cálculo.** Por registros cronológicos del clima, temperaturas internas de diseño y coeficientes de expansión de los materiales.
- **Dirección y sentido.** Fuerzas ejercidas sobre la estructura si la expansión libre está restringida; deformaciones y esfuerzos dentro de la estructura si las partes conectadas tienen diferentes temperaturas.

Contracción: Reducción del volumen en el concreto, en juntas de mortero en mampostería y en grandes elementos de madera no tratada; puede producir fuerzas similares a las causadas por efectos térmicos.

Vibración: Además de ser provocadas por los efectos sísmicos, las vibraciones pueden ser causadas por maquinaria pesada, vehículos o sonidos de alta intensidad.

Acciones internas: Se pueden inducir fuerzas por el asentamiento de apoyos, deslizamiento o aflojamiento de conexiones, pandeo de elementos, etc.

Manejo: Las fuerzas se ejercen sobre los elementos estructurales durante la producción, edificación, transportación, almacenamiento, remodelación, etc. Estos efectos no son necesariamente evidentes en la forma del edificio terminado, pero se debe considerar en su construcción.

5.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS CARGAS

El fin principal de una estructura es la de encerrar o definir un espacio. Al hacer esto, la estructura queda sujeta, en primer lugar, a la acción de su propio peso, la *carga muerta*, y, después, a cargas debidas a otras fuerzas naturales o condiciones tales como viento, nieve, sismos o diferencias de temperatura y a cargas ejercidas por sus ocupantes, las *cargas vivas*. Al considerar una carga, uno no debe solamente definir su intensidad, sino también debe establecerse la forma en que la carga se aplica a la estructura específica que se está estudiando.

Debido al comportamiento elástico de los materiales estructurales, cualquier estructura se deforma bajo la acción de la carga regresando a su forma original cuando ésta se retira. Por tanto, las estructuras tienen una tendencia a oscilar. El tiempo que tarda una estructura para llevar a cabo una oscilación completa se llama su *periodo*. Generalmente, una estructura tiene cualquier número de periodos, llamándosele al de mayor duración, su *periodo fundamental*. Los periodos fundamentales de los edificios varían desde 0.2 seg para edificios rígidos de poca altura, hasta seis o más segundos para edificios altos y flexibles. Cuando se aplica una carga a una estructura durante un tiempo *mucho mayor* que su periodo fundamental, se dice que la carga actúa *estáticamente* sobre la estructura; en este caso, la carga queda completamente definida por su intensidad, dirección, y punto de aplicación. La presión de una ráfaga de viento creciendo desde cero hasta su





intensidad máxima en 3 seg es una fuerza estática cuando se ejerce sobre un edificio rígido y de poca altura. Cuando el tiempo de aplicación de la carga es *corto* comparado con su periodo fundamental, se dice que la carga actúa *dinámicamente*. La presión de la misma ráfaga de viento actúa dinámicamente sobre un rascacielos con un periodo de 6 seg.

5.3 CARGAS VIVAS y MUERTAS

En el diseño de edificios se hace una diferenciación entre cargas vivas y cargas muertas. Una *carga muerta* es esencialmente una carga permanente, como el peso de partes permanentes del edificio. Una *carga viva* es, técnicamente, cualquier cosa que no se aplique permanentemente, como una fuerza sobre la estructura. Sin embargo, el término específico "carga viva" se usa, generalmente, en reglamentos de construcción para referirse a las cargas de diseño supuestas en la forma de cargas gravitacionales distribuidas sobre superficies de techo y piso, debidas a la ubicación y al uso particular del edificio.

5.3.1 CARGA MUERTA

Se llama carga muerta al conjunto de acciones que se producen por el peso propio de la construcción; incluye el peso de la estructura misma y el de los elementos no estructurales, como los muros divisorios, los revestimientos de pisos, muros y fachadas, la ventanería, las instalaciones y todos aquellos elementos que conservan una posición fija en la construcción, de manera que gravitan en forma constante sobre la estructura. La carga muerta es, por tanto, la principal acción permanente.

El cálculo de la carga muerta es en general sencillo, ya que sólo requiere la determinación de los volúmenes de los distintos componentes de la construcción y su multiplicación por los pesos volumétricos de los materiales constitutivos. En su mayoría las cargas muertas se representan por medio de cargas uniformemente distribuidas sobre las distintas áreas de la construcción, aunque hay casos de cargas lineales (muros divisorios) y concentradas (equipos fijos).

Es común la creencia de que las cargas muertas pueden calcularse con mucha exactitud; sin embargo, aunque éstas son las acciones que presentan menor grado de incertidumbre, las diferencias que suele haber entre los valores de cálculo y los reales no son despreciables. Esto se debe a las diferencias entre las dimensiones especificadas en el proyecto y las que resultan en la construcción, a modificaciones y adiciones en los elementos no estructurales y a las variaciones en los pesos volumétricos de los materiales. Al cuantificar la carga muerta en algunas construcciones, se han encontrado diferencias hasta de 20 por ciento con respecto a las consideradas en el cálculo.

5.3.2 CARGAS VIVAS

La carga viva es la que se debe a la operación y uso de la construcción. Incluye, por tanto, todo aquello que no tiene una posición fija y definitiva dentro de la misma y no puede considerarse como carga muerta. Entran así en la carga viva el peso y las cargas debidos a muebles, mercancías, equipos y personas. La carga viva es la principal acción variable que debe considerarse en el diseño.

Por su carácter, la carga viva es peculiar del uso a que está destinada la construcción. Podemos distinguir tres grandes grupos de construcciones en cuanto a la carga viva





que en ellas debe considerarse: los edificios, las construcciones industriales y los puentes.

Las cargas de operación en las construcciones están formadas por la suma de diversos factores que tienen carácter muy variable en su distribución en el espacio y en el tiempo, así como en la forma en que actúan sobre la estructura.

Conviene tener en mente las dos características básicas de la carga viva: su variación temporal y su variación espacial.

En la mayoría de los usos pueden distinguirse dos componentes: uno semipermanente y otro que varía mucho con el tiempo. La magnitud de los dos es muy distinta según el tipo de construcción. En un puente, por ejemplo, la fracción semipermanente es prácticamente nula, mientras que en una bodega representa la casi totalidad de la carga viva.

5.3.3 CARGAS DE NIEVE, LLUVIA, GRANIZO Y HIELO

La precipitación atmosférica puede producir cargas significativas especialmente en el diseño de los techos. En regiones con condiciones climáticas particularmente severas es necesario tomar en cuenta explícitamente los efectos de estas acciones. En regiones donde estas acciones no son muy significativas, su efecto se suele incorporar al de las cargas vivas que se modifican para tomarlas en cuenta.

Conviene, en todo caso, conocer la naturaleza de estas acciones para detectar las situaciones en que pueden llegar a ser críticas y en que sus efectos no queden cubiertos por las cargas especificadas por los reglamentos.

La lluvia puede producir cargas importantes en techos planos cuando hay un mal funcionamiento de los desagües. El fenómeno puede tener consecuencias catastróficas en techos.

5.3.4 EFECTOS DE CAMBIOS VOLUMÉTRICOS

Los materiales que componen una estructura sufren cambios en sus dimensiones debido a acciones como las variaciones en la temperatura y en la humedad. Estos cambios volumétricos producen movimientos relativos entre diversos puntos de la estructura por los que se inducen fuerzas internas si la estructura no tiene libertad para moverse.

5.3.5 EFECTOS DEL VIENTO

Los vientos son movimientos horizontales de masas de aire debidos a diferencias de presión en las distintas zonas de la atmósfera y a la rotación terrestre. Estos movimientos ocurren constantemente; sin embargo, para el diseño estructural interesan esencialmente los vientos que tienen velocidades muy grandes y que se asocian a fenómenos atmosféricos excepcionales. Por tanto, el viento se trata en el diseño como una *acción accidental* desde el punto de vista de las combinaciones de carga en que interviene y de los factores de carga que se deben adoptar.

Cuando el libre flujo del viento se ve obstaculizado por un objeto fijo, tiene que desviarse para rodearlo, por lo cual produce presiones sobre el objeto.

La forma de la distribución de presiones puede resultar bastante compleja, dependiendo de la geometría del objeto. Para algunas geometrías muy sencillas las distribuciones de presiones pueden determinarse





analíticamente; para la mayoría de los casos, sin embargo, es necesario recurrir a mediciones de presiones en modelos colocados en un túnel de viento.

Es importante que el proyectista sepa reconocer los problemas que el viento puede ocasionar en una estructura dada, para que considere en el diseño aquellos aspectos que puedan producir efectos significativos.

5.3.6 OTRAS ACCIONES ACCIDENTALES

Las *explosiones* son fenómenos que pueden afectar prácticamente a todas las construcciones. En edificios de habitación, el gas doméstico es la fuente más frecuente de explosiones. Las explosiones externas debidas a vehículos que transportan gases o a bombas, pueden excepcionalmente afectar cualquier estructura.

Una explosión genera un desplazamiento de la masa de aire que da lugar a un incremento brusco de presión al frente de una onda de choque que viaja a gran velocidad, seguido por una zona de presión negativa de menor intensidad. La presión que se genera depende del tipo y cantidad de explosivo, de la distancia del punto donde se origina la explosión y de las condiciones de ventilación del lugar.

En general la falla de ventanas o paredes divisorias permite la liberación de la energía de la explosión sin que se lleguen a ocasionar daños graves a las estructuras comunes que poseen adecuada ductilidad y continuidad en sus conexiones.

De manera similar, en el diseño de puentes, el impacto y efectos dinámicos que se generan por el tránsito de vehículos sobre una superficie irregular se toman en

cuenta mediante fuerzas estáticas equivalentes, o más específicamente, mediante un incremento en las fuerzas gravitacionales de carga viva.

La acción de los *incendios* sobre una estructura es de dos tipos; por una parte el fuerte incremento de temperatura involucrado produce solicitaciones si la deformación de alguna parte de la estructura está restringida: por otra, muchos materiales estructurales ven afectada su resistencia a altas temperaturas y por tanto la capacidad de carga de la estructura se reduce.

Los requisitos para la protección de la estructura contra incendio tienen como objetivo evitar que ocurran fallas locales o colapso total durante el tiempo suficiente para el desalojo de los ocupantes y para la intervención de los equipos para controlar el fuego. Las precauciones que se requiere para minimizar los efectos de incendio son la protección de los elementos por medio de recubrimientos incombustibles y aislantes y el empleo de secciones con espesores relativamente gruesos para evitar su rápida combustión, en el caso de la madera, o su pandeo, en el caso del acero.

5.3.7 SISMOS

“La acción de un sismo en una estructura reviste aspectos netamente distintos de los de la mayoría de las otras acciones. Las diferencias no residen tanto en las características dinámicas de la acción, cuanto en que sus efectos dependen de una interacción compleja entre el movimiento sísmico, las propiedades del suelo subyacente y las de la estructura misma.





*El diseño sismorresistente implica mucho más que la simple consideración de un conjunto de cargas estáticas que se aplican a la estructura; requiere, además y principalmente, la selección de un sistema estructural idóneo y eficiente para absorber los efectos sísmicos y de un cuidado especial en la observancia de requisitos de dimensionamiento y de detalle de los elementos estructurales, y aun de los no estructurales. Esto implica que un diseño adecuado para soportar las acciones comunes puede resultar totalmente inapropiado para resistir efectos sísmicos, como lo demuestran las frecuentes fallas y problemas que se tienen al utilizar sistemas constructivos desarrollados para zonas no sísmicas en otras en que estos efectos son críticos."*³

El carácter accidental de la acción sísmica, junto con el elevado costo que implica lograr que ante un sismo de gran intensidad la respuesta de una estructura se mantenga dentro de niveles de comportamiento que no impliquen daño alguno hacen que se trate de aprovechar el trabajo de la estructura para deformaciones que sobrepasan el intervalo elástico; por ello, las propiedades inelásticas de los materiales y elementos estructurales, y en particular la ductilidad, adquieren una importancia fundamental en el diseño sísmico.

A grandes rasgos el diseño sísmico implica:

a) *La definición de la acción de diseño:* en estructuras de particular importancia es necesario realizar estudios específicos para determinar la intensidad del sismo de

diseño, tomando en cuenta las características geológicas, topográficas y mecánica de suelos del sitio particular.

b) *Selección de una estructura adecuada:* Como se ha dicho repetidamente, la bondad de un diseño depende esencialmente de la idoneidad del esquema estructural para absorber las acciones que lo puedan afectar. En el caso de sismos este aspecto adquiere una importancia todavía mayor, debido a que los efectos sísmicos dependen fuertemente de las propiedades de la estructura misma y de los elementos normalmente considerados no estructurales. Mediante una estructurtación adecuada puede lograrse que sean menos desfavorables las acciones que inducen un sismo en la estructura.

c) *El cálculo de la respuesta estructural.* Los métodos de análisis sísmico varían grandemente en el nivel de refinamiento; desde la consideración del efecto de una serie de fuerzas estáticas equivalente, hasta el análisis dinámico ante movimientos de la base de la estructura, representativos de los que el suelo de cimentación experimenta durante un sismo. El conocimiento de los aspectos básicos de la respuesta dinámica de las estructuras es siempre necesario, aun cuando se vayan a emplear métodos estáticos para su análisis cuantitativo.

d) *El dimensionamiento detallado de la estructura.* Debido a que los criterios de diseño aceptan que la estructura entre en etapas inelásticas de comportamiento ante el sismo de diseño, es esencial que se eviten fallas frágiles locales y que, en caso de que ocurra un sismo de excepcional intensidad, se logre una disipación uniforme de la energía del sismo mediante la fluencia de un

³ Roberto Meli. **Diseño Estructural.** Pag 407. Editorial Limusa. México 2004.





número alto de secciones. Para lograr este objetivo deben cuidarse los detalles estructurales, no solo a nivel de secciones y uniones de elementos, sino también en lo que concierne a la conexión entre la estructura y los elementos no estructurales.

5.5 COMPARACIÓN ENTRE FUERZAS ESTÁTICAS y FUERZAS DINÁMICAS

Existe una ligera diferencia entre los efectos de las fuerzas dinámicas y las fuerzas estáticas. Éste es, esencialmente, el carácter de dependencia que existe entre la fuerza y el tiempo. Así, el peso de la estructura produce un efecto estático, a menos que la estructura sea movida o detenida súbitamente, instante en el que se produce un efecto dinámico provocado por la inercia o el impulso de la masa de la estructura. Entre más repentino sea el inicio o la terminación, mayor será el efecto dinámico.

Para la investigación y el diseño estructural, la diferenciación significativa entre efectos estáticos y dinámicos tiene relación con la respuesta de la estructura a las cargas. Si la respuesta principal de la estructura se puede evaluar de manera efectiva en términos estáticos (fuerza, esfuerzo, deformación lineal, etc.), el efecto sobre la estructura es esencialmente estático, aunque la carga sea dependiente del tiempo por naturaleza. No obstante, si la respuesta de la estructura se puede evaluar de forma eficaz sólo en términos de capacidad de energía, trabajo efectuado, movimientos cíclicos, etc., el efecto de las cargas es de un verdadero carácter dinámico.

Un factor crítico en la evaluación de la respuesta de la estructura a las cargas dinámicas, es el *periodo fundamental* de la vibración de la estructura. Este es el tiempo que requiere un ciclo completo de movimiento, en la

forma de un salto o de una vibración continua. La relación de este periodo con el tiempo de aumento de la carga, es un importante factor en la determinación del grado relativo del efecto dinámico sobre la estructura. Un periodo fundamental de la estructura puede variar de una fracción de un segundo a varios segundos, dependiendo del tamaño, forma, masa, material, rigidez, restricciones de apoyo y posible presencia de diversos efectos de amortiguamiento.

El diseño para los efectos dinámicos empieza con una evaluación de posibles orígenes y de sus efectos potenciales. Luego, se considera la respuesta de la estructura usando las variables de su masa, vibración natural, capacidades de absorción de energía, amortiguamiento natural, etc. Una vez comprendido el comportamiento dinámico, el proyectista puede considerar la forma de manejar las variables para mejorar el comportamiento de la estructura o para reducir los efectos de las cargas.





CAPITULO VI

MATERIALES ESTRUCTURALES

En el diseño de estructuras de edificios se usan los materiales estructurales disponibles y los productos formados con ellos. En este capítulo se examinarán los materiales estructurales comunes y sus usos representativos en la construcción contemporánea.

6.1 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

El comportamiento estructural de los materiales puede estudiarse en términos de un conjunto de propiedades idealizadas. Estas son homogeneidad e isotropía, elasticidad, plasticidad, dureza, fragilidad, rigidez y ductilidad.

Un material cuyas propiedades son idénticas en todo él, se llama *homogéneo*. Si las propiedades de un material son idénticas en todas direcciones, el material se llama *isotrópico*.

Todos los materiales se deforman bajo carga. Si la deformación desaparece cuando se quita la carga, se dice que el material es *elástico*. Si la deformación permanece después de quitar la carga, se dice que el material se comporta *plásticamente*. La mayoría de los materiales tienen tanto un rango elástico como plástico, dependiendo de la intensidad de la carga. La mayoría de los materiales se usan estructuralmente dentro de su rango elástico, para evitar deformaciones permanentes. Si las deformaciones de un material elástico, son proporcionales a la carga aplicada, su comportamiento se denomina como *linealmente elástico*. La rigidez de un material se define mediante su *módulo*

elástico, que es la razón del *esfuerzo* o fuerza por unidad de área entre la *deformación unitaria* correspondiente, o deformación por unidad de longitud.

Los *materiales dúctiles* se deforman plásticamente antes de romperse, mientras que los materiales *frágiles* no tienen rango plástico. El acero es dúctil, el hierro colado es frágil. La ductilidad es un requisito básico de los materiales estructurales: permite un reajuste de esfuerzos acompañado de una eliminación de concentraciones de esfuerzos, Y previene una falla inminente debido a grandes deformaciones en el rango plástico. Una medida de la eficiencia estructural de un material se da por medio de su *razón resistencia-densidad* o *resistencia específica*.

Cuanto mayor es la resistencia específica tanto más resistente es el material, sobre una base de libra por libra. La deformación de una estructura bajo su propio peso puede medirse mediante su *elasticidad específica*.

6.2 CONSIDERACIONES GENERALES

Se pueden hacer amplias clasificaciones de materiales, igual que las diferenciaciones entre animales, vegetales y minerales; entre materiales orgánicos e inorgánicos y entre los estados físicos: sólido, líquido y gaseoso. En el estudio o diseño de estructuras, interesan las propiedades particulares de los materiales. Estas propiedades críticas se pueden dividir en propiedades estructurales esenciales y propiedades generales.

Las propiedades estructurales esenciales incluyen las siguientes:

- *Resistencia*. Puede variar para los diferentes tipos de fuerzas, en diferentes direcciones, en





diferentes edades o en diferentes valores de temperatura o contenido de humedad.

- *Resistencia a la deformación.* Grado de rigidez, elasticidad, ductilidad; variación con el tiempo, la temperatura, etc.
- *Dureza.* Resistencia al corte de la superficie, raspaduras, abrasión o desgaste.
- *Resistencia a la fatiga.* Pérdida de la resistencia con el tiempo; fractura progresiva; cambio de forma con el tiempo.
- *Uniformidad de la estructura física.* Vetas y nudos en la madera, agrietamiento del concreto, planos cortantes en la roca, efectos de cristalización en los metales.

Las propiedades generales de interés en el uso y evaluación de materiales estructurales incluyen las siguientes:

- *Forma.* Natural, remodelada o reconstituida.
- *Peso.* Como contribuyente a las cargas gravitacionales de la estructura.
- *Resistencia al fuego.* Combustibilidad, conductividad, punto de fusión y comportamiento general a altas temperaturas.
- *Coeficiente de expansión térmica.* Relacionado con los cambios dimensionales debidos a variaciones de temperatura; crítico cuando se acoplan diferentes materiales, como en la laminación, el concreto reforzado o columnas recubiertas.
- *Durabilidad.* Resistencia al clima, pudrición, insectos y desgaste.
- *Trabajabilidad.* En la producción, moldeado, ensamble, modificación.
- *Apariencia.* Natural o modificada.
- *Disponibilidad y costo.*

En cualquier situación, la elección de materiales debe hacerse a menudo con base en varias propiedades, tanto estructurales como generales. En cualquier función estructural específica, muy raras veces un solo material resulta superior en todos aspectos y, a menudo, se tienen que categorizar las diversas propiedades, según su importancia.

6.3 MADERA

Las innovaciones técnicas han superado algunas de las limitaciones tradicionales de la madera. Las limitaciones de forma y tamaño se han ampliado mediante la laminación y los adhesivos. Las técnicas especiales de sujeción han hecho posibles estructuras de mayor tamaño mediante un mejor ensamble. La combustibilidad, la podredumbre y la infestación de insectos se pueden retardar con la utilización de impregnaciones químicas. El tratamiento con vapor o gas amoniacal puede hacer altamente flexible a la madera, permitiéndole asumir formas plásticas.

Un proceso tecnológico ha producido un elemento de madera único: la hoja de madera contrachapada. Aunque otros materiales en formas laminares, como el aglomerado de fibra y elementos prefabricados de cartón y yeso, han surgido para competir con la madera contrachapada, su amplio uso continúa, tanto como material de revestimiento como parte de una variedad de productos estructurales fabricados a base de láminas de madera contrachapada.

En el diseño de componentes estructurales y sistemas, no siempre es prudente o posible usar un solo material. Con frecuencia, los materiales se combinan, efectuando cada uno de ellos funciones específicas, como en la construcción de concreto reforzado. Los techos con





armaduras ligeras, para cubrir claros medianos, tienen a menudo las partes superiores y las cuerdas inferiores de madera y los elementos interiores en zig-zag de acero.

La madera de construcción es uno de los más primitivos materiales de construcción y uno de los pocos materiales naturales con buenas propiedades a la tensión. La madera se clasifica de acuerdo con su uso, es decir, poste y columna, viga y larguero, tabla y tablón, y los esfuerzos permisibles se dan dentro de esas clasificaciones. Las calidades de la madera dependen principalmente de la localización, tamaño y número de defectos, tales como nudos, grietas o rajaduras anulares y radiales, y alabeo longitudinal o transversal.

6.4 ACERO

El acero se usa en gran variedad de tipos y formas en casi cualquier edificio. Desde las enormes columnas hasta los pequeños clavos, el acero es el más versátil de los materiales estructurales comunes. También es el más fuerte, el más resistente al envejecimiento y, generalmente, el más confiable en cuanto a calidad. El acero es un material completamente industrializado y está sujeto a estrecho control de su composición y de los detalles de su moldeo y fabricación. Tiene las cualidades adicionales deseables de no ser combustible, no pudrirse y ser estable dimensionalmente con el tiempo y los cambios de temperatura.

Aunque el material en volumen es costoso, el acero se puede usar en pequeñas cantidades debido a su gran resistencia y a sus procesos de moldeo, los cuales lo hacen competitivo con materiales de menor costo en volumen. También se pueden lograr ahorros mediante la producción masiva de elementos estandarizados.

Dos desventajas principales del acero para estructuras son inherentes al material. Éstas son su rápida absorción del calor y la pérdida de resistencia, que se producen cuando se expone al fuego, y su corrosión cuando se expone a la humedad y al aire o a condiciones corrosivas. Se pueden usar varias técnicas para superar su sensibilidad al fuego, incluyendo el uso de recubrimientos especiales que expanden su volumen al calentarse, formando un aislamiento superficial incombustible. Los recubrimientos de un tipo u otro son siempre medios posibles de protección contra la corrosión, aunque algunos aceros especiales resisten suficientemente la que provoca el aire, como para dejarlos expuestos sin tratamiento. El denominado acero inoxidable es una aleación especial costosa que, en general, no posee las propiedades deseadas para uso estructural.

Recientemente, se ha ampliado el vocabulario de los aceros que se utilizan en estructuras de edificios, y por lo que existe una amplia gama de la cual se puede elegir el acero adecuado para un caso particular de magnitud de esfuerzos, corrosión, forma de elementos o técnicas de sujeción. Es común que los diversos elementos del marco estructural de un edificio de acero, estén formados por una docena o más de clases del material, con un amplio espectro de variación de propiedades.

El acero es, posiblemente, el más eficiente y sin duda el más usado de los materiales estructurales. Puede modelarse en formas estructurales, como las de las vigas de ala ancha, o en placas o láminas por rolado. Puede fundirse en formas complejas, como las de los apoyos de los puentes. Puede ser atornillado, remachado o soldado. Puede alearse con otros metales, tales como el cromo, níquel o cobre, para obtener una mayor resistencia a la corrosión, o con metales como el manganeso o silicio, para obtener un incremento en resistencia.





El acero es uno de los pocos materiales estructurales que demuestra un bien definido *esfuerzo de fluencia*, es decir, un esfuerzo arriba del cual cede o fluye con casi ningún incremento en el esfuerzo. El pequeño incremento en el esfuerzo, necesario para producir un gran incremento en la deformación sobre el punto de cedencia, demuestra que el acero se *endurece por deformación* más allá del límite de fluencia, antes de alcanzar su *resistencia Última* a la cual se fractura.

El acero también se usa en forma de varillas para reforzar al concreto. Las varillas de acero en diámetros que varían desde 1/8 plg. hasta 2 plgs, se fabrican con "corrugaciones" sobre su superficie para aumentar su adherencia con el concreto. Además de las varillas se usan parrillas soldadas hechas con alambres estirados en frío, como refuerzo para losas de concreto y cascarones.

6.5 CONCRETO

En la construcción de edificios, la palabra *concreto* se usa para describir: una variedad de materiales que tienen un elemento en común: el uso de un agente aglutinante o aglomerante para formar una masa sólida a partir de un agregado suelto inerte ordinario. Los tres ingredientes básicos del concreto ordinario son agua, agente aglomerante (como el cemento) y un gran volumen de agregado suelto (como arena y grava). En el producto final puede haber enormes variaciones mediante el uso de diferentes aglomerantes y agregados y con el uso de químicos especiales y agentes espumosos, productores de burbujas de aire-vacío.

El concreto ordinario tiene varios atributos, el principal es su bajo costo general y su resistencia a la humedad, la oxidación, los insectos, el fuego y el desgaste.

Puesto que es amorfo en su condición de mezcla, puede tomar una gran variedad de formas. Con este material se construyen naturalmente estructuras monolíticas en gran escala.

Una de las principales desventajas del concreto es su falta de resistencia al esfuerzo de tensión. Por tanto, es imperativo el uso de refuerzo inerte o pretensado para cualquier función estructural que implique flexión o torsión considerables. Precisamente debido a su amorfismo, su moldeado y acabado representan, a menudo, los mayores gastos en su uso. El precolado de fábrica en formas permanentes es una técnica común utilizada para superar este problema.

Las propiedades mecánicas del concreto dependen de numerosos factores: la resistencia del agregado, la relación agua-cemento, la relación de la pasta al agregado, las condiciones de curado y la edad. Generalmente una disminución en la relación agua-cemento da por resultado un incremento en la resistencia. El curado del concreto en una atmósfera húmeda dará por resultado mayores resistencias que si se cura en una atmósfera seca.

En el *Concreto reforzado*, el concreto se combina con varillas de acero para crear un nuevo material, que tiene la ventaja de la resistencia a la tensión del acero y de la resistencia a la compresión del concreto. La fabricación de este material es posible por el hecho de que el acero y el concreto tienen aproximadamente el mismo coeficiente de dilatación térmica (alrededor de 0.000065 plg/plg/oF). Si no fuera así, la adherencia entre el acero y el concreto se rompería por un cambio de temperatura, ya que los dos materiales tendrían diferentes elongaciones. Ya que tanto el acero como el concreto están disponibles en una gran variedad de resistencias, pueden fabricarse innumerables





combinaciones de esos dos materiales para satisfacer situaciones específicas de diseño.

El concreto reforzado puede ser vaciado en una variedad infinita de formas para fabricar vigas, columnas, losas y cascarones. Los elementos del concreto pueden ser *pretensados* o *postensados* para colocarlos en un estado de compresión tal que elimine en parte o totalmente los esfuerzos de tensión debidos a las cargas aplicadas. De esta manera se elimina prácticamente la debilidad del concreto a la tensión.

Cuando el concreto se vacía en un molde o forma, contiene agua libre (no incluida en la reacción química con el cemento), que se evapora. Conforme el concreto, fragua y se cura, suelta esta humedad durante un periodo de tiempo y se contrae.

La contracción también puede reducirse usando una mezcla especialmente graduada, en la cual los agregados gruesos estén en contacto unos con otros, debido a que se omiten los agregados de tamaño intermedio. De esta manera la contracción se reduce a causa de que el movimiento de los agregados grandes queda restringido a un arreglo de las partículas, en vez de consistir en el movimiento libre de éstas en el aglomerante del cemento.

Ya que el concreto es un material plástico, se deformará con el tiempo. Esta propiedad de fluir bajo la carga se llama *flujo plástico*. La cantidad de flujo plástico depende de la carga, de la resistencia y del tipo de agregado usado, y la edad del concreto. El flujo plástico continúa indefinidamente a través del tiempo, pero con rapidez decreciente. Otra manera de reducir el flujo plástico es reducir la relación *esfuerzo-resistencia* del concreto, es decir, la relación entre el esfuerzo real y la resistencia

última del concreto. El flujo plástico también se reduce si se conserva húmedo el concreto; esto se debe, aparentemente, al hecho de que el concreto, cuando se conserva húmedo, aumenta su resistencia más que cuando se expone al aire.

6.6 ALUMINIO

En forma de aleación, el aluminio se usa para una gran variedad de elementos estructurales, decorativos y funcionales en la construcción de edificios. Las principales ventajas son su peso ligero (un tercio del peso del acero) y su alta resistencia a la corrosión. Entre las desventajas están su suavidad, su baja rigidez, sus grandes variaciones de dimensión por su expansión térmica, su baja resistencia al fuego y su costo relativamente alto.

Su uso estructural a gran escala en edificios está limitado, principalmente, debido a su costo o a sus grandes cambios dimensionales causados por la baja rigidez del material. Esta escasa rigidez también reduce su resistencia al pandeo. Sin embargo, es considerable su uso estructural a pequeña escala: tableros, recubrimientos de muros y techos, marcos de puertas y ventanas y herrería. En este caso, su mayor ventaja es su resistencia a la corrosión, facilidad de trabajo y las posibilidades de su moldeo en producción.

Ya que el aluminio puro es extremadamente suave y dúctil, se usa la adición de elementos aleatorios y un tratamiento térmico o trabajo en frío para impartirle la resistencia requerida para usarlo en miembros mediante oxidación anódica, o pintándola. Cuando el aluminio está en contacto con otros metales en presencia de humedad, la corrosión electrostática puede causar perjuicios. Por esta razón, el acero y el aluminio deben separarse





cuidadosamente en una estructura, ya sea mediante pintura o mediante el uso de un material aislante.

6.7 MAMPOSTERÍA

El término mampostería se usa para describir una variedad de formaciones que constan de elementos separados unidos entre sí por algún relleno aglutinante. Los elementos pueden ser roca bruta o cortada, losetas o ladrillos cocidos de arcilla, o unidades coladas de concreto.

Tradicionalmente, el aglutinante es mortero de cemento-cal, aunque se han hecho grandes esfuerzos en la experimentación con diversos compuestos adhesivos. El ensamble resultante es similar a una estructura de concreto y posee muchas de sus propiedades. Una importante diferencia es que el proceso de construcción no requiere normalmente la misma cantidad de formaleta y apuntalamiento temporales como se necesita para una estructura de concreto colado. Sin embargo, requiere mucho trabajo manual, lo cual impone algunas limitaciones de tiempo y el producto terminado está altamente sujeto a la pericia individual del albañil. En años recientes, se ha desarrollado técnicas de refuerzo para ampliar las posibilidades estructurales de la mampostería.

La mampostería consiste ya sea en materiales naturales, tales como piedra, o productos manufacturados, tales como tabique y bloques de concreto, apilados y juntados con un mortero. Los materiales modernos para mampostería estructural caen dentro de tres categorías generales: tabiques de barro recocido o tabiques pizarrosos, tabiques de concreto o bloques de concreto, y mampostería de piedra. Todos son materiales básicamente resistentes a la compresión y tienen muy poca resistencia a la tensión.

La construcción de mampostería está formada de dos materiales, las piezas de mampostería y el mortero que se usa para unir dichas piezas. El mortero usado en mampostería es una mezcla de arena, cemento de mampostería, y ya sea cemento Portland o limo hidratado. Los morteros hechos a base de cemento Portland tienen mayor resistencia y durabilidad.

6.8 PLÁSTICOS

Los elementos del plástico representan la mayor variedad de uso en la construcción de edificios. Las enormes variaciones de las propiedades del material y de los procesos de moldeo proporcionan un campo virtualmente ilimitado para la imaginación de los proyectistas. Algunos de los principales problemas con los plásticos son su falta de resistencia al fuego, escasa rigidez, grandes variaciones por expansión térmica y algunos casos de inestabilidad química o física con el tiempo.

El uso de estos materiales avanza firmemente a medida que reemplazan a los materiales tradicionales y también crean posibilidades funcionales totalmente nuevas.

En años recientes, el diseño de estructuras superficiales neumáticas y sostenidas por tensión ha estimulado la construcción de diversas membranas plásticas y productos de tejidos para su uso en edificios. En las estructuras pequeñas se pueden usar membranas delgadas de plástico, pero en las grandes, el material superficial es, generalmente, un tejido de tela con resistencia incrementada a la tensión y al desgarramiento.

Un plástico es un material sintético o resina que puede moldearse en la forma deseada y que usa como aglutinante una sustancia orgánica. Los plásticos orgánicos





pueden dividirse en dos grupos generales: composiciones de fraguado térmico y composiciones termoplásticas. El grupo termoplástico se conserva blando a elevadas temperaturas y debe enfriarse antes de volverse rígido; los plásticos de este grupo pueden ser perfilados y moldeados mediante la aplicación de calor. El grupo de fraguado térmico se vuelve rígido a través de un cambio químico que tiene lugar cuando se aplica calor; una vez solidificados, ya no pueden remodelarse. Hay cientos de composiciones separadas que caen dentro de cada uno de esos grupos, pero solamente se discutirán aquí, aquellos que tengan un interés estructural y, particularmente, los plásticos reforzados.

Las fibras de vidrio son los aditivos de refuerzo más comunes para la resina, a fin de mejorar sus propiedades mecánicas. Las fibras de vidrio se fabrican impeliendo vidrio fundido a través de finos orificios y soplando chorros de vapor a alta presión, o aire, contra ellos. Después el material es hilado en filamentos y torones de una excepcional alta resistencia.

Otra clase de plásticos tiene usos estructurales como espumas. Las espumas de uretano y polietireno se usan en tableros laminados entre dos capas de un material superficial, tales como madera contrachapada, aluminio, o plásticos reforzados y sin reforzar. Estas espumas tienen resistencias muy bajas a la tensión y compresión, pero suficiente resistencia a cortante para permitir la fabricación de tableros con alta rigidez.

6.9 MATERIALES DIVERSOS

Fibra de vidrio. Un uso especial del vidrio es en su forma fibrosa, en la cual es capaz de acercarse a su resistencia ideal. Ésta puede exceder la del acero de alta resistencia y, aunque su forma restringe su uso, se pueden

lograr diversas utilidades estructurales. Un uso conocido es en el que las fibras se suspenden en una resina, produciendo plástico reforzado con fibra de vidrio.

6.10 SUELOS

Aunque no se consideran ordinariamente como tales, los suelos son, sin embargo, materiales estructurales básicos, ya que todas las estructuras se apoyan sobre ellos. El diseño de una cimentación depende de muchos factores del suelo: el tipo de éste, la estratificación, el espesor de las capas de suelo, su compactación, las condiciones de las aguas freáticas, la proximidad de estructuras adyacentes, etc.

Con el fin de hacer su evaluación, los suelos se clasifican de acuerdo con el tamaño de sus partículas. El tamaño de las partículas aumenta a partir del limo, a la arcilla, a la arena, a la grava y a la roca. En una mezcla bien graduada, los huecos entre las partículas mayores están completamente llenos con partículas más y más pequeñas es decir, la arena llena el espacio entre las partículas de grava, la arcilla llena el espacio entre las partículas de arena y el limo llena el espacio entre las partículas de arcilla.

En diseños preliminares de cimentaciones, al suelo correspondiente puede asignarse un valor para la capacidad de carga. Para estimar con seguridad estos valores, deben hacerse exploraciones preliminares por medio de perforaciones o pozos de exploración, para determinar el tipo de suelo sobre el que descansará la estructura y la profundidad del nivel freático.





Segunda Parte:

Criterios para la selección del Sistema Estructural



Criteria Generales



“El proyecto estructural, por tanto, es no solamente un método para obligar a las fuerzas a cambiar de dirección, sino también un arte.”

Heinrich Engel

CAPITULO VII

ANALISIS Y PROCESO DE DISEÑO

7.1 EL ÁMBITO DEL DISEÑO ESTRUCTURAL

“La estrategia del proyecto estructural es polifacética, conforme al carácter específico que cada una de las estrategias particulares pueda expresar: las superficies curvadas, que distribuyen en su interior las fuerzas, de manera que la tensión se reduce hasta adquirir magnitudes inofensivas (láminas); los ligeros sistemas articulados que descomponen las fuerzas según diversas direcciones en las cuales pueden ser resistidas (armaduras); la flexible ligereza que doblega el camino natural de las fuerzas llevándolas hasta aquellos puntos en los cuales ya no pueden ser nocivas (cubiertas colgantes); la pesada masa que pone en acción el brazo de palanca de los materiales sólidos, modificando poderosamente la dirección de las fuerzas para alejarlas de todas las zonas críticas (estructuras flectadas). Fundamentalmente, todas son artilugios para controlar las fuerzas; pero la realidad es que se dan en la variedad, intensidad y universalidad de esas expresiones todos los requisitos necesarios para que sean también formas artísticas.”¹

El diseño estructural abarca las diversas actividades que desarrolla el proyectista para determinar la forma, dimensiones y características detalladas de una estructura, o sea de aquella parte de una construcción que tiene como función absorber las solicitaciones que se presentan durante las distintas etapas de su existencia.

¹ Engel, Heinrich. **Sistemas de Estructuras**. H. Blume Ediciones. España, Última edición. 1998.

S
a
j
m
u
a
y
n
o
a
P
a
b
a
l
r
o
c
i
a





El diseño estructural se encuentra inserto en el proceso más general del proyecto de una obra civil, en el cual se definen las características que debe tener la construcción para cumplir de manera adecuada las funciones que está destinada a desempeñar. Un requisito esencial para que la construcción cumpla sus funciones es que no sufra fallas o mal comportamiento debido a su incapacidad para soportar las cargas que sobre ella se imponen. Junto con éste, deben cuidarse otros aspectos, como los relativos al funcionamiento y a la habitabilidad, que en general son responsabilidad de otros especialistas. Evidentemente, dada la multitud de aspectos que deben considerarse, el proceso mediante el cual se crea una construcción moderna puede ser de gran complejidad.

Una construcción u obra puede concebirse como un sistema, entendiéndose por sistema un conjunto de subsistemas y elementos que se combinan en forma ordenada para cumplir con determinada función. Un edificio, por ejemplo, está integrado por varios subsistemas: el de los elementos arquitectónicos para encerrar espacios, el estructural, las instalaciones eléctricas, las sanitarias, las de acondicionamiento de aire y los elevadores. Todos estos subsistemas interactúan de modo que en su diseño debe tenerse en cuenta la relación que existe entre ellos. Así, no puede confiarse que lograr la solución óptima para cada uno de ellos, por separado, conduzca a la solución óptima para el edificio en su totalidad.

Con demasiada frecuencia esta interacción entre los subsistemas de una construcción se considera sólo en forma rudimentaria. En la práctica tradicional el diseño de un edificio suele realizarse por la superposición sucesiva de los proyectos de los diversos subsistemas que lo integran. El arquitecto propone un proyecto arquitectónico a veces con escasa atención a los problemas estructurales implícitos en

su diseño. El estructuralista procura adaptarse lo mejor posible a los requisitos arquitectónicos planteados, con frecuencia con conocimiento limitado de los requisitos de las diversas instalaciones; Por último, los proyectistas de éstas formulan sus diseños con base en los proyectos arquitectónico y estructural.

El proyecto general definitivo se logra después de que los diversos especialistas han hecho las correcciones y ajustes indispensables en sus proyectos respectivos.

En esta forma de proceder, cada especialista encargado de una parte del proyecto tiende a dar importancia sólo a los aspectos del proyecto que le atañen, sin tener en cuenta si la solución que está proponiendo es inadmisibles o inconveniente para el cumplimiento de otras funciones. En particular, el ingeniero estructural no debe olvidar que, como lo expresó Eduardo Torroja: "Las obras no se construyen para que resistan. Se construyen para alguna otra finalidad o función que lleva, como consecuencia esencial, el que la construcción mantenga su forma y condiciones a lo largo del tiempo. Su resistencia es una condición fundamental, pero no es la finalidad única, ni siquiera la finalidad primaria." Debe tener siempre presente que el proyecto no constituye un fin por sí mismo, sino que representa sólo una parte del proceso que conduce a la construcción de una obra terminada. Por tanto, lo importante es la calidad del resultado que se logre y el proyecto será más satisfactorio en cuanto mejor contribuya a facilitar la construcción de una obra adecuada. Por ello, deberá tener en mente que lo que se proyecta se tendrá que construir y elegir las soluciones que mejor se ajusten a los materiales y técnicas de construcción disponibles.

La interacción con los contratistas responsables de la construcción es otro aspecto importante. Es frecuente que





éstos pidan y obtengan, una vez terminado el proyecto, modificaciones importantes en las características arquitectónicas y estructurales en función del empleo de un procedimiento constructivo que presenta claras ventajas de costos o de tiempo de ejecución, pero que no se adapta al proyecto que se ha elaborado. Esto da lugar a que se repitan partes importantes del proceso de diseño o, más comúnmente, a que se realicen adaptaciones apresuradas por los plazos de entrega ya muy exiguos.

Un ejemplo frecuente de la situación anterior se da cuando el constructor propone recurrir a un sistema de prefabricación mientras que en el proyecto original se previó una solución a base de concreto colado en el lugar. Obviamente, esto implicaría modificaciones sustanciales al proyecto estructural.

A pesar de sus evidentes inconvenientes, el proceso que en términos simplistas se acaba de describir, es el que se suele seguir con resultados aceptables, en el diseño de la mayoría de las construcciones. Sin embargo, en los últimos años, dada la complejidad creciente de las obras, se ha iniciado una tendencia a racionalizar el proceso de diseño recurriendo a los métodos de la ingeniería de sistemas. En esencia, se pretende aprovechar las herramientas del método científico para hacer más eficiente el proceso de diseño. En particular, se pone énfasis en la optimización de la obra en su totalidad. Una diferencia fundamental respecto al enfoque tradicional del diseño es la consideración simultánea de la interacción de los diversos subsistemas que integran la obra en una etapa temprana del proceso de diseño, en lugar de la superposición sucesiva de proyectos.

Aunque en los aspectos estructurales esto quizás no tenga gran importancia, en las decisiones generales sobre las características de una obra la participación de los usua-

rios puede ser esencial. No pocos proyectos de vivienda han fracasado por haberse basado en lo que el proyectista consideraba adecuado, pero no en lo que el futuro habitante hubiere deseado. Situaciones semejantes pueden presentarse en el proyecto de un hospital o de una escuela.

7.2 DISEÑO CON RESPECTO AL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

En la práctica del diseño profesional, la investigación del comportamiento estructural es una parte importante del proceso de diseño arquitectónico.

Aunque el análisis de esfuerzos y deformaciones es necesario en el proceso de diseño, hay un tipo de relación gallina-huevo entre el análisis y el diseño. Para analizar algunas de las respuestas de la estructura, se requiere conocer algunas de sus propiedades, pero para determinar las propiedades necesarias, se debe disponer de algunos resultados del análisis.

Los proyectistas profesionales utilizan su propia experiencia junto con diversos elementos de ayuda en el diseño, como las tabulaciones de las capacidades de elementos de uso común para reducir el proceso de diseño. En muchos casos, se efectúan cálculos detallados para el análisis estructural solamente después de varios intentos y aproximaciones utilizadas para establecer un diseño preliminar de la estructura.





7.3 INVESTIGACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

Ya sea para fines de diseño, de investigación o para estudio del comportamiento estructural como una experiencia de aprendizaje, el análisis de esfuerzos y deformaciones es importante. Éste se puede efectuar como un procedimiento de prueba sobre la estructura real, con cargas aplicadas para simular las condiciones de uso real. Si se hace cuidadosamente, este es un procedimiento muy confiable. Sin embargo, exceptuando algunos elementos simples de uso común en la construcción, generalmente es imposible efectuar pruebas de carga destructivas en estructuras de edificios construidos a escala natural. El comportamiento de las estructuras de edificios se debe prever especulativamente con base en el comportamiento demostrado por estructuras similares o sobre un modelo donde se simulen las acciones impuestas. El modelo puede consistir en la realización de pruebas físicas sobre estructuras a escala menor, pero se hacen con mayor frecuencia matemáticamente, usando los avances del conocimiento en forma de fórmulas para el análisis. Cuando la estructura, las condiciones de carga y las formulaciones necesarias son sencillas, los cálculos se pueden hacer manualmente, pero es más común que incluso los cálculos rutinarios los hagan proyectistas profesionales mediante técnicas que hacen uso de las computadoras. Es imperativo que el proyectista mantenga el control de la situación mediante el conocimiento de lo que está haciendo la computadora.

7.4 EL PROCESO DEL DISEÑO ESTRUCTURAL

El diseño es un proceso creativo mediante el cual se definen las características de un sistema de manera que cumpla en forma óptima con sus objetivos. El objetivo de un

sistema estructural es resistir las fuerzas a las que va a estar sometido, sin colapso o mal comportamiento. Las soluciones estructurales están sujetas a las restricciones que surgen de la interacción con otros aspectos del proyecto y a las limitaciones generales de costo y tiempo de ejecución.

Conviene resaltar el carácter creativo del proceso. La bondad del proyecto depende esencialmente del acierto que se haya tenido en imaginar un sistema estructural que resulte el más idóneo para absorber los efectos de las acciones exteriores a las que va a estar sujeto. Los cálculos y comprobaciones posteriores basados en la teoría del diseño estructural sirven para definir en detalle las características de la estructura y para confirmar e rechazar la viabilidad del sistema propuesto. Podrá lograrse que una estructura mal ideada cumpla con requisitos de estabilidad, pero seguramente se tratará de una solución antieconómica o antifuncional. Esta parte creativa del proceso no está divorciada del conocimiento de la teoría estructural. La posibilidad de intuir un sistema estructural eficiente e imaginarlo en sus aspectos esenciales, es el fruto de la intuición y de la asimilación de conocimientos teóricos y de la experiencia adquirida en el ejercicio del proceso de diseño y en la observación del comportamiento de las estructuras. Lo que comúnmente se denomina buen criterio estructural no está basado sólo en la intuición y en la práctica, sino que también debe estar apoyado en sólidos conocimientos teóricos.

Cualquier intento de clasificación o subdivisión del proceso de diseño resulta hasta cierto punto arbitrario. Sin embargo, es útil para entender su esencia, considerar tres aspectos fundamentales: la estructuración, el análisis y el dimensionamiento.

S
a
m
u
a
y
n
a
P
a
g
a
b
i
r
o
c
i
a





Estructuración: En esta parte del proceso se determinan los materiales de los que va a estar constituida la estructura, la forma global de ésta, el arreglo de sus elementos constitutivos y sus dimensiones y características más esenciales. Como se desprende de lo expresado en párrafos anteriores, es ésta la parte fundamental del proceso. De la correcta elección del sistema o esquema estructural depende más que de ningún otro aspecto la bondad de los resultados. En esta etapa es donde desempeñarán un papel preponderante la creatividad y el criterio.

Análisis: Se incluyen bajo esta denominación las actividades que llevan a la determinación de la respuesta de la estructura ante las diferentes acciones exteriores que pueden afectarla. Por el momento basta entender que se trata de determinar los efectos de las cargas que pueden afectar a la estructura durante su vida útil. Para esta determinación se requiere lo siguiente:

Determinar las acciones de diseño. En muchas situaciones las cargas y los otros agentes que introducen esfuerzos en la estructura están definidos por los códigos y es obligación del proyectista sujetarse a ellos. Es frecuente, sin embargo, que quede como responsabilidad del proyectista la determinación del valor de diseño de alguna carga, o al menos la obtención de datos ambientales locales que definen la acción de diseño. Cabe aquí hacer notar que en esta etapa se suelen tener grandes incertidumbres y se llegan a cometer errores graves que dan al traste con la precisión que se pretende guardar en las etapas subsecuentes.

Determinar los efectos de las acciones de diseño en el modelo de estructura elegido. En esta etapa, que constituye el análisis propiamente dicho, se determinan las

fuerzas internas (momentos flexionantes y de torsión, fuerzas axiales y cortantes), así como las flechas y deformaciones de la estructura. Los métodos de análisis suponen en general un comportamiento elástico-lineal.

Dimensionamiento. En esta etapa se define en detalle la estructura y se revisa si cumple con los requisitos de seguridad adoptados. Además, se elaboran los planos y especificaciones de construcción de la estructura. Nuevamente, estas actividades están con frecuencia muy ligadas a la aplicación de uno o más códigos que rigen el diseño de la estructura en cuestión.

El haber distinguido en el proceso diseño tres partes que indican una secuencia lógica, nos debe llevar a pensar que en el diseño se sigue un proceso unidireccional en el que primero se imagina una estructura, luego se analiza y finalmente se dimensiona. El proceso real, es mucho más complejo e iterativo; implica pasar varias veces por cada etapa a medida que la estructura evoluciona hacia su forma final.

El análisis de la secuencia temporal con que se realiza el diseño de una estructura permite distinguir las fases siguientes:

1) *Planteamiento de soluciones preliminares:* Se requiere primero una definición clara de las funciones que debe cumplir la estructura y de las restricciones que impone el entorno físico y de las que fijan otros aspectos del proyecto. Es necesario tener datos al menos preliminares sobre condiciones ambientales y requisitos de proyecto. En esta fase es particularmente necesaria la interacción entre el estructuralista y los especialistas de los demás subsistemas de la obra para definir las necesidades básicas de cada uno de ellos y para analizar las soluciones generales que se





vayan proponiendo. De una evaluación esencialmente cualitativa surge un número limitado de soluciones que tienen perspectivas de resultar convenientes. Esta evaluación se basa con frecuencia en comparaciones con casos semejantes y en algunos cálculos muy simplistas. Es en esta fase donde juega un papel preponderante el criterio del proyectista estructural.

2) *Evaluación de soluciones preliminares.* Se realizan las actividades que, según se ha mencionado anteriormente, constituyen las etapas del proceso de diseño estructural, pero a un nivel tosco que se denomina comúnmente "prediseño", en el cual se pretende definir las características esenciales de la estructura en diversas alternativas, con el fin de identificar posibles problemas en su adopción y, principalmente, de poder cuantificar sus partes y llegar a una estimación de los costos de las diversas soluciones. La elección de la opción más conveniente no se basará solamente en una comparación de los costos de la estructura en cada caso; hay que considerar también la eficacia con la que ésta se adapta a los otros aspectos del proyecto, la facilidad de obtención de los materiales necesarios, la rapidez y grado de dificultad de las técnicas de construcción involucradas, los problemas relacionados con el mantenimiento, el aspecto estético de la solución y, en obras de gran importancia, también diversos factores de tipo socioeconómico, como la disponibilidad de recursos nacionales y la contribución a la generación de empleos.

3) *Diseño detallado.* Una vez seleccionada la opción más conveniente, se procede a definirla hasta su detalle, realizando de manera refinada todas las etapas del proceso; aún aquí es necesario con frecuencia recorrer más de una vez las diversas etapas, ya que algunas de las características que se habían supuesto inicialmente pueden tener que modificarse por los resultados del

dimensionamiento y hacer que se repita total o parcialmente el análisis.

7.5 CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS ESTRUCTURALES

Un sistema estructural específico deriva su carácter único de cierto número de consideraciones; probablemente, de muchas de ellas a la vez. Consideradas por separado:

1. Funciones estructurales específicas, algunas de las cuales son de resistencia a la compresión; resistencia a tensión; para cubrir claros horizontales, verticalmente, o en alguna otra posición; en voladizo vertical u horizontal. Se puede necesitar un solo elemento o sistema para desempeñar más de una de estas funciones en diversas situaciones de uso.
2. La forma geométrica u orientación. Se debe observar la diferencia entre la naturaleza de la viga plana y el arco, ambas funcionando como estructuras para cubrir claros horizontalmente. La diferencia principal es la forma estructural. El arco se puede comparar con el cable colgante ambos usados como elementos para cubrir claros horizontales. Son, obviamente, diferentes en cuanto a función. No obstante, la diferencia no es de forma sino de punto de aplicación de la carga.
3. El (los) material(es) de los elementos.
4. La forma de unión de los elementos si el sistema consiste en un juego de partes articuladas.
5. La forma de apoyo de la estructura.





6. Las condiciones específicas de carga o las fuerzas que debe soportar la estructura.
7. Las consideraciones de uso impuestas separadamente en función de la forma y los límites de escala.
8. Las limitaciones de forma y escala de los elementos y la naturaleza de su unión impuesta por las propiedades de los materiales, los procesos de producción y la necesidad de funciones especiales como desarmar y mover.

S
a
j
m
u
a
y
n
o
a
P
a
G
b
a
i
r
o
c
i
a





CAPITULO VIII

CRITERIOS GENERALES PARA SELECCIÓN DEL SISTEMA ESTRUCTURAL

“La elección del método y medios de cómo pueden difundirse con mayor eficacia los conocimientos sobre sistemas estructurales se regirá por las características particulares de lo que se ha de difundir, y a quién. Entre estas características, las tres siguientes son obligadas:

- *La naturaleza predominantemente gráfica del lenguaje del arquitecto.*
- *La esencia físico-mecánica del objeto considerado.*
- *La orientación de todos los esfuerzos arquitectónicos hacia la forma y el espacio.”²*

El diseño estructural tiene como objeto proporcionar soluciones que por medio del aprovechamiento óptimo de los materiales, de las técnicas constructivas disponibles, y cumpliendo con las restricciones impuestas por los otros aspectos del proyecto, den lugar a un buen comportamiento de la estructura en condiciones normales de funcionamiento de la construcción y a una seguridad adecuada contra la ocurrencia de algún tipo de falla.

Para analizar o diseñar una estructura, es necesario establecer un criterio para determinar cuál estructura es

² Engel, Heinrich. **Sistemas de Estructuras**. H. Blume Ediciones. España, Última edición. 1998.

aceptable en uno u otro caso o circunstancia. Entre los criterios más generales están:

8.1 RESISTENCIA

La estructura debe ser capaz de soportar las cargas de manera segura, sin excesivo esfuerzo ni deformaciones. Esta capacidad se alcanza usando factores de seguridad en el diseño de los elementos y de la estructura en sí. Mediante el cuidadoso diseño del tamaño, forma y elección del material, las cargas en una estructura pueden mantenerse en factores de seguridad aceptables. Este criterio es básicamente de *resistencia* y es de fundamental importancia.

“El requisito de resistencia concierne a la integridad de la estructura y de cada una de sus partes, sometidas a cualquiera y a todas las cargas posibles. Para ello se elige primero el sistema estructural y se establecen las cargas que actuarán sobre él...”³

Las deformaciones excesivas pueden interferir con el funcionamiento de otros de los elementos que conforman la totalidad del elemento estructural. Además, las deformaciones simplemente son visualmente indeseables; una estructura deformada no es necesariamente una estructura insegura.

Asociado a las deformaciones está el movimiento en la estructura. En ciertas situaciones, las aceleraciones y velocidades de estructuras que soportan cargas dinámicas son perceptibles por los ocupantes y son desagradables. En

³ Mario Salvadori y Robert Heller. Ibid. Pag. 51.





este caso entran los edificios altos y el efecto que causa el viento en ellos.

En general la resistencia de una estructura se determina mediante procedimientos analíticos basados en el conocimiento de las propiedades de la estructura y de los materiales que la componen.

Los métodos de cálculo se basan usualmente en algún modelo analítico del comportamiento de la estructura y del mecanismo de falla que la rige, aunque generalmente los parámetros de esos modelos están ajustados con base en resultados experimentales.

En algunos casos, cuando no se ha podido establecer un modelo teórico suficientemente confiable para el fenómeno que rige el estado límite los procedimientos de cálculo tienen base puramente empírica.

8.2 FACTIBILIDAD

Las estructuras son reales, por lo que en ellas se deben usar materiales y productos disponibles, que puedan manejar los trabajadores de la construcción y las empresas de producción. Los proyectistas deben tener un conocimiento razonable del inventario corriente de materiales y productos disponibles y de los procesos usuales para la construcción de edificios. Mantenerse actualizado en este tipo de conocimientos es un desafío ante su crecimiento, el estado cambiante de la tecnología y la competencia de mercado entre proveedores y constructores.

La factibilidad no es sólo una cuestión de potencialidades tecnológicas, sino que está relacionada con la utilidad práctica de una estructura. Sólo porque algo se *puede* construir no es razón para que se *deba* construir. Se

tiene que considerar la complejidad del diseño, el costo, el tiempo de construcción, la aprobación de los departamentos reguladores de la construcción, etc.

Los costos son invariablemente un factor importante en la construcción de una estructura. Este criterio no puede separarse de lo constructivo ni de la eficiencia del elemento. El costo total de la estructura depende inicialmente del costo del material, de la mano de obra requerida y el costo del equipo necesario. Obviamente, una estructura eficiente, fácil de construir será económica.

8.3 EFICIENCIA

Este criterio involucra la economía con que una estructura alcanza su objetivo de diseño. Una medida usada comúnmente es la cantidad de material necesario para resistir las cargas en un espacio y función específica. Posiblemente varias respuestas estructurales resulten factibles, es entonces donde el papel del arquitecto toma un rol determinante, y no por esto necesariamente cada una de estas respuestas necesite la misma cantidad de material. El uso de la menor cantidad posible de recursos es un criterio valido y ampliamente usado por los diseñadores.

8.3 CONSTRUCCIÓN

El aspecto constructivo es fundamental en la elección de la respuesta estructural. Posiblemente una respuesta estructural altamente eficiente sea ineficiente en cuanto a la distribución del material, ensamblaje o producción del mismo. El criterio constructivo es diverso e incluye la consideración del recurso humano, maquinaria y tiempo.

Un criterio general para considerar la factibilidad de la construcción es la complejidad del elemento estructural,





reflejado en el número de elementos que lo conforman y su ensamblaje. El tamaño, forma y peso de los elementos conformantes es también de suma importancia.

8.4 OPTIMIZACIÓN

Con frecuencia, los proyectistas están motivados por deseos de originalidad y expresión individual. Sin embargo, también están presionados generalmente para producir un diseño práctico en términos de función y factibilidad. En muchos casos, para esto se necesita tomar decisiones que constituyan balances entre consideraciones conflictivas u opuestas. A menudo, la solución óptima o la mejor es difícil de encontrar.

Conflictos obvios son aquellos entre los deseos de seguridad, calidad de acabados, amplitud de los espacios y lujo general, por una parte, y factibilidad práctica y economía por otra. Todos estos atributos pueden ser importantes, pero a menudo los cambios que tienden a mejorar un factor hacen que se degraden a otros. Generalmente, se necesita ordenar por categorías los diversos atributos, donde normalmente el costo encabeza la lista. Así, la mejor solución puede tener que calificarse en términos de las prioridades específicas utilizadas en el diseño.

8.5 INTEGRACIÓN

El buen diseño estructural requiere la integración de la estructura en la totalidad del sistema físico del edificio. Es necesario reconocer las influencias de las decisiones del diseño estructural sobre el diseño arquitectónico general, la mayoría de los sistemas estructurales de uso más difundido han logrado tener aceptación, en muchos casos y en gran medida, por su capacidad para integrar los otros

subsistemas del edificio y emplear formas y detalles arquitectónicos muy comunes.

8.6 SEGURIDAD

El aspecto más importante de las estructuras es dar seguridad. Las dos principales consideraciones se relacionan con la resistencia al fuego y una baja posibilidad estadística de colapso bajo cargas.

Existen dos técnicas básicas para asegurar el margen de seguridad. El método que se usó ampliamente es el denominado *método de esfuerzos de trabajo o de cargas de servicio*. Con este método se determinan condiciones de esfuerzo bajo su uso real (cargas de servicio) y se establecen los límites de esfuerzo como un porcentaje de las capacidades máximas (últimas) definidas de los materiales. Por tanto, no se puede hacer una predicción de falla a partir de una evaluación de esfuerzos, basándose en una simple proporcionalidad lineal; usar un esfuerzo de trabajo de la mitad del esfuerzo máximo medido, no es realmente aplicar un factor de seguridad de 2.

El otro método principal para lograr la seguridad se denomina *método de diseño por resistencia o del factor de carga*. Se determina la capacidad total de carga de la estructura en el punto de falla y se establece la carga permisible (de servicio) en el nivel deseado, dividiendo simplemente la carga entre el factor de seguridad seleccionado. Las únicas condiciones de esfuerzo consideradas en este método son aquellas que se presentan en el colapso.

Si todas las variables que intervienen en el diseño fueran determinantes, o sea, si su valor pudiera predecirse con absoluta precisión, para lograr la seguridad deseada de





la estructura bastaría diseñarla para que su resistencia ante todos los posibles estados límite de falla fuera ligeramente superior que la acción máxima correspondiente. Por muy conservador que sea el diseño, siempre habrá una probabilidad mayor que cero de que la acción máxima que se vaya a presentar exceda a la resistencia para algún estado límite de falla.

8.7 RELACIONES FORMA-ESCALA

Hay una gran variedad de tipos de espacio arquitectónico y, por lo tanto, hay muchas categorías de problemas estructurales. A continuación se presenta una clasificación de los diferentes tipos de espacios:

Espacio único: Este tipo representa, comúnmente, el mayor grado de libertad en la elección del sistema estructural. Básicamente, el edificio requiere paredes y techo, aunque se puede usar una estructura de piso que no sea pavimento si el edificio se eleva por encima del nivel del suelo.

Espacio horizontal múltiple: lineal: Esta categoría incluye moteles, pequeños centros comerciales y alas de aulas escolares. La multiplicación de espacios se puede hacer con muros que realizan la doble función de soportar el techo y dividir los espacios interiores, o se puede hacer solamente cubierta sin estructura interior como tal, en términos de múltiplos del sistema estructural. El sistema de cubierta tiene un poco menos de libertad de forma que la del edificio de espacio único, por lo que, comúnmente, un sistema modular de este tipo es el más conveniente.

Aunque, por lo general, la utilización del espacio y la sencillez de la construcción se obtendrán con la multiplicación lineal en planta de unidades rectangulares,

hay otras posibilidades, si las unidades se espacian mediante conectores de conductos separados, se podrá obtener mas libertad para la estructura de cubierta de las unidades individuales.

Las opciones estructurales siguen siendo esencialmente las mismas que para el edificio de espacio único. Si los espacios adyacentes son significativamente diferentes en altura o claro, puede ser conveniente cambiar el sistema de construcción, usando sistemas apropiados a escala de los espacios individuales.

Espacio horizontal múltiple: dos sentidos: Esta categoría incluye fábricas, tiendas, bodegas y grandes oficinas de un solo piso. Como en la multiplicación lineal, la repetición de unidades se puede hacer con o sin muros interiores, utilizando columnas interiores como elementos de carga.

Las restricciones en planta de la forma de la superficie de techo son mayores aquí que en la multiplicación lineal. El rendimiento de las unidades de planta rectangular es, generalmente, mayor, aunque existen otras posibilidades. La organización y coordinación modulares se vuelven cada vez más precisas al generar sistemas estructurales.

La continuidad en las estructuras para cubrir claros, aunque también es posible con la multiplicación lineal, se hace más útil cuando la multiplicación es en dos sentidos.

Aunque aún es posible realizar la multiplicación lineal, en las estructuras de cubierta que no son planas y horizontales se hace cada vez menos práctica la utilización de la multiplicación en dos sentidos. El drenaje de la azotea se convierte en un problema importante cuando es grande





la distancia del centro al extremo del edificio. La pendiente requerida para que escurra el agua hacia el borde no es posible a menudo, en cuyo caso se necesitan drenajes de techo interiores más complejos y costosos.

Las opciones estructurales son generalmente las mismas que para edificios de espacio único. La multiplicación en dos sentidos de espacios a gran escala es poco común, y estas estructuras tienden a entrar en la categoría de claro mediano. De la misma manera que con la multiplicación lineal, si los espacios adyacentes tienen tamaños significativamente diferentes, se puede justificar un cambio en el sistema estructural.

Espacio de niveles múltiples: El paso de un solo nivel a múltiples niveles tiene implicaciones estructurales importantes.

- *Necesidad de estructura de piso reticular:* este es un elemento para cubrir claros y separar, lo que no es esencialmente requerido para el edificio de un solo piso.
- *Necesidad de sobreponer elementos de apoyo:* los elementos inferiores deben soportar a los superiores, así como también a los elementos que cubren el claro inmediatamente arriba de ellos. Esta condición funciona mejor si los elementos de apoyo se alinean verticalmente e impone la necesidad de coordinar las plantas del edificio en los diferentes niveles.
- *Aumento de la importancia de las cargas laterales:* entre más alto es un edificio, las cargas producidas por el viento y los

terremotos imponen mayores efectos de volteo, así como también una mayor fuerza horizontal en general, por lo que el diseño del contraventeo lateral se convierte en un problema mayor.

- *Penetración vertical de la estructura:* elevadores, escaleras, chimeneas, tuberías y cableados eléctricos deben subirse a través de la estructura horizontal en cada nivel y los sistemas que cubren los claros deben acomodar estas penetraciones.
- *Incremento de cargas en la cimentación:* cuando aumenta la altura de un edificio sin incremento en el tamaño de la planta, también aumenta la carga vertical total por cada unidad de área de la planta, creando con el tiempo la necesidad de una cimentación muy voluminosa.

Un importante aspecto arquitectónico del edificio de varios niveles, es la planta de los elementos verticales de carga, puesto que representan objetos fijos alrededor de los cuales se distribuyen los espacios interiores. Debido a la sobre posición requerida, los elementos estructurales verticales son, con frecuencia, una condición constante en planta, en cada nivel, a pesar de los posibles cambios en las unidades arquitectónicas en los diversos niveles. Un edificio de departamentos con estacionamiento de automóviles en los niveles inferiores presenta el problema de que las plantas tengan ubicaciones fijas de elementos estructurales verticales para acomodar tanto espacios múltiples de estacionamiento, como las habitaciones de los departamentos.





Normalmente, los elementos estructurales verticales son muros o columnas, que pueden ser ubicados en una de tres posibles maneras:

- Como columnas aisladas y libres o unidades de muros en el interior del edificio.
- Como columnas o muros localizados en elementos como escaleras, elevadores, baños o cañones de ductos.
- Como columnas o muros en la periferia del edificio.

Las columnas interiores libres tienden a ser molestas para la planificación, ya que restringen la colocación de puertas y pasillos así como la colocación de muebles. A menudo las decisiones tomadas en la planificación comprenden la elección de una entre varias situaciones indeseables. Estas molestias han motivado a diseñar edificios con pocas, o ninguna, columnas libres interiores. Para edificios con módulos fijos en planta, como hoteles, dormitorios y prisiones, puede ser aceptable un sistema de muros de carga con frecuentes muros interiores permanentes.

Cuando las columnas se colocan en el perímetro del edificio, su relación con el muro del revestimiento del edificio tiene una importancia determinante en la apariencia exterior, así como en el diseño interior.

Aunque las columnas interiores libres son, generalmente, las menos convenientes, se pueden aceptar si son cortas (como en los edificios de poca altura) y tienen sección transversal pequeña (redonda, octagonal, etc.). En algunos casos se pueden tratar como características

significativas del diseño. En armaduras de madera o acero, el extremo en voladizo implícito por las columnas interiores presenta, en general, un difícil problema de marcos. En estructuras de concreto colado en obra, sin embargo, el voladizo se logra simplemente e, incluso puede ser ventajoso para la estructura porque reduce el esfuerzo en claros interiores y ayuda a la transferencia de carga a las columnas.

La colocación de columnas totalmente fuera de los muros elimina tanto el obstáculo interior en planta, como el extremo en voladizo requerido. Se produce un resalto exterior continuo que se puede usar como protección contra el sol, para el lavado de ventanas, como balcón o como corredor exterior. Sin embargo, a menos que se justifique alguno de estos usos, el resalto puede ser un estorbo y crear problemas de escurrimiento de agua y acumulación de suciedad. Las columnas totalmente exteriores también crean un problema potencial con la expansión térmica.

Si se unen el muro y la columna, existen tres posibilidades para ubicar la columna, por lo general, gruesa y el muro, normalmente, delgado. Para lograr una superficie exterior lisa, la columna puede estar a ras de la cara exterior del muro, aunque esto crea el mismo problema para proyectar que el que se examinó en el caso de las columnas interiores libres. Si el muro se alinea con la cara interna de la columna, la superficie interior será lisa (para facilitar la planeación interior), pero la exterior estará dominada por las aristas verticales de las columnas. El esquema menos útil sería colocar la columna al centro del plano del muro.

Por supuesto, otra solución es engrosar suficientemente el muro para acomodar la columna, lo cual





es un truco netamente arquitectónico, pero que, por lo general, ocasiona mucho desperdicio de espacio en planta.

En edificios altos, las dimensiones de las columnas varían comúnmente desde la parte inferior a la superior, aunque se puede lograr un considerable margen de resistencia con una sola medida así como la simplificación del diseño.

8.8 RELACIÓN EDIFICIO-SUELO

Existen cinco variaciones de esta relación:

Edificio subterráneo: Incluye refugios, estaciones de tren y estacionamientos. El efecto aislante del suelo puede ser útil para el control térmico interno en climas extremos. Las superficies exteriores del edificio se someten a presiones del terreno, penetración del agua y condiciones de deterioro, en general causadas por el contacto constante con el suelo, lo cual restringe, fuertemente, la elección de materiales y detalles de construcción para la cubierta, el piso y los muros.

Si la distancia entre el edificio y la superficie del terreno es grande, las cargas del suelo limitan la factibilidad de cubrir grandes espacios libres. Los muros exteriores generalmente son impenetrables, aunque deben considerarse aspectos como el paso de la gente y del aire y los diversos servicios que requiere el edificio. La acción del viento no se considera en este caso y el diseño sísmico es diferente al de edificios apoyados sobre el suelo.

Techo al nivel del suelo: El edificio se encuentra totalmente enterrado, excepto que la única superficie expuesta al aire ofrece algunas posibilidades para dar luz y ventilación directas. Las cargas que soporta la cubierta son

menos críticas que en el caso de un edificio enterrado, aunque es posible que tenga cierto tránsito que requiera el uso de pavimento. El peso del pavimento más el del tránsito, constituirán una carga considerablemente mayor que la normal para un techo, por lo que la posibilidad de cubrir grandes claros es cuestionable.

Las limitaciones en la construcción en contacto con el suelo son las mismas que para los edificios enterrados. Es posible que el techo tenga aberturas para el aire, conductos de ventilación, luz y acceso de los ocupantes.

Edificios parcialmente enterrados: En este caso, el edificio consta comúnmente de dos elementos estructurales: la superestructura (sobre el nivel del suelo) y la subestructura (bajo el nivel del suelo). Esta última tiene todos los problemas del edificio enterrado y además debe soportar la superestructura. Si ésta es muy alta, las cargas gravitacionales serán altas y la subestructura tendrá la mayor función, que es la de distribuir la carga vertical sobre el material que sirve como soporte. Las fuerzas horizontales debidas al viento y los terremotos también se deben transmitir al suelo a través de la subestructura.

Por lo general, la subestructuras se construyen de concreto o mampostería. Si la superestructura se construye también con cualquiera de estos dos materiales, puede haber cierta continuidad en los sistemas para los dos elementos, pero si se construye de madera o de acero, el edificio constará, en general, de dos estructuras, una arriba de la otra.

La superestructura debe cumplir con las diversas funciones de barrera y filtro. Debe facilitar la disposición de aberturas para puertas y ventanas. La superestructura es sumamente visible, mientras que la subestructura no lo es;





por ello, la primera tiene, en general, mayor importancia en el diseño arquitectónico.

Piso al nivel del suelo: Hasta hace poco tiempo, los sótanos eran comunes, a menudo necesarios para poder alojar un sistema de calefacción por gravedad y para almacenar la madera o el carbón utilizados como fuente de energía. También eran útiles para el almacenamiento de alimentos, antes de la refrigeración, para el almacenamiento general de chatarra y como protección durante las tormentas de viento. El advenimiento de los sistemas de calefacción de circulación forzada, de la refrigeración, y el alto costo de la construcción, han limitado el uso de sótanos, a menos que sean necesarios para estacionamiento de automóviles o para albergar equipo de gran tamaño.

Si no hay sótano, el edificio se reduce a la superestructura y a la cimentación. Si el edificio es de poca altura y las cargas verticales pequeñas, los cimientos pueden ser cortos. Si no hay problemas de congelación y el nivel de la superficie del suelo es adecuado, los cimientos pueden ser de poca altura bajo la superficie del suelo. El piso a nivel del terreno puede consistir en una simple pavimentación de la superficie del suelo, denominada *losa a nivel*.

Un problema que se puede presentar con un edificio ligero sin sótano, es que la ausencia de una subestructura pesada reduce críticamente la resistencia a movimientos horizontales, o de volteo, efectos causados por viento o sismo. Así, aunque sólo se necesite una cimentación mínima para cargas, gravitacionales, se tienen que incrementar en masa o lastrar con rellenos de tierra para proveer el anclaje necesario para la estabilidad del edificio.

Edificios arriba del nivel del suelo: Algunas veces los edificios se construyen sobre columnas o piernas, o

están en voladizo o suspendidos y, literalmente, están en el aire. Las estructuras de apoyo se deben construir sobre o dentro del suelo, pero el propio edificio no tiene contacto directo con éste.

El piso inferior de estos edificios se debe diseñar para cumplir las funciones de barrera y filtro, generalmente asociadas sólo con cubiertas y muros exteriores. Además, a menudo, su parte inferior es visible y constituye un problema de diseño poco común.

Las estructuras de apoyo pueden ser muy modestas si los edificios no son grandes ni imponentes. Sin embargo, si el espacio abierto ante el edificio es grande o si la altura sobre el nivel del terreno es considerable, la estructura de apoyo puede convertirse en un elemento predominante. Debido a que en la mayoría de los edificios se entra por el nivel del terreno, la estructura de apoyo y la parte inferior expuesta del edificio son aspectos importantes del diseño arquitectónico.





Sistemas Estructurales



“Las ESTRUCTURAS son ejemplos y por ello MODELOS de proyecto. Los SISTEMAS estructurales son ordenaciones y por ello PRINCIPIOS de diseño.”

CAPITULO IX

ARMADURAS

Heinrich Engel

Muchas estructuras formadas por la unión de varios miembros han sido construidas a lo largo de la historia, el aprovechamiento estructural que presenta la unión de miembros lineales en patrones triangulares es relativamente reciente. Las estructuras de este tipo son llamadas comúnmente armaduras; algunas de ellas son usadas en techos sencillos en forma de tijeras.

“Elementos cortos, sólidos y rectos, es decir, piezas lineales, son componentes estructurales, los cuales, debido a su reducida sección en relación con su longitud, pueden transmitir solamente esfuerzos en el sentido de ésta; es decir, tensiones normales (tracción y/o compresión), piezas comprimidas o extendidas.

Las piezas comprimidas o extendidas, ensambladas triangularmente, forman una composición estable y completa en sí misma que, si se sustenta convenientemente, es capaz de recibir cargas asimétricas y variables transmitiéndolas a los extremos.

Las piezas comprimidas y extendidas, dispuestas según una cierta forma y formando en conjunto un sistema con nudos articulados constituyen mecanismos que pueden dirigir las fuerzas y transmitir las cargas a grandes distancias sin soportes intermedios, sistemas estructurales activos vectorialmente.

Característica de los sistemas estructurales de vector

S
a
j
m
u
a
y
n
o
a
P
a
b
a
l
o
c
i
a





activo es la disposición triangulada de las piezas rectas.³

9.1 PRINCIPIOS GENERALES

Triangulación: una armadura es la unión de varios elementos lineales conformados en combinaciones triangulares que forman una armazón que no puede ser deformada por la aplicación de fuerzas externas sin deformar uno o más de los miembros que la conforman. Los elementos individuales son normalmente ensamblados en sus intersecciones por conexiones *pinadas*. Los miembros están dispuestos de tal manera que las acciones de las cargas ocurren únicamente en estos puntos.

El principio fundamental que define el uso de una armadura será que la conformación triangular de sus miembros dará como resultado una forma estable (Fig. 16).

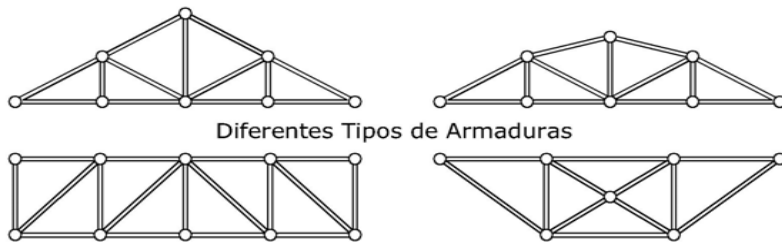


FIGURA 16: Diferentes tipos de armaduras.

Considérese las dos estructuras mostradas en la figura de abajo, la aplicación de una carga en la primera figura causa una seria deformación como se muestra, esta es una *estructura inestable* que tiende al colapso bajo la

³ Engel, Heinrich. **Sistemas de Estructuras**. H. Blume Ediciones. España, Última edición. 1998.

acción de fuerzas externas (Fig. 17 izquierda). Estructuras de este tipo no logran estabilidad cambiando la longitud de ninguno de sus miembros. La conformación mostrada en la segunda figura claramente no puede ser deformada por la acción de fuerzas similares. Esta conformación entonces puede ser considerada *estable* (Fig. 17 derecha). Cualquier deformación puede ser considerada menor y no afecta la función del elemento en conjunto. Así mismo, el ángulo formado entre los elementos permanece casi igual bajo la acción de las cargas. Esto en contraste con el cambio que se produce en la conformación de la otra estructura.

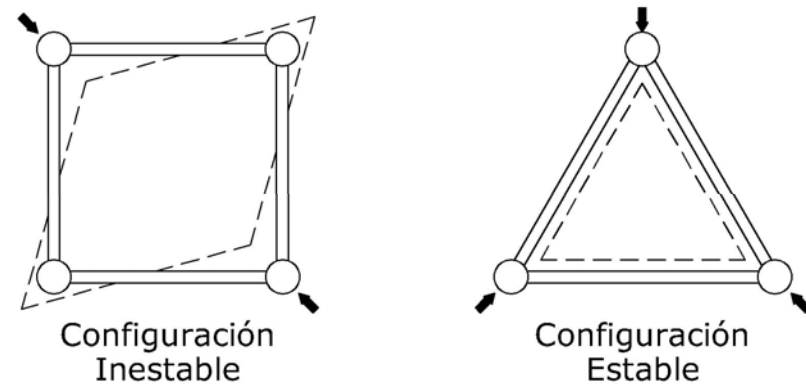
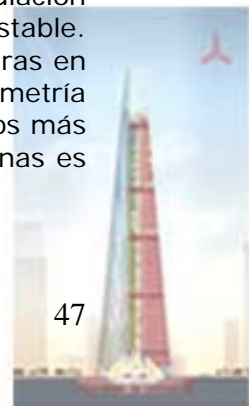


FIGURA 17: Configuración Inestable y Estable en Armaduras.

Así, una triangulación básica es una forma estable, por lo que, cualquier estructura formada por la triangulación de sus miembros es rígida y por lo consiguiente estable. Esta idea es el principio aplicado en el uso de armaduras en edificios, formas más complejas de cualquier geometría pueden ser originadas por la triangulación de miembros más pequeños. Nuevamente, el efecto de las cargas externas es





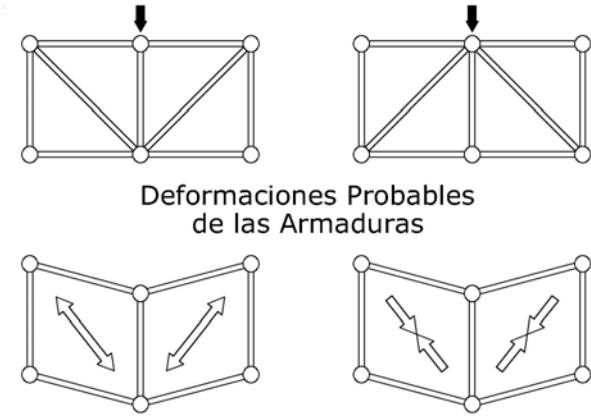
producir un estado de ya sea tensión o compresión simple, en los miembros que conforman la armadura. Para armaduras comunes con cargas verticales, las fuerzas de compresión son aplicadas a los elementos superiores y la tensión en los inferiores. En los miembros intermedios se presenta un efecto alterno entre tensión y compresión.

Es sumamente importante que las armaduras sean concebidas para soportar únicamente fuerzas a tensión o compresión en sus juntas, ya que la aplicación de una carga directamente en alguno de sus miembros causaría un efecto de flexión que afectaría el equilibrio de la estructura.

9.2 ANÁLISIS CUALITATIVO DE LAS FUERZAS

La naturaleza de las fuerzas en los elementos de una armadura puede ser determinada por las ecuaciones básicas de equilibrio. Para algunas configuraciones simples de armaduras, sin embargo, el sentido básico (tensión, compresión, cero) de las fuerzas en algunos miembros puede ser determinado por técnicas más sencillas de visualización de ciertas cargas externas.

Una forma de determinar el sentido de las fuerzas en una armadura es el visualizar e imaginar la deformación probable de la estructura si uno de sus miembros es removido.



Deformaciones Probables de las Armaduras

FIGURA 18: Análisis cualitativo de las fuerzas.

Otra forma completamente distinta de visualizar las fuerzas desarrolladas en una armadura es utilizar una analogía basada en arcos y cables.

Obviamente, ambos métodos son sumamente o casi imposibles de emplear en configuraciones más complejas. Para estos casos se presentan ciertos métodos más adelante.

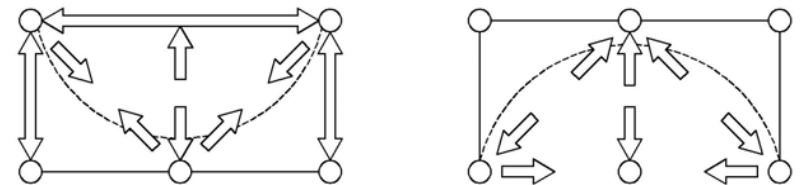


FIGURA 19: Analogía entre armaduras cables y arcos.





9.3 ANÁLISIS DE LAS ARMADURAS

Estabilidad: el primer paso para el análisis de una armadura es siempre determinar si la configuración de la armadura es estable. Es usualmente posible determinar por simple inspección si una armadura es estable bajo cargas externas si se considera cada nudo y la deformación que este va a sufrir en relación a la estructura completa.

La aparición de formas no triangulares en una armadura es un signo obvio de inestabilidad (Fig. 20). Aunque pueden darse combinaciones que aparentemente no presentan una triangulación que si sean estables (Fig. 21).

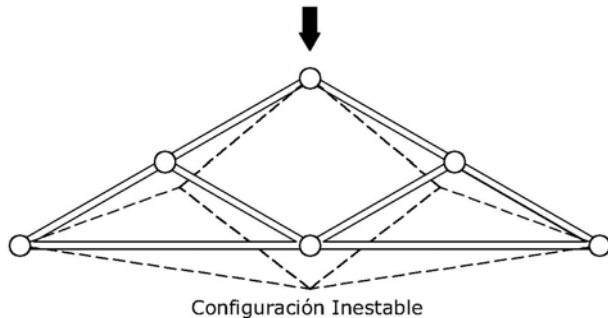
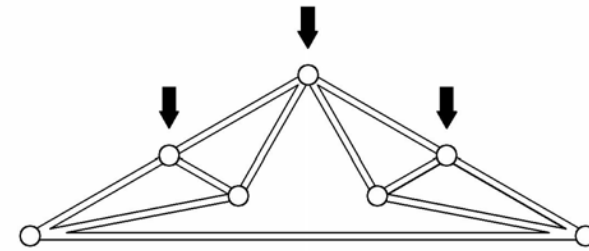


FIGURA 20: La falta de triangulación provoca inestabilidad.

La triangulación puede también ser usada para dar estabilidad a estructuras bajo cargas laterales.



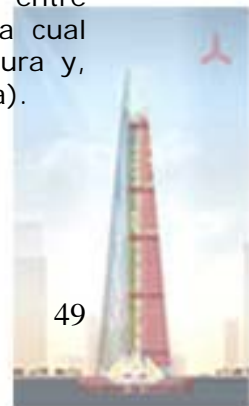
Configuración Estable

FIGURA 21: Conformación estable debido a la triangulación.

En ciertos casos, pueden ser usados cables para sustituir miembros rígidos, solo cuando estos miembros estén sometidos únicamente a tensión. Las consideraciones de estabilidad tomadas hasta el momento son basadas en que los elementos de las armaduras pueden soportar la tensión y la compresión de igual manera.

9.4 DISEÑO ESTRUCTURAL DE ARMADURAS

Existen varios aspectos para el diseño de armaduras, los principales incluyen la configuración total de la armadura, el patrón interno de triangulación y la selección del material. Variables importantes en las dimensiones incluyen la envergadura y tamaño de la armadura, la longitud de los elementos conformantes (particularmente los miembros en compresión), el espaciamiento entre armaduras y la ubicación transversal de la viga (la cual indica la dirección en que la carga afecta la armadura y, frecuentemente, la ubicación de los nudos en la misma).





Los objetivos de la eficiencia estructural son comunes y reflejan la intención de minimizar el uso de material y alcanzar la mayor seguridad y factibilidad de la estructura. La configuración externa y los patrones de triangulación interna son diseñados para alcanzar estos objetivos. Barras y cables pueden ser utilizados en su configuración.

Alternativamente, otro criterio de diseño puede basarse en la eficiencia constructiva, considerando la fabricación y construcción de la armadura. El responder a estos objetivos frecuentemente conlleva a una configuración simple de las armaduras. Igualmente la simple triangulación interna es usada para lograr una igualdad en las longitudes de los elementos conformantes. Como ayuda para lograr esta respuesta en lugar de dimensionar cada elemento respondiendo a la carga que este soporta, puede tomarse el elemento crítico como modelo para el dimensionamiento de todos los elementos conformantes. Con lo anterior se garantiza una fabricación y construcción más sencilla y eficiente.

Debe comprenderse que se utilizará uno u otro criterio, ya que el empleo de ambos puede llevar a un punto de contradicción o a diferentes respuestas de diseño.

9.5 CONFIGURACIONES

Las diferentes configuraciones son útiles para los diferentes propósitos y pueden ser factibles para diferentes claros y condiciones de carga.

Formas básicas: desde el punto de vista constructivo como estructural, las formas parabólicas y de postes paralelos son las más eficientes y útiles, y sujetas a útiles discusiones. Asumiendo que ambas son sometidas a

cargas idénticas, una forma de decidir entre ambas es considerar el corte y momento al cual va a estar sometido la estructura y la respuesta que daría ante las eventuales cargas. Los miembros superiores e inferiores frecuentemente cargan momentos primarios, y las fuerzas se desarrollan proporcionalmente al momento presente y a la altura de la estructura.

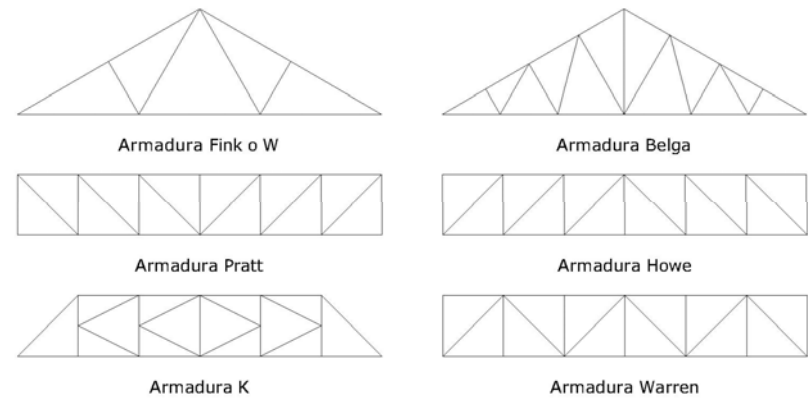


FIGURA 22: Otros tipos de composiciones en armaduras.

Armaduras de barras paralelas: en una armadura de barras paralelas, los momentos externos son resistidos por las barras superior e inferior. Así mismo, las fuerzas de corte son soportadas por los elementos diagonales ya que los elementos horizontales no pueden presentar una resistencia vertical a estas fuerzas. Las fuerzas en las diagonales varían conforme las fuerzas de corte varían; para asegurar un correcto funcionamiento de la armadura debe considerarse como parámetros de diseño los esfuerzos máximos en la estructura.





Diferentes organizaciones en las diagonales son posibles, con diferentes patrones de colocación en respuesta a diferentes fuerzas. En respuesta a lograr una mejor solución estructural ha de buscarse hacer trabajar la mayor cantidad posible de elementos a tensión en vez de a compresión. Esto puede lograrse prestando singular atención a la dirección en que ciertos miembros están orientados en la armadura.

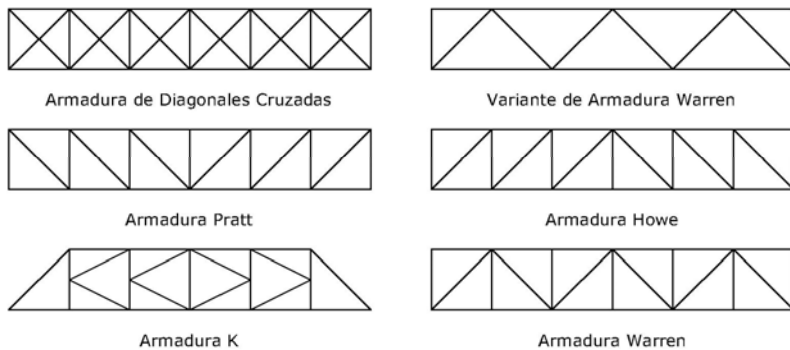


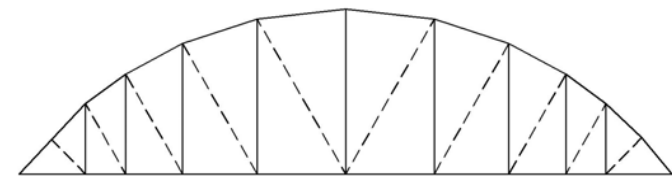
FIGURA 23: Armaduras de barras paralelas.

Los cables pueden ser usados como elementos a tensión dependiendo si las cargas no varían y se mantienen constantes. Si se emplean cables debe prestarse singular atención al hecho que no vayan a estar sometidos a la compresión.

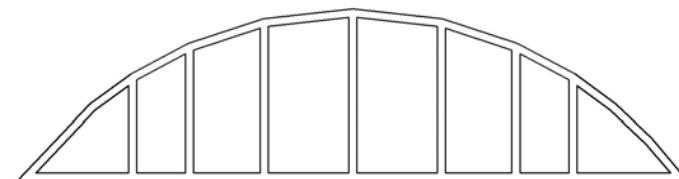
Basados en lo anterior podemos llegar a una conclusión básica, los elementos de una armadura deben ser diseñados tomando en consideración **cualquier** carga a la que puedan estar sometidos.

Armaduras de forma funicular: estas formas son a menudo bastante eficientes desde el punto de vista

estructural. Estas armaduras toman su forma según las cargas, reflejando la forma que asumiría un cable bajo las mismas cargas. La configuración corresponde a las magnitudes de los cortes y momentos presentes en la estructura. Así como el efecto flexionante va de mayor en el centro a menor en los extremos, así la forma de la estructura varía también. Los nudos están en consecuencia a varias alturas y los miembros conectados a diferentes inclinaciones. La forma conduce a las fuerzas de mas o menos la misma magnitud a los miembros superior e inferior; así mismo, los miembros inclinados pueden soportar fuerzas de corte a través de sus miembros verticales. Es importante hacer notar que la inclinación de los elementos aumenta en los extremos, en respuesta al aumento del esfuerzo de corte en estos puntos.



Armadura Funicular con Elementos Diagonales



Armadura Funicular sin Elementos Diagonales

FIGURA 24: Armaduras de forma funicular.





Conceptualmente, los elementos de fuerza cero pueden ser removidos creando formas no triangulares, siempre y cuando las cargas no cambien y se mantengan constantes, ya que si las fuerzas cambian la configuración de la estructura se tornaría inestable y colapsaría. La función de los elementos intermedios es la de soportar las fuerzas generadas por las cargas no uniformes que se presentan ocasionalmente en la estructura. Si las cargas son suspendidas en poste inferior en lugar del superior, los elementos verticales intermedios servirán como barras que transmitirán los esfuerzos al elemento superior.

Una de las últimas posibilidades de armaduras funiculares es la de *lente*, un análisis de esta armadura revelara que los elementos diagonales intermedios son miembros con carga cero y sirven únicamente para estabilizar la estructura bajo condiciones de carga variables.

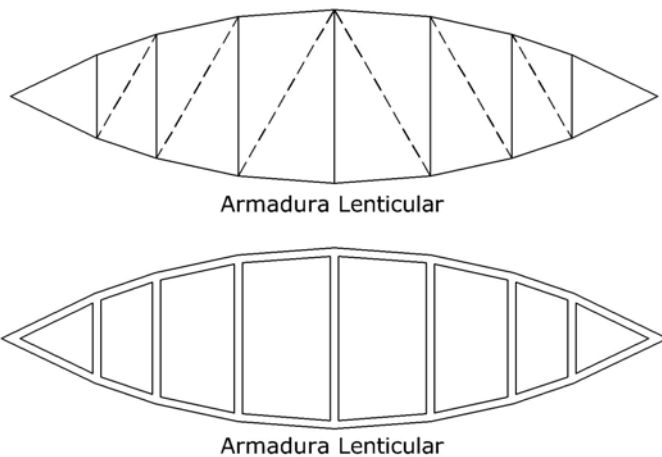


FIGURA 25: Armaduras de forma lenticular, con y sin diagonales.

Los elementos verticales tienen la función de equilibrar las cargas entre el elemento superior e inferior de la armadura.

En vez de concebir esta configuración de armadura como una forma especial, puede ser concebida como una combinación de arco y cable. Esta forma ha sido comúnmente utilizada en la construcción de puentes.

9.6 DIMENSIONES DE LAS ARMADURAS

Otra de las preguntas más frecuentes durante el proceso de diseño es ¿Qué tan grande ha de ser?, existe un tamaño óptimo en el diseño de una armadura. Como es de imaginarse, determinar el tamaño ideal minimiza el volumen total de la armadura y la hace más factible tanto estructural como constructivamente.

En general, la optimización del proceso de diseño revela que las armaduras son relativamente grandes en relación al claro que cubren y las excesivamente grandes reducen su funcionalidad y eficiencia. Los ángulos formados por las diagonales con respecto a la horizontal son normalmente de 45° a 60° , con 45° a menudo se obtienen buenas soluciones estructurales.

9.7 CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DE LOS MIEMBROS

Cargas críticas: la selección de los elementos físicos para el uso en cualquier configuración de armadura es de los aspectos más importantes en su diseño. El aspecto fundamental es considerar y diseñar el elemento en función de la carga que va a soportar. Para esto es necesario analizar y tomar en cuenta todas las cargas que van o





pueden llegar a actuar en el elemento, el cual se diseñara en respuesta a la máxima (crítica) fuerza posible.

Diseño de los miembros: una vez encontrada la fuerza crítica que actuara en los miembros, ahora el problema será la selección apropiada del material y las dimensiones de la sección de los miembros, así como la forma en que se trataran las uniones, sujetas a la acción de la tensión y la compresión. Para miembros en compresión hay que considerar la posibilidad del pandeo. En resumen, el objetivo de este diseño es crear una situación en la cual la mayor cantidad de miembros trabajen a tensión y los miembros que trabajen a compresión sean cortos para evitar el pandeo, alcanzando estos objetivos se requerirá menos material y se optimizaran los recursos.

Tamaño constante o variable de los miembros: el tamaño relativo de los miembros es diseñado en respuesta a las fuerzas que estarán presentes en ellas.

En lugar de variar el tamaño de cada miembro individual en respuesta a las fuerzas, puede ser más conveniente y menos costoso hacer diferentes piezas de un mismo tamaño y sección. De cualquier manera para tomar esta decisión es necesario tomar en cuenta otros factores. Cuando la cuerda superior es diseñada para ser de una sola pieza y sección, por ejemplo, la sección deberá ser aquella que resista el máximo esfuerzo presente en la cuerda superior. Dado que este esfuerzo ocurre sólo en una sección de la cuerda, deberá considerarse si esta sección no resultará excesiva para el resto de la misma, resultando ineficiente.

En resumen, cuando una armadura soportará una carga ligera, puede ser diseñada basándose en un esfuerzo máximo y así determinar su sección; en el caso de soportar

cargas muertas fuertes es mejor diseñar la armadura tomando en cuenta las fuerzas soportadas.

El pandeo y su efecto en la triangulación: la dependencia de la capacidad de carga de un miembro en compresión esta asociada a su longitud y es un objetivo del diseño lograr que estos sean cortos para alcanzar una mayor eficiencia. Los miembros en tensión no presentan mayor pandeo. Hay que hacer notar que los miembros superiores presentan una mayor tendencia a la compresión y pueden ser redimensionados basándose en esta consideración, así como se pueden redistribuir lo elementos dentro de la armadura para lograr una mejor respuesta.

9.8 ARMADURAS PLANAS O TRIDIMENSIONALES

Una serie de consideraciones deben tomarse en cuenta para decidir si se usara una armadura plana o tridimensional. ¿Cuál de los dos usa más material para soportar la misma cantidad de cargas? Nada indicaría que una estructura tridimensional usaría menos material, lo que probablemente es cierto. En claros armados en una sola dirección la utilización de armaduras planas resulta mas efectiva, entendiendo con esto que las armaduras tridimensionales son mas eficientes en claros armados en dos sentidos. Las armaduras tridimensionales proveen una gran eficiencia cuando son simplemente apoyadas.

9.9 ESTRUCTURAS ESPACIALES

La descomposición de fuerzas también puede ser efectuada en el espacio, o sea que cada carga se descompone en tres componentes en los ejes principales del espacio trigonométrico. En tal caso se obtiene mayor eficiencia por cuanto existe mayor descomposición de las cargas, participando más elementos en la misma, con lo





cual necesariamente aumenta la rigidez del sistema y se pueden lograr mayores claros que en las estructuras trianguladas planas.

la hace capaz de absorber cargas en cualquier dirección sin desestabilizar el sistema. Tienen también mayor capacidad de carga y su gran ventaja consiste en cubrir mayores claros sin apoyos intermedios. Las estructuras trianguladas planas también se emplean bajo el mismo principio pero hasta cierto límite, determinado no sólo por la resistencia del material sino por las cargas actuantes. Cuando se encuentra dicho límite, la solución inmediata superior son los entramados espaciales.

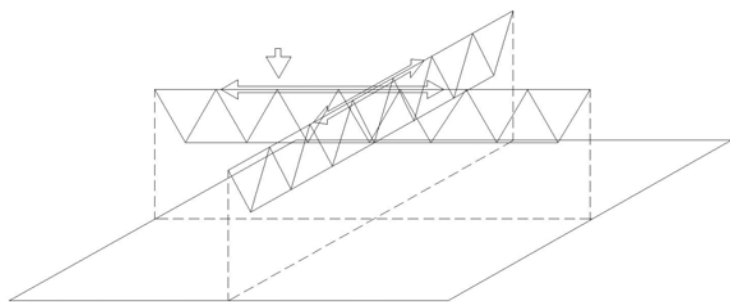


FIGURA 26: Intersección de armaduras de barras paralelas.

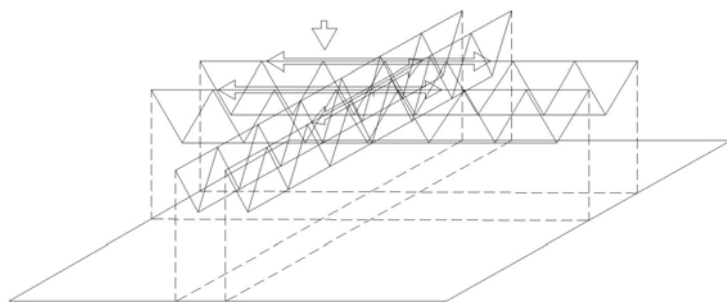


FIGURA 27: Intersección de armaduras de barras paralelas.

Esta descomposición se logra en tres dimensiones colocando las barras en el espacio en ángulos convenientes. La estructura se vuelve más rígida puesto que las barras se estabilizan mutuamente, por la triangulación espacial, lo que

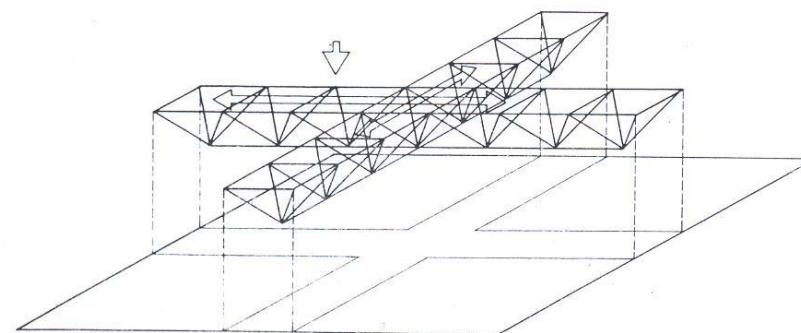
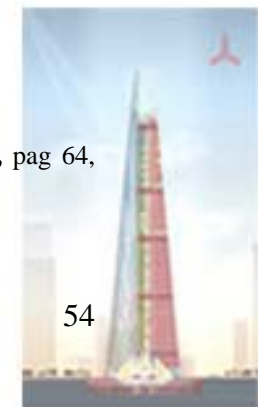


FIGURA 28: Concepción de una estructura espacial partiendo de la intersección de armaduras planas.

Con este sistema se pueden lograr no sólo superficies planas horizontales sino también curvas. La curvatura le da una rigidez adicional debido a su forma, lo que favorece la transmisión de cargas más fluidamente hacia los apoyos, dada la posición de la cubierta en relación a las cargas actuantes que en su mayoría son verticales.⁴

⁴ Jorge Escobar Ortiz, **Introducción a la Tipología Estructural**, pag 64, Segunda edición, Guatemala, 1997.



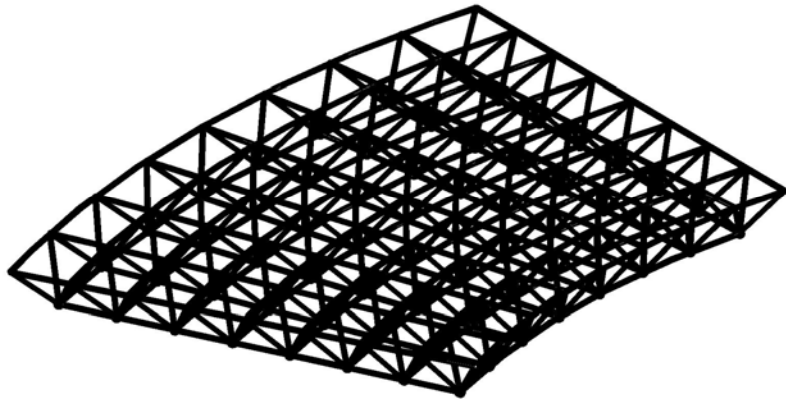


FIGURA 29: Estructura espacial.

Fuerzas en los miembros: las estructuras espaciales están típicamente conformadas por elementos lineales rígidos unidos en una repetición de patrones geométricos formando una estructura de cubierta horizontal. Son particularmente buenas para cargas uniformemente distribuidas pero no para cargas concentradas grandes. También son llamadas armaduras espaciales.

La importancia de los apoyos debe ser recordada. El uso de apoyos puntuales para estas estructuras es el menos deseable.

Diseño de la forma y sus elementos: una serie innumerable de arreglos geométricos pueden ser usados para crear la modulación de estas estructuras, desde un simple tetraedro hasta formas derivadas de los poliedros platónicos y arquimideanos.

Los módulos por sí mismos pueden asumir una variedad de geometrías y pueden aun funcionar estructuralmente.

El principal problema frecuentemente es menos estructural y más constructivo, ya que se tiene que definir la correcta unión de estos miembros, lo cual es difícil en geometrías complejas.

Las estructuras espaciales no tienen que ser necesariamente conformadas por módulos individuales; en su lugar, pueden ser hechas de planos cruzados de elementos lineales. Estas estructuras tampoco tienen que ser regulares, pueden ser diseñadas según condiciones propias del proyecto.

9.10 CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE LAS ARMADURAS

Probablemente la pregunta mas frecuente en el proceso de diseño será ¿qué forma debe tener la armadura? Desafortunadamente no hay una respuesta sencilla a esta pregunta. La configuración de la armadura estará influenciada tanto por los factores externos como por factores estructurales, constructivos y formales.

Habiendo comprendido como trabajan las armaduras podemos llegar al punto de plantear criterios sencillos para su selección y aplicación, como lo son los siguientes:

- **Función y Forma:** el uso de una armadura ha de ser correspondiente al espacio que se quiere generar con su empleo y a la forma que se desea obtener, por lo que lo su empleo estará condicionado por esta consideración.





- Las armaduras en forma de tijeras se emplearán en techos a dos aguas, no importando la forma de éstas, ya que mediante las diferentes conformaciones de la triangulación de los elementos se pueden lograr innumerables respuestas tanto formales como estructurales.
- Las armaduras de barras paralelas se pueden emplear en luces grandes de superficies planas, o como entrepisos, tomando en cuenta en este caso que la carga a la cual este sometida el elemento no sea mucha, ya que en este caso sería más efectivo otro sistema estructural.
- Incluir una curvatura en las armaduras aumenta su efectividad y resistencia a las diferentes cargas y esfuerzos, la forma curva en las barras paralelas superior e inferior complementa la triangulación de los elementos internos de las armaduras, en caso de usar esta opción será únicamente en cubiertas y no en entrepisos. Esta opción aumenta la posibilidad de cubrir claros más grandes.
- Las armaduras, tanto en su conformación de tijeras o de barras paralelas, pueden llegar a cubrir claros relativamente amplios pero las armaduras espaciales presentan una mayor factibilidad y funcionalidad en claros grandes y el resultado formal será más interesante.
- La ubicación de los apoyos en las armaduras será en sus extremos, por lo que su empleo

en espacios abiertos es recomendable, no importando su configuración en planta (rectangular, circular o irregular).

- El empleo de articulaciones en los apoyos, así como el los puntos intermedios de las armaduras, puede ser conveniente y recomendable para aumentar la posibilidad de cubrir un claro más amplio.
- Las dimensiones de los miembros conformantes en una armadura han de ser preferiblemente regulares e iguales, ya que al ser así se logra la optimización tanto de materiales como de su aspecto constructivo.
- Como se presentará en la tercera parte de este trabajo, el empleo de armaduras o estructuras espaciales puede ser combinado con otros sistemas estructurales, así como se puede dar una combinación de diferentes materiales para lograr respuestas formales más interesantes.
- Las armaduras, y fundamentalmente el principio de triangulación, no ha de limitarse únicamente a cubiertas, ya que su empleo en la respuesta volumétrica del proyecto puede aportar un valor agregado al mismo, así como una respuesta estructural más efectiva.





CAPITULO X

ESTRUCTURAS FUNICULARES: CABLES Y ARCOS

Pocos tipos de estructuras han apelado tan conscientemente a la imaginación de los constructores como los cables y arcos. Estos dos tipos de estructuras aparentemente distintos, comparten algunas características fundamentales que los hacen más similares de lo que parece, particularmente en términos de su comportamiento estructural.

Un cable sometido a cargas externas se deformará dependiendo de la magnitud y localización de la fuerza. (El termino *funicular* deriva de la palabra del latina que significa "cuerda".) Sólo fuerzas en tensión serán desarrolladas en los cables. Invertiendo la forma estructural obtenida producirá una nueva estructura que es exactamente alarga a la del cable, con la excepción que será la compresión la que actúe en lugar de la tensión. Teóricamente, la forma obtenida puede ser construida por elementos simplemente apoyados y la estructura resultante será estable. Cualquier mínima variación en la naturaleza de las cargas significara que la estructura dejara de ser funicular en su forma y el pandeo que se desarrolle puede ocasionar el colapso de toda la estructura. Debido a que tanto las estructuras a tensión y compresión que se derivan de la manera descrita y están relacionadas al concepto de una cuerda suspendida, colectivamente son consideradas como *estructuras funiculares*.

"Una materia no rígida, flexible, con una determinada forma y asegurada mediante extremos fijos, puede sostenerse a sí misma y cubrir un espacio: sistemas

estructurales de forma activa."⁵

10.1 PRINCIPIOS GENERALES DE LAS FORMAS FUNICULARES

De fundamental importancia para el estudio de los arcos y cables es el conocimiento de que curva exacta o elementos lineales definen la forma funicular para una determinada carga. La forma funicular es naturalmente asumida por la simple deformación del cable sometido a una carga. Un cable de sección constante que carga únicamente su propio peso se forma una *catenaria*. Un cable soportando una carga uniformemente distribuida a lo largo de la proyección horizontal del cable forma una parábola. Cables soportando cargas concentradas en ciertos puntos se deformaran en una serie de segmentos lineales.

La magnitud de las cargas desarrolladas en los arcos y cables, dependen relativamente su alto y largo y ambas guardan relación con la longitud, magnitud y localización de las cargas aplicadas. Entre más alto el arco o flojo el cable, mas pequeñas son las fuerzas internas desarrolladas en la estructura y viceversa. Las reacciones desarrolladas en los extremos del arco o cable dependen también de estos parámetros. Las reacciones en los extremos tienen tanto componentes verticales como horizontales que deben ser resistidos por los soportes u otros elementos.

Hay que hacer notar que en las estructuras funiculares, *su forma siempre cambia bajo cargas externas*. La forma apropiada para una carga continua por lo tanto debe cambiar continuamente. De manera similar, si la forma de la estructura cambia cuando no hay cargas, habrá

⁵ Engel, Heinrich. **Sistemas de Estructuras**. H. Blume Ediciones. España, Ultima edición. 1998.





flexión. La presencia de flexión será problemática o no dependiendo de cómo esta construida la estructura. Una estructura de mampostería sujeta a flexión desarrollara grietas y colapsara. Una estructura de acero, sin embargo, puede ser diseñada para que soporte tanto la flexión como las fuerzas axiales que se presenten.

10.2 ANÁLISIS Y DISEÑO DE ESTRUCTURAS CON CABLES

El puente suspendido, que fue inicialmente desarrollado en China, India y sur América, es de gran antigüedad. Mientras que puentes más recientes usaban cuerdas, normalmente hechas de bambú, existen pruebas que esta clase de puentes fueron usados en China en el siglo primero a.C. Además una serie de tiendas usaban cuerdas, por ejemplo, fueron usadas en 70 a.C. como cubierta de un anfiteatro romano. Así, existe una conexión entre los puentes suspendidos que usaban cables y la comprensión teórica de estos elementos estructurales. Este entendimiento teórico es de hecho, reciente, dado que el puente suspendido permaneció desconocido en Europa (aunque una estructura basada en una cadena suspendida fue construida en los Alpes Suizos en 1218), donde la mayoría de avances en teoría estructural se desarrollaban, hasta que en el s. XVI, cuando, en 1595, Fausto Veranzio publicó un dibujo de un puente suspendido. No fue hasta 1741 cuando en la ciudad de Durham, Inglaterra, se construyó un puente de esta naturaleza. Este puente fue el primero en Europa, aunque falló, estableció un precedente.

Un punto importante en la evolución de los puentes suspendidos ocurrió cuando en la primera parte del s. XIX en Estados Unidos, James Findley desarrollo un puente suspendido capaz de soportar tráfico vehicular. Su puente inicial, construido sobre Jacobs Creek en Uniontown,

Pennsylvania, utilizaba una cadena flexible de acero. La innovación de Findley no fue el cable, sino su anclaje, hecho de una armadura de madera. Este anclaje evitó que el cable perdiera su forma y, en consecuencia, que la superficie que soportaba mantuviera la misma. Con esta innovación los puentes modernos vieron su origen.

La aplicación de los cables a edificios aparte de tiendas se desarrolló con más lentitud debido a la poca necesidad de cubrir grandes distancia y los problemas inherentes a la aplicación de los cables. Sin embargo, James Bogardus presento una propuesta para el Palacio de Cristal en Nueva York en 1853, en la cual la cubierta de un edificio circular, 213 mts de diámetro, estaba suspendida de una serie de cadenas radiadas ancladas a una torre central; la estructura del pabellón de exhibición Nijny Novgorod diseñada por V. Shookhov en 1896 marcó el principio real de sus aplicaciones modernas. Desde entonces un número significativo de estructuras soportadas por cables han sido construidas.

10.2.1 CABLES SUSPENDIDOS: CARGAS CONCENTRADAS

Las reacciones en los cables son desarrolladas cuando éstos se encuentran en equilibrio. El cable normalmente ejerce una fuerza en los apoyos que actúa interiormente y hacia abajo. Las reacciones provistas por los soportes son de igual magnitud y en sentido opuesto. Usualmente no es posible calcular estas reacciones directamente sólo considerando el equilibrio del cable únicamente. Las reacciones son consideradas normalmente en sus componentes horizontal y vertical.





La forma exacta del cable no puede ser definida *a priori*, ya que ésta dependerá de las cargas que en este se aplique. Los procedimientos de análisis tienen como objetivo definir esta forma.

Las fuerzas internas en los cables están invariablemente en estado de tensión. Un cable puede ser concebido como una serie de elementos continuos conectados unos a otros por conexiones colgantes (una cadena sería el ejemplo obvio). Por lo tanto, cada elemento es libre de rotar según se aplique la carga. Las conexiones serán tales que los momentos internos de flexión no serán transmitidos unos a otros. Por consiguiente, la suma de todos los efectos de rotación internos o externos en cualquier punto ha de ser cero (este es el principio fundamental para calcular la geometría y fuerzas presentes en el cable).

En un cable o arco, el corte externo en una sección está balanceado por una fuerza de corte interna provista por el componente vertical de la fuerza axial interna desarrollada en el cable o arco. El momento externo de flexión en la misma sección es balanceado por un momento desarrollado por el componente horizontal de la fuerza axial del elemento funicular y por la fuerza horizontal actuante del elemento de soporte.

10.2.2 CABLES SUSPENDIDOS: CARGAS DISTRIBUIDAS UNIFORMEMENTE

Los cables y arcos soportando cargas uniformemente distribuidas pueden ser analizados de manera similar a los de cargas concentradas, ya que la forma funicular es constantemente curva. Sin embargo existen ciertas variantes en los métodos analíticos.

10.2.3 DISEÑO DE ESTRUCTURAS CON CABLES

Las estructuras soportadas por cables son categorizadas de mejor manera si se dividen en estructuras en suspensión o estructuras soportadas por cables. Las estructuras en suspensión pueden ser subdivididas en: 1. estructuras de simple curvatura, las cuales están conformadas por cables colocados de manera paralela y emplean superficies formadas por vigas o losas para cubrir los espacios entre los cables; 2. estructuras de cables dobles, en las cuales se interconectan los cables en diferentes curvaturas pero en el mismo plano vertical; y 3. estructuras de doble curvatura, en las cuales una serie de cables de diferentes curvaturas y usualmente inversas crean la superficie de cubierta. Las estructuras soportadas por cables emplean típicamente un elemento de soporte vertical del cual penden los cables y soportan una superficie.

10.2.4 CABLES SIMPLEMENTE SUSPENDIDOS

Los sistemas de cables suspendidos son capaces de cubrir grandes luces. Para ciertos claros y condiciones de carga uno de los criterios fundamentales de diseño es la determinación de la flecha del cable. La fuerza, longitud y diámetro de la sección dependen de esta holgura. Los sistemas simplemente suspendidos son especialmente susceptibles a los efectos del viento, los que han causado la destrucción de muchas de estas estructuras en el pasado. Ciertas consideraciones especiales serán tomadas para prevenir la estabilidad causada por el viento. Por ejemplo, las tensiones en los cables, que afectan el periodo natural de vibración de un cable y por lo consiguiente su susceptibilidad a la misma, pueden ser controladas. Varios anclajes o formas de sujeción de la superficie pueden ser empleados también.





10.2.5 FLECHAS EN LOS CABLES

Las fuerzas en las estructuras, y por lo tanto su tamaño, son claramente dependientes de la flecha o elevación del cable y la envergadura de la estructura. Debido a esto, encontrar la flecha apropiada del cable se convierte en un problema de optimización, ya que si la flecha aumenta, aumenta su longitud y sección.

10.2.6 ELEMENTOS DE SOPORTE

Además de los cables, otros elementos estructurales son necesarios para crear la estructura. Los elementos soportan el cable en el espacio y proveen los medios para transferir sus cargas vertical y horizontal al suelo. El diseño de estos elementos es tan fundamental como el diseño de los cables mismos.

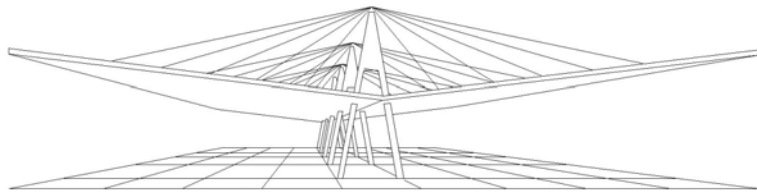


FIGURA 30: Elementos de soporte en estructuras con cables.

Un criterio fundamental de diseño es como absorber las cargas horizontales ejercidas directamente a través de los cimientos, riostras o cualquier otro elemento suplementario de apoyo. El diseño de la cimentación, para absorber tanto la carga horizontal como vertical es difícil,

pero es factible, dependiendo del suelo y otras condiciones. El uso de riostras para lograr un soporte a la compresión horizontal es menos frecuente, dado a la longitud variable de estos miembros y a la tendencia al pandeo que estos presentarían.

10.2.7 SISTEMAS DE DOBLE CABLE

Los sistemas de doble cable son respuestas interesantes al problema ocasionado por la acción del viento y el efecto vibratorio, el cual hace el uso de sistemas de cables simples, problemático. Una estructura de este tipo esta compuesta típicamente por un par de cables pretensados y riostras o ataduras que funcionan juntas para cargar una fuerza externa.

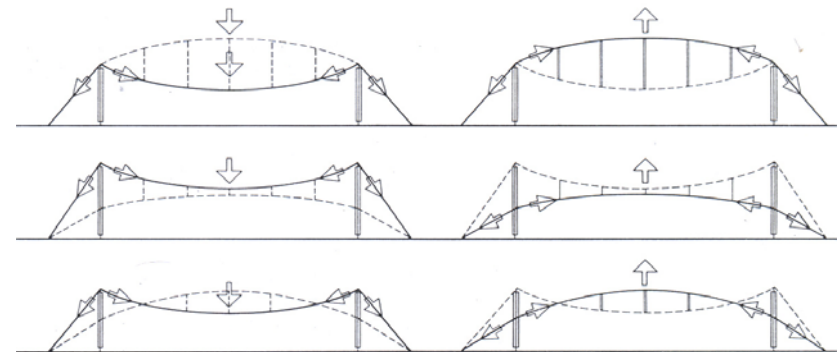


FIGURA 31: Funcionamiento de los sistemas de doble cable.

El comportamiento dinámico de este tipo de estructuras es interesante, ya que la frecuencia natural de vibración de un cable depende de su tensión y la ésta en ambos cables es diferente, es evidente que habrá una





diferencia en la frecuencia de vibración. La frecuencia natural del cable inferior tendera siempre a ser diferente al cable superior. Como una fuerza externa causará la vibración de ambos cables, uno de ellos vibrará de forma natural y el otro amortiguara las vibraciones en el ya que no tienen la misma frecuencia de vibración. El resultado será que ninguna de las oscilaciones será amortiguada, ya que ninguno de los dos cables podrá entrar en vibración debido al efecto amortiguador del otro con una frecuencia natural diferente.

Es posible, sin embargo, que toda la estructura (que deberá tener su propia frecuencia natural, distinta de aquella de sus elementos constitutivos) entre en resonancia. La frecuencia natural del sistema entero está relacionada con la combinación de frecuencias individuales y será mayor que cada una de ellas. Si el cálculo de esta frecuencia combinada se hace con el suficiente cuidado, el peligro de que la velocidad del viento cause una resonancia significativa queda minimizado al punto de no existir peligro.

10.2.8 ESTRUCTURAS SOPORTADAS POR CABLES

Muchas estructuras comunes con cables para edificios como para puentes incorporan vigas y columnas como elementos rígidos. El sistema de cable y mástil es frecuentemente usado en edificios para reducir el espacio ocupado por otros sistemas de anclaje.

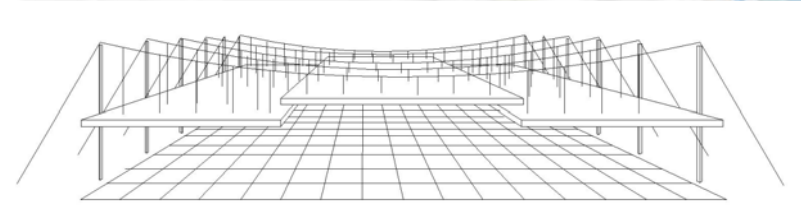


FIGURA 32: Estructura soportada por cables.

En una estructura típica, las cargas externas son compartidas entre los cables y el elemento de cubierta principal, funcionando en sus propios términos como una viga o una armadura. El número de cables usado depende del tamaño y esbeltez del elemento de cubierta. Los cables pueden ser mínimamente separados y vigas y columnas relativamente pequeñas pueden ser usadas, o separados ampliamente y utilizar vigas y columnas masivas. En general, estas soluciones se utilizaran cuando la respuesta estructural no pueda ser alcanzada simplemente por vigas o armaduras.

Los cables por sí mismos están invariablemente en tensión. Determinar las fuerzas en ellos puede ser simple o complejo, dependiendo de el numero de cables que conformen el sistema y la esbeltez de las vigas o armaduras. Un procedimiento útil para una primera aproximación al cálculo de una estructura de esta naturaleza es ignorar el tamaño de los elementos complementarios y asumir que todas las cargas serán soportadas por los cables.

Los ángulos formados por los cables portantes y las cargas suspendidas son críticos. Pequeños ángulos serán evitados, ya que no proveerán un soporte necesario para los elementos en suspensión y las fuerzas desarrolladas en ellos serán extremadamente altas.





Los mástiles o postes serán diseñados como columnas y los elementos suspendidos como vigas continuas. Cuando se planea utilizar un solo juego de cables, como en muchos puentes, la sección de estos deberá ser diseñada para soportar significativas cargas de torsión propias del balanceo de los elementos suspendidos.

10.3 ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARCOS

10.3.1 ARCOS DE MAMPOSTERÍA

Los arcos tienen sus raíces en la antigüedad. Los arcos de mampostería desarrollan su capacidad de resistir cargas de su geometría curva, la cual causa únicamente fuerzas de compresión entre los bloques que lo conforman. Esta clase de estructuras es incapaz de resistir efectos de tensión, lo que ocasionaría la inmediata fractura y potencial inestabilidad de toda la estructura. Para que un arco de mampostería colapse, de cualquier manera, es necesario que se desarrolle más de una fractura. Los cambios significativos en su forma acompañados a las fracturas pueden causar su colapso.

La analogía del arco como un cable invertido, y por lo tanto, una estructura sujeta únicamente a fuerzas de compresión, ya ha sido descrita. Estrictamente hablando, las formas de los arcos de mampostería son raramente funiculares, son parabólicos para cargas uniformemente distribuidas, así como los cables. Ciertamente, los arcos semicirculares comunes no son parabólicos, un hecho que sugiere que cierta flexión y cambio de forma es inducido en la estructura lo que puede llevar a ciertas tensiones y por lo tanto a fracturas. La forma funicular puede ser mantenida fácilmente con la inserción de un bloque grande (clave) en la estructura. Si este bloque se encuentra en el medio de la tercera parte no se producirá efecto de tensión alguno.

La carga primaria en los arcos de mampostería es normalmente su peso propio. Las cargas inusuales en arcos de una curvatura regular, tales como fuertes cargas concentradas, pueden causar excesiva flexión y ocasionar el fallo de la estructura. Dichas cargas deberán ser evitadas, a menos que este sea diseñado específicamente para resistirlas. En la mayoría de los casos, las cargas muertas exceden a las vivas, y las fuerzas de compresión asociadas a las cargas muertas de un arco de mampostería dominan a las fuerzas de tensión ocasionadas por las cargas vivas, con la consecuencia que dichas estructuras pueden soportar diversos tipos de cargas sin llegar al colapso. La piedra angular no juega un papel importante desde el punto de vista estructural. Dependiendo del diseño, esta piedra puede ser útil para integrar el arco a la mampostería circundante.

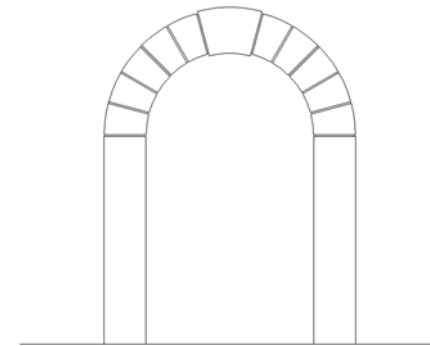


FIGURA 33: Arco de mampostería.

Es importante hacer notar que en la actualidad los arcos de mampostería ya no son utilizados, debido a sus limitaciones y a la opción de ser sustituidos por otras formas de arcos rígidos (concreto reforzado) los cuales presentan





un sinnúmero de ventajas en relación a los de mampostería, aun así, es apropiado conocer su funcionamiento y orígenes para con esto comprender el comportamiento de los arcos usados en la actualidad.

10.3.2 ARCOS PARABÓLICOS RÍGIDOS: CARGAS UNIFORMEMENTE DISTRIBUIDAS

Con la llegada del acero y concreto reforzado, la rigidez inherente de estos materiales dieron origen a la posibilidad de formas mas versátiles en los arcos, debido a que esta rigidez permite que los arcos mantengan su forma ante cargas eventuales. La forma de un arco moderno es usualmente diseñada en respuesta a una carga definida y soporta las cargas axiales por compresión cuando dichas cargas están presentes, aunque también es diseñado para tener suficiente resistencia a la flexión con cargas variantes; debido a esto, la estructura no será funicular para las nuevas cargas. Es por esto que los marcos rígidos son fundamentalmente diferentes a los cables flexibles. Un cable flexible siempre cambia su forma bajo diferentes cargas y es sin embargo carente de momentos bajo todas las cargas, mientras que un arco rígido es carente de momentos solo bajo una carga (dependiendo de su forma), pero es capaz de soportar alguna flexión debida a las variaciones de carga.

Para una carga uniformemente distribuida, la forma ideal de un arco será parabólica, cabe recalcar que esta condición es ideal.

10.3.3 DISEÑO ESTRUCTURAL DE LOS ARCOS

Aspectos formales generales: existe una relación estrecha entre la forma de una estructura y las cargas que soportan si la estructura se ha de comportar de manera funicular. Cuando la forma de la estructura corresponde a la

forma funicular de las cargas, no existe un efecto de flexión significativo y se da un mejor aprovechamiento de los materiales. Un arco soportando cargas uniformemente distribuidas deberá ser parabólico para mantener su carácter funicular. Otras formas son apropiadas para otro tipo de cargas. Esto no significa que formas funiculares no pueden ser empleadas, pero, se debe prestar más atención al diseño del arco y sus elementos conformantes. Un arco continuo es una estructura hiperestática. Se requieren tres articulaciones para que sea isostático y de cuatro para que se vuelva un mecanismo.

Elementos de soporte: como en los cables, un problema básico en el diseño de arcos es como absorber los efectos horizontales de algunos elementos. Cuando es funcionalmente posible, barras de amarre pueden ser empleadas; dado a que estas barras trabajan a tensión es una excelente forma de darle equilibrio al sistema. La cimentación entonces sólo debe ser diseñada para soportar cargas verticales.

Con frecuencia hay menos necesidad de ubicar a los arcos sobre elementos verticales debido a la altura que por si solos proveen; cuando exista la posibilidad de ubicar los arcos directamente en el suelo debe tomarse. Así las barras de amarre pueden enterrarse y facilitar el diseño de la cimentación. Si los arcos deben usarse sobre soportes verticales, el uso de contrafuertes es preferible al diseño de elementos que trabajen a flexión.

Comportamiento lateral de los arcos: una de las primeras consideraciones en el diseño es el comportamiento lateral del arco. Es obvio que un arco típico, que descansa sobre un plano vertical, debe ser prevenido de sufrir volteo. Hay dos mecanismos de prevenir este efecto. Uno es emplear conexiones articuladas, lo cual puede traer ciertas





desventajas. Para estructuras grandes, el uso de conexiones articuladas conlleva el empleo de grandes cimentaciones para evitar el volteo. El otro método, y más comúnmente empleado para alcanzar la estabilidad lateral es emplear elementos transversales a los arcos. Un par de arcos ubicados en los extremos y estabilizados mediante elementos diagonales pueden estabilizar a una serie de arcos intermedios conectados únicamente por elementos transversales.

Diseño para cargas variables: uno de los aspectos más significativos de los arcos modernos es que pueden ser diseñados para soportar la variación de cargas sin que se vea afectada o dañada su forma. Únicamente los arcos construidos con materiales que provean esta rigidez, tal como el concreto reforzado o el acero, poseen esta capacidad.

La forma de un arco es definida por las cargas que actúan en él. Si una carga diferente actúa en él, la flexión actuara en los elementos que lo componen además de los efectos de compresión axiales. En este punto, el aspecto más importante para el diseño de un elemento que soporte la flexión es su dimensionamiento; a mayor flexión, mayor el tamaño del elemento, si una carga llega a ser muy grande el diseño deja de ser factible. Tomando esto en cuenta debe considerarse como un criterio fundamental de diseño, el lograr la menor presencia de flexión en la estructura.

10.3.4 ARCOS TRIPLEMENTE ARTICULADOS

Los arcos y cables considerados previamente han sido asumidos con una forma funicular. Dado a que no existen momentos de flexión, la suma de los momentos rotacionales producidos por la acción externa de fuerzas y reacciones en cualquier elemento de la estructura, es cero.

Si la estructura no es funicular, esta condición de equilibrio de momentos bajo la acción de fuerzas y reacciones externas existe únicamente en las juntas o articulaciones, donde la libertad de rotación entonces será permitida. Tal es el caso de los arcos triplemente articulados.

Esta respuesta estructural es la unión de dos secciones rígidas conectadas al suelo y entre sí por articulaciones. No importando la forma de los segmentos una forma funicular es producida por las cargas.

Este tipo de estructura fue desarrollada por ingenieros alemanes y franceses a mediados de s. XIX, en parte para resolver ciertas dificultades de cálculo presentes en las formas usuales de los arcos. La incorporación de las articulaciones en la base y punto superior, permite el cálculo exacto de las fuerzas y la determinación exacta de la forma funicular de los elementos confortantes. Estructuras grandes pueden ser calculadas entonces con gran precisión.

Antes de entrar de lleno al estudio de los arcos doble y triplemente articulados es conveniente dar una definición de articulación, la cual sería: el punto de unión entre dos elementos en donde se permite la rotación moderada de los mismos.

Modelado de los arcos triplemente articulados: como se ha descrito, estos pueden tomar cualquier forma, pero la lógica estructural conlleva a mantener una forma funicular. Por ejemplo, las fuerzas desarrolladas en las articulaciones no dependen de la forma de los dos elementos, sino que, dependen de las cargas y geometría presente. Gracias a que las cargas pueden ser determinadas de manera exacta, esto ayuda a determinar la forma de los elementos que conforman estas estructuras.





10.3.5 COMPARACIÓN ENTRE ARCOS DOBLEMENTE Y TRIPLEMENTE ARTICULADOS

Existen tres tipos de arcos descritos normalmente por sus condiciones de apoyo: triplemente articulado, doblemente articulado y de apoyo fijo. Para los arcos funiculares diseñados para la carga que soportan, reacciones básicas, superficies de conexión, cortes y momentos internos, pueden ser determinados por las ecuaciones básicas de equilibrio. Los arcos doblemente articulados y de apoyo fijo son más complicados de analizar cuando están sujetos a cargas inusuales y cuando hay efectos de flexión. Los arcos triplemente articulados son estáticamente determinados y son estructuras sencillas de analizar.

El comportamiento estructural de los tres tipos de arcos puede ser comparado en todas sus condiciones, excepto en el tipo de apoyo que usan, además no son tan diferentes en su forma funicular si se diseñan de acuerdo a las cargas que soportan. Las fuerzas internas de compresión son similares. Las diferencias más significativas aparecen, sin embargo, cuando se consideran otros factores. Entre estos se pueden considerar el tipo de apoyos, los efectos de expansión y contracción de los elementos de soporte bajo los cambios de temperatura, y la relativa deflexión inducida por la aplicación de las cargas.

En general, los diferentes tipos de apoyo son ideales con respecto a diferentes fenómenos. La presencia de articulaciones es útil cuando los elementos de soporte sufren cambios considerables de temperatura, dado que las articulaciones permiten que las estructuras se expandan libremente. Momentos de flexión indeseables pueden ser generados por fenómenos similares en arcos con apoyos fijos. El arco con apoyos fijos tiende a deflectarse menos, bajo una misma condición de carga que los arcos doble y

triplemente articulados. Estos últimos pueden resultar problemáticos debido a la flexibilidad que presentan frente a ciertas cargas.

La elección de la condición de apoyo dependerá de condiciones precisas de diseño, aunque los arcos doblemente articulados son utilizados más frecuentemente dado que presentan una combinación de las ventajas de los otros dos tipos de arcos y no así, sus desventajas.

10.4 CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ARCOS

“Los sistemas estructurales de forma activa, a causa de su dependencia de las condiciones de carga, son gobernados estrictamente por la disciplina del flujo «natural» de las fuerzas, y por ello no pueden llegar a someterse al proyecto arbitrario y libre de la forma. La forma y el espacio arquitectónico son el resultado del mecanismo sustentante.

El arco y el cable colgante, a causa de ser solicitados exclusivamente por simple compresión o tracción, son los sistemas más económicos para cubrir un espacio, atendiendo a la relación peso-luz.”⁶

Los criterios para estos sistemas estructurales serán:

- El arco empotrado se presenta con mayor frecuencia en túneles y puentes de concreto reforzado. Mantener la condición de empotramiento (ninguna rotación) en la base, en general, no es factible en el caso de arcos

⁶ Engel, Heinrich. **Sistemas de Estructuras**. H. Blume Ediciones. España, Última edición. 1998.





de claros muy largos, así que esta forma se utiliza más a menudo para claros cortos a medianos. Se puede presentar en la acción de una serie de arcos construidos uno después del otro con sus pilas de apoyo.

- El arco de dos articulaciones es la forma más común para claros largos. La base articulada es más factible para un arco grande y no (está sometida a fuerzas producidas por cambios de temperatura como el apoyo empotrado. Este arco también es indeterminado, aunque no tanto *como* el arco empotrado.
- El arco de tres articulaciones es una forma muy aceptada para las cubiertas de edificios de claro mediano. Las razones principales de su aceptación son las siguientes:
 1. Las bases articuladas se construyen con mayor facilidad que las empotradas, lo que hace que las cimentaciones superficiales sean razonables para las estructuras de claro mediano.
 2. La expansión y contracción de los segmentos del arco por cambios térmicos, provocan el desplazamiento vertical de la articulación de la cima; sin embargo, en las bases no se presentan efectos apreciables. Ello simplifica aún más el diseño de la cimentación.
 3. La construcción a menudo se puede lograr prefabricando las dos secciones del arco (con mayor frecuencia de madera laminada unida con pegamento o acero soldado) y

conectándolas en la cima en la obra. La junta articulada es una conexión mucho más fácil de lograr en estas circunstancias.

- El empleo de cables como mecanismo de sustentación de cubiertas ha de estar condicionado por la presencia de un elemento masivo (mástil) que sirva de "resistencia" para lograr la tensión en los cables.
- Tanto los cables como los arcos están limitados en su mayoría a ser sistemas estructurales factibles para claros grandes y como sustentación de cubiertas, ya que se perderían las ventajas de estos al emplearse, por ejemplo como entrepisos.
- Como se vera en la tercera parte de este trabajo, el uso de cables y arcos es la opción mas lógica para la construcción de puentes, tanto por la efectividad de la respuesta estructural como por la respuesta formal.
- La configuración en planta para el empleo de arcos ha de quedar limitada a espacios circulares o rectangulares, ya que formas irregulares vendrían a causar esfuerzos innecesarios y peligrosos para el correcto funcionamiento de la estructura resultante.





CAPITULO XI

ESTRUCTURAS MEMBRANÁCEAS Y REDES

Una membrana es una superficie flexible y delgada que soporta una carga primaria a través del desarrollo de fuerzas de tensión. Las redes son conceptualmente similares, excepto que su superficie está conformada por cables entrelazados. Una burbuja de jabón es el ejemplo clásico para ilustrar lo que una membrana es y como se comporta. Como sus contrapartes lineales, este tipo de superficies tienden a adaptar su forma a las cargas que soportan. Estas son también muy susceptibles a los efectos del viento, lo que puede causar que las membranas ondeen. Consecuentemente, la mayoría de las membranas que son usadas en edificios son estabilizadas de tal manera que conserven su forma al ser sometidas a diferentes cargas.

Hay diversas formas de estabilizar una membrana o red. Un marco de soporte rígido, por ejemplo, puede ser usado. Es de especial interés, la estabilización a través del tensado, lo cual es logrado por la aplicación de una fuerza externa que tire la superficie para que alcance la forma deseada.

La forma básica de soporte de cargas de una membrana es la tensión. Una membrana soportando una carga normal en su superficie se deforma en una curva tridimensional (dependiente de la forma exacta de la carga y del soporte) y soporta la carga por fuerzas de tensión en los diferentes planos desarrollados por la membrana. El soporte de cargas es similar al de los sistemas de cables cruzados. Además de los esfuerzos de tensión, un tipo de corte tangencial es desarrollado en la estructura. Este esfuerzo es asociado con el giro que está normalmente presente en las

superficies curvas y que ayuda a soportar las cargas. Si la membrana es estabilizada, la tensión en dos sentidos y la acción de corte tangencial, tienen como resultado que la superficie de la estructura trabaje de manera funicular, siempre y cuando los esfuerzos no sean de compresión, lo que ocasionaría que la membrana perderá su forma.

De acuerdo a lo anterior, un principio fundamental de diseño es simplemente mantener la estructura en tensión bajo el efecto de cualquier carga.

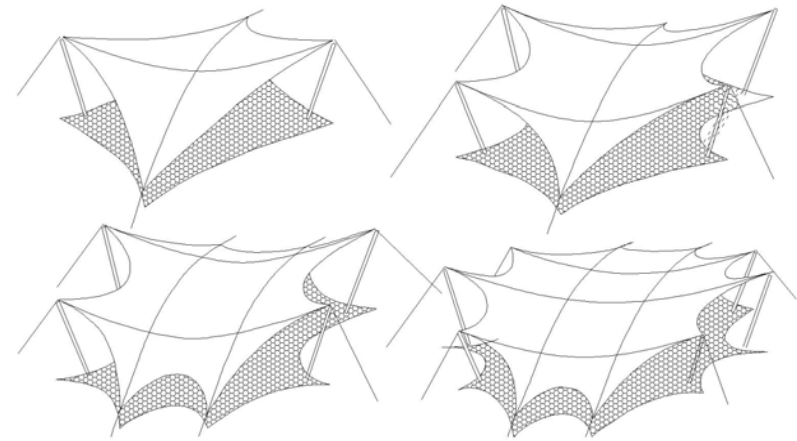


FIGURA 34: Diferentes tipos de estructuras membranáceas.

11.1 ESTRUCTURAS NEUMÁTICAS

Otra forma de sustentación de las membranas y que resulta realmente innovadora, producto de la inventiva e ingenio del hombre, es el uso de la presión de aire como estructura. En las membranas estructurales como en los globos inflables, la presión de aire hace que la membrana





*adapte su forma a la presión, poniéndose en tensión cuando alcanza su extensión máxima al inflarse. Las formas obtenidas con este sistema son, como es de suponerse, esferoidal es ya que la esfera es la figura que resulta de una distribución de presiones uniforme.*⁷

estructuras usan aire como medio de presurización pero otros fluidos pueden ser usados.

Existen dos tipos primarios de estructuras neumáticas:

- Estructuras soportadas por aire
- Estructuras infladas

Una estructura soportada por aire consiste en una membrana simple (que encierra un espacio útil) que es soportada por una pequeña presión diferencial. El volumen interno del aire en el edificio es mayor al atmosférico. Una estructura inflada es soportada por aire presurizado contenido en los elementos constructivos. El volumen interno del edificio se mantiene igual al atmosférico. También existen híbridos y combinaciones.

En ambos tipos de estructuras, la presión del aire induce esfuerzos de tensión en la membrana. Bajo la presión de cualquier tipo de carga, la presión interna deberá ser lo suficientemente alta para prevenir esfuerzos de compresión, los cuales serán percibidos como doblajes y deformaciones. La estabilidad completa es alcanzada cuando toda la estructura permanece en tensión. Sin embargo la presión interna no deberá sobrepasar la capacidad de resistencia del material.

La efectividad de las estructuras soportadas por aire reside en mantener una presión poco mayor a la atmosférica y que no cause molestias a los ocupantes. Si las cargas externas son uniformes, entonces, la presión interna será igual a ellas y las soportara directamente. Dado a que las cargas externas son siempre relativamente pequeñas, la presión será similar. La imagen correcta para visualizar estas estructuras es como una bolsa inflada, más que como la llanta de un automóvil.

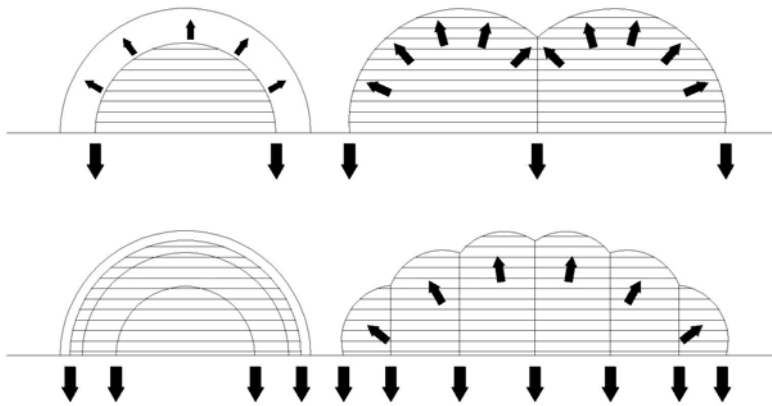


FIGURA 35: Comparación y ejemplificación del funcionamiento de las estructuras soportadas por aire y estructuras infladas.

Estabilizar una membrana mediante la presurización es posible cuando la membrana encierra un volumen. Una clase de membranas llamadas estructuras neumáticas obtienen su estabilidad de esta manera. En la arquitectura, este tipo de estructuras es reciente, la tecnología básica de este tipo de estructuras ha sido conocida por mucho tiempo, pero hallan su origen en los globos y zeppelines que cruzan los cielos desde hace muy poco tiempo. Muchas de estas

⁷ Jorge Escobar Ortiz, Ibid, Pág. 64.





Las estructuras infladas tienen un mecanismo de soporte diferente. Aire presurizado es usado para inflar las superficies que conforman el edificio. Existen dos tipos básicos de estructuras infladas: las estructuras con nervio y las estructuras de doble pared. Una estructura con nervio esta conformada por una serie de tubos que son usualmente arqueados y cubren un espacio. Las de doble pared consisten en estructuras de membranas paralelas. El espacio entre ellas es presurizado. Las estructuras infladas tienden a requerir una mayor presurización que las estructuras soportadas por aire. Esto se debe a que la presurización interna no puede ser usada directamente para balancear las cargas externas, pero puede ser usada para formar superficies que lo hagan de una manera más tradicional.

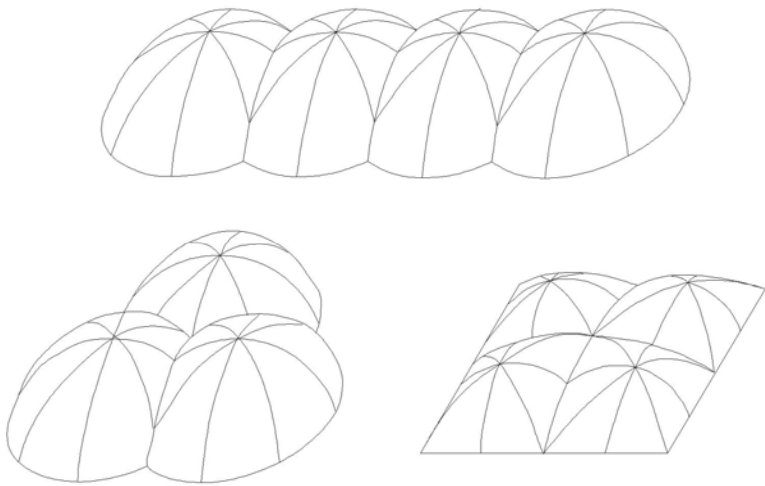


FIGURA 36: Ejemplos de formas resultantes en estructuras infladas.

En general, las estructuras soportadas por aire son capaces de cubrir claros mas grandes que las estructuras infladas. Ocasionalmente la combinación de ambas puede resultar en una solución más viable.

11.1.1 ESTRUCTURAS SOPORTADAS POR AIRE

Tipos de cargas externas: algunas condiciones de carga son de especial interés para este tipo de estructuras. Varios tipos de cargas pueden acumularse en ellas. La nieve por ejemplo, pero esto se evita utilizando formas esféricas, las cuales permiten el deslizamiento de la misma.

Esfuerzos en las membranas debidos a la presión interna: las fuerzas en los diferentes planos de una membrana inducidos por la presión interna dependen directamente de la forma y las dimensiones de la estructura, así también la magnitud de la presión interna presente.

Presión interna requerida: la presión interna requerida deberá ser suficiente para evitar que la membrana se doble, no importando la combinación de cargas presente. Diferentes puntos en la superficie de la esfera deberán de revisarse para encontrar la presión ideal, la cual será la mayor de todas las presiones encontradas y la usada para estabilizar la estructura. Debe recordarse que esta presión no ha de superar la capacidad de resistencia del material.

Condiciones de apoyo: como una estructura soportada por aire es mantenida en el suelo es un problema de diseño crucial. Por ejemplo, el problema del sello hermético. Desde un punto de vista mas estructural que arquitectónico, el problema dominante es que la estructura ejerza la presión suficiente para mantenerla en pie y, dependiendo de la forma exacta de la misma, las fuerzas horizontales que se desarrollen.





El diseño de los apoyos debe resistir ambas fuerzas para lograr el anclaje de la estructura. En estructuras grandes, una solución usual es un anillo de base. En estructuras de perfil bajo las fuerzas horizontales serán directas por lo cual es preferible el uso de refuerzos interiores al uso de un anillo base.

Estos anillos serán circulares para formas esféricas; para otras formas, el objetivo del diseño será minimizar la tensión o compresión lo cual condicionará la forma del anillo.

En estructuras soportadas por aire que cubren claros grandes y son soportadas por cables, las uniones entre la membrana y los cables son problemáticas y deberán ser tratadas con especial cuidado.

11.1.2 ESTRUCTURAS INFLADAS

Las estructuras infladas conducen las cargas al suelo de una manera más tradicional que las soportadas por aire. Elementos comunes como vigas, columnas o arcos pueden ser rígidos mediante la presurización interna apropiada. Una esfera de doble pared, por ejemplo, actúan como una cáscara rígida delgada. Estructuras como estas pueden ser susceptibles al quiebre.

11.2 ANÁLISIS Y DISEÑO ESTRUCTURAL DE REDES Y TIENDAS

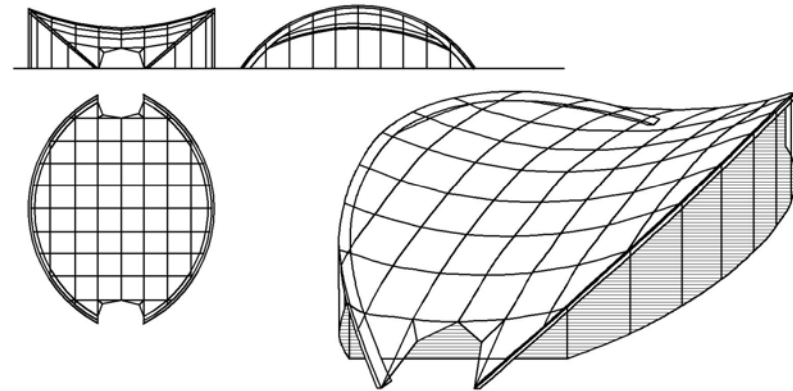


FIGURA 37: Estructura conformada por red y membrana.

11.2.1 CURVATURAS

Para superficies que obtienen su estabilidad a través de fuerzas de tensión, las superficies planas deben ser evitadas y las curvaturas, mantenidas. Estas pueden ser aseguradas prestando una particular atención a los puntos altos y bajos. Dos puntos altos deben ser siempre separados por uno bajo y viceversa.

11.2. 2 CONDICIONES DE SOPORTE Y APOYO

La mayoría de estructuras son soportadas por una serie de puntos de apoyo discretos. Los principales puntos altos son usualmente mástiles, que actúan a compresión, diseñados como grandes columnas. Los puntos bajos usualmente son conexiones al suelo. Grandes fuerzas tirantes están presentes en estas conexiones, dado que el





efecto de tensión se logra al estirar la membrana, es de utilidad ubicar cables de refuerzo en los bordes entre los puntos altos y bajos.

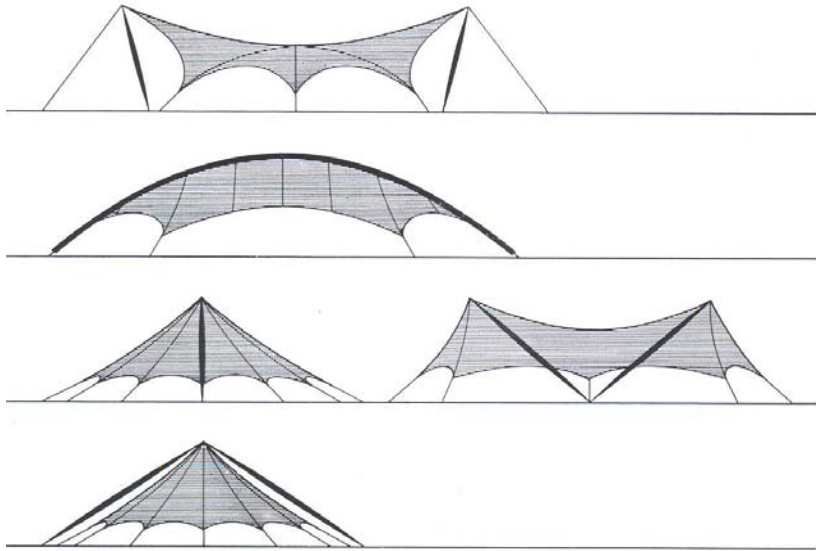


FIGURA 38: Formas de sustentación de estructuras membranáceas.

El número y ubicación de los soportes generalmente determina la cantidad de fuerza presente en los mástiles y en los amarres al suelo. Entre más soportes, menos la carga en cada elemento individual. Debe tomarse en cuenta también que el uso de demasiados amarres y soportes deriva en menos curvaturas.

11.2.3 DETERMINACIÓN DE LA FORMA

Encontrar la forma exacta de una estructura membranacea o estructura de red es difícil, así como lograr una doble curvatura con materiales reales. La distribución final de las fuerzas en la membrana, por supuesto, depende de encontrar la forma. El problema de esto es la presencia de diferentes fuerzas de tensión usadas en diferentes direcciones. Incluso encontrando la forma exacta, llevarla a cabo es difícil. Dado que estas superficies no son simples de desarrollar, el uso de hojas de un material plano para conformar la superficie es común. Usualmente, la superficie está hecha por piezas no uniformes especialmente cortadas. Determinar la forma de estas piezas es una tarea ardua así como su unión y su conexión a los soportes y apoyos.

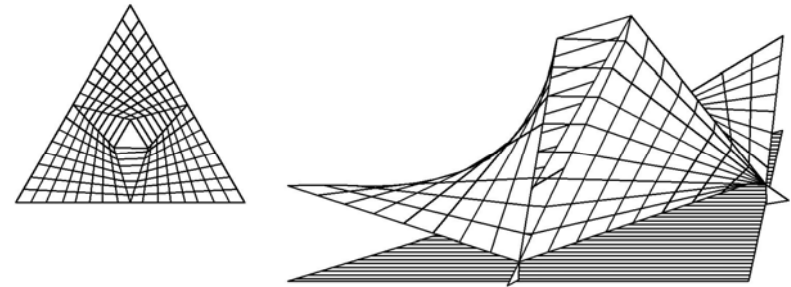


FIGURA 39: Configuración volumétrica de una estructura membranacea.

Para este tipo de estructuras es conveniente el uso de modelos a escala, ya que éstos proveen una aproximación real de las formas, curvaturas y apoyos necesarios, aunque, en los modelos a escala no pueden llegar a preverse a cabalidad los efectos reales de las fuerzas a las cuales va a estar sometida la estructura.





El uso de complejos programas de computación es de gran ayuda para encontrar la forma exacta de una de estas estructuras, así como para lograr determinar la forma de cada uno de los elementos conformantes.

11.3 MATERIALES

Los aspectos de selección del material incluyen tanto los aspectos estructurales como características de uso. Las membranas están sujetas a una intensa condición de esfuerzo biaxial. Muchas fábricas poseen diferentes resistencias y propiedades de estiramiento a lo ancho y largo, aspectos que deben considerarse tanto en el diseño formal como estructural.

Comúnmente las fábricas utilizan varios tipos de poliéster recubierto con PVC, fibra de vidrio cubierta con teflón o fibra de vidrio cubierta con silicón. Aquellas que poseen poliéster son susceptibles a la degradación con el tiempo. Las membranas pueden ser reforzadas con cables.

Los cables típicos usados en las estructuras de redes son de acero, en el cual los factores a considerar y tomar en cuenta son su resistencia a la corrosión y factor de expansión térmica.

11.4 CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRUCTURAS MEMBRANÁCEAS Y REDES

Sus características de funcionamiento estructural son también similares a las del cable; gran eficiencia estructural con mínimo peso propio de la estructura; rigidez transversal despreciable que lleva a la necesidad de cambiar de forma para soportar cada estado de fuerzas diferente; transmisión de elevadas fuerzas de anclaje concentradas en algunos

puntos y con dirección inclinada que exigen una estructura de soporte que puede resultar particularmente costosa.

- En el caso de las estructuras neumáticas, han de ser recomendables para espacios temporales, ya que su facilidad de instalación las hacen convenientes para este tipo de espacios.
- Al emplear este tipo de estructuras ha de tomarse una particular atención a las instalaciones, ya que el uso de ductos o cormas convencionales de localización de estas no es del todo aplicable para este tipo de estructuras.
- La diferencia fundamental entre una estructura soportada por aire y una inflada es que en la primera se ejerce una presión uniforme en su interior, lo cual define su forma, y en las segundas, es que estas poseen paredes paralelas, en cuyo interior se encuentra el fluido sustentante de la estructura.
- Las formas posibles para este tipo de estructuras si bien han de estar limitadas por la curvatura resultante de la distribución uniforme del fluido interno, pueden ser complementadas y definidas por elementos rígidos que definan formas distintas y "sugieran" la dirección que deba tomar el fluido.
- Como en los cables, las redes han de contar con elementos de soporte masivos, que han





de considerarse en el diseño preliminar y tomarse en cuenta su forma como un apoyo y complemento para la respuesta formal del proyecto.

- La versatilidad del material conformante de las membranas hace de este un elemento ideal para lograr espacios “completos” que incorporen el uso de la luz y color como apoyo a la forma.
- Las membranas, por su mínimo peso propio, son ideales para cubrir espacios amplios y evitar apoyos intermedios.
- Otro criterio sumamente importante es que las membranas pueden complementar casi cualquier otro sistema estructural, dado a su flexibilidad y versatilidad, tanto en el aspecto constructivo, funcional y formal.
- Al emplearse membranas debe considerarse el reforzar sus bordes con cables u otros elementos, aún más en los puntos de anclaje, ya que estos son los que sufren mayores esfuerzos.
- La configuración en planta para espacios cubiertos por membranas es ilimitada, ya que la flexibilidad del material hace que cualquier forma sea posible.
- Las redes son mas elementos decorativos que estructurales, ya que éstas no proveen una cubierta por sí mismas y no llegan a definir completamente un espacio.

S
a
j
m
u
a
y
n
a
P
a
G
b
a
l
r
o
c
i
a





CAPITULO XII

CÁSCARAS

Una cáscara es una estructura delgada, rígida, tridimensional, encerrada en un volumen definido por una superficie curva. Una cáscara puede asumir virtualmente cualquier forma. Las formas comunes incluyen superficies en rotación, generadas por la rotación de un elemento curvo entorno a un eje. Superficies regladas, generadas por el deslizamiento de segmentos lineales a lo largo de dos planos individuales curvos. También se pueden generar una amplia variedad de complejas superficies formadas por una combinación de superficies rotadas, en traslación y regladas.

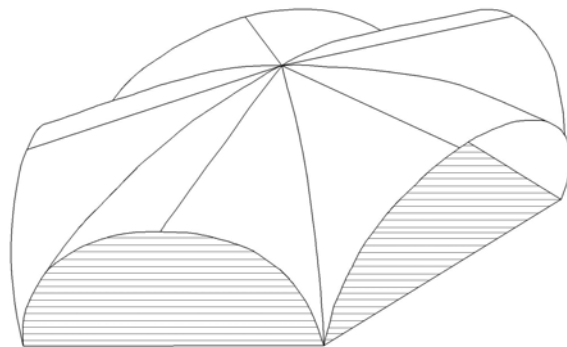
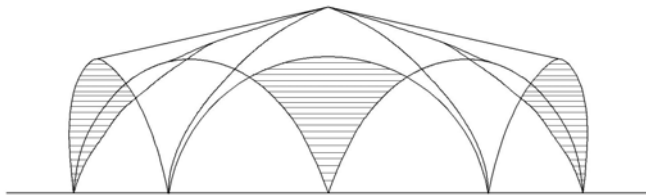


FIGURA 40: Ejemplo de una cáscara.

Las cargas aplicadas a las cáscaras son transmitidas al suelo mediante el desarrollo de esfuerzos de tensión, compresión y corte actuando en la dirección del plano de la superficie. El poco espesor de la superficie no permite el desarrollo de fuerzas de flexión apreciables. Este tipo de superficies se adaptan de manera que soportan cargas distribuidas. Sin embargo no son factibles para soportar cargas concentradas.

Existe una amplia gama de posibilidades tanto en la forma de las cáscaras como en la capacidad de cubrir claros, esto debido a la implementación de nuevos materiales e innovaciones en el campo estructural.

“Las superficies, limitadas y determinadas en su forma, constituyen un instrumento y un criterio en la definición del espacio. Las superficies en el espacio dividen a éste y, al dividirlo, lo limitan formando así nuevo espacio.

Las superficies son los medios geométricos más eficientes e inteligibles para definir el espacio del interior al exterior, de plano a plano, de espacio a espacio.

Las superficies, debido a su naturaleza para formar y determinar espacio, son la abstracción elemental a través de la cual la Arquitectura se afirma a sí misma; tanto como idea como realidad.

En la construcción, los elementos superficiales, si dan ciertas cualidades, pueden desempeñar funciones resistentes: son las superficies estructurales. Sin otra ayuda adicional pueden alzarse libremente en el espacio y al mismo tiempo soportar cargas.

Las superficies estructurales pueden combinarse para





formar mecanismos que transmitan fuerzas, sistemas estructurales de superficie activa. La continuidad estructural de los elementos en dos direcciones, es decir, la resistencia superficial frente a esfuerzos de compresión, tracción y cortantes son el requisito previo y la primera característica de las estructuras de superficie activa."⁸

Estructuras tridimensionales más antiguas, como domos de mampostería, son considerablemente más gruesas en relación al claro que cubren y no pueden ser caracterizados que soportan cargas por esfuerzos en el plano o por corte, debido a que existe mayor flexión y los esfuerzos no son uniformes, por lo cual no pueden ser considerados como cáscaras.

Formas tridimensionales pueden ser hechas también del ensamble de barras cortas y rígidas. Estas estructuras, no son estrictamente cáscaras, pero por su comportamiento estructural pueden incluirse en esta clasificación, tomando en cuenta únicamente su rigidez y forma, no su conformación.

Para minimizar las dificultades de construcción envueltas en el uso de barras de diferentes longitudes para formar estas superficies, se han creado diferentes sistemas con el afán de lograr el uso de barras de igual longitud. El sistema más difundido es el domo geodésico asociado a Buckminster Fuller. Debido a que la superficie de una esfera no es alcanzable, el número de patrones repetitivos idénticos en los que puede ser dividido una superficie es limitado.

⁸ Engel, Heinrich. **Sistemas de Estructuras**. H. Blume Ediciones. España, Última edición. 1998.

El icosaedro esférico, por ejemplo, consiste en 20 triángulos equiláteros, pero la necesidad de sub dividir la superficie tiene como resultado el uso de barras de diferentes longitudes. Las ventajas de estas formas no son mayores de las inherentes a los domos reticulados.

Los cascarones pueden tomar formas muy variadas y se prestan a crear estructuras de gran belleza. Las de geometría más sencilla son los cascarones cilíndricos, o *superficies de traslación*, que son las que se generan por la traslación de una línea curva o recta sobre otra línea curva plana.

Las *superficies de rotación* se forman por la rotación de una curva plana sobre un eje vertical, como la cúpula esférica o la parabólica. Una superficie de este tipo se puede visualizar como formada por meridianos que transmiten por compresión las cargas hacia los apoyos y por paralelos que restringen la deformación transversal de los meridianos, trabajando a tensión en algunas zonas y a compresión en otras.

Las *superficies regladas* son las que se forman por la traslación de los dos extremos de una recta sobre dos curvas planas (o rectas) distintas. Los más comunes de estos cascarones son el paraboloides hiperbólico como el que se forma al deslizar los extremos de dos rectas sobre los de otras dos, y el hiperboloides que se obtiene al hacerla sobre dos círculos.

12.1 ACCIÓN DE LAS MEMBRANAS EN LAS CÁSCARAS

Una buena forma de entender el comportamiento de cualquier cáscara bajo el efecto de una carga es concebirla como una membrana, un elemento tan delgado que solo desarrolla fuerzas de tensión. Una membrana soportando la





acción de una carga se deforma en una curva tridimensional que resiste la carga por tensión en el plano en el cual es ejercida la carga. El mecanismo básico de soporte de cargas de una cáscara es similar al que se produce en una membrana invertida. Es importante saber que existen dos grupos de fuerzas internas en la superficie de una membrana que actúan en direcciones perpendiculares. También es importante considerar la existencia de un tipo de un esfuerzo de flexión tangencial en la superficie de la membrana que ayuda a soportar la carga aplicada.

12.2 CÁSCARAS ESFÉRICAS

Esta sección considera un tipo específico de cáscara, la cual es formada de una porción de una superficie esférica. Previo a su análisis, es útil prestar mas atención a como estas cáscaras trabajan y que tipos de fuerzas actúan en sus elementos conformantes.

12.2.1 TIPOS DE ESFUERZOS EN LAS CÁSCARAS ESFÉRICAS

La existencia de dos juegos de fuerzas en direcciones separadas en la superficie de una cáscara esférica, hace que esta actúe de manera similar a una placa en dos sentidos. Las fuerzas de corte entre las tiras adyacentes en las placas y que contribuyen al soporte de las cargas, están presentes en las cáscaras también.

Estas dos características – el desarrollo de fuerzas de corte y los dos juegos de fuerzas axiales, no concentradas, en vez de una – caracteriza la diferencia entre el comportamiento estructural de una cáscara y de una serie de arcos de geometría similar que se desarrollan en torno a un eje. En un arco, no existe flexión si éste está diseñado de manera funicular.

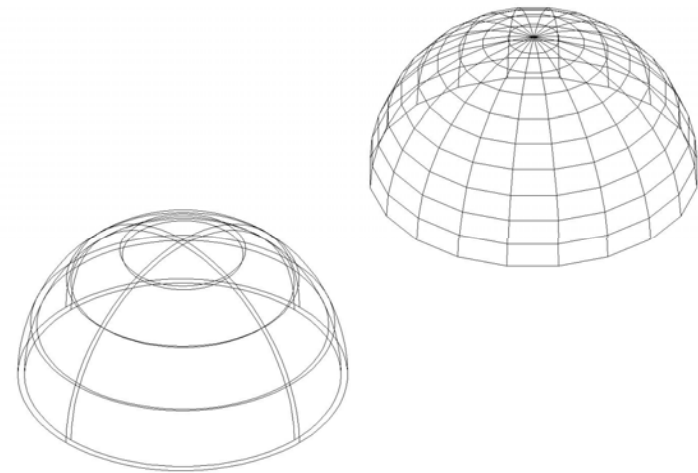


FIGURA 41: Cáscaras esféricas.

En una cáscara, las fuerzas en el meridiano son inducidas por la totalidad de las cargas y no son como aquellas presentes en un arco análogo. Estas fuerzas en los aros actúan en dirección de la circunferencia y perpendicularmente a las fuerzas en el meridiano. Estas fuerzas en los aros restringen el desplazamiento de las tiras causado por cargas parciales. En una cáscara, esta fuerza evita la flexión en la dirección del meridiano. Como consecuencia, una cáscara puede soportar variaciones en las cargas debido al desarrollo de esfuerzos en el plano únicamente.

Las fuerzas en el meridiano bajo la acción vertical de las cargas es siempre de compresión, sin embargo, las fuerzas en los aros pueden ser tanto de tensión como de compresión, dependiendo de su ubicación en la cáscara.





12.2.2 CONDICIONES DE APOYO: ANILLOS DE TENSIÓN Y COMPRESIÓN

Una consideración importante en la naturaleza de una cáscara son sus condiciones de apoyo. De la misma manera que los contrafuertes o barras de apoyo son usadas para el apoyo y soporte de los arcos, ciertos elementos pueden ser usados para el apoyo de las cáscaras.

Un anillo plano y circular, llamado anillo a tensión, puede ser usado para contener la base de un domo y contener las acciones de empuje de las fuerzas meridionales. Si un agujero fuera abierto en la parte superior de un domo, el anillo que contiene las fuerzas meridionales presentes en esa sección, actúa a compresión.

Un anillo a tensión absorbe completamente todas las acciones horizontales. Cuando esta descansa directamente en el suelo, provee una condición propia para la transmisión de las reacciones verticales al suelo; alternativamente, estos anillos pueden ser apoyados en otros elementos, los cuales soportarán cargas verticales únicamente.

12.2.3 OTRAS CONSIDERACIONES

Muchos de los factores que han sido tomados en cuenta para otros sistemas estructurales (cargas, materiales, formas, etc.) deben de tomarse en cuenta en el diseño de las cáscaras. Adicionalmente, debe evitarse que estas estructuras sufran pandeo. Cuando la curvatura de una de estas superficies es relativamente plana, tiende a ser susceptible a este fenómeno, lo cual puede ser prevenido usando curvaturas más pronunciadas. Esta necesidad, sin embargo, limita la extensión de las cáscaras sobre claros grandes.

12.3 CÁSCARAS CILÍNDRICAS

El comportamiento estructural de las formas definidas por superficies en traslación está sumamente influenciado por sus proporciones y sus condiciones de apoyo.

En una bóveda, apoyada en paredes, la superficie se comporta de manera similar a una serie de arcos paralelos, siempre que las paredes puedan proveer las reacciones necesarias. Si la superficie es rígida, esta presenta una acción de placa, la cual es útil para soportar cargas no uniformes. Esta clase de acción también ocurre cuando el apoyo es una viga rígida, la cual transmite los esfuerzos a los apoyos por flexión.

El comportamiento de una cáscara muy corta difiere apreciablemente de una descrita anteriormente, ya que las cargas serán transferidas a los apoyos de manera similar que en las placas.

Cuando una estructura se vuelve mucho más larga que ancha, una acción completamente diferente se presenta, particularmente si los bordes son soportados por vigas, ya que estas tienden a ser más flexibles si su longitud aumenta, por lo cual no proveerán un soporte adecuado a las acciones presentes.

Dicho de otra manera, el efecto de pandeo presente en la viga influirá en el comportamiento de la cáscara, por lo cual, el comportamiento de esta ante los diferentes tipos de acciones variará y por lo tanto no cumplirá con su función.





12.4 CÁSCARAS: HIPERBÓLICAS Y PARABOLOIDES

El comportamiento de las cáscaras que poseen superficies regladas puede ser entendido imaginando las curvaturas formadas por las líneas que lo conforman. Si en ella existe alguna restricción, una acción similar a la de un arco existirá en las regiones de curvatura convexa, y una acción similar a la de un cable en las de curvatura cóncava. La presencia de tensión o compresión en la superficie dependerá de las acciones presentes en ella. Cuando una superficie es demasiado plana entonces trabaja más como una placa o una losa que como una cáscara, en tal caso predominara la flexión. Si las orillas no están soportadas, existirá un comportamiento de viga.

Una superficie reglada puede ser hecha trasladando los extremos de una línea recta sobre dos líneas paralelas pero giradas. Dicho de otra manera, una superficie en traslación puede ser descrita como una generada por la traslación de una parábola convexa sobre una cóncava, o viceversa. Los esfuerzos in este tipo de cáscara serán tanto de tensión como de compresión dependiendo de su dirección de desplazamiento.

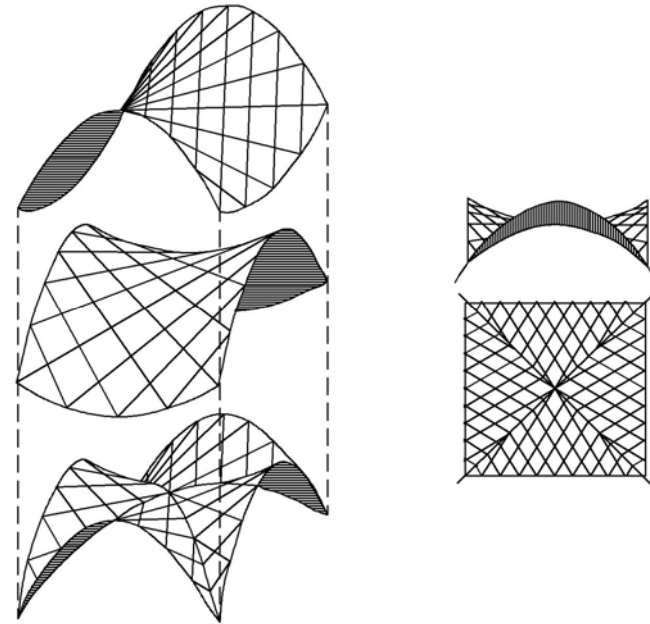


FIGURA 42: Aplicación de las cáscaras.

12.5 ESTRUCTURAS DE PLACAS PLEGADAS

La rigidez de una placa puede ser incrementada dramáticamente no usando una superficie plana, pero tomando en cuenta que esta forma responda a la exigencia estructural buscada (aumentar la resistencia). La forma resultante de la placa, con una sección que puede ser la unión de una serie de elementos unidos por sus bordes. Estas estructuras son llamadas *placas plegadas*.



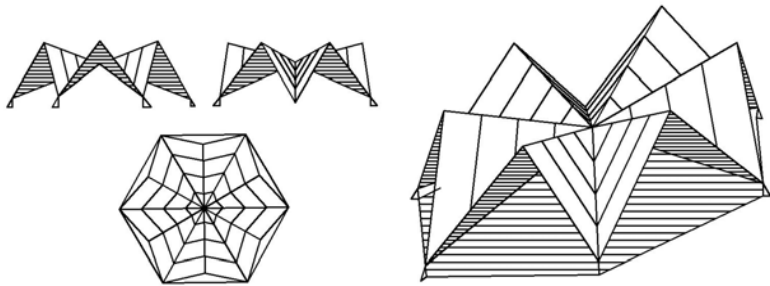


FIGURA 43: Estructura conformada por placas plegadas.

Una característica de estas estructuras es que las placas individuales que la conforman son más largas que anchas. Un principio de diseño será apartar la mayor cantidad de materia posible del centro de la estructura. Siendo delgadas las placas pueden aumentar su resistencia, pero solo si se evita el efecto de pandeo ocasionado por la compresión. Dada esta situación, el pandeo no es un problema, y la capacidad máxima de resistencia de los planos puede ser alcanzada. El ángulo formado entre los elementos conformantes deberá ser relativamente agudo para fortalecer la estructura.

La forma real en que las cargas son soportadas en las placas plegadas es mejor comprendida considerando dos tipos de acción de las vigas: transversal y longitudinal.

Consideremos primero la acción transversal. De la misma forma en que un plano soporta a otro, el primer plano también puede proveer una superficie continua de apoyo. Las cargas de las superficies son transmitidas a los pliegues adyacentes por una acción transversal. Si la conexión rígida entre los planos es usada, ésta se

comportará como una viga continua. Una vez las cargas son soportadas por los planos, estas son transferidas de manera longitudinal a los apoyos.

Es crucial que el ángulo entre los planos se mantenga constante. Un desplazamiento transversal puede ocurrir y con esto reducir la capacidad de carga de la estructura sustancialmente. Este fenómeno puede ocurrir en los planos de los extremos, para prevenirlo pueden usarse planos más rígidos en los extremos y en el centro en estructuras que cubren claros muy grandes. Si no se usan rigidizantes, la rigidez de las juntas debe revisarse para evitar desplazamiento.

12.6 CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE CÁSCARAS

“En las estructuras de superficie activa es fundamental una forma adecuada que transmita las fuerzas actuantes y las reparta por toda la superficie en tensiones de pequeña magnitud. El conseguir una forma eficaz para la superficie desde los puntos de vista estructural, utilitario y estético es un acto creador: arte.”⁹

- Comprendiendo que las cáscaras trabajan fundamentalmente por su forma, habrá que tomarse en cuenta en su diseño que ángulos demasiado cerrados o agudos, en el caso de placas plegadas, o de curvaturas muy pronunciadas repercutirán de manera negativa en toda la estructura.
- Debido a su forma, las cáscaras son estructuras ideales para lograr una integración entre el entorno y

⁹ Engel, Heinrich. **Sistemas de Estructuras**. H. Blume Ediciones. España, Última edición. 1998.





el elemento arquitectónico, ya que pueden lograrse formas muy sutiles como versátiles.

- Por su forma, las cáscaras han de proveer una gran variedad de posibilidades para espacios carentes de apoyos intermedios, así como espacios interiores muy interesantes, susceptibles de gran manera al empleo de la luz y color en las superficies resultantes.
- Tanto en planta como en su expresión volumétrica, las cáscaras presentan una gran variedad de posibilidades, limitadas más por el aspecto constructivo y económico que por el estructural.
- En este tipo de estructuras, tanto la utilización del concreto como de placas metálicas complementan las posibilidades de expresión formal. El deconstructivismo de líneas curvas es un exponente actual de este tipo de sistema estructural.

S
a
j
m
u
a
y
n
o
a
P
a
G
b
a
l
r
o
c
i
a





CAPITULO XIII

ESTRUCTURAS MASIVAS

“Los elementos lineales rectos pueden determinar ejes y dimensiones, longitud, altura y anchura. A causa de esta propiedad los elementos lineales son requisito previo para la definición geométrica del espacio tridimensional.

Por medio de conexiones rígidas las vigas y soportes aislados pueden combinarse para formar un sistema de múltiples componentes que actúan conjuntamente en el cual cada miembro mediante la incurvación de su eje participa con su deformación en el mecanismo resistente: sistemas estructurales de masa activa.”¹⁰

Columna esencialmente, es un elemento que trabaja a compresión lineal y está sujeto a aplastamiento o pandeo, dependiendo de su esbeltez relativa.

Viga básicamente, es un elemento lineal sujeto a carga transversal; debe generar resistencia interna a los esfuerzos cortantes y de flexión y resistir deflexión excesiva (flecha).

Un marco rígido es una estructura formada por elementos lineales, principalmente vigas y columnas, conectadas unas con otras en sus extremos con juntas que no permiten ninguna rotación entre sus miembros, además las juntas pueden girar como una. Los miembros son continuos esencialmente en sus juntas, los marcos rígidos son estructuras estáticamente indeterminadas.

¹⁰ Engel, Heinrich. **Sistemas de Estructuras**. H. Blume Ediciones. España, Última edición. 1998.

Las estructuras conformadas por marcos rígidos parecen a simple vista sistemas de vigas y columnas, pero son completamente diferentes en su comportamiento estructural, propia de la rigidez de sus juntas, las cuales proveen una resistencia suficiente para soportar cargas laterales, lo cual no es posible en sistemas mas simples sin la ayuda de elementos de soporte. Aun así, los marcos rígidos son de reciente uso en la construcción de edificios.

El hecho de distinguir cerramientos de elementos estructurales se hizo posible gracias a la introducción de los marcos rígidos y marcó un hito en la historia de la arquitectura.

El comportamiento y eficiencia de un marco rígido dependen, de la rigidez relativa de vigas y columnas.

13.1 PRINCIPIOS GENERALES

“En estos sistemas cualquiera sea el tipo de cargas aplicadas, si éstas actúan perpendicularmente al eje longitudinal del elemento provocan deformaciones por flexión, por lo cual la principal característica de estos elementos es su voluminosidad material para resistir esta deformación. Por esta razón se les denomina estructuras masivas.

Deben ser además elementos rectilíneos en que la dimensión predominante sea la longitud o el área que abarcan, dejando la sección transversal en segundo plano, aunque ésta es siempre voluminosa.

La deformación descrita está determinada por varios factores, entre ellos: la longitud libre del elemento entre apoyos, las condiciones de continuidad en los extremos del





elemento, la forma de la sección resistente, el material a emplear, la magnitud de la carga, el tipo y colocación de estas con respecto al elemento, etc.”¹¹

La deformación excesiva en algunos casos si el problema funcional lo permite, puede controlarse con recursos puramente técnicos, tal como el uso del voladizo, rigidización de las condiciones de apoyo, racionalización de la sección resistente, eliminación del peso muerto innecesario, uso de materiales más resistentes, etc. Esto quiere decir que si el momento se resiste a través del volumen de la sección transversal del elemento, y éste varia, la sección también puede variar, resultando de esto mayores volúmenes en la sección transversal en los puntos críticos o de mayor momento, y menores volúmenes en los puntos donde la magnitud del momento decrezca. Esto implica una sección transversal variable, que constructivamente puede ser compleja, pero que en eficiencia supera a las secciones constantes, por la eliminación de peso muerto que incide directamente en la reducción de las deformaciones y por consiguiente mayor capacidad de carga, o posibilidad de mayores claros entre apoyos.

Debido a que los elementos flexionados suelen ser rectilíneos, los espacios que definen las estructuras de este tipo también tienden a ser rectilíneos por lo general. Si tienen continuidad material con sus apoyos, se convierten en marcos, y estos unidos continuamente con otros marcos constituyen marcos múltiples, o varios pisos si la continuidad es vertical. Además la sucesión inmediata de vigas constituye las losas, que sirven a su vez de cubiertas y entrepisos de los espacios definidos por vigas y marcos. Las

columnas cuando trabajan bajo el efecto de fuerzas laterales también son estructuras flexionadas, y sirven de apoyo o sustentación a los elementos horizontales.

Los principales tipos estructurales que se dan en estos sistemas son las vigas, los marcos, las losas y los variantes de ellos.

13.2 VIGAS

Las vigas se diferencian entre sí por las condiciones de apoyo, que determinan la deformación del eje neutro o curva elástica.

Los principales tipos de vigas son: la simplemente apoyada que es la más deformable de su tipo.

La viga doblemente empotrada es la más rígida y menos deformable, ya que tiene restricción al giro en sus dos apoyos, por lo que sus deformaciones son mínimas comparadas con las anteriores.

13.2.1 RETÍCULA DE VIGAS

“En este caso la rigidez o control de la deformación de los elementos, se logra a través de cruzar los elementos longitudinales con elementos transversales del mismo tipo; dando origen así al entramado de vigas. Cada una de las intersecciones de los elementos mencionados constituye los llamados nudos que en realidad trabajan como semiempotramientos que restringen el giro libre de los elementos.

¹¹ Jorge Escobar Ortiz, Ibid, pág. 68.



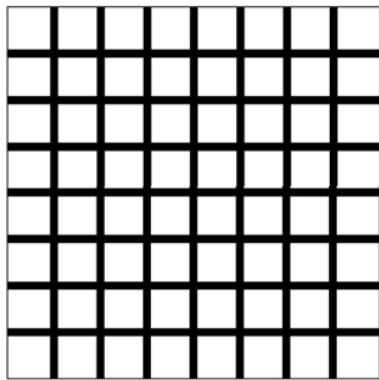


FIGURA 44: Retícula ortogonal de vigas.

Si consideramos una viga simplemente apoyada en sus extremos con una deformación determinada, bajo el efecto de una carga concentrada en la mitad de su claro. Si a este elemento se le interseca con una viga perpendicular a su plano, con las mismas dimensiones, se verá que la deformación se reduce considerablemente. Esto quiere decir que el elemento está menos esforzado, por lo cual su deformación se reduce. Al aumentar el número de vigas intersecadas en los dos sentidos la deformación tenderá a reducirse cada vez más, constituyendo un auténtico trabajo de equipo en que las deformaciones y la transmisión de las cargas se comparten entre todos los elementos, proporcionalmente a la ubicación de estos dentro del conjunto.”¹²

Estos entramados de vigas se utilizan para cubrir espacios mayores comparativamente y sin apoyos intermedios, puesto que cada nudo o semi empotramiento por la restricción de giro que causa en los tramos entre

¹² Jorge Escobar Ortiz, Ibid, pág. 79.

intersecciones trabaja como si fuera un apoyo intermedio, haciendo que se comporte como viga continua, pero con claros libres.

Si la longitud de una de las vigas en un sentido aumenta desproporcionadamente respecto de los elementos en el otro sentido, el sistema pierde eficiencia, pues las cargas tenderán como es lógico a transmitirse por la vía más corta, aumentando así las reacciones de las vigas del sentido corto y disminuyendo las del sentido largo.

Si aumenta la desproporción llegará el momento en que la viga del sentido largo casi no trabaje y por el contrario el peso muerto de ésta será una sobrecarga para la viga corta, con lo cual en lugar de ayudar a reducir la deformación del sistema contribuye a aumentarla.

La retícula o entramado de vigas oblicuo tiene la ventaja sobre el entramado ortogonal de que adicionalmente a los mecanismos resistentes ya mencionados, se logra efecto de semiempotramiento en los apoyos, por ser dos elementos en ángulo los que llegan a este punto, lo cual le da más rigidez al sistema, pues en el entramado ortogonal los elementos llegan solos a los apoyos, con lo cual no tienen la rigidez del entramado oblicuo en estos puntos.



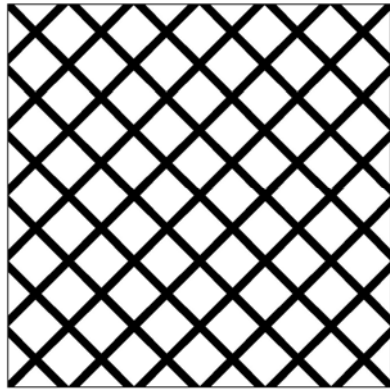


FIGURA 45: Retícula oblicua de vigas.

13.3 COLUMNAS

“Las columnas bajo el efecto de cargas axiales trabajan a compresión, debido a que son elementos verticales que sirven de apoyo a los elementos horizontales. Sin embargo las columnas en realidad rara vez trabajan a compresión simple, pues por lo general nunca están aisladas, sino en continuidad con los elementos horizontales flexionados que transmiten la deformación a las columnas, obligando a estas a flexionarse y compartir la deformación como sucede en los marcos.”¹³

Esto determina que se consideren dos tipos de columnas: cortas; si su relación de esbeltez es tal que no se flexionan con cargas axiales, Y largas si debido a su relación de esbeltez flexionan con cargas axiales.”¹³

¹³ Jorge Escobar Ortiz, Ibid, pág. 86.

Las condiciones de apoyo son importantes en determinar para fines de análisis lo que se llama la longitud efectiva de la columna. Por ejemplo para un voladizo; la longitud efectiva es el doble de la longitud real, y para una columna empotrada en sus extremos la longitud efectiva es la mitad de su longitud real.

Como optimización del volumen de la columna se puede emplear el apoyo en V o Y que resulta del diagrama de momentos de la columna cuando está bajo el efecto de carga lateral, en cuyo caso el momento máximo está en la base si está empotrada o es cero si está articulada.

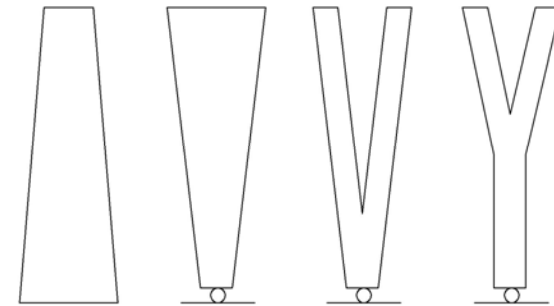


FIGURA 46: Apoyos en V y Y.

Un factor importante en el diseño de vigas es el factor de la estabilidad contra el pandeo, puesto que la misma puede muy bien soportar cargas de flexión, pero ser inestable a cargas de pandeo, de la misma manera que las columnas.

“La flexión de las vigas como ya se indicó produce tensiones y compresiones en las caras superior e inferior del elemento. Este problema tiende a ocurrir en todas las vigas pero principalmente en las de Sección I por lo cual hay que





rigidizar convenientemente la sección del elemento por medio de elementos transversales que amarren las vigas entre sí.

13.4 MARCOS

Una manera útil de entender el comportamiento estructural de los marcos es comparar las reacciones de estos con relación a estructuras simplemente apoyadas de vigas y columnas, las cuales aparentemente son iguales a excepción de la conexión rígida de sus miembros.

Para que el sistema funcione efectivamente como marco rígido es fundamental el diseño detallado de las conexiones para proporcionarles rigidez y capacidad de transmitir momentos.

En la práctica rara vez se emplean las vigas como elementos aislados, puesto que sólo transmiten cargas verticales, y como en la realidad las estructuras también están sujetas a cargas horizontales, se hace necesario entonces anclarlas a sus apoyos, por lo que éstos que originalmente trabajaban a compresión empiezan a trabajar a flexión. En este caso, tanto elementos verticales o columnas, como los horizontales o vigas, tienen continuidad entre sí para que trabajen como un único elemento compartiendo las deformaciones, lo cual constituye una reducción de las mismas. A este elemento o tipo se le llama marco. Los marcos atendiendo a sus condiciones de apoyo pueden ser rígidos con los apoyos empotrados, o articulados si la base de sus apoyos es articulada.

El segundo caso es más eficiente en cuanto a la distribución de momentos, pues en la base del apoyo el momento resistente es cero, por lo que requiere escasa sección resistente en ese punto; mientras que el marco

empotrado por tener sus apoyos restricción al giro, tienen momento distinto de cero en la base, que hace de estos, puntos críticos de la estructura. Esto quiere decir que requieren volumen adecuado en la sección resistente. Sin embargo el marco articulado no se puede utilizar aisladamente porque sería inestable a cargas perpendiculares a su plano, por lo que necesita amarre o estabilización en este sentido, mientras que el marco rígido es estable para este tipo de cargas dadas las características de sus apoyos.

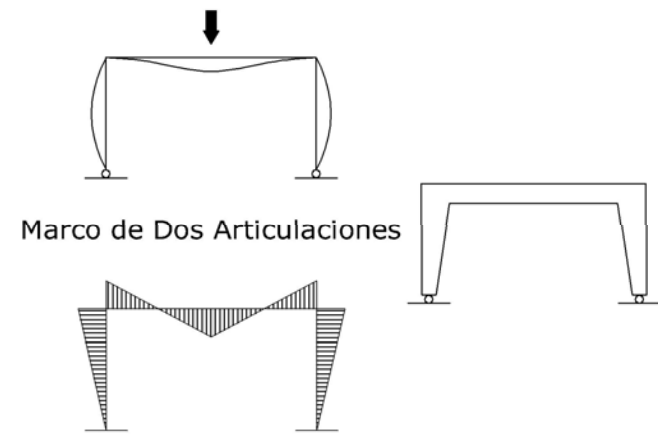
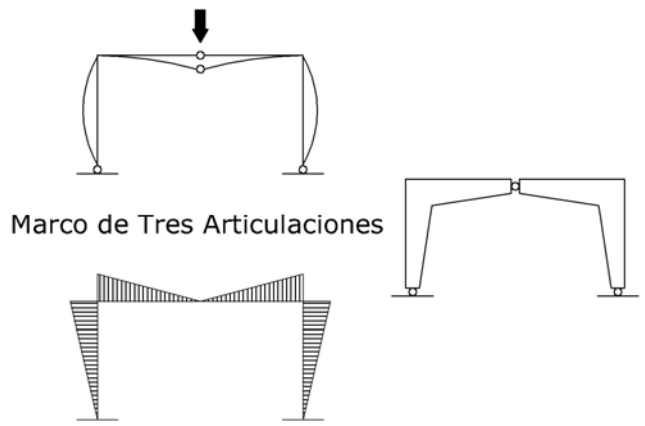


FIGURA 47: Marco de dos articulaciones.





Marco de Tres Articulaciones

FIGURA 48: Marco de tres articulaciones.

En la práctica tampoco los marcos se utilizan por lo general aisladamente, sino amarrados con otros marcos a través de vigas perpendiculares a su plano lo que da lugar a un sistema de marcos en sentido perpendicular a los considerados, con los que tendrán apoyos comunes.

El sistema mencionado constituye los marcos múltiples, que son de por sí estables y combinados con las losas o entresijos, nos definen espacios modulares con expansión tanto en sentido horizontal como vertical.

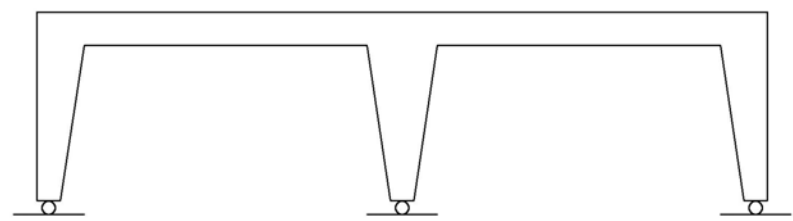


FIGURA 49: Marco múltiple.

“Las intersecciones de los elementos verticales y horizontales definen los nudos; que no son más que uniones continuas de los elementos flexionados.”¹⁴

Cargas Verticales: una carga vertical en una estructura simple (como se llamara a las conformadas por vigas y columnas simplemente apoyadas) es recibida por el elemento horizontal (viga) y transmitida al elemento vertical (columna) por flexión y éste la transmite al suelo. La viga simplemente apoyada descansa sobre la columna, consecuentemente, cuando se desarrolla la flexión en la viga, los extremos de esta rotan en sobre la columna. El ángulo formado entre ambos elementos cambia conforme aumenta la carga ejercida en la viga. Las columnas no restringen la rotación de los extremos de la viga, no se transfieren momentos y estas únicamente soportan cargas axiales.

Cuando un marco rígido es sometido a una carga vertical, está es recibida por la viga y transmitida por las columnas al suelo. Una vez más, la carga causa la rotación de los extremos de la viga, pero en este caso los extremos de la columna y la viga están conectados rigidamente, por lo

¹⁴ Jorge Escobar Ortiz, Ibid, pág. 74.

S
a
j
m
u
a
y
n
o
a
P
a
b
a
l
o
c
i
a





cual no hay rotación. Una es que la viga ahora se comporta mas como una viga empotrada que como una simplemente apoyada. Otra es que ahora la viga puede soportar la flexión así como las cargas axiales, lo cual complica su diseño.

La unión de los extremos no provee una rigidez total, por lo cual cuando la carga ocasiona la rotación del extremo de la viga, el extremo de la columna rota también, sin embargo, la rigidez de sus miembros hace que estos conserven su relación angular, por ejemplo, si la unión de una viga con una columna posee una relación angular de 90°, esta se mantendrá. Entre más rígida la columna en relación a la viga, menos rotación habrá.

Desde el punto de vista de diseño, la utilización de este sistema conlleva dos aspectos importantes, uno, que la sección de la viga en comparación a una simplemente apoyada será menor, y la otra, la sección de la columna será mayor al formar un marco rígido.

Cargas Horizontales: así como las diferencias en el comportamiento de la estructura al soportar cargas verticales es enorme, lo es también al aplicar cargas horizontales. Una estructura simple es incapaz de resistir cargas laterales significativas.

Dado a la conexión rígida existente, las vigas limitan a las columnas de rotar libremente de forma que harían colapsar la estructura. La rigidez de la viga contribuye a la resistencia a las cargas laterales que el marco pueda proveer, así como ayuda a transmitir la carga ejercida en una columna a la otra.

La acción de las cargas laterales produce flexión, corte y fuerzas axiales en todos los miembros.

Los marcos rígidos son aplicables tanto para edificios grandes como pequeños. Muchos edificios altos usan marcos rígidos para soportar tanto cargas verticales como horizontales. Entre mas alto el edificio, sin embargo, mayores los momentos y fuerzas en sus miembros.

13.4.1 EL USO DEL VOLADIZO

“Como se indicó anteriormente una de las formas de controlar la deformación excesiva de las vigas, es el aspecto de las condiciones de apoyo; en que la continuidad material con otros elementos induce a cambios de curvatura en la elástica reduciéndose la deformación.

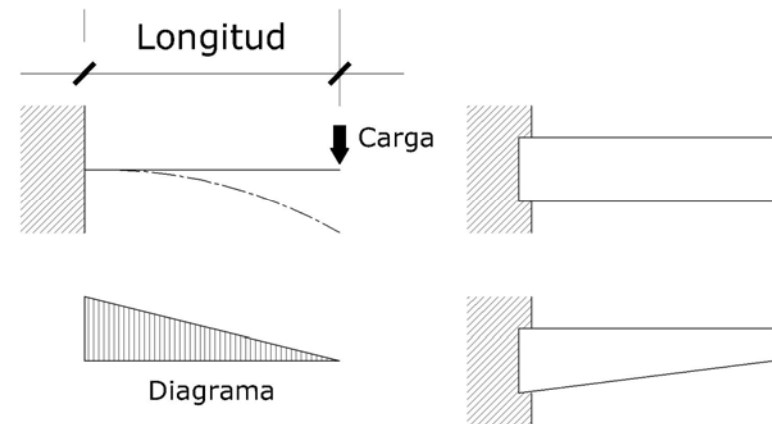


FIGURA 50: Comportamiento y ejemplos del voladizo.





*El voladizo hará entonces contrapeso al claro interior, reduciendo sus deformaciones.*¹⁵

13.4.2 MARCOS VIERENDEEL

Como ya se mencionó anteriormente los marcos continuos son sumamente eficientes para soportar el desplazamiento de cargas laterales, ya que bajo el efecto de éstas entran a trabajar todas las columnas o apoyos verticales compartiendo la deformación.

La rigidez se puede aumentar aún más, así como su eficiencia al reducir las deformaciones, si al elemento horizontal y a los apoyos verticales típicos del marco se agrega un cuarto elemento horizontal y paralelo al elemento horizontal superior. En este caso la deformación se minimiza al aplicarle cargas, ya que el sistema se vuelve cerrado, constituyendo lo que se llama un panel. El trabajo de esta estructura es muy similar al de una viga de sección I en la que el elemento superior trabaja a compresión y el inferior a tensión con los elementos verticales sirviendo de amarre y absorbiendo los esfuerzos cortantes.

Este elemento se puede utilizar como viga de la manera descrita o bien como un sistema de marcos múltiples.

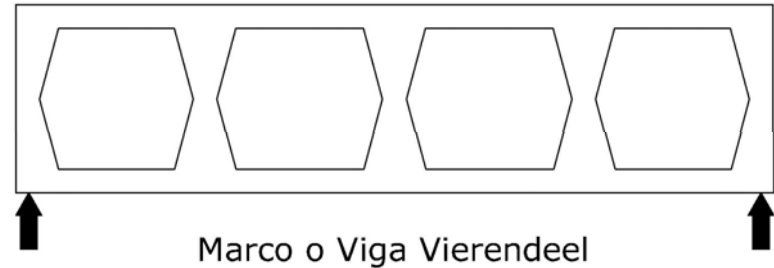


FIGURA 51: Marco Vierendeel.

A este se le conoce como sistema Vierendeel. Al actuar como voladizo se invierten los mecanismos de distribución de las tensiones, por lo que utilizado como prolongación de un claro central puede ayudar a reducir las deformaciones del mismo, tal y como sucede en una viga convencional.

Al utilizarlo como marco; cada tramo entre paneles se deforma como una viga continua sólo que sin apoyos intermedios.

¹⁵ Jorge Escobar Ortiz, Ibid, pág. 83.





*"La eficiencia del sistema consiste en que todos los elementos integrantes se flexionan tanto para cargas verticales como horizontales, causando deformaciones mínimas debido a la cantidad de elementos que intervienen en la absorción de las cargas."*¹⁶

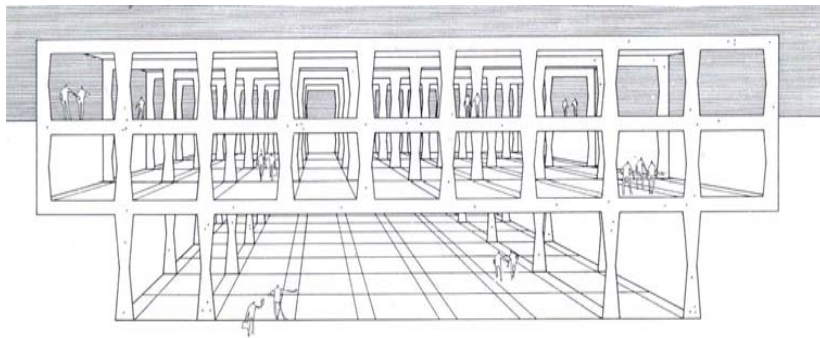
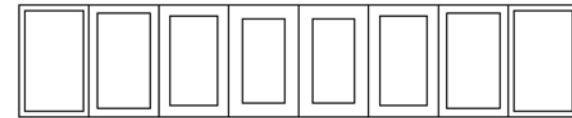


FIGURA 52: Aplicación de los marcos vierendeel.



Diferentes Tipos de Marco Vierendeel

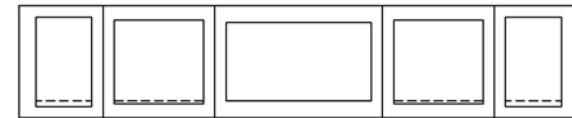
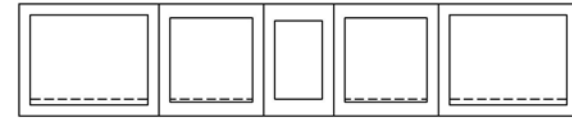


FIGURA 53: Diferentes tipos de marcos Vierendeel.

¹⁶ Jorge Escobar Ortiz, Ibid, pág. 86.





13.5 ANÁLISIS DE MARCOS RÍGIDOS

Importancia de la Rigidez de las Vigas y Columnas: En cualquier estructura estáticamente indeterminada, incluyendo un marco, las magnitudes de las fuerzas y momentos internos son, en el análisis final, dependientes de las propiedades de los miembros que lo conforman.

Si un marco no está simétricamente diseñado, la estructura oscilará de un lado a otro.

Condiciones de Apoyo y Cimentación: Como en una viga continua, los marcos rígidos son muy sensibles a las diferencias que se presentan en sus apoyos, cualquier tipo de diferencia en ellos, ya sea horizontal o vertical, inducirá momentos en el marco. A mayor diferencia en los apoyos, mayores los momentos que se producirán. Si no son tomados en cuenta, estos momentos traerán consigo la falla de la estructura, por lo que el diseño de la cimentación será muy importante para los marcos rígidos.

13.6 SELECCIÓN DEL TIPO DE MARCO

Los marcos son usualmente descritos en términos de su flexibilidad, por el número y localización de sus juntas, ya sean articuladas o empotradas.

Ocasionalmente, el marco se emplea como viga para transmitir cargas transversales hacia los apoyos.

Ocasionalmente, el marco se emplea como viga para transmitir cargas transversales hacia los apoyos.

13.7 LOSAS

“La losa es un tipo estructural que trabaja a flexión, pero no en sentido lineal como las vigas, sino en sentido superficial, lo que se denomina comportamiento de placa. Al aplicarle cargas perpendiculares a su plano, las desvía horizontalmente y las transmite en dos direcciones hacia los apoyos por flexión, deformándose el elemento de manera similar a como ocurre en los elementos lineales, o sea curvándose.”

La flexión ocurre en dos sentidos al deformarse la estructura. Su deformación depende de las condiciones de apoyo. Por ejemplo, en una losa cuadrada simplemente apoyada, las deformaciones en sentido longitudinal o transversal son como las de una viga simplemente apoyada en cualquier sección del elemento, excepto en las diagonales, en que la deformación es como la de una viga doblemente empotrada.

Para controlar las deformaciones excesivas en las losas se utilizan los mismos mecanismos o recursos que se usan en las vigas o sea, por ejemplo, el uso del voladizo adecuado, el incremento del peralte para obtener un mayor momento resistente, rigidez de las condiciones de apoyo, empleo de la forma ideal o racionalización en la distribución del volumen resistente, etc.

La transmisión de fuerzas en las losas siempre es en dos direcciones, pero el ángulo que forman estas dos direcciones, varía de acuerdo con la ubicación de los apoyos y el tipo de estos respecto a la planta de la losa.

Los elementos más comunes en la sustentación de las losas son las columnas, los muros de carga y las vigas perimetrales, que a su vez se sustentan sobre columnas.

S
a
m
u
a
y
n
a
P
a
b
l
o
c
i
a





Por el manejo del volumen resistente del peralte de la losa, estas se pueden dividir en dos grupos:

- *Macizas*
- *Nervuradas.*

Los dos tipos de losa se pueden apoyar directamente sobre columnas o bien sobre vigas perimetrales, dando origen a dos subgrupos:

- *losas planas y bordeportantes para las macizas, y*
- *losas borde portantes y reticular celuladas para las nervuradas.*¹⁷

13.7.1 LOSAS MACIZAS PLANAS

Las losas macizas planas se apoyan directamente sobre columnas, careciendo de vigas en cualquier sentido. Este tipo de losa es eficiente para cargas vivas grandes y se utilizan para cubrir espacios de forma regular cuadrada o rectangular, así como para espacios de forma irregular en los cuales la sustentación sobre vigas perimetrales sería problemática.

Los puntos críticos en este tipo de losa son las intersecciones de la losa con los apoyos verticales, en que la gran masa de la losa tiende a deslizarse a través de las columnas debido al peso considerable de la misma y a la pequeña área de contacto entre losa y apoyos, produciendo esfuerzos de punzonamiento; que no son más que esfuerzos cortantes.

¹⁷ Jorge Escobar Ortiz, Ibid, pág. 88.

Para contrarrestar esta tendencia se requiere de ampliar la superficie de contacto entre losa y apoyos a través de elementos de transición de sección variable llamados capiteles, o bien con elementos cruciformes de refuerzo en esos puntos, o aumento de espesor en los puntos críticos. El punzonamiento queda resuelto en este caso al repartirse las cargas y el peso de la losa en un área mayor que en el caso de apoyos aislados.

Por regla general, en este caso se utilizan voladizos para lograr una distribución de cargas más equilibrada y contrarrestar las deformaciones del claro interior, así como evitar mayores flexiones en los apoyos debido a cargas asimétricas.

La losa maciza bordeportante se caracteriza por estar sustentada sobre vigas perimetrales. En este caso las cargas se desvían hacia las vigas portantes y luego se desvían nuevamente a través de estas hacia los apoyos verticales, que pueden ser columnas o muros de carga.

Este tipo de losas en concreto reforzado pueden ser armadas en una o en dos direcciones dependiendo de la proporción del espacio en que se usen. La carga se transmite lo mismo en los dos sentidos en cuyo caso las reacciones son iguales si el área es cuadrada. Si el área es rectangular serán mayores las del sentido corto y menores las del sentido largo.

En este caso sólo requerirá de vigas soportantes en el sentido largo las cuales descansarán a su vez sobre vigas principales, o directamente sobre apoyos.

Los tipos de losa bordeportantes se utilizan por lo general para claros pequeños y cargas vivas medianas.





13.7.2 LOSAS NERVURADAS

Por otra parte se tienen las losas nervuradas, o nervadas. Este tipo de losa se origina en el problema ya mencionado de los claros mayores en que las deformaciones son excesivas con losa convencional, debido al incremento de peso muerto.

En tal caso lo que se busca es la eliminación de todo el peso muerto posible, a través del aprovechamiento en el mayor grado de la sección transversal de la losa.

Las áreas adyacentes al eje neutro no necesitan mayor sección resistente puesto que los valores de las tensiones en este sector son nulos.

La sección típica de una losa nervurada, bajo el principio anterior es una viga de sección T, pues la masa de compresión y el nervio son de concreto, mientras que la masa de tensión se reduce a la escasa sección del acero de refuerzo recubierto por el elemento que une las dos masas.

La losa nervurada se conforma con una sucesión de vigas T trabajando monolíticamente, lo que origina una losa nervurada en un sentido. Por supuesto la eficiencia aumenta si el nervurado es en dos sentidos por alcanzar mayor rigidez el sistema, tal y como sucede en la retícula de vigas, sin embargo el uso de una u otra solución dependerá de las proporciones del espacio como sucede en las losas macizas.

“Las losas nervuradas son estructuras más livianas que las losas macizas, menos deformables y por consiguiente pueden cubrir espacios de mayores dimensiones, aunque no son recomendables para cargas

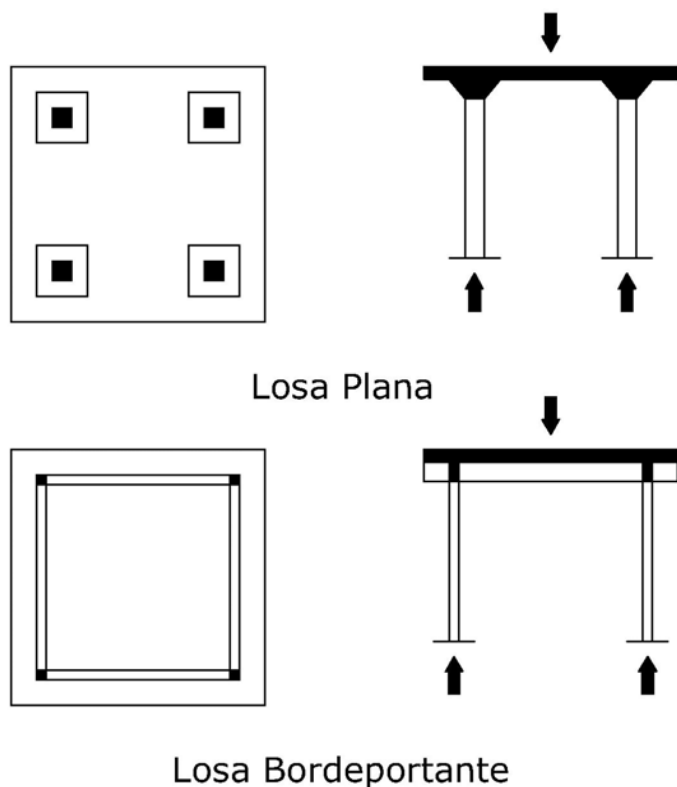


FIGURA 54: Losa plana y bordeportante.





concentradas muy grandes, siendo más bien económicas para cargas vivas pequeñas o medianas.¹⁸

Este tipo de losas se recomiendan para cargas vivas medianas con claros mayores que los del resto de losas descritas anteriormente.

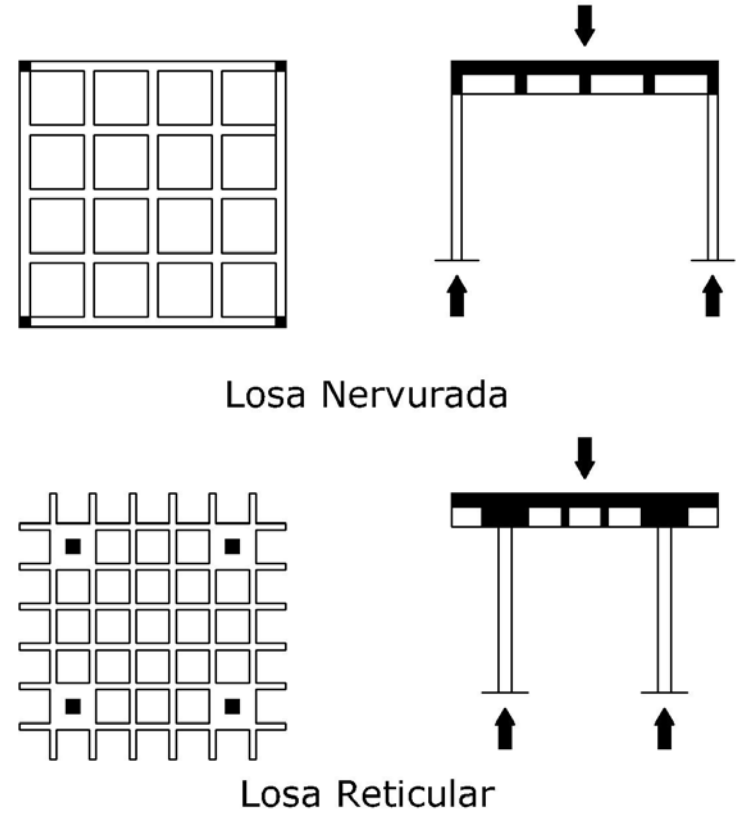
La losa nervurada en dos direcciones tendrá más rigidez que la losa nervurada en un sentido, debido al efecto de semi empotramiento que ejercen los nudos o intersecciones, los cuales actúan como apoyos intermedios, aunque el claro esté totalmente libre de apoyos.

Las losas nervradas bordeportantes se sustentan sobre vigas perimetrales, las cuales a su vez se apoyan en elementos verticales, sean columnas o muros de carga. Siempre es recomendable el uso del voladizo para equilibrar la distribución de las cargas sobre las vigas y para reducir la deformación dar claro central.

El otro tipo de losas nervradas son las reticulares celuladas, las cuales se apoyan directamente sobre elementos verticales o columnas, sin requerir de vigas perimetrales.

Análogamente a lo que sucede en las losas planas macizas se generan esfuerzos de punzonamiento en la intersección de la losa y las columnas debido a la pequeña área de éstas en relación al área de la losa, por lo cual tiende a punzonarse la losa con las columnas.

Se recomienda siempre el uso del voladizo por las razones indicadas para la losa bordeportante nervurada, o sea para mejorar el comportamiento de la estructura.



S
a
m
u
a
y
n
o
P
a
b
a
i
r
o
c
i
a

FIGURA 55: Losa nervurada y reticular.

¹⁸ Parker, Harry. **Diseño Simplificado de Concreto Reforzado**. Ed. Limusa. Mexico 1978. pag 194.





13.8 LÍNEAS ISOSTÁTICAS

“En casi todas las estructuras al deformarse por flexión o por su forma, se producen efectos de tensión y compresión dentro de la sección transversal del elemento considerado. Al analizar la dirección de los efectos mencionados se ha determinado que dentro del material se forman líneas de presión que se ven comprimidas o tensadas axialmente y que siguen direcciones opuestas que son perpendiculares entre sí. A estas líneas se les llama líneas isostáticas de la estructura y se emplean en los análisis de los elementos para visualizar situaciones críticas.”¹⁹

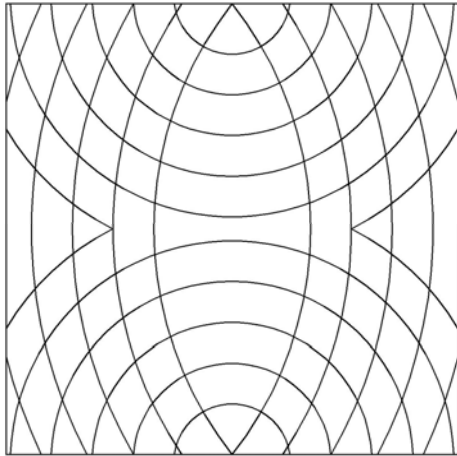


FIGURA 56: Líneas isostáticas.

Las líneas isostáticas son las que indican el recorrido de las tensiones dentro del elemento estructural.

¹⁹ Jorge Escobar Ortiz, Ibid, pág. 83.

En cualquier punto de la estructura se pueden establecer las dos direcciones mencionadas para las cuales las tensiones de flexión son respectivamente máximas y mínimas y el corte es nulo. En estas direcciones las cargas se transmiten axialmente con mecanismo de arco si es compresión, y por mecanismo de cable si es tensión. Los empujes de compresión son absorbidos por la materia del elemento a través de las líneas de flujo y de las tensiones.

13.9 CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRUCTURAS MASIVAS

- Los elementos conformantes de las estructuras masivas, columnas, vigas y losas, no es recomendable su uso de manera aislada ya que su máximo potencial estructural se alcanza en la combinación de los mismos.
- Los marcos rígidos, combinación de vigas y columnas, aumentan su efectividad cuando en ellos se aplica el uso de articulaciones en sus juntas o en puntos intermedios de su sección, ya que con esto provee al elemento de un movimiento que permite cierta rotación y evita la excesiva rigidez del mismo.
- La configuración en planta de este tipo de estructuras ha de estar muy relacionada a formas regulares, rectangulares o circulares, pero el uso del voladizo puede complementar el funcionamiento de los marcos no solo en su aspecto estructural sino también en el formal, ya que estos pueden adoptar formas que complementen el diseño en planta.





- El análisis del comportamiento de las tensiones en las losas, líneas isostáticas, puede abrir la posibilidad a un sin número de variaciones en la respuesta formal de las mismas, ya que combinando estas líneas y el concepto de losa nervurada, pueden obtenerse no solo elementos estructurales sumamente funcionales sino también bellos, enriqueciendo con esto el proyecto arquitectónico.
- En Guatemala, este tipo de estructuras se perfila como la respuesta estructural mas conveniente y factible, ya que tanto los materiales como el aspecto constructivo de las mismas las hace aplicables al medio local.
- En este tipo de estructuras puede darse una combinación de conceptos y formas derivadas de la comprensión del comportamiento de sus elementos conformantes y de otros principios estructurales, ya que por ejemplo el uso de la triangulación en las columnas o las vigas puede aumentar su resistencia a los esfuerzos y acciones así como enriquecer la expresión formal del proyecto.
- El uso de una grilla modular en el proceso de diseño facilitara la aplicación de las estructuras masivas, ya que por su naturaleza rectilínea su aplicación en patrones regulares y ordenados es más sencilla y optimizara su comportamiento estructural.
- Los espacios cuadrados o rectangulares con claros mayores, pueden ser resueltos

subdividiendo el espacio en sectores rectangulares más pequeños y Utilizando entonces losa armada en una dirección.

- En la aplicación de este tipo de estructuras debe tenerse claro su comportamiento y su concepto, ya que por ejemplo, en una planta radial, a medida que la estructura se aleja del centro las luces se incrementan al igual que la separación entre los apoyos, por lo cual la utilización de vigas secundarias puede ser de utilidad, aplicando el concepto de una retícula de vigas, y con esto evitar la inserción de apoyos intermedios que interrumpen el espacio interior.
- Al adoptar los marcos rígidos como elementos estructurales, es de utilidad separar en planta los espacios por volúmenes definidos, ya que con esto se logra un comportamiento estructural más regular y se evitan acciones y esfuerzos bruscos en el todo.

S
a
m
u
a
y
n
a
P
a
b
a
l
o
c
i
a





CAPITULO XIV

ESTRUCTURAS VERTICALES

“Los elementos sólidos rígidos que se extienden predominantemente en sentido vertical, asegurados contra esfuerzos laterales y anclados firmemente al suelo pueden recoger cargas desde planos horizontales a gran altura sobre aquél y transmitir las a los cimientos: sistemas estructurales verticales.

Los sistemas estructurales verticales no son una serie de sistemas de una planta dispuestos unos sobre otros, ni su comportamiento estructural puede explicarse del todo como el de una ménsula erecta. Son sistemas homogéneos con problemas específicos propios y soluciones únicas.

Los sistemas estructurales verticales son un instrumento y una ordenación para la construcción de edificios de gran altura. En este sentido, colaboran a la configuración de las modernas edificaciones y ciudades.

Los sistemas estructurales verticales son requisitos e instrumento para la utilización de la tercera dimensión, la altura, en la planificación de ciudades. Por tanto, en el futuro, el empleo de los sistemas estructurales verticales no se limitará a edificios aislados, sino que se extenderá hasta hacer accesible el espacio urbano no sólo en altura, sino también en anchura.”²⁰

Se tratará aquí esencialmente el sistema vertical resistente de los edificios, en particular en lo referente a su

eficiencia para resistir las cargas laterales de viento o sismo, cuya importancia crece a medida que aumenta la altura del edificio. Lo ideal sería que el sistema estructural que se requiere y que representa la solución óptima para resistir las cargas verticales de diseño, resultase suficiente para resistir sin modificación alguna también las cargas laterales, contando para ello con la reducción en los factores de seguridad que admiten las normas de diseño para esta última condición de carga, por ser de tipo accidental. Sin embargo, esto llega a ser cierto sólo en edificios de pocos pisos y en zonas donde las acciones de diseño por sismo o viento son moderadas. A medida que crece la altura, las modificaciones necesarias para resistir cargas laterales son mayores. El problema puede plantearse como el de un sobreprecio que hay que pagar para la resistencia a carga laterales, el cual aumenta con el número de pisos hasta que, para edificios muy altos, este es el aspecto que domina la elección del sistema estructural más apropiado.

Las estructuras verticales se caracterizan por transmitir cargas desde planos situados a gran altura hacia el suelo. El origen de estas estructuras es relativamente reciente y se generó con el crecimiento de las ciudades, que obligó a la multiplicación del espacio horizontal mediante el uso de planos paralelos habitables colocados uno sobre otro, de tal manera de aprovechar al máximo el área disponible.

Esto trajo consigo el planteamiento de nuevos problemas estructurales, ya que la masa derivada de la solución mencionada tiene una predominante extensión vertical, siendo su único punto de apoyo la base del mismo, la cual debe absorber no sólo las cargas verticales, sino también las horizontales y los momentos provocados por éstas.

S
a
m
u
a
y
n
o
a
P
a
b
a
r
o
c
i
a

²⁰ Engel, Heinrich. **Sistemas de Estructuras**. H. Blume Ediciones. España, Última edición. 1998.





En cuanto a las cargas verticales se refiere, estas se van acumulando conforme se acercan al suelo. Las cargas horizontales ya sean de sismo o viento, exigen una cohesión entre todos los elementos para que no se desbarate la forma estructural. El problema básico entonces radica en una conducción adecuada de las cargas verticales al suelo, y en amortiguar y resistir convenientemente el efecto de las cargas horizontales.

Como la altura es la principal dimensión en estas estructuras, se puede concebir estructuralmente como una viga flexionada en voladizo, cuyo extremo libre es el último nivel y cuyo empotramiento es la base del edificio, que se encuentra firmemente afianzada en el suelo.

El sistema estructural debe permitir proporcionar resistencia a las fuerzas laterales y rigidez para mantener las deformaciones ante esas cargas dentro de límites tolerables. El segundo aspecto suele ser más decisivo que el primero para definir el esquema estructural apropiado.

“Para fines de análisis, se considerará un edificio como alto cuando sobrepase los 25 niveles o sea aproximadamente 75 metros, en que su comportamiento empieza a ser característico, sobre todo para cargas horizontales en que la similitud con las vigas flexionadas es válida, ya que las cargas de viento y sismo empiezan a tener brazos de palanca lo suficientemente grandes para provocar momentos críticos en la base del edificio.

Las cargas horizontales entonces, serán siempre críticas, puesto que igual que las vigas en voladizo provocan momento en la base o empotramiento el cual aumenta en proporción directa a la altura del edificio.

Las deformaciones con cargas horizontales se manifiestan con desplazamientos en el sentido de la carga actuante. En el extremo libre ocurre el máximo desplazamiento hasta llegar a cero en el primer nivel; si se supone firmemente empotrado en el suelo. Siempre requiere una buena cimentación que asegure la estabilidad del edificio. Las cargas horizontales también producirán esfuerzos cortantes debido a la dirección opuesta de estas y las reacciones que ejerce el suelo, que tienden a deslizar los niveles uno sobre otro, por lo que deben reforzarse convenientemente los apoyos verticales para este tipo de esfuerzo, especialmente las intersecciones entre nivel y nivel, o bien con el uso de elementos estabilizadores que limiten el desplazamiento.”²¹

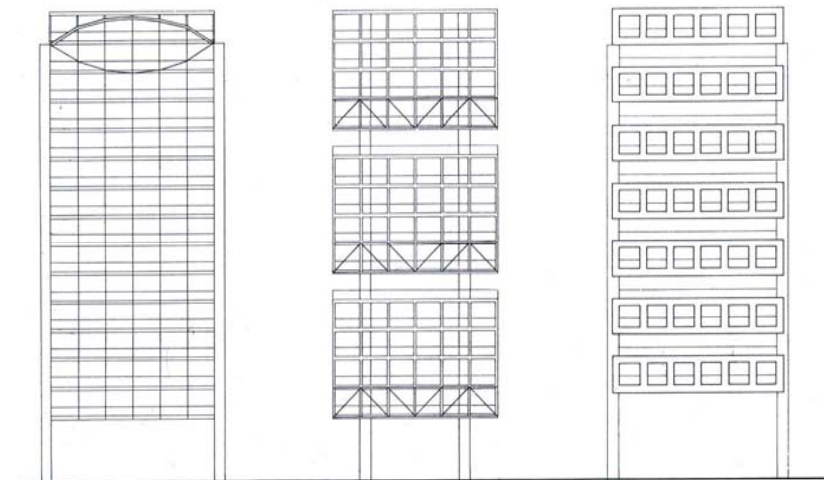


FIGURA 57: Tipos de estabilización en edificios.

²¹ Jorge Escobar Ortiz, Ibid, pág. 168.





“En lo que se refiere a las cargas verticales; existen varias posibilidades de conducirlos al suelo, teniendo todos los sistemas como principio básico la continuidad de los elementos verticales, ya que de otra manera se producirían desviaciones innecesarias y hasta riesgosas en la transmisión de las cargas.

Los apoyos deben guardar una adecuada relación de esbeltez para las cargas a soportar a efecto de no exponerlos al pandeo por cargas a compresión o excéntricas.

Frecuentemente aumenta la sección transversal los apoyos conforme se aproximan al suelo, dado que las cargas se van acumulando en este sentido, siendo los apoyos de los primeros niveles los que reciben la suma de las cargas verticales. Esta es otra razón para aumentar la sección resistente de los apoyos en el basamento, y por otra parte para contrarrestar el momento de empotramiento que producen las cargas horizontales en la base del edificio.

La ubicación de los apoyos en la planta del edificio es prácticamente lo que define los sistemas de conducción de cargas verticales. Los cuatro sistemas descritos a continuación se pueden considerar como los básicos, aunque pueden ser logradas combinaciones entre ellos.”²²

La variedad de soluciones estructurales que pueden darse a un sistema de piso es tan grande que haría interminable un intento de enumerarlas o aun de clasificarlas en detalle. Es en estos sistemas donde mayor es el número de innovaciones que se presentan continuamente, ligadas sobre todo a tecnologías de construcción que tratan de hacer más rápida y más sencilla la fabricación.

²² Jorge Escobar Ortiz, Ibid, pág. 170.

14.1 SISTEMA RETICULAR

Sistema reticular es aquel donde los apoyos se encuentran repartidos en la planta de manera modular y se emplea en situaciones en que los apoyos intermedios no estorban la función del espacio. Las luces pueden ser pequeñas o moderadas, y resulta bastante flexible para edificios de altura debiendo rigidizarse con mecanismos adicionales para carga lateral. Las cargas verticales aplicadas se desvían a los apoyos verticales donde se conducen al suelo y son debidamente contrarrestadas.

14.2 SISTEMA PERIMETRAL

El sistema perimetral es aquel en que los apoyos se encuentran repartidos en el perímetro de la planta, y se usa en problemas en que se requieren áreas libres de apoyos. Los sistemas de entrepiso deben estar diseñados para luces moderadas a grandes, y conducir las cargas verticales aplicadas hacia la periferia; en donde los apoyos las captan y conducen al suelo para ser debidamente contrarrestadas. Para cargas laterales resulta un poco más rígida que el sistema anterior, especialmente si se logra triangulación en los apoyos. Estos, dada la magnitud de las cargas, están muy juntos unos a otros.





14.3 SISTEMA DE NÚCLEO CENTRAL

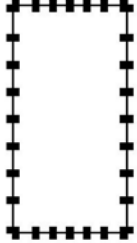
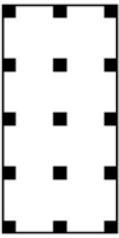
El sistema de núcleo central concentra el soporte de la estructura en un apoyo único centralizado en la planta, por lo que los entresijos quedan todos en voladizo. El apoyo único es mucho más rígido si se usa como tubo, dado su momento de inercia. Para este sistema se requiere el uso en los entresijos de sistemas adaptables a voladizos grandes. La planta lograda está libre de apoyos excepto en el centro del claro, por lo que deja el campo visual totalmente libre, siendo adecuado su uso para espacios en que se requiera máxima iluminación interior.

El núcleo central puede ser utilizado eventualmente para circulaciones verticales, siempre que las perforaciones no sean mayores para no mermar su capacidad resistente, y que sean independientes del tubo para no crear problemas de diferencia en las rigideces.

La transmisión de las cargas se logra cuando estas convergen al tubo central y se transmiten al suelo para ser contrarrestadas.

14.4 SISTEMA DE MUROS DE CORTE

El sistema de muros de corte o tubo exterior corresponde a un mecanismo similar al sistema perimetral pero tiene la ventaja sobre aquel en que este cumple no sólo una función sustentante sino también estabilizadora; al actuar como una placa rígida no muy propensa a deformaciones excesivas laterales dado su momento de inercia y al mismo tiempo conduce las cargas verticales al suelo para ser debidamente equilibradas. La placa de rigidez o muro de corte actúa prácticamente como una viga de enorme peralte en relación a su base o espesor, ya que las



Sistema Reticular
Sistema Perimetral

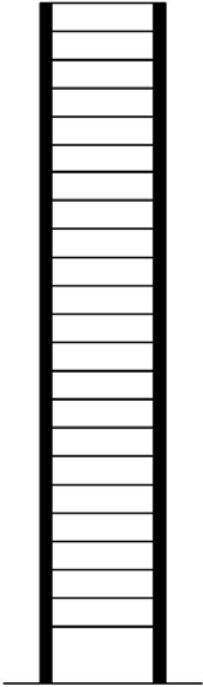
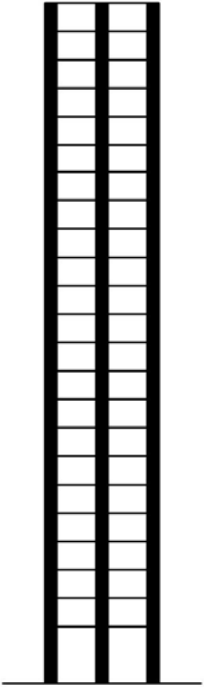


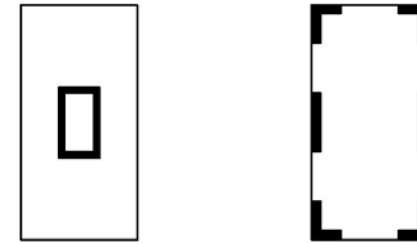
FIGURA 58: Sistema reticular y perimetral.



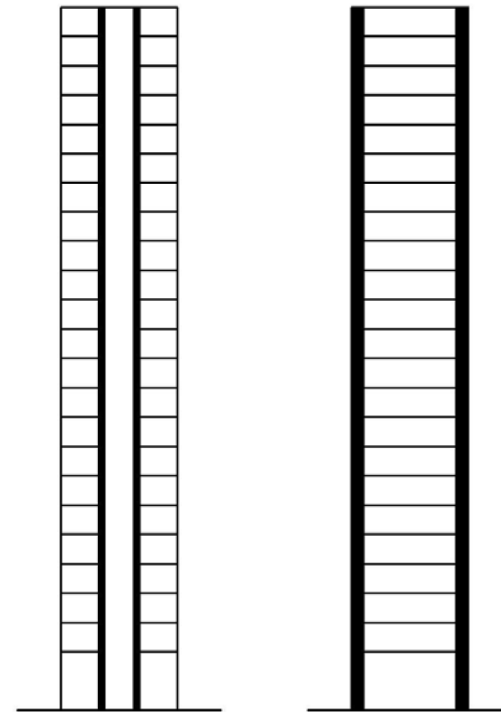


cargas laterales son paralelas a su plano; el peralte absorbe la carga con mínimas deformaciones.

Los mecanismos descritos anteriormente pueden combinarse entre sí para adaptar la estructura a los requerimientos particulares de cada problema, así podría resultar por ejemplo una planta de tubo interior con apoyos periféricos.



Sistema de Núcleo Central
Sistema de Muros de Corte



S
a
j
m
u
a
y
n
o
a
P
a
G
b
a
l
r
o
c
i
a

FIGURA 59: Sistemas de muro de corte y núcleo central.





14.5 SISTEMA DE MUROS DE CARGA

Los muros de carga de mampostería han constituido el primer sistema estructural que se empleó para edificios de varios niveles, asociados a sistemas de piso de madera o de bóveda de mampostería.

La limitación de este sistema se debe a que su escasa resistencia en compresión y en tensión obliga a una alta densidad de muros con espesores considerables. Por ello la estructuración es aceptable sólo cuando el uso de la construcción implica la subdivisión del espacio en áreas pequeñas, como en edificios de vivienda y hospitales. En la actualidad la construcción a base de muros de carga de mampostería se emplea usualmente para edificios hasta cerca de cinco pisos, aunque existen ejemplos de construcciones de 15 o más pisos con muros de mampostería de piezas de alta resistencia y con altas cantidades de refuerzo.

El material más apropiado para la estructuración con muros de carga en edificios altos es el concreto, sea en la modalidad de concreto colado en el lugar o en la de paneles prefabricados, esta última muy popular en diversos países. La mayor limitación de esta solución a base de muros de carga es la falta de flexibilidad en el uso del espacio interior de la construcción. La distribución de áreas no puede modificarse en el tiempo, debido a que los muros tienen función estructural y la, distribución de éstos no puede alterarse de uno a otro piso. Desde el punto de vista estructural las ventajas básicas son, como se mencionó en incisos anteriores, la transmisión de cargas verticales por fuerzas esencialmente axiales y la gran rigidez ante cargas laterales que se logra por la alta densidad de muros en ambas direcciones.

14.6 OTRAS CONSIDERACIONES

Los tipos expuestos pueden ser edificados en cualquier sistema estructural de los expuestos anteriormente, o sea pudieran ser a flexión o triangulados, por su forma, etc. Lo que determina su agrupación en un sistema aparte es su comportamiento en la transmisión de cargas desde gran altura, lo que no ocurre en otros sistemas estructurales.

En cuanto a la estabilización se refiere se utilizan también varios sistemas, siendo los más conocidos los muros de corte ya mencionados, la rigidización por triangulación en los diferentes niveles, el adosamiento de estructuras trianguladas exclusivamente estabilizadoras, anclaje por medio de cable tensores, rigidización a través del espesor de los elementos verticales y horizontales, el uso de nervios a cada cierta distancia vertical, y también la estabilización a través de la forma de la planta con el uso del curvado, lográndose la estabilización como superficie estructural."



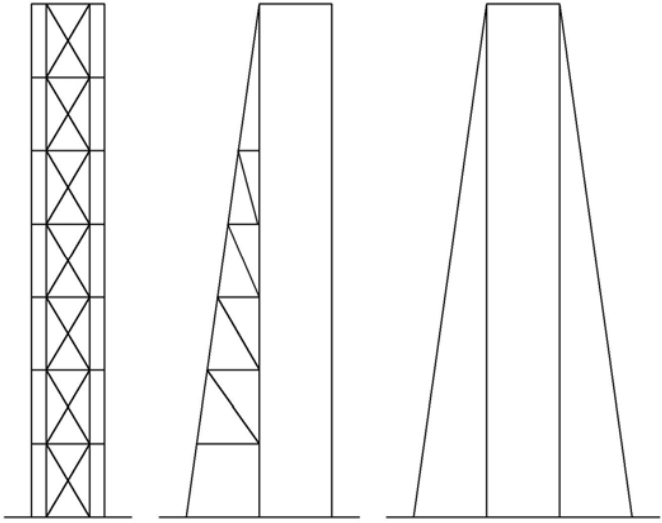


FIGURA 60: Estabilización de edificios.

En cuanto a la forma del conjunto deben tenerse presentes ciertas consideraciones que mejoran la eficiencia de la estructura. La primera consideración es que si el edificio alto se comporta de manera similar a una viga en voladizo la forma ideal del mismo corresponde a un ensanchamiento de la base, pudiendo ser disminuida la sección conforme aumenta la altura, pues el punto crítico es el empotramiento y este grado de riesgo disminuye con la altura, hasta llegar al último nivel en que se pueden tener secciones mínimas.

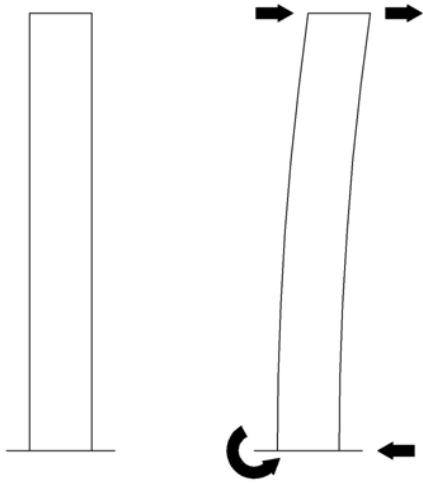


FIGURA 61: Comportamiento del edificio como viga empotrada.

Con esto se obtiene una forma estructural correcta y de acuerdo a los esfuerzos que se producen en cada sección.

Otro factor importante es la forma de la planta, prefiriéndose plantas cuadradas, rectangulares o bien figuras geométricas regulares que tengan bien localizado y centralizado su centro de masa, a efecto de evitar efectos de torsión o deslizamiento de sectores por esfuerzos cortantes, que ocurrirían sin duda con cargas aplicadas asimétricas en plantas caprichosas o irregulares.

Es importante considerar también que un edificio alto debe ser un volumen único que actúe monolíticamente al afectarle las cargas, por lo que no se recomienda el adosamiento de volúmenes de menor altura y diferentes





proporciones y que si se emplean deben ser independientes del volumen vertical, pues su comportamiento es muy diferente debido a los momentos de inercia; por lo que al actuar cargas laterales pueden llegar a dañarse mutuamente si se unen en un solo volumen.

De acuerdo con las consideraciones sobre la forma, no se recomendaría el uso de volúmenes protuberantes en los últimos niveles, a manera de remate, pues es totalmente contradictorio a la sección ideal y con cargas laterales puede hacer comportarse esa masa como un péndulo oscilante con fuertes desplazamientos y deformaciones no convenientes.

Dada la magnitud de las cargas laterales provocadas por sismo, no es recomendable construir edificios altos en zonas muy sísmicas, más que todo por razones económicas, pues dada la complejidad, y comportamiento de este tipo de sistemas, la seguridad del edificio se logra a costa del factor económico.

En edificios de muchas decenas de pisos ya no es suficiente la rigidez que pueden proporcionar algunos muros o un núcleo central, y la necesidad de contar con el mayor espacio libre posible en el interior lleva naturalmente a tratar de aprovechar la fachada para dar rigidez ante cargas laterales. La solución más eficiente es contra ventear todo el perímetro exterior de la construcción de manera que actúe como un gran tubo, aprovechando la máxima sección disponible; las que poco se prestan a lograr un aspecto agradable al edificio. Un funcionamiento similar se obtiene si en lugar de tener un arreglo triangular de los elementos de fachada se tiene una retícula formada por columnas muy poco espaciadas y por vigas de piso de alta rigidez, de manera que las deformaciones de flexión de las columnas sean pequeñas y el trabajo de éstas sea fundamentalmente a

carga axial. En este sistema, llamado comúnmente de tubo, se aprovechan las columnas de fachada integrándolas a la ventanería y reduciendo mucho el costo de ésta. Este ha sido el sistema estructural más popular en los últimos 30 años para los mayores rascacielos construidos en los Estados Unidos, hasta superar los 100 pisos. Existen diversas variantes que tienden a obtener una rigidez todavía mayor, como la de acoplar el tubo a un núcleo central de muros de concreto (tubo en tubo) o de subdividir la planta en una serie de tubos interiores (tubo *subdividido* en *celdas*).

14.7 CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE ESTRUCTURAS VERTICALES

- Las estructuras verticales han de basar su aplicación en dos principios básicos, el primero, la selección de la ubicación de los apoyos (descritos anteriormente) y el segundo, la forma de estabilización a emplear en el objeto arquitectónico.
- En las figuras que se presentan a continuación, se muestran las diferentes ubicaciones de los apoyos según la configuración en planta, la dirección que toman las cargas y la posible respuesta volumétrica resultante. La primera fila (horizontal) en las cuatro figuras presenta la opción reticular, la segunda, la opción de núcleo central y la tercera la opción perimetral. Es importante hacer notar que el uso del voladizo en este tipo de estructuras, así como en las estructuras masivas, complementa la respuesta tanto estructural como formal del elemento arquitectónico.





S
a
m
u
e
l
P
a
b
l
o
c
i
a

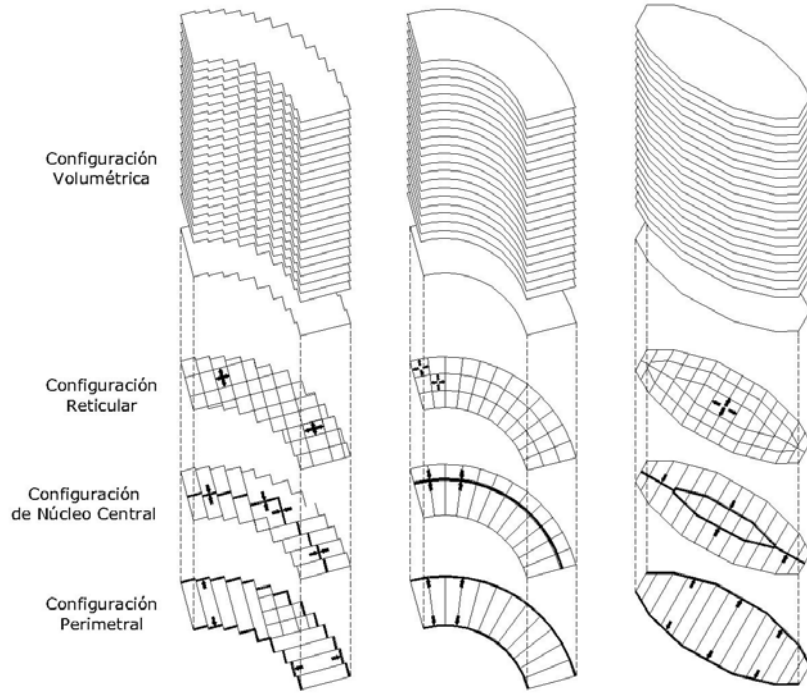


FIGURA 61: Configuraciones estructurales en edificios.

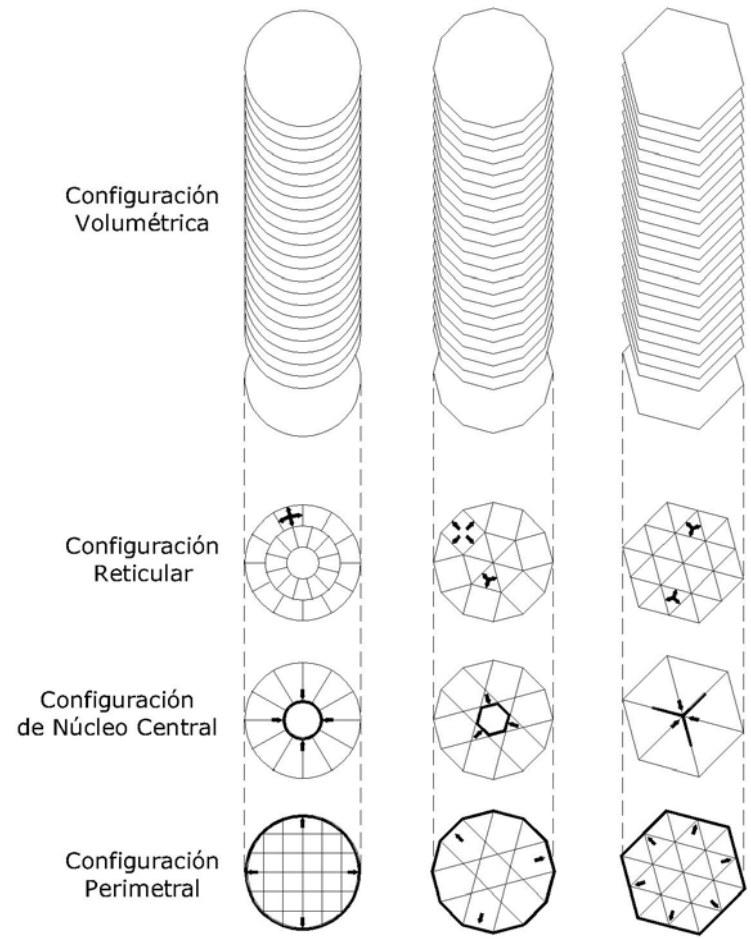


FIGURA 62: Configuraciones estructurales en edificios.



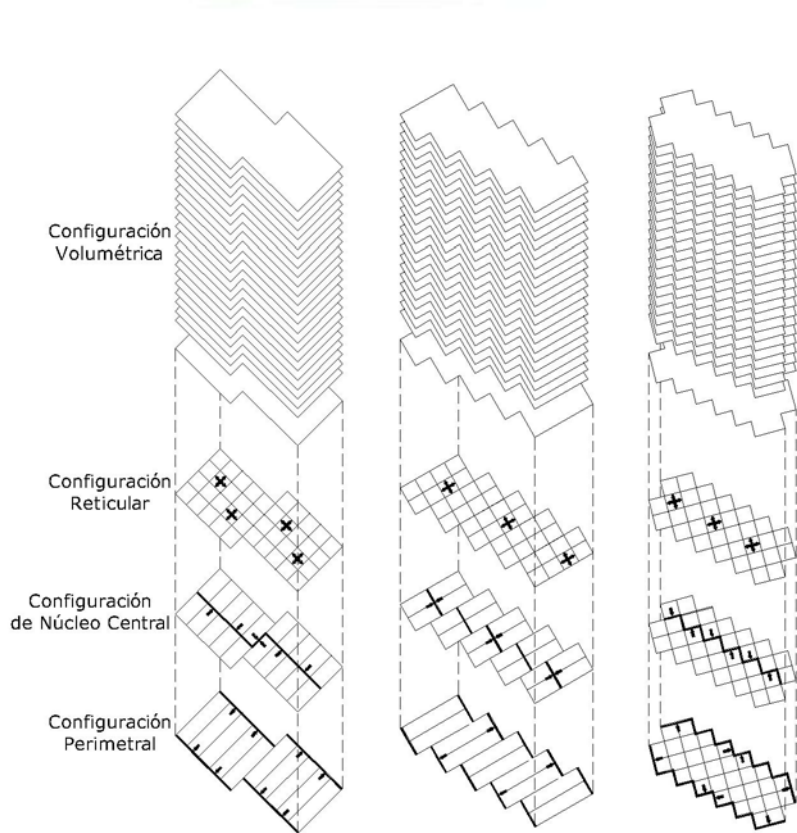


FIGURA 63: Configuraciones estructurales en edificios.

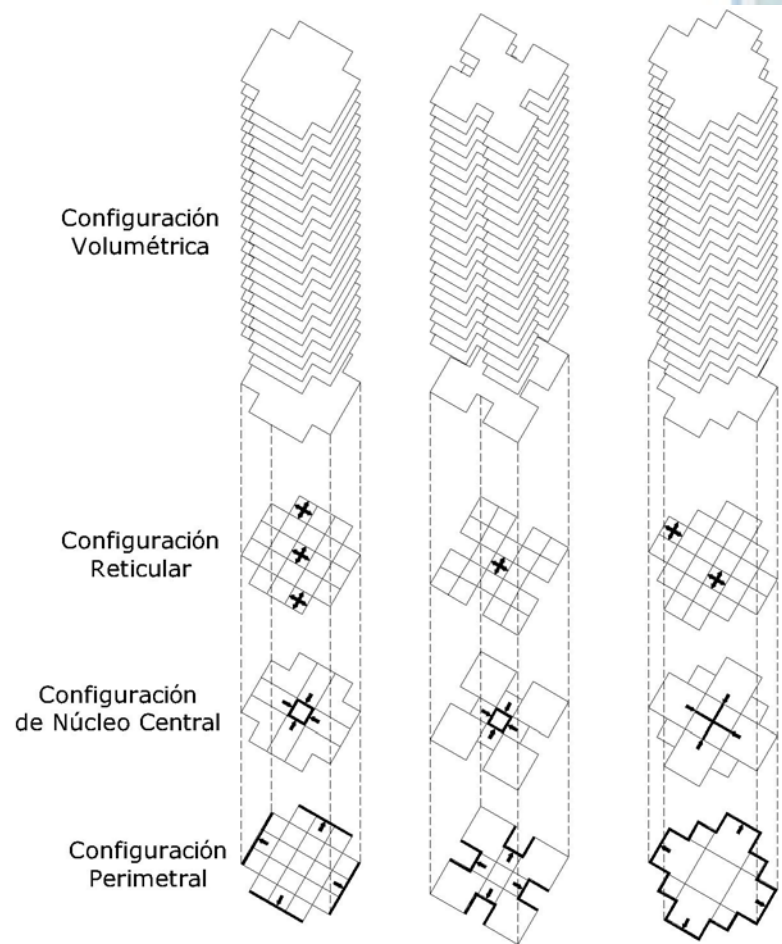


FIGURA 64: Configuraciones estructurales en edificios.

S
a
m
u
a
y
n
o
P
a
b
a
i
r
c
i
a





- En este tipo de estructuras la forma en planta es de vital importancia para el correcto funcionamiento estructural del proyecto, ya que las formas resultantes de una u otra configuración en planta, pueden repercutir de manera favorable o desfavorable para el proyecto.
- Como se verá en la tercera parte, en la actualidad se presenta un sin numero de posibilidades para estructuras verticales, pero todas ellas responden a la correcta interpretación de conceptos y la combinación de materiales y sistemas estructurales.
- El empleo de planos seriados y su rotación como principio de diseño es recomendable para lograr formas innovadoras y resulta estructuralmente funcional ya que la misma rotación de la planta trae consigo la estabilidad del elemento resultante.
- En este tipo de estructuras, debido a su voluminosidad y envergadura, es posible combinar otros sistemas estructurales antes descritos e integrarlos en subsistemas de una estructura mayor, por ejemplo los arcos, cables y armaduras pueden ser usados como medios de estabilización, los marcos rígidos como elementos puramente conformantes del cuerpo del edificio, las cáscaras y las membranas como elementos delimitantes del espacio y auxiliares formales, todos basados en el funcionamiento y conceptualización previamente descrita.
- El uso de sistemas verticales responde la necesidad imperante en la actualidad de

optimización del espacio, por lo que su comprensión y correcta aplicación será en gran parte el futuro de la Arquitectura.



S
a
j
m
u
a
y
n
o
a
P
a
G
b
a
l
r
o
c
i
a





Tercera Parte: Aplicación al Diseño Arquitectónico



CAPITULO XV

ERRORES Y ESTÉTICA ESTRUCTURAL

15.1 ERRORES ESTRUCTURALES

15.1.1 Errores históricos

“Desde el momento que el hombre comenzó a erigir estructuras, éstas comenzaron a fallar. En los tiempos prehistóricos las casas de piedra se construían ininterrumpidamente por Asia Menor, Grecia, Creta, Cerdeña, el sur de Francia e Inglaterra, pero sólo unas pocas sobrevivieron intactas después de 2000 ó 5000 años. Las pirámides de Egipto se encuentran entre las siete maravillas del mundo: el Coloso de Rodas, una estatua de bronce que representa a Helios, el dios del sol y mide más de 30.5 metros de altura, desapareció y un terremoto destruyó el faro de Alejandría (Egipto) que según algunos historiadores medía 61 metros y según otros 183 metros.

Aceptamos tales errores por la falta de conocimiento estructural de los hombres de esa época. Pero estamos impactados y confundidos por el derrumbe de nuestros edificios y puentes. ¿Cómo explica nuestra edad científica tales desastres? Si nos interesa saber porqué la mayoría de nuestros edificios permanecen en pie, también queremos saber porqué algunos se derrumban.”¹

15.1.2 Causas principales de error estructural

En los últimos análisis se comprobó que todos los errores estructurales están causados por el error humano y

se debe a la falta de conocimiento o juicio, pero con fines de clasificación, pueden atribuirse a deficiencias de diseño, la fabricación o los materiales. Uno puede atribuir los errores a causas inesperadas, naturales o hechas por el hombre, pero hasta éstas se deben, la mayoría de las veces, a la falta de conocimiento o de cuidado. Las diferentes causas a menudo conspiran y terminan en derrumbes. Las *investigaciones técnicas* deberían tratar de explicarlas, de modo que se pudiera evitar su repetición.

15.1.3 Fallas en el diseño estructural

Las deficiencias de diseño pueden darse por un número de razones: puros y simples errores de cálculos, interpretación equivocada o incompleta de los códigos de edificación, errores de cómputos, desconocimiento de cargas ocultas o dinámicas, defectos de detalle, falta de coordinación entre los miembros del equipo de construcción y muchas más.

Un buen diseño resulta de la experiencia, ya que el diseño no puede enseñarse. Por lo tanto del joven aprendiz no debe esperarse que asuma la importancia de las muchas facetas de diseño y no se le debe dar la responsabilidad del diseño de componentes estructurales esenciales. La organización de una oficina profesional requiere una asignación de tareas y supervisión cuidadosa en todos los niveles. Antes de firmar los bocetos un profesional con experiencia debe examinarlos cuidadosamente y estar seguro de que interpretan fehacientemente el concepto de diseño para los otros miembros de equipo de construcción. Desafortunadamente, bajo las presiones económicas y de tiempo de nuestra cultura, cada supervisión y coordinación no tienen la consideración que merecen y a menudo son las causas de las fallas.

¹ Mario Salvadori y Robert Heller. Ibid. pag. 226.





Contrariamente a lo que se puede creer, los *errores de cálculo* rara vez ocasionan diseños deficientes: si son notorios, se captan fácilmente; si son menores puede que no sean importantes. Con la llegada de la computadora se han refinado inmensamente los cálculos estructurales al costo de ahogar al diseñador en un mar de números: el profesional de experiencia, consciente de los errores de la computadora, nunca aceptará los resultados sin chequearlos a mano con una fórmula simplificada.

Un conocimiento exhaustivo de los *códigos de construcción* requiere años de paciente estudio, interpretación cuidadosa y actualización constante. Los códigos se modifican en lapsos cortos de tiempo para tomar en cuenta la acumulación del nuevo conocimiento y clarificar el significado de sus requerimientos. La mayoría de los requerimientos estructurales de los códigos locales derivan o se refieren a unos pocos códigos norteamericanos aceptados, pero igual varían lo suficiente de unos a otros como para demandar la inspección minuciosa, particularmente por sus implicancias legales. De todas formas, debe recordarse que los códigos de edificación hacen las recomendaciones mínimas y la aceptación a esos requerimientos no está exenta de responsabilidades técnicas por parte del diseñador.

Los campos de evolución rápida, como los de *diseño dinámico* para cargas de viento y terremotos tienen requerimientos que rara vez se actualizan a tiempo en los códigos de edificación porque necesitan debates que requieren tiempo antes de que sean aprobados. Además, la práctica de tratar con las condiciones dinámicas no es común en la ingeniería arquitectónica porque la mayoría de nuestros edificios están generalmente sujetos a cargas estáticas únicamente. Por tanto, el aprendiz de diseñador no debe ser consciente sólo de la posibilidad de las cargas

dinámicas, sino que debe estar al tanto de la posibilidad de la bibliografía actual de modo de poder hacer uso económico y seguro de la última información sobre estas peligrosas condiciones. Por ejemplo, el diseño de la Municipalidad de Toronto para fuerzas de viento, sabiamente determinado por pruebas de túneles de viento, denota una carga de viento inesperada debido a la canalización del mismo a través de la brecha que se encuentra entre los dos edificios. En forma similar, las pesadas compuertas de hierro de uno de nuestros primeros silos misil se separaron de sus bisagras y se derrumbó la primera vez que se usó por falta de consideración, por parte de los diseñadores, de las fuerzas dinámicas debido a su movimiento acelerado.

El sistema contra el viento de un edificio no debe reunir sólo las condiciones de fuerza sino las de rigidez, para disminuir la incomodidad de sus ocupantes y evitar el daño a las paredes.

El conocimiento de los movimientos de los terremotos y su influencia en los edificios ha mejorado durante las últimas décadas. Debe advertirse que los datos sobre terremotos se reúnen ininterrumpidamente en todo el mundo y que como resultado de estas investigaciones los requerimientos se vuelven cada vez más exigentes.

El mismo cuidado debe tenerse al tratar con diferencias térmicas, la fuente principal de tensiones. Debido a su dependencia de un gran número de parámetros, la investigación de las tensiones termales está aconsejada por la mayoría de los códigos sin recomendaciones específicas sobre las diferencias de temperatura o métodos de análisis. Como consecuencia, las fallas estructurales pueden a menudo atribuirse a condiciones termales olvidadas. La mayoría de las rajaduras de la mampostería de los edificios que tienen aire acondicionado particularmente en los





revestimientos de paneles prefabricados, se deben a las conexiones rígidas entre la mampostería expuesta y a la estructura interior que no permiten las expansiones y contracciones de la mampostería debido a las variaciones exteriores diarias y de estación. En forma similar, el resquebrajamiento de las particiones de los edificios altos se da cuando el clima produce grandes diferencias de temperatura entre las fachadas sur y norte. El corte térmico de tales edificios es la fuente de altos cortes en las particiones que actúan como nervios de las vigas verticales en voladizo y de las rajaduras debidas al componente de tensión de estos cortes.

La mecánica de suelos se ha convertido en un campo de ciencia importante debido a las investigaciones de los últimos 100 años: es una de las facetas más sensibles del diseño de cimientos. Ningún ingeniero estructural asumirá la responsabilidad de tal diseño sin una investigación de suelo llevada a cabo por laboratorios especializados que especifican la capacidad de soporte del suelo, el diferencial máximo de asentamiento a esperar, y el tipo de cimientos más apropiado para una ubicación elegida. Los diferenciales de asentamiento son de particular interés para el diseñador ya que éstos pueden causar grandes grietas en las paredes y particiones y el debilitamiento de la estructura. Un número sustancial de errores en losas y paredes se deben a deficiencias en los cimientos que tienen que ver con cambios en los niveles de agua y la nueva construcción.

Algunas de las fallas más espectaculares tienen lugar en las estructuras que carecen de *redundancia*. La indeterminación estática es necesaria pero no es una condición suficiente de redundancia. Por ejemplo, si una viga *fija* fallara en una de sus secciones de soporte, podría permitirle teóricamente cargar la carga como un voladizo, pero si fuera designada originalmente para resistir los

momentos de flexión de una viga fija que generalmente se dan en sus extremos, las tensiones de la raíz del voladizo aumentarían por un factor de 6 y derrumbarían la viga. Si la sección media de la misma viga fallara y soportara la carga como dos voladizos de la mitad de su largo, las tensiones en las raíces de estos voladizos estarían 50% sobre el máximo de tensión original y peligrosamente cerca de derrumbarse ya que, por lo general, los factores de seguridad tienen en cuenta un aumento de carga del orden del 67%.

La redundancia requiere que se provea una resistencia estructural adicional en caso de falla, particularmente cuando las cargas en una estructura están sostenidas por un gran número de elementos idénticos, como, en las estructuras de espacio. El techo del Estadio de Kansas City (Missouri) se colgó de los tres armazones de tubos externos por medio de 48 soportes de hierro. Cuando una de las conexiones de soportes falló durante una tormenta de lluvia, la carga soportada por ese soporte se transfirió a los soportes adyacentes que presumiblemente no podían soportar más carga adicional, se desarrolló una cadena de reacción que derrumbó una gran sección del techo, afortunadamente sin pérdida de vidas humanas porque el estadio estaba vacío en ese momento. Una reacción de cadena similar se dice que causó el derrumbe de un cielorraso suspendido en la terminal de Jersey City del ferrocarril Path, que causó dos muertos. Debe destacarse que los soportes de tensión trabajan en tensión simple distribuyendo la carga uniformemente sobre su sección cruzada, por lo tanto no tienen la reserva de fuerza derivada de la redistribución de tensión en una sección típica de la acción de flexión.

La redundancia es particularmente necesaria cuando se da una reacción en cadena a causa del pandeo.





El pandeo es un fenómeno que se da sin avisar, y es seguido generalmente por el error. El caso particular de pandeo que incluye torsión se llama *pandeo lateral* y presenta la misma característica peligrosa. De acuerdo a los resultados publicados por las investigaciones estructurales sobre el derrumbe de la estructura espacial del techo del centro cívico de Hartford, en Hartford, Connecticut cuya extensión era de 100 x 90 metros y estaba sostenido sobre 4 pilares, el derrumbe del techo durante una tormenta de nieve, comenzó por las fallas de pandeo de la barra de compresión cercana al límite de la estructura. Cuando la carga soportada por esta barra se transfirió a las barras adyacentes, éstas no pandearon, precipitando una reacción en cadena de derrumbe que tiró al piso de la cancha de hockey en cuestión de minutos, las 1500 toneladas de hierro de todo el techo. No está claro el pandeo responsable de la reacción en cadena y posterior derrumbe fue axial o torsional.

Los estados de tensión de las *conexiones* de los elementos estructurales son particularmente complejos. Por lo tanto no es de sorprenderse que sean a menudo "fuentes de errores". Los códigos y manuales dan criterio para el diseño de conexiones basadas no sólo en el análisis refinado de la tensión matemática sino también en una serie de pruebas sobre maquetas o conexiones de tamaño natural. Ya que, debido a su complejidad las fallas de conexiones se dan más frecuentemente que las de miembros estructurales, las conexiones están diseñadas con altos coeficientes de seguridad. Esto es particularmente cierto acerca de las estructuras espaciales cuyos conectores pueden tener formas complejas y distribuciones de tensión.

Las fallas se atribuyen a veces a *fenómenos naturales inesperados* o *hechos por el hombre*, tales como huracanes, tormentas de nieve, tsunamis, incendios o

explosiones. Estos por supuesto causan estragos en toda clase de estructuras, ya sean grandes o pequeñas, pero sólo cuando las estructuras no fueron diseñadas para resistirlos, cuando las fuerzas alcanzan nuevos picos (algo común), o cuando los ingenieros olvidaron las lecciones del pasado. El derrumbe del Puente de Tacoma, Narrows, en 1940 fue idéntico al del puente de suspensión sobre el río Ohio, en 1854, pero el recuerdo de este desastre vívidamente descrito en la prensa local, se había evaporado. Descripciones de derrumbes similares de puentes de suspensión habían aparecido en la prensa británica a principios del siglo XIX pero también habían sido olvidadas, permitiendo la repetición de desastres pasados.

En la mayoría de los derrumbes recientes de grandes estructuras, las cargas, debido a las fuerzas naturales no alcanzaron los valores de diseño recomendados por los códigos y deben atribuirse al diseño defectuoso. Por ejemplo, el derrumbe de grandes techos planos expuestos a tormentas se debe a menudo a un fenómeno de reacción en cadena llamado "ponding". El techo plano hace un hueco debajo del peso de la lluvia, adquiriendo una forma cóncava que no permite que el agua alcance el nivel de los desagües. El peso de la lluvia aumenta el hueco del techo, que se transforma en una laguna que contiene una carga de agua creciente que eventualmente derrumba el techo. La distribución apropiada de los drenajes en los niveles correctos previene el "ponding".

Las causas de las fallas ocasionadas por el hombre, como por ejemplo, incendios y explosiones, pueden dañar tanto como las debidas a fenómenos naturales. A un alto edificio industrial de la ciudad de Nueva York se le "volaron" dos de sus fachadas completas por una bizarra secuencia de eventos atribuibles al error humano. Un tanque cilíndrico de aire comprimido de 3 metros de alto y 60 centímetros de





diámetro, explotó en la mitad de la noche, debido probablemente a una deficiencia en el tanque o el mal funcionamiento de un indicador de presión. La explosión del tanque disparó la cúpula superior contra un caño de gas que se encontraba en la parte superior y a causa del impacto comenzó a tener una pérdida. El gas se hubiera confinado al piso donde se encontraba el tanque si no hubiera sido por el movimiento alternativo de los ascensores que llevaron el gas a los pisos altos y lo bajaron a los inferiores en una acción de bombeado, repartiendo así el gas por todo el edificio. Cuando a la mañana temprano, un ocupante del edificio encendió un cigarrillo, la mezcla de gas y aire explotó, destruyendo las dos fachadas cuyos escombros dañaron los edificios adyacentes e hirieron a un número de sus ocupantes.

Esta breve reseña de alguna de las causas más comunes de las fallas estructurales ilustra su gran variedad y sugiere la responsabilidad del ingeniero estructural en el diseño de estructuras importantes. En las secciones siguientes se muestra que la responsabilidad de los otros miembros del equipo de construcción es tan grande como la del arquitecto.

15.1.4 Fallas en la coordinación y la supervisión

El equipo de construcción de una gran estructura moderna consta de un número de especialistas: el arquitecto a cargo y su equipo de arquitectos de diseño, el arquitecto de coordinación, el arquitecto de paisaje y los diseñadores de interiores; el ingeniero estructural y su equipo; el ingeniero mecánico y su equipo; el ingeniero electrónico y su equipo; el ingeniero de plomería y su equipo; el ingeniero de sueldos; el diseñador de ambientes; el contratista y su equipo; los representantes del dueño, y una variedad de expertos en paredes de cristal, techos, costos,

inventarios y materiales. El último que mencionaremos, no porque carezca de importancia, es el *jefe de construcción*, que tiene la responsabilidad de la viabilidad del diseño y la coordinación de todos los rubros, actúa como el agente del dueño y dirige la ejecución de trabajo con la ayuda de los expertos en inventarios, responsables por la secuencia de operaciones y entrega de materiales. En las frecuentes reuniones generales sobre el progreso de la construcción no es común tener 30 expertos o más alrededor de la mesa, peleando sus batallas personales en favor del edificio.

La fluida *coordinación* entre todas las facetas de la construcción requiere una comunicación entre los miembros del equipo e implica un conocimiento de los requerimientos básicos de otros aspectos por parte de los representantes de cada uno de los mismos. El arquitecto, como líder del equipo, debe conocer las necesidades de *todos* los items y ser capaz de conciliar las disputas que surjan de los requerimientos de los consultores. En esto, lo ayuda el jefe de construcción, cuyo trabajo demanda una experiencia práctica y una capacidad para conciliarse y comprometerse con los angostos límites de la aceptación. Los *documentos de construcción* (bocetos, especificaciones y contratos) son de gran importancia a la hora de evitar malos entendidos e interpretaciones equivocadas que sólo llevan a retrasos y errores. Si se elige a un contratista al comienzo del diseño o por contrato, deben dársele los documentos pertinentes que no dejen dudas de lo que debe hacer. El tiempo y el esfuerzo que llevan estos documentos evitan fallas y costosos pleitos.

Muchos de los elementos estructurales como vigas y columnas de hierro o vigas, columnas y losas de hormigón standard (a menudo pretensadas), llegan al terreno desde un *negocio*. Deben controlarse estos elementos para ver si son compatibles con el diseño y es necesario asegurarse de





que cualquier-discrepancia se encuentre dentro de las *tolerancias* prescritas, no sea que se vean obligados a forzar los elementos, induciéndolos a tensiones peligrosas.

El arquitecto y los ingenieros deben darse cuenta que hay una amplia brecha entre la concepción teórica y su ejecución y que el trabajo del contratista puede parecer menos creativa que el de ellos pero es por cierto igual de complejo y exigente. Una colaboración armoniosa entre las ramas legislativas y ejecutivas del equipo de construcción es una necesidad si se quieren evitar errores.

15.1.5 Errores de materiales

Las propiedades más esenciales del acero estructural son *la fuerza y la ductilidad*, es decir, la capacidad plástica, que garantiza la eliminación de las concentraciones de tensión y una reserva de fuerza. Estas propiedades dependen de la composición química, el tratamiento térmico y la ondulación de las formas del acero durante la manufactura y deberían chequearse para cada horneada de acero usado obteniendo los datos correspondientes del fabricante: son esenciales, no sólo para vigas y columnas sino para tuercas, pernos y otros componentes de conexión. Desde 1960 los ingenieros han sido alertados del peligroso fenómeno de la *delaminación* causada por la soldadura de gruesas secciones de acero: a menos que su acero sea tratado térmicamente en forma adecuada, cualquier sección de más grosor de dos o tres pulgadas tiende a separarse en láminas, reduciendo ampliamente su fuerza. La experiencia recogida de estos desastres enfatiza la importancia de chequear el tratamiento de hierro usado en grandes estructuras.

No hay operación que tenga más riesgos en la construcción de hierro que la soldadura de conexiones: la

soldadura de materiales, el tipo de llama, la temperatura y la velocidad usada en esta operación influencia dramáticamente la fuerza de las conexiones. Dado que el número de errores de las estructuras atribuibles a las soldaduras, la mayoría de los códigos requieren soldadores debidamente entrenados.

Las propiedades del hormigón dependen de su composición, es decir, las proporciones de cemento, arena, piedra y agua usadas en la mezcla. Además del tipo de cemento y la resistencia de la piedra, se debe establecer la granulometría de arena y piedra, es decir, la distribución del tamaño, de modo tal que garantice que los huecos que se encuentran entre las piedras, sean rellenados por los granos de arena y los huecos que aún queden, por el cemento. Tanto la piedra como la arena deben lavarse cuidadosamente para eliminar impurezas. La proporción de *agua/cemento* es el factor más importante en determinar la resistencia del hormigón: una proporción baja aumenta la resistencia pero dificulta el vertido y la vibración del hormigón; una proporción alta debilita el hormigón. En todos los proyectos de cierta importancia la mezcla de hormigón está diseñada por un *laboratorio de hormigón* y su resistencia se chequea después de 7 a 28 días por medio de cilindros de prueba de hormigón tomados de las horneadas diarias del mismo. El siguiente episodio ilustra la necesidad de vigilancia en la supervisión del hormigón. Durante la construcción de una de las más famosas terminales aéreas de los Estados Unidos se notó que las horneadas de hormigón daban resultados de resistencia aceptable en todo momento, con excepción de los del paraje en horas tempranas de la tarde. Cuando todas las investigaciones fallaron al tratar de descubrir la razón de esta anomalía, el ingeniero de diseño decidió seguir los camiones que dejaban la planta de hormigón en la hora del almuerzo, que generalmente llegaban una hora más tarde. Así descubrió





que el conductor del camión, antes de detenerse a almorzar, echaba agua en las mezcladoras automáticas de los camiones para evitar que el hormigón se seque durante la hora de la comida. El hormigón que llegaba al lugar tenía la consistencia correcta pero una resistencia reducida por la proporción mayor de agua-cemento, como lo revelaron las pruebas a los siete días.

Debe tenerse un cuidado particular en la colocación de las barras de hierro reforzado en el hormigón, además, las barras de hierro deben cubrirse con zinc o epoxia cuando haya sales corrosivas que puedan filtrarse a través del hormigón, como sucede a menudo en las losas de los garages cuando se usan sales derriete-nieve en los caminos. El arquitecto debe ser consciente de los peligros debidos a fallas en los dos materiales estructurales más comunes, pero sólo el metalúrgico y el especialista en hormigón pueden ayudarlo en la determinación de sus propiedades y prevenir así los errores.

15.1.6 Consecuencias de los errores estructurales

Los errores estructurales provocan a veces daños corporales y pérdidas de vida humana y son *siempre* la causa de pérdidas financieras y de reputación profesional y otras consecuencias para los miembros del equipo de construcción. A menos que se solucione amigablemente entre las partes involucradas, los derrumbes y también los errores menores llevan a litigios en la corte o arbitrios como los consultores técnicos del arquitecto son a menudo sus subcontratistas, el arquitecto está legal y financieramente involucrado en el litigio. El arquitecto está entonces obligado a demandar a sus consultores y al contratista, y el contratista, en cambio, a demandar a todo el equipo arquitectónico. El propietario que, por cierto, no tiene ninguna responsabilidad, es generalmente el que origina

estas complejas, prolongadas y costosas maniobras, en las que cada parte está asistida por un grupo de expertos. Es común para estos procedimientos legales duran largos períodos de tiempo (a veces años) y que los requerimientos por daños, alcancen altas sumas de dinero aunque no se trate de daños primitivos, atribuibles a la mala fe o el fraude. En muy pocos intentos humanos encontramos una pizca de prevención que cueste tantas libras de remedio.

Puede parecer extraño leer en un libro de estructuras, la recomendación de que un arquitecto debe contar no sólo con los servicios de consultores estructurales competentes sino también de un consejero legal. Pero las realidades del mundo de la construcción prueban que el consejo de un abogado en la preparación de contratos, documentos de construcción, la aprobación de los bocetos de los consultores y, en general, de todas las comunicaciones escritas, es de particular importancia para el arquitecto profesional. La recomendación puede ser esclarecedora hasta para el letrado que lee las historias de la prensa diaria acerca de las consecuencias humanas, financieras y profesionales de las fallas estructurales. No debe sorprenderlo que la *ingeniería forense* el arte y ciencia del testimonio experto en la corte, se ha convertido en una especialidad reconocida de la ingeniería, cuando aprende que los daños demandados por el demandante en el derrumbe del Hotel Hyatt Regency de Kansas City, Missouri ascendían a la friolera de tres billones de dólares y que los ingenieros de diseño de este proyecto han sido excluidos del foro.

¿Hay algún otro remedio para las fallas estructurales de nuestra era tecnológica? Una medida que sugería aliviar la situación fue tomada por unos pocos estados y consistía en requerir a los ingenieros de construcción actualizar sus conocimientos por medio de la concurrencia a cursos de su





especialidad antes de renovar sus licencias profesionales. Las sociedades de ingeniería profesional y las facultades de ingeniería ofrecen esos cursos y las oficinas y compañías de ingeniería lo ofrecen en sus plantas y obligan a sus ingenieros a que asistan a los cursos de las universidades y las sociedades profesionales. La evolución rápida y continua del campo de las estructuras ha aumentado notablemente el uso por oficinas de diseño de consultores externos y recomendaron, en circunstancias particulares, el uso de las llamadas "inspecciones". Estas consisten en pedirle a una firma de diseño que analice *profundamente* un diseño estructural antes de su ejecución y que señale sus deficiencias y sugiera soluciones alternativas a los problemas estructurales de diseño.

15.2 ESTÉTICA ESTRUCTURAL

15.2.1 Estética y estructuras

"No hay arquitectura sin un componente estético, pero ¿existe una estética de la arquitectura? Y si la hay ¿influye tan profundamente a la arquitectura como para que los arquitectos se interesen en ella?"

Los edificios que satisfacen estéticamente pueden construirse en parte sin tener en cuenta las leyes estructurales. Por otra parte, grandes estructuralistas han predicado que no se debería molestar con la estética porque si un edificio está correctamente diseñado, la belleza está obligada a caer de su corrección estructural. Innumerables edificios horribles, correctos desde el punto de vista de la ingeniería, prueban esta teoría al carecer de base. Hasta si no tuvieran nada que ver con la estética, los genios de la ingeniería como Mailart y Nervi diseñaron estructuras hermosas por su innato sentido de belleza.

Al considerar la influencia de la estructura en la estética arquitectónica, uno debe distinguir esos edificios en los que la estructura carece relativamente de importancia, y por lo tanto no está determinada, de aquéllos en los que la estructura es esencial. Las soluciones estéticas totalmente satisfactorias sólo pueden lograrse a través de la acción recíproca de la arquitectura y la ingeniería."²

15.2.2 Mensajes semióticos

Desde principios del siglo XX, el concepto del *mensaje semiótico* de todo un edificio ha llegado a ser ampliamente aceptado por arquitectos, historiadores de arquitectura y otros especialistas del campo de la construcción. La semiótica, que es una rama de la filosofía desarrollada en los últimos noventa años, considera cualquier y todas las actividades y productos humanos desde el punto de vista de lo *no-verbal* o *comunicación por signo*. La comunicación consta de mensajes: la comunicación verbal tiene que ver con la comunicación de significados y para este propósito, usa las palabras de un lenguaje dado: una comunicación verbal depende totalmente de la cultura en la que se entiende el mensaje. La comunicación no verbal puede consistir también en un mensaje con significado que pueda expresarse verbalmente también. El mensaje semiótico de una señal del camino puede representar el mensaje inglés: "No estacionar", pero, a diferencia del mensaje verbal, se entiende internacionalmente. Por otro lado, un mensaje semiótico puede ser también subproducto de un objeto o artefacto, cuyo propósito principal no es comunicarse sino representar una función. La ropa, por ejemplo, se hace para proteger al cuerpo, pero semióticamente comunica status, como en el caso de uniformes militares o hábitos eclesiásticos.

² Mario Salvadori y Robert Heller. Ibid. pag. 241.





Ambos tipos de mensajes semióticos se encuentran en la arquitectura: los botones de un ascensor no sólo cumplen una función específica sino que expresan también mensajes semióticos relacionados con su función de mover el ascensor a pisos específicos. El mensaje de una ventana, en cambio, comunica algo que va más allá de su función intrínseca de transmitir luz y aire; las ventanas enrejadas de una prisión dicen: "Este edificio es una cárcel", mientras que las ventanas decoradas de un palacio del Renacimiento establecen inequívocadamente el status de su propietario.

Es obvio, que a partir de estos ejemplos elementales, que el mensaje semiótico se encuentra tan profundamente en una cultura como el mensaje verbal. Un salvaje entrando al lobby de un edificio alto no entendería el "significado" de los botones de un ascensor; ni captaría el significado social de las ventanas de un palacio renacentista.

Finalmente, el significado de un mensaje semiótico, tanto como el de uno verbal, cambia con el tiempo: las pirámides comunicaron un mensaje religioso en tiempo de los faraones, un estímulo para dar gloria a Napoleón y sus tropas, y una mezcla de significados artísticos, sociológicos y estructurales para el visitante moderno.

La estructura introduce en la arquitectura dos tipos de mensajes semióticos o cuando no es visible, el componente estructural puede no ser manifiesto para el que no es profesional, hasta el edificio pudiera depender esencialmente de esto para su mensaje arquitectónico. Por otro lado, los edificios estructurados únicamente por los requerimientos de la estática expresan un mensaje semiótico que a pesar de no ser independiente de su arquitectura, está estrictamente relacionado con la acción estructural y adquiere un significado *propio*.

15.2.3 Orígenes del mensaje estructural

Los mensajes puramente estructurales que se originan en un entendimiento intuitivo de la acción estructural provienen tanto de la experiencia física como de la percepción de las formas estructurales en la naturaleza.

La percepción visual de las formas naturales ha sido básica al extender nuestras intuiciones acerca de las estructuras hechas por el hombre. Las ramas de un árbol actuaron por su propio peso y el de la nieve, sugieren el comportamiento y la forma correcta para los voladizos, con dimensiones más grandes en su raíz que en su cúspide. Los troncos de los árboles que se doblan por el viento confirman este comportamiento, a la vez que la forma de los troncos rectos nos introduce en la acumulación de cargas verticales. Debido a estas intuiciones nos confundimos por la visión de una columna de Micenas, que es más grande en la parte superior que en la inferior, pero aceptamos como instintivamente correcto la forma piramidal de una columna dórica. En forma similar, consideramos "horrible" un voladizo que se afila hacia su base porque contradice un comportamiento estructural que hemos visto en la naturaleza desde el principio de la raza.

Una reacción de shock similar se da cuando nos enfrentamos a un volumen grande que tiene forma de pirámide invertida. Debido a la acción de la gravedad, las montañas tienen forma de pirámides y las pirámides egipcias tienen una forma geométrica idealizada idéntica a la de las montañas. Un edificio moderno que cae en Cantilever pero hacia arriba no le dice al que no es profesional como se erige: le sugiere que se usó algún "truco" para lograr un resultado "artificial" que cause en

S
a
m
u
a
y
n
a
P
a
b
l
o
c
i
a





nosotros una sorpresa más que el sentimiento de equilibrio expresado por un comportamiento estático "honesto".

Los arcos naturales nos han enseñado que la piedra que cubre una abertura debe adquirir una curvatura hacia abajo porque este material que es lo suficientemente fuerte para sostener una montaña, es débil en tensión. Este entendimiento intuitivo de la acción del arco puede extenderse a las estructuras bidimensionales, como por ejemplo, las cúpulas, refiriéndonos a nuestra experiencia de vivir en cavernas. Las cavernas no explican el grosor requerido de las cúpulas, pero de todos modos esto no puede apreciarse ni desde el interior ni desde el exterior.

En forma similar, las curvas catenarias de las viñas que unen árbol con árbol nos muestran la necesidad de curvaturas hacia arriba en las estructuras de tensión, una característica que hasta la ingeniería moderna debe usar en los puentes de suspensión.

De esta formase ve que aquéllos no son estructuralistas, el mensaje estructural deriva de experiencias atávicas cuya acumulación da como resultado reacciones estéticas. Esta es la razón por la que el no profesional considera a un voladizo correctamente diseñado "elegante" y dinámico, mientras que una simple viga apoyada, correctamente diseñada con una profundidad mayor en la parte media es difícil de entender y puede considerarse "horrible" para el no profesional, que nunca o casi nunca ha visto una viga en la naturaleza. Por el contrario, las vigas más naturales se conectan rígidamente a sus soportes y tienen un perfil visual de arcos bajos, de modo que una viga arriñonada parece "correcta" para el ojo inexperto. Hasta el experto estará de acuerdo con esta evaluación instintiva porque se da cuenta que, como lo muestran las líneas de tensión principales de una viga

simplemente apoyada, la acción del arco comienza cuando una viga de hormigón reforzado se sobrecarga. Podría parecer que en este caso el ojo humano está condicionado para ver la forma "final" de la viga, siguiendo los principios básicos de que una estructura no se derrumbará hasta que sea realmente inevitable.

Junto con la producción de aceros fuertes y baratos, hicieron su aparición en el siglo XIX, las estructuras con bisagras en su base, pero como su comportamiento es complejo, su mensaje es todavía confuso para el que no es profesional. Mientras que la forma curva del arco tiene una fuerte carga estética una estructura no parece ni horrible ni bella y se encuentra fuera del universo de la estética.

La misma clase de consideración se aplica al mundo tridimensional de las estructuras. En los elementos espaciales de naturaleza cóncava como por ejemplo los caracoles no son sólo símbolos de protección sino que tienen un fuerte contenido estético cuando tienen una de sus partes acanaladas. La analogía de la gran cúpula hacia el cielo misterioso podría caer en la misma categoría.

15.2.4 Escala y el mensaje estructural

El mensaje semiótico de las estructuras hechas por el hombre no está influenciado por la *escala* porque el mensaje se refiere a las experiencias comunes de la raza que tiene que ver con la forma y no con el tamaño. La comparación de la cúpula con cualquier caracol o el cielo es significativa en este contexto, como lo son las grandes estructuras de tensión con respecto a las telarañas, que siempre ocasionan sentimientos de sorpresa. Debido a la extrema eficiencia de los campos de tensión, las estructuras tensas, sea cual fuere su geometría y tamaño son también livianas en apariencia y consideradas intrigantes y hermosas. Además tienen formas





dictadas por las cargas que soportan e implican al lector de su mensaje una comprensión correcta pero no obvia de las estructuras de flexión. Si, siguiendo el ejemplo de Gaudí, uno usa una forma de antifunicular (dado vuelta) dictado por la correspondiente forma tensa del funicular, uno encuentra que estas formas correctas no siempre comunican un mensaje de belleza. Por otra parte, la forma particularmente bella de los cables de un puente de suspensión se convierte al invertirlo en una forma de arco bajo cuyo mensaje de belleza es obvio porque se ve a menudo en la naturaleza.

Uno puede objetar que ninguna estructura con cúpula es más liviana que un techo neumático de cable reforzado. Y debería parecer elegante hasta para el ojo inexperto. En cambio, las estructuras en globo se consideran poco atractivas porque transmiten pesadez: una comparación con el mensaje tradicional de la cúpula de piedra en comprensión no nos permite "entender" su acción estructural y nos confunde estructural y estéticamente. Tal confusión nunca se da en las tiendas porque estas estructuras tensas tienen su complemento en la naturaleza, aunque en escala reducida.

15.2.5 Estética y corrección estructural

Para la apreciación estética rara vez se necesita un entendimiento del comportamiento estructural. Un ejemplo de esto lo da la admiración general por una forma de techo rara vez comprendida en forma estructural. La parábola hiperbólica, una de las formas estructurales de techo más eficientes cuando está correctamente apoyada se caracteriza por una forma de silla de montar que se encuentra a menudo en la naturaleza y el arte, si se usa correctamente en forma horizontal o incorrectamente en vertical, el mensaje de la parábola hiperbólica es siempre de belleza. La

reacción de un chico de doce años cuando la ve por primera vez indica las asociaciones dictadas por este mensaje: luego de compararla con una montura de caballo, siente que también se le parece a un pájaro en vuelo.

En algunos casos un entendimiento inconsciente del comportamiento estructural puede reforzar la apreciación estética. Los nervios de una losa orientados hacia las líneas de los principales momentos de flexión se convierten en una fuente de satisfacción estética hasta para aquéllos que no tienen idea de la teoría de las placas. En forma similar, las líneas comprensivas de la tensión principal en una viga expresan su comportamiento en términos del comportamiento "más fácil" de los arcos y cables y constituyen un diseño agradable.

Uno puede preguntarse si el mensaje confuso de ciertas estructuras siempre nos llevarán a su aceptación estética. La forma de los elementos de hormigón pretensado gobernados por la tensión en sus tendones puedan contradecir la intuición humana. Uno se puede preguntar como las futuras generaciones pueden reaccionar a los volúmenes que flotan magnéticamente en el espacio que, por falta de referencia en la naturaleza, parecería desafiar algunas de las leyes básicas de la naturaleza, mientras que el avión parece elegante al comparárselo con el planeo de las aves.

Es la armonía entre las necesidades visuales de belleza y el respeto por las leyes naturales lo que dictó en el pasado y dicta hoy la exhibición de una estructura edilicia.

S
a
m
u
a
y
n
a
P
a
b
l
o
c
i
a





15.2.6 El mensaje de la estructura

En las secciones anteriores se mostró que el mensaje semiótico de una estructura está influenciado por nuestra experiencia personal y la experiencia cultural de nuestra sociedad. La importancia relativa de estos dos factores está iluminada por el ejemplo clásico de la Torre Eiffel de París. Esta extraordinaria estructura de hierro, diseñada y construida por un ingeniero genial en ocasión de la exposición de 1889, tenía el propósito utilitario de atraer visitantes a la exposición y el propósito patriótico de celebrar el centésimo aniversario de la Revolución Francesa. Iba a ser desarmada al final de la exposición. La campaña en contra de su construcción involucró a algunos de los más respetados representantes de la cultura francesa, incluyendo a famosos escritores, poetas, pintores y políticos que fueron exasperados por la "fealdad" de la torre. Pero, como se da a menudo en estructuras desarmables, la Torre Eiffel no se desarmó y, sólo 23 años después de su construcción se convirtió en el tema de una famosa serie de pinturas de Delaunay, que mostraba su aceptación de un punto de vista puramente estético. No le llevó mucho tiempo a la torre convertirse no sólo en una de las vistas de ese centro de la cultura llamado París, sino en su mismo símbolo. Y algunos años más tarde, toda su fuerza estructural se convirtió en un símbolo semiótico de Francia. En este caso extraordinario el mensaje semiótico parte pura y exclusivamente de una estructura: la Torre Eiffel es una obra maestra en la que nada se concedió a la decoración y nada se usó para ocultar sostenes necesarios. Su aceptación indica el hecho maravilloso de que una estructura pura pueda comunicar un mensaje simbólico complejo. Una relación recíproca similar entre los mensajes estéticos y estructurales llevó a la desnudez de las torres del Puente George Washington, en contra de la oposición de una gran parte de los intelectuales de Nueva York y del mismo in-

geniero de diseño que quería que se los recubriera en piedra, Y es otra indicación del rápido cambio del mensaje semiótico de la estructura en significado cultural.

El Museo Beaubourg se inauguró en París hace unos años. El desaliento del mundo del arte ante la construcción de un refugio de arte cuyo mensaje estético se basa no sólo en su estructura, sino también en sus sistemas mecánicos, debe aceptarse si se tiene en cuenta nuestro pasado reciente. Uno no puede predecir que el Beaubourg se convertirá en el nuevo símbolo de París o del arte moderno, pero uno no debería sorprenderse si la incorporación de elementos mecánicos en su mensaje estético fuera a llevar a una ampliación del vocabulario de la arquitectura y sea aceptado como rutinario por las generaciones venideras. El arte y la tecnología parecen ser así dos facetas de una cultura y no dos aspectos compatibles de la actividad humana.

S
a
m
u
a
y
n
a
P
a
b
l
o
c
i
a





CAPITULO XVI

APLICACIÓN AL DISEÑO ARQUITECTÓNICO

La aplicación de conceptos y la puesta en práctica de los conocimientos son lo que hacen reales a los mismos, por lo que se presentan a continuación una serie de proyectos de arquitectura contemporánea en los cuales se describirá y ejemplificará el uso de una u otra respuesta estructural, dando con esto validez a la propuesta que las estructuras no deben considerarse como una parte aislada del proyecto arquitectónico y su propuesta formal, sino al contrario, deben lograr una integración y servir de complemento para la respuesta formal buscada.

Para lograr una relimitación y evitar ser muy extensos en el análisis de estos casos se tomaron como referencia varios de los arquitectos más sobresalientes de los últimos tiempos, y algunos de sus proyectos, entre ellos: Norman Foster, Santiago Calatrava, Eric Owen Moss, Peter Eisenman y Daniel Libeskind.

16.1 ARMADURAS

16.1.1 ESTACIÓN DE TRENES EN DRESDEN, ALEMANIA.

Por: Norman Foster

“La estación principal de Tren de Dresden, completada en 1898 y diseñada por Ernst Giese y Paul Weidner, es una de las más grandes en Alemania y una de las más impresionantes estaciones de tren de finales del s. XIX de toda Europa. Conectando a Dresden con Berlín y Praga, la vía del ferrocarril jugó un papel importante en el crecimiento económico e industrial de las ciudades en la primera mitad del s. XX. Durante la segunda guerra mundial, sin embargo, esta estación fue severamente dañada por los bombardeos aliados. La destrucción causada en este periodo se agravó por el pobre mantenimiento hasta hacerse necesaria su conservación.

Cubierta por una estructura desmoronándose, se planteó la necesidad de renovar y expandir la estación como parte de un plan maestro para revitalizar el área. Esta renovación removió varias adiciones hechas al edificio a lo largo de los últimos cien años, para restaurar la integridad del diseño original. La circulación a lo largo y dentro de la estación fue racionalizada y su diseño permite la futura expansión de la estación mediante la extensión de la cubierta a lo largo de 200 metros de vía exterior, proveyendo con esto de cubierta a los nuevos trenes, los cuales son casi del doble de largo que sus predecesores. Las vías centrales han sido movidas hacia atrás para crear un espacio amplio en el corazón de la edificación, el cual puede ser usado para ventas o eventos culturales.

El primer elemento previsto para su reconstrucción es el techo de 30000 metros cuadrados, una tarea urgente

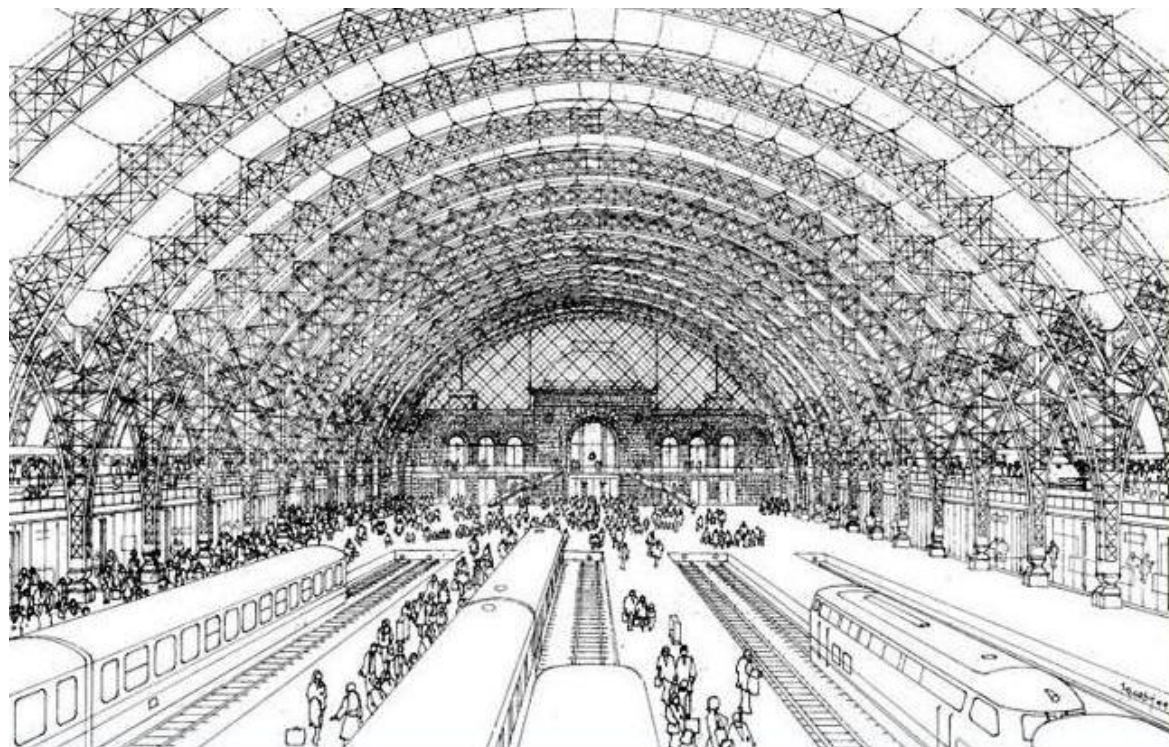
S
a
m
u
a
y
n
o
a
P
a
b
a
l
o
c
i
a





*dato el estado de inseguridad y degradación del anterior. Originalmente el techo contenía parcialmente vidrio, pero después de la guerra fue cubierto con madera, sin permitir la entrada de luz solar. La estructura completa ha sido restaurada a su condición original y cubierta con una membrana de teflón y fibra de vidrio. Esta nueva cubierta transmite 13% de luz de día y reduce significativamente el empleo de luz artificial. En la noche, la luz refleja hacia fuera, creando una ola de iluminación sobre la estación, mientras que desde el exterior se percibe una iluminación irradiada de la estructura.*³

La imagen mostrada en la parte inferior muestra el interior de la estación de trenes de Dresden, en donde se puede observar la utilización de las armaduras como respuesta estructural, basados en dos criterios básicos, el lograr cubrir un espacio relativamente amplio sin apoyos intermedios y como se expuso anteriormente, la curvatura de los elementos superior e inferior de la armadura, para con esto lograr una mayor rigidez y espacio interior disponible.



S
a
j
m
u
a
y
n
o
P
a
b
l
o
c
i
a

³ www.fosterandpartners.com

FIGURA 65: Interior de la estación de Dresden.





FIGURA 66: Vista exterior de la estación.

En la imagen de arriba (Fig. 66), se muestra la combinación de dos sistemas estructurales, las armaduras y las membranas, en este caso su combinación se debe al mínimo peso propio de ambas estructuras, debido al claro tan amplio que se busca cubrir, y a la versatilidad de ambos materiales.

Las imagen 67 muestra el proceso constructivo de las armaduras y la colocación de la membrana en éstas, y si podemos apreciar, como la culminación de los arcos de la cubierta coincide con los apoyos entre los arcos de las ventanas.



FIGURA 67: Configuraciones estructurales en edificios.

S
a
m
u
a
y
n
o
a
P
a
G
b
a
l
r
o
c
i
a





FIGURA 68: Vista interior de la estación.

Como se muestra en la figura 68, como estos mismos puntos de unión se refuerzan con otro elemento, para evitar con esto una sobrecarga en el muro y punto de apoyo de la estructura.

S
a
j
m
u
a
y
n
o
a
P
a
G
b
l
r
o
c
i
a





16.1.2 MUSEO DE ARTE, QUEEN, EE.UU

Por: Eric Owen Moss

Este proyecto del arquitecto Owen Moss, presenta una respuesta formal bastante inusual e innovadora, que observada desde el punto de vista estructural no es más que la disposición creativa de las armaduras y los diferentes elementos sustentantes (Fig. 70).

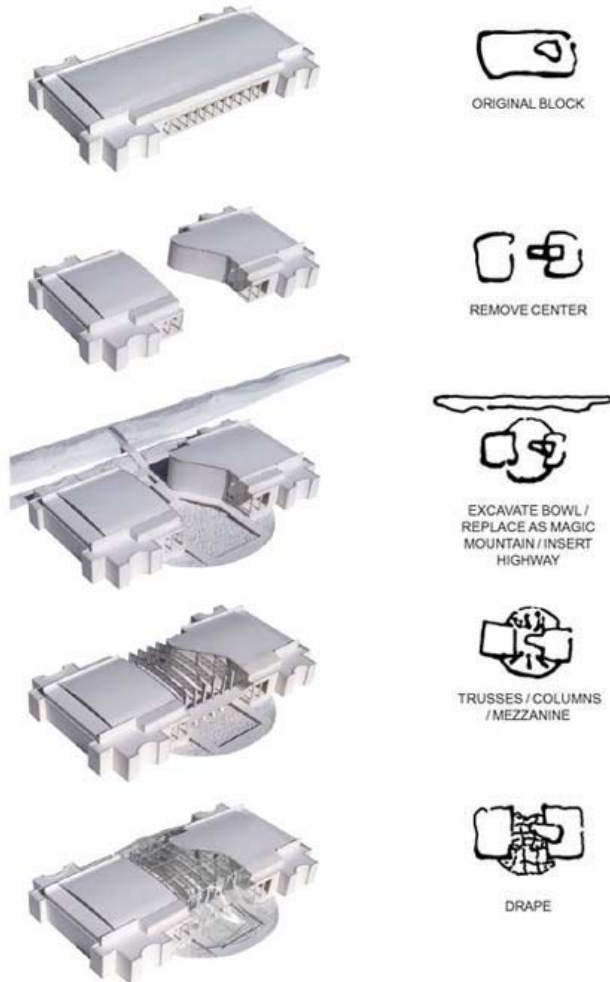


FIGURA 69: Concepción y bocetos del proyecto.

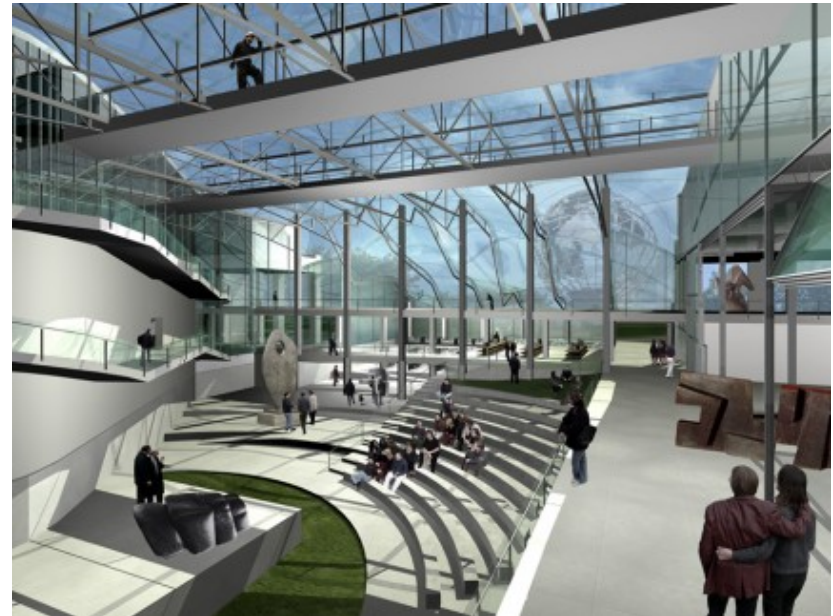


FIGURA 70: Vista interior del edificio.

S
a
j
m
u
a
y
n
o
P
a
b
a
i
r
o
c
i
a





FIGURA 71: Sección del proyecto.

En esta sección se puede apreciar como la forma irregular resultante parte de una disposición regular de las armaduras, así como el aprovechamiento de las características propias del acero, el cual permite la generación de estas formas.

A continuación, dos de los criterios formulados en la segunda parte:

- *Función y Forma: el uso de una armadura ha de ser correspondiente al espacio que se quiere generar con su empleo y a la forma que se desea obtener, por lo que lo su empleo estará condicionado por esta consideración.*
- *Las armaduras, tanto en su conformación de tijeras o de barras paralelas, pueden llegar a cubrir claros relativamente amplios pero las armaduras espaciales presentan una mayor factibilidad y funcionalidad en claros grandes y el resultado formal será más interesante.*





16.1.3 ESTADIO DE MUNICH, ALEMANIA.

Por: Peter Eisenman.

La cubierta de este estadio es un claro ejemplo del empleo de las armaduras y su funcionalidad en claros grandes y sin apoyos intermedios.

En la figura 72 podemos observar que se está aplicando el criterio de introducir una curvatura en la armadura para con esto aumentar su rigidez y efectividad.



FIGURA 72: Vista aérea del proyecto.



FIGURA 73: Vista interior del estadio.

En la figura 73 se puede observar que aun cuando es una luz grande se está utilizando únicamente una armadura de barras paralelas y no una armadura espacial, esto podría deberse a la optimización de la estructura y que la resistencia de las cargas y la satisfacción de las necesidades puede ser alcanzada sin llegar a una triangulación espacial.



S
a
j
m
u
a
y
n
o
a
P
a
b
a
l
o
c
i
a



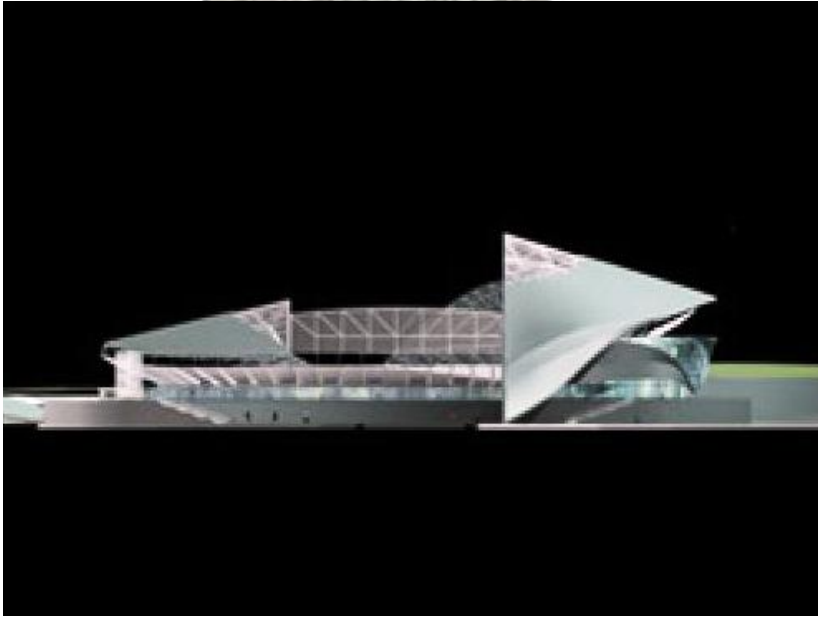


FIGURA 74: Elevación lateral.



FIGURA 75: Maqueta del proyecto.

Tanto en la figura 74 como en la 75 se puede observar como la optimización de la estructura no se limita a la triangulación de la misma sino se apoya también en la forma y en los principios estructurales de las cáscaras.

Uno de los criterios que respaldan lo anterior:

- *Como se presentara en la tercera parte de este trabajo, el empleo de armaduras o estructuras espaciales puede ser combinado con otros sistemas estructurales, así como se puede dar una combinación de diferentes materiales para lograr respuestas formales más interesantes.*





16.2 ESTRUCTURAS FUNICULARES

16.2.1 PUENTE ALAMILLO, SEVILLA, ESPAÑA.

Por: Santiago Calatrava

"Este puente extraordinario (1992; Sevilla, España; Santiago Calatrava, ingeniero estructural), el cual se diseñó en conjunción con la Expo 92, representa la belleza y el diseño estructural innovador que este arquitecto-ingeniero español introdujo, primero en estructuras de puentes y más recientemente en la arquitectura. El puente tiene un claro de 200 m y está soportado por cables arriostrados paralelos y diagonales, todos suspendidos de un lado del mástil de 142 m de altura. La mayoría de las estructuras de grandes claros, arriostradas por cables tienen un arreglo simétrico de anclajes que cuelgan de un mástil con una base articulada para eliminar la flexión. Este diseño es poco común porque la configuración de los cables es unilateral y el mástil se encuentra en cantiliver en la base. El empuje de los cables se contrabalancea por el peso del mástil de acero relleno de concreto, el cual se encuentra inclinado 58° en dirección opuesta, eliminando la necesidad de cables traseros. La espina dorsal del piso del puente es una viga de

caja hexagonal de acero a la cual se unen los cables de sostén. La calzada del puente (tres carriles por cada sentido) se encuentra en cantiliver lateral en cada lado de esta espina dorsal."⁴



FIGURA 75: Vista panorámica.

S
a
m
u
a
y
n
o
a
P
a
b
a
l
r
o
c
i
a

⁴ Fuller Moore. **Comprensión de las estructuras en Arquitectura.** Pag. 35 Ed. McGraw Hill. Mexico, 2000.





16.2.2 PUENTE TRINITY RIVER, DALLAS, TEXAS. EE.UU.

Por: Santiago Calatrava

En este proyecto realizado por Calatrava se muestra la combinación de los dos sistemas estructurales funiculares, el arco y el cable.



FIGURA 76: Vista panorámica.

Como se muestra en la figura de arriba, la combinación de ambos elemento permite salvar un tramo bastante extenso, nótese que siempre se mantiene el principio básico de funcionamiento de este tipo de estructuras, el cable, a tensión, y el arco, a compresión.

Explicando de manera simple el funcionamiento, los cables son soportados por el arco, y "jalados" hacia abajo tanto por el peso de la carretera que soporta como por las cargas vivas a las cuales estará sometido este elemento. El arco por su parte, trabaja a compresión ya que esa misma

tensión a la cual esta sometida el cable, provoca la compresión en el arco, como se indico en el capitulo de estructuras funiculares, estos elementos, son complementarios e inversos.

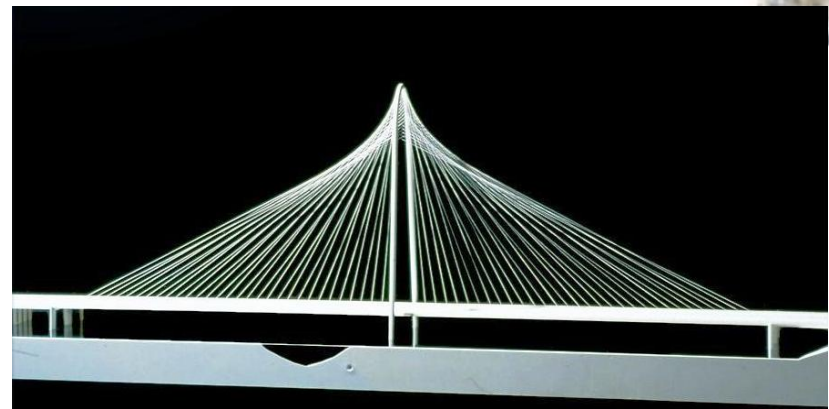


FIGURA 77: Vista lateral.

En los criterios expuestos se hizo alusión a que el uso de cables esta condicionado por el empleo de elementos sustentantes masivos, y como puede verse en ambos casos, tanto el mástil inclinado del puente Alamillo, como los arcos expuestos arriba son elementos voluminosos y masivos, lo cual afirma el criterio planteado.

S
a
m
u
a
y
n
a
P
a
b
a
l
o
c
i
a





16.3 ESTRUCTURAS MEMBRANÁCEAS Y REDES

16.3.1 ESTACION DE TRENES EN FLORENCIA

Por: Norman Foster



FIGURA 76: Vista exterior de la estación.

La propuesta de diseño de esta estación de trenes en Florencia, Italia, incorpora el uso de membranas en la cubierta, como puede verse en la imagen de arriba, y en complemento a uno de los criterios planteados en este trabajo, el uso de las membranas y su combinación con el uso de la luz, hace que los espacios resultantes adquieran una particularidad tanto formal como visual.

La versatilidad de formas obtenidas del uso de las membranas abre la puerta a un sinnúmero de posibilidades formales, nótese en la imagen (Fig. 77), las figuras obtenidas al entrar la luz en el espacio definido por las membranas, así como la claridad del espacio obtenido.

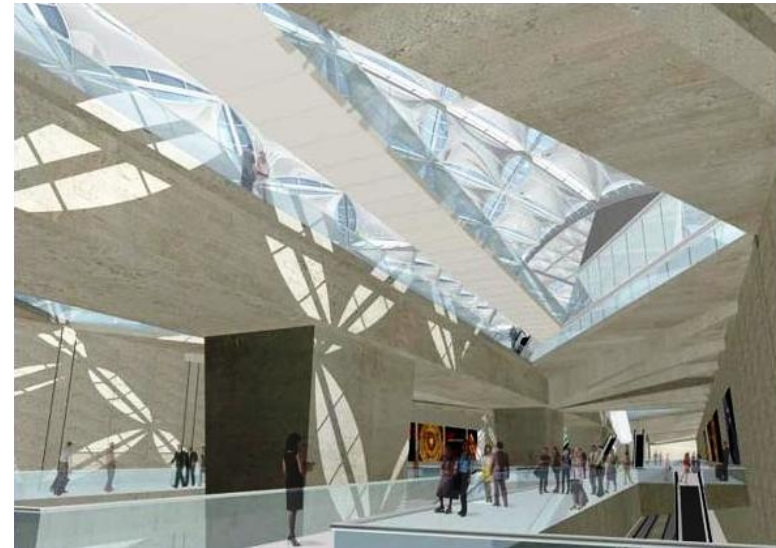


FIGURA 77: Vista interior.





No sólo los arcos de acero funcionan como elementos sustentantes, ya que como se puede ver en esta perspectiva interior, también se incorpora en la propuesta arquitectónica vigas y columnas de concreto, así como losas usadas como entrepiso.

En la imagen 78 se muestra el espacio interior resultante, nótese el uso tanto de las membranas como cubiertas, los cables como elementos tensionantes de las mismas y los arcos de acero como elementos sustentantes de ambos (membranas y cables).



En este proyecto se afirma el criterio del uso de las membranas, primero como cubiertas y segundo como elementos ideales para cubrir claros amplios, como ya se explicó, debido a su poco peso y versatilidad de aplicación.

S
a
m
u
a
y
n
o
a
P
a
b
a
l
r
o
c
i
a

FIGURA 78: Perspectiva interior.





16.4 CÁSCARAS

16.4.1 CENTRO CULTURAL ZENIT EN ST. ETIENNE, FRANCIA.

Por: Norman Foster

“La propuesta ganadora de Foster and Partners’ para el centro cultural de arte y musical, ubicará a esta ciudad industrial en el mapa cultural. Desafiando a Lyon en su tradición de organización de eventos culturales, esta instalación de clase mundial, transforma a esta ciudad en una de las más atractivas para las actividades culturales, así como regenera el contexto urbano.

La distinta forma aerodinámica de este diseño de Foster, será reconocida instantáneamente. Esta responde a una preocupación ecológica, con un techo en Cantivelier que canalizara las fuerzas del viento y hará correr el mismo en el auditorio de manera natural. Este sistema responde tanto al movimiento del viento de norte como sur.”⁵

En este proyecto se ve claramente el uso de las cáscaras y su trabajo estructural por forma, ya que las diferentes curvaturas del complejo, proveen un estabilidad y forma sutil.

⁵ www.fosterandpartners.com

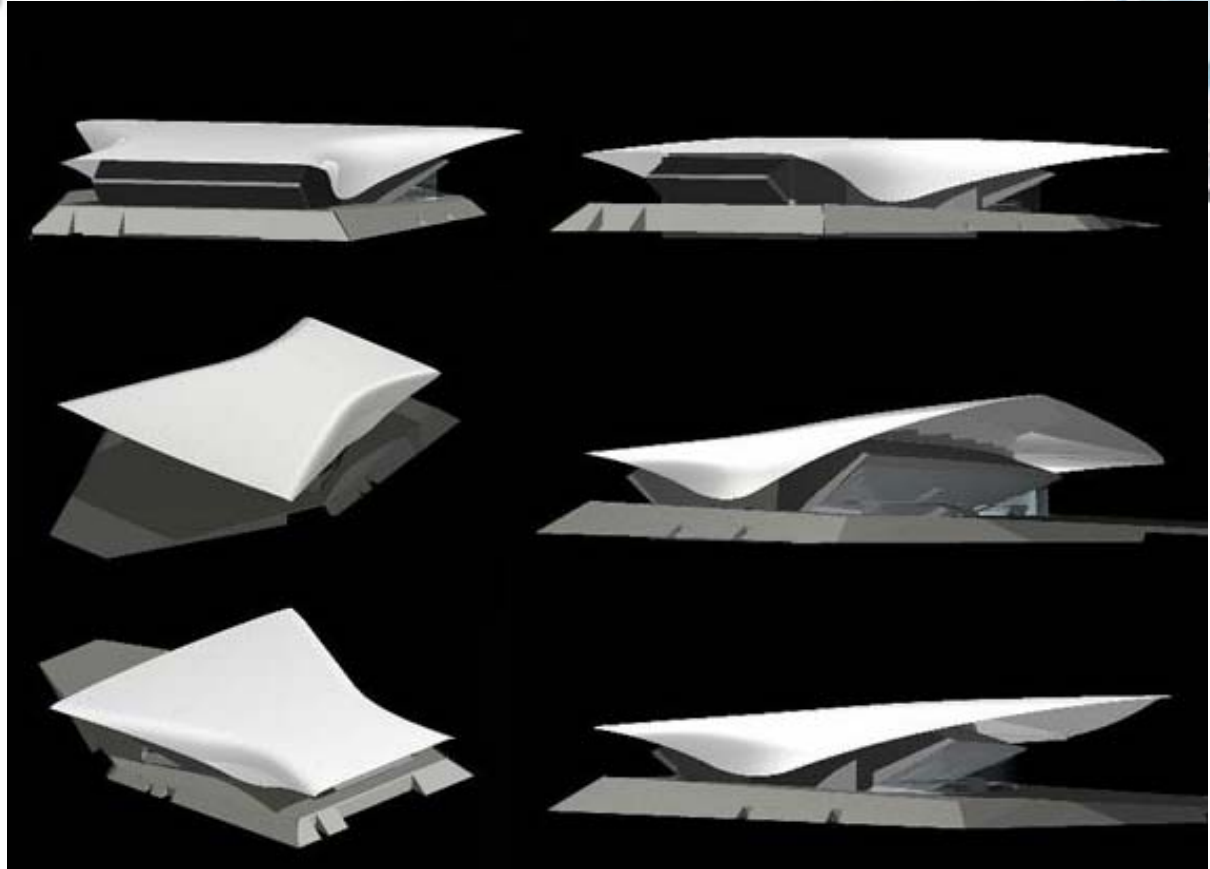


FIGURA 79: Diferentes vistas del proyecto.

Aquí se ven afirmados los criterios expuestos anteriormente, ausencia de ángulos y curvaturas pronunciadas, integración con el entorno y amplitud de espacio interior sin uso de apoyos intermedios.

S
a
j
m
u
a
y
n
o
a
P
a
b
l
o
c
i
a



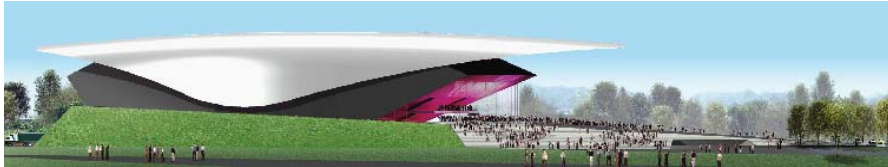


FIGURA 80: Vista lateral del Zenit.

Véase la amplitud del espacio propuesto y la configuración en planta del elemento arquitectónico, en la imagen superior, puede apreciarse la sutilidad de la forma y su integración con el entorno.

La sección en la parte inferior muestra el uso de otros principios estructurales, como lo son el voladizo en la cubierta (cáscara) y la estabilización por forma de los graderías, ya que estos van de una sección voluminosa en la parte inferior, la cual brinda soporte a una sección más reducida en la parte superior del elemento, en donde los esfuerzos vendrán en disminución.

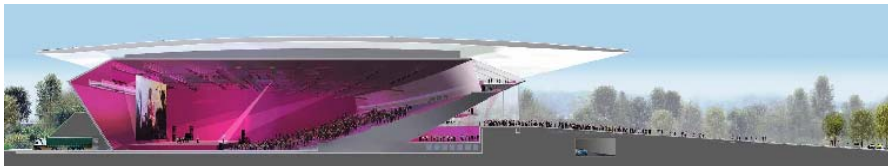


FIGURA 81: Sección.

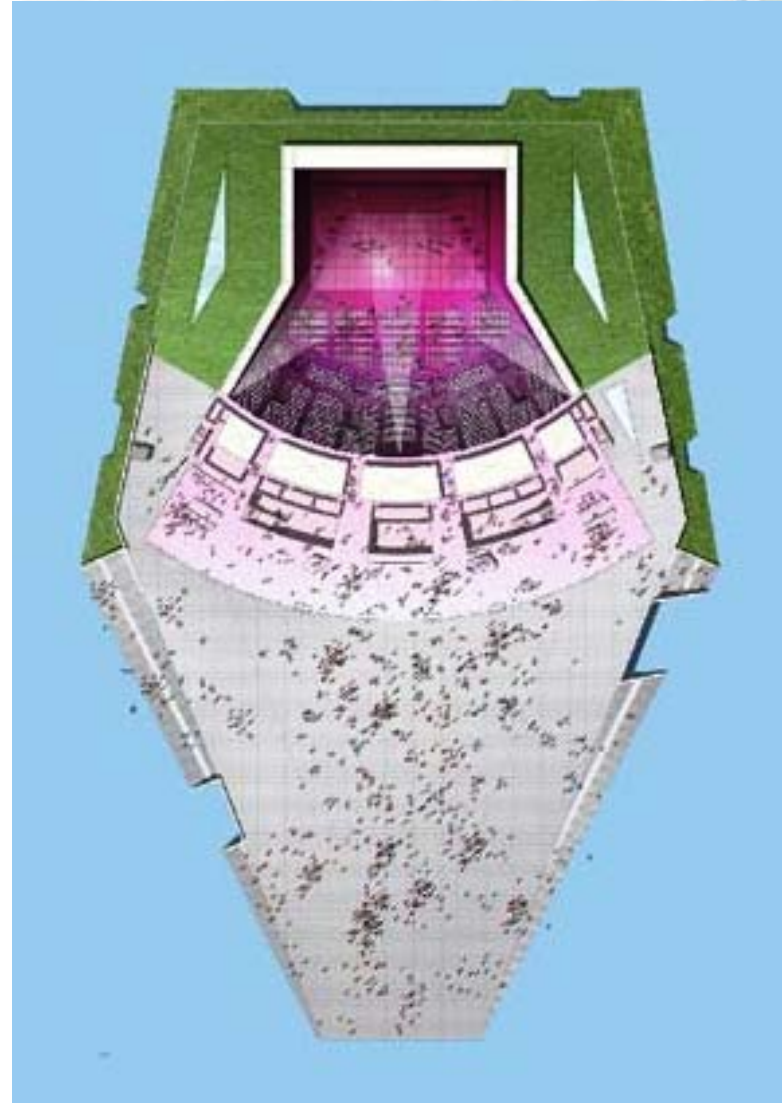


FIGURA 82: Planta arquitectónica.

S
a
j
m
a
y
n
a
P
a
b
l
i
c
i
a





16. 4. 2 SALA DE CONCIERTOS, BRUJAS, BÉLGICA.

Por: Peter Eisenman

Este proyecto propuesto por el arquitecto Eisenman, se ven ejemplificados varios de los criterios antes mencionados:

- *En este tipo de estructuras, tanto la utilización del concreto como de placas metálicas complementan las posibilidades de expresión formal. El deconstructivismo de líneas curvas es un exponente actual de este tipo de sistema estructural.*



FIGURA 83: Perspectiva exterior.

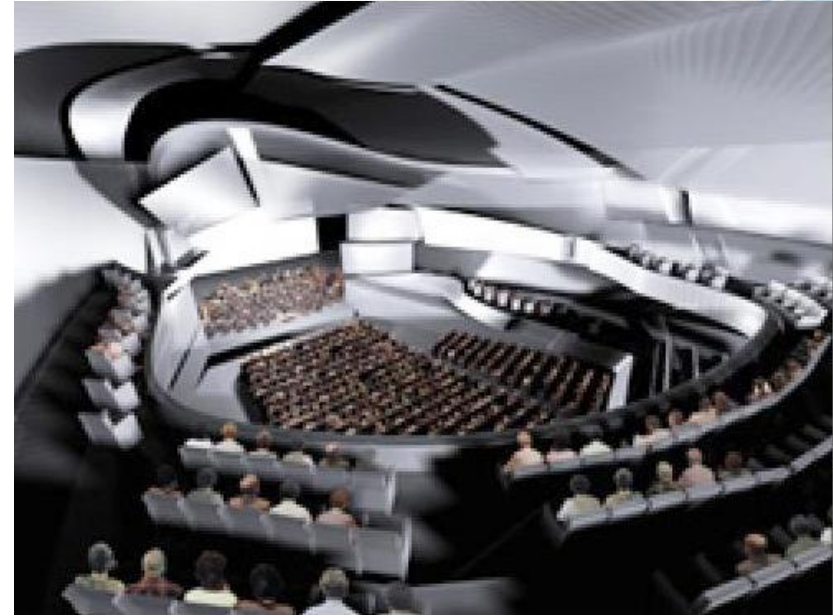


FIGURA 84: Vista interior de la sala de conciertos.

- *Por su forma, las cáscaras, han de proveer una gran variedad de posibilidades para espacios carentes de apoyos intermedios, así como espacios interiores muy interesantes, susceptibles de gran manera al empleo de la luz y color en las superficies resultantes.*

S
a
j
m
u
a
y
n
o
a
P
a
b
a
l
o
c
i
a



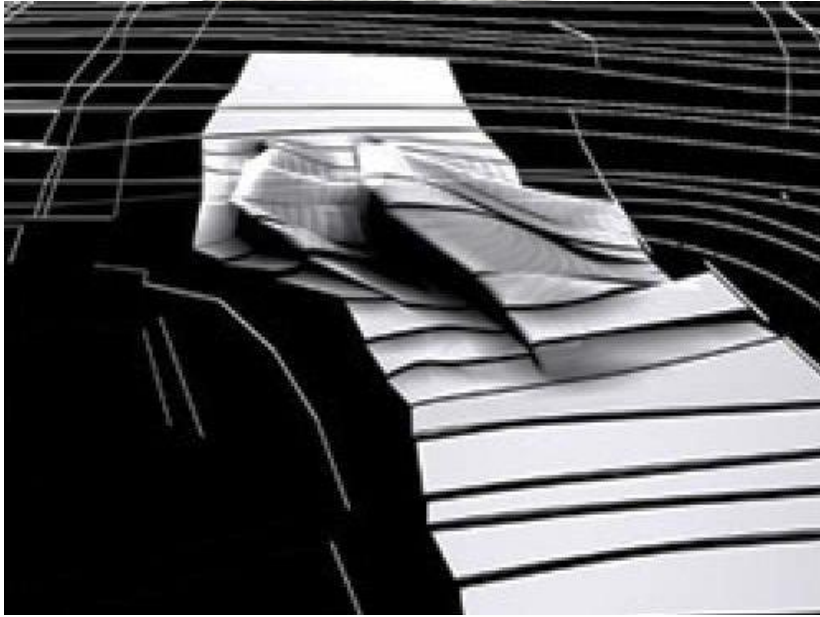


FIGURA 85: Perspectiva exterior.

- *Debido a su forma, las cáscaras son estructuras ideales para lograr una integración entre el entorno y el elemento arquitectónico, ya que pueden lograrse formas muy sutiles como versátiles.*

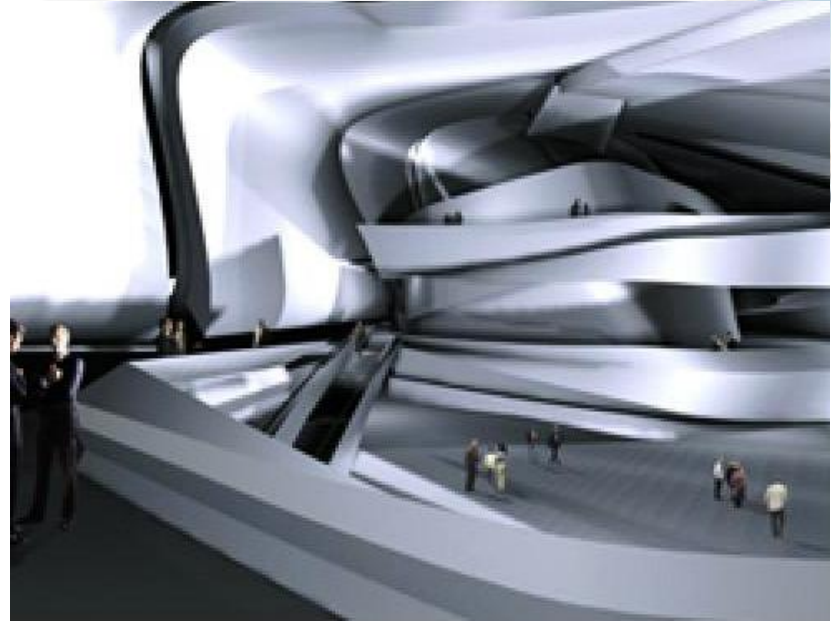


FIGURA 86: Perspectiva interior.

- *Por su forma, las cáscaras, han de proveer una gran variedad de posibilidades para espacios carentes de apoyos intermedios, así como espacios interiores muy interesantes, susceptibles de gran manera al empleo de la luz y color en las superficies resultantes.*

S
a
m
u
a
y
n
o
P
a
b
a
l
o
c
i
a





16. 4. 3 INSTITUTO DE ARTES Y CIENCIAS, STATEN ISLAND, EE.UU.

Por: Peter Eisenman

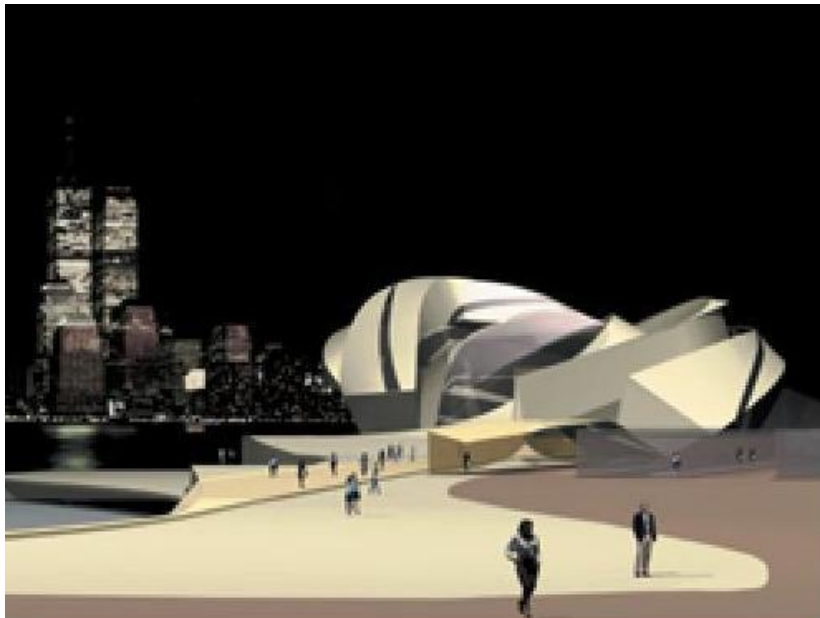


FIGURA 87: Vista exterior.

Peter Eisenman es uno de los arquitectos contemporáneos más exitosos y reconocidos mundialmente, precursor del deconstructivismo, genera proyectos innovadores fundamentados en una teoría tanto arquitectónica como estructural.

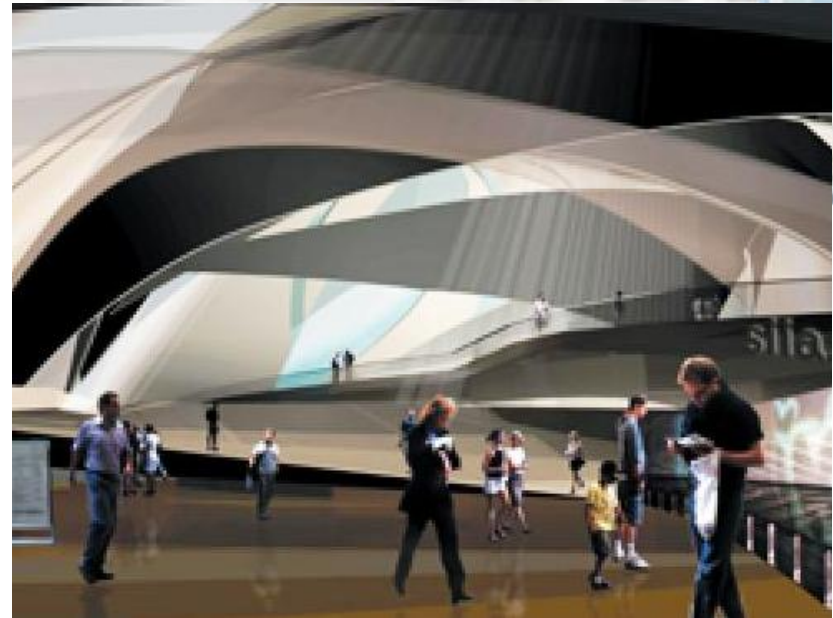


FIGURA 88: Perspectiva interior del instituto.

S
a
j
m
u
a
y
n
o
P
a
b
a
i
r
o
c
i
a





16.5 ESTRUCTURAS MASIVAS

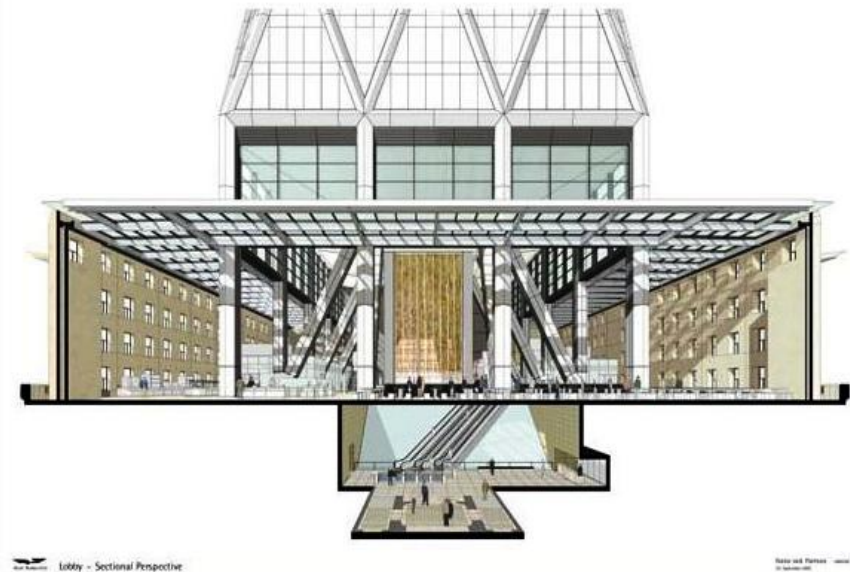
16.5.1 OFICINAS CENTRALES HEARST, NUEVA YORK, EE.UU.

Por: Norman Foster

“Las oficinas centrales de Hearst Headquarters reviven un sueño de los años veintes cuando William Randolph Hearst visualizo el Círculo de Columbus como un nuevo y vibrante centro para las compañías de medios y entretenimiento en Manhattan. Hearst designó una cuadra de estilo Art Deco en la Octava Avenida para albergar su imperio. Cuando éste fue terminado en 1928 el propietario se dio cuenta que eventualmente este sería la base de una torre de oficinas. Ahora para este proyecto el reto era diseñar una torre tal que estableciera un dialogo creativo entre lo antiguo y lo nuevo.

Esta torre provee casi un millón de pies cuadrados destinados a oficinas, el cual se levanta sobre el antiguo edificio, comunicado con el exterior por una cortina de vidrio que ilumina con luz natural los espacios interiores y da la impresión de que la torre flota ligeramente sobre su base. el atractivo espacial principal es el atrio, el cual ocupa toda la primera planta y se levanta a través de seis pisos, lo cual le da acceso a todas las partes del edificio. En él se incorpora el elevador principal del edificio, la cafetería y el auditorio con su mezanine especial para reuniones y eventos especiales. **Estructuralmente, la torre tiene una forma triangulada – una solución altamente eficiente que usa 20 por ciento menos material que una estructura convencional -.** Con sus esquinas hacia adentro, las diagonales enfatizan las proporciones verticales y crean una silueta particular.

Este nuevo edificio es también distintivo en términos ambientales. Fue construido con un 80 por ciento de acero reciclado, así como su diseño consume un 25 por ciento menos energía que sus vecinos. Como resultado, se espera que este sea el primer edificio en la ciudad en recibir la mas alta calificación del programa Norteamericano de Diseño Ambiental y Energético. Como compañía, Hearst ocupa los primeros puestos en concepto de lugares de trabajo sanos, estándar que se convertirá en un factor fundamental en el futuro. Esta experiencia abre las puertas a una visión constructiva más sensible al aprovechamiento energético y a la sensibilidad ambiental de los edificios en Nueva York.”⁶



Lobby - Sectional Perspective

FIGURA 89: Corte perspectivado.

⁶ www.fosterandpartners.com





En la sección presentada en la página anterior (Fig. 89) se muestra el uso de varios elementos conformantes de las estructuras masivas, una retícula de vigas como cubierta, muros de mampostería definiendo el espacio, columnas siendo reforzadas por triangulación por elementos de soporte y como se vio en las estructuras verticales, un núcleo central. También se puede intuir la retícula de columnas.

En la figura 90, puede observarse tanto la triangulación de los elementos en la fachada como la utilización de una grilla modular en los mismos.

Haciendo un análisis desde el punto de vista de diseño arquitectónico, aquí se está presentando una arquitectura de contraste, ya que sin duda el objeto arquitectónico de la parte inferior no sólo es de una corriente arquitectónica distinta sino su entorno no corresponde al objeto que se está edificando.



S
a
m
u
e
l
a
P
a
b
l
o
c
i
a

FIGURA 90: vista exterior.





16.5.2 RENOVACIÓN Y EXTENSIÓN AL ROYAL ONTARIO MUSEUM: EL CRISTAL

Por: Daniel Libeskind

“El programa del Museo Real de Ontario proveía una maravillosa oportunidad para la inclusión de una nueva arquitectura y la creación de un atractivo edificio público. La centralidad del lugar intensifica la profundidad de la relación entre la historia y lo nuevo, entre la tradición y la innovación. Los edificios históricos que lo rodean complementan el significado urbano del museo, soluciona complejos aspectos de función y perfecciona dramáticamente las exhibiciones, facilidades y programas de entretenimiento. El Cristal, una estructura que se conforma orgánicamente por la asociación de prismas, acentúa la primacía de un espacio participativo y público. Su imagen, función y estructura dan a esta esquina de Toronto un Nuevo enfoque, una nueva vista, transformando al edificio en un destino de clase mundial.

La composición escultural de las formas arquitectónicas radia de un punto central de la entrada de cristal. Los visitantes entran a través de un atrio espectacular en el cual los dos temas centrales del museo, la naturaleza y la cultura, están distintivamente tematizados por la interacción especial de los volúmenes. La totalidad del piso está unificada por un espacio orientado de norte a sur y de este a oeste. La claridad de esta orientación deriva en una claridad de circulación y acceso que crea una transparencia en la cual la arquitectura inherente y la nueva construcción alcanzan una unidad y equilibrio imaginario.

La probada presentación de la Naturaleza y Cultura no son alcanzadas únicamente por la tecnología interactiva sino también son visualizadas por la verdadera magia y

poder del espacio resultante. Se puede imaginar este espacio como un lugar donde el público está enganchado a un sentimiento que sugiere que la naturaleza ha sido conquistada y la cultura alcanzada.

Este edificio cuenta una única y particular historia, la cual cristaliza su contenido y singularidad. El Cristal convierte y transforma el carácter de fortaleza que poseía su entorno en una atmósfera dedicada al resurgimiento del museo como centro dinámico de Toronto”

Daniel Libeskind
Berlin, February 4, 2002



FIGURA 91: Vista exterior de El Cristal.



S
a
j
m
a
y
n
o
a
P
a
b
a
l
o
c
i
a



FIGURA 92: Perspectiva interior del museo.

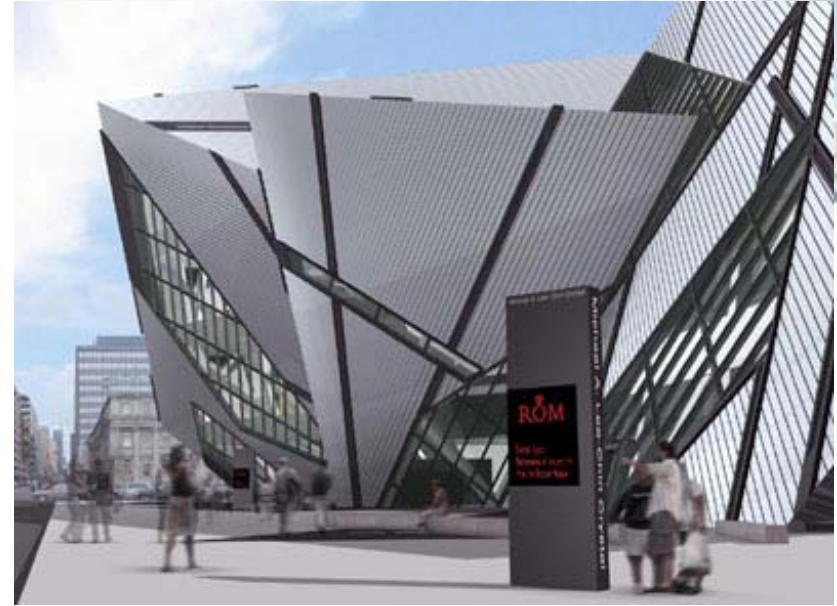


FIGURA 93: Vista exterior.

Aunque los proyectos de Libeskind, Zaha Hadid y Owen Moss son muy particulares y complejos desde el punto de vista estructural, pueden clasificarse como estructuras masivas, por el uso de columnas vigas y muros en su configuración. Estos elementos estructurales en esta clase de proyectos son diseñados individualmente y no se diseña la estructura en sí, ya que la diversidad de formas producen una gran variedad de esfuerzos y reacciones imposibles de calcular como un todo.

Si bien estos proyectos resultan atractivos visualmente, son estructuralmente complejos y poco funcionales.





16.5.3 CIUDAD DE LA ARTES, VALENCIA, ESPAÑA.

Por: Santiago Calatrava

Este proyecto de Calatrava es uno de los más representativos de su arquitectura y ejemplifica claramente, como la mayoría de sus proyectos, el uso de elementos estructurales como complementos formales y a veces hasta esculturales.



FIGURA 93: Vista frontal del auditorio.

En la figura 94 se muestra el empleo de los apoyos en Y, expuestos en la segunda parte (Fig. 46), además, los extremos de la Y sirven como punto de encuentro a otros elementos que pueden ser considerados desde el punto de vista estructural como la mitad de un arco.



FIGURA 94: Perspectiva interior.

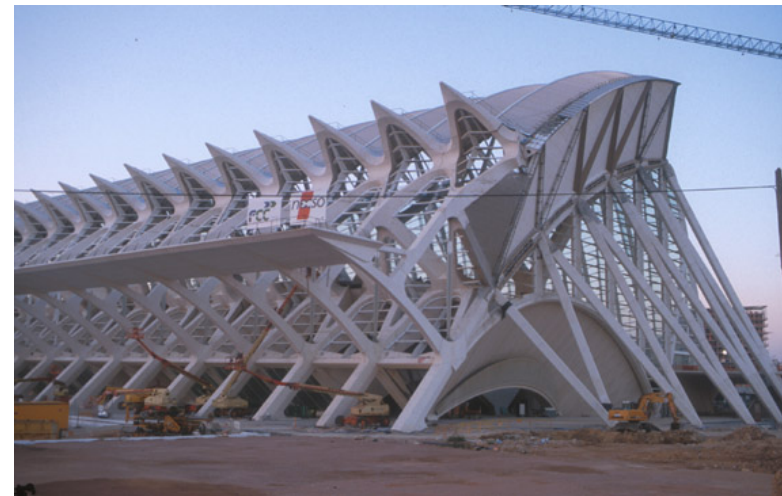


FIGURA 95: Perspectiva exterior.

S
a
m
u
a
y
n
a
P
a
b
l
o
c
i
a





FIGURA 96: Perspectiva exterior.

Tanto en la figura 95 como en la 96 se puede apreciar la complejidad de las formas resultantes del empleo de los elementos estructurales, nótese que aplicando los conceptos básicos de las estructuras masivas puede llegarse al entendimiento de estas formas.

S
a
g
r
a
d
a
F
á
m
i
l
i
a





16.5.4 BEEHIVE, CULVER CITY, CALIFORNIA.

Por: Eric Owen Moss

*"La forma del Beehive fue dictada por requerimientos programáticos y restricciones del sitio. La forma variable responde a diferentes funciones internas y la necesidad de integración con un grupo existente de edificios la estructura en esencia, cuatro columnas conectadas horizontalmente por vigas tubulares que conforman así marcos conformantes de la forma. No se hizo más a la estructura, la forma resultante se dio por la manipulación de las columnas y sus diferentes inclinaciones, así como la interconexión de otros elementos formales."*⁷

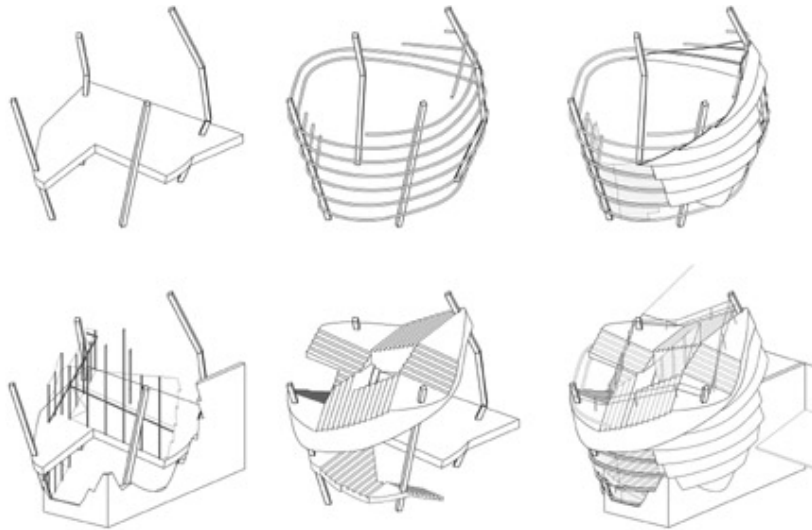


FIGURA 97: Perspectiva interior del instituto.

⁷ www.ericowenmoss.com



FIGURA 98: vista exterior del Beehive.

S
a
m
u
e
l
a
P
a
b
l
o
c
i
a





16.5.5 MUSEO GUANGDONG, GUANGZHOU, CHINA.

Por: Peter Eisenman

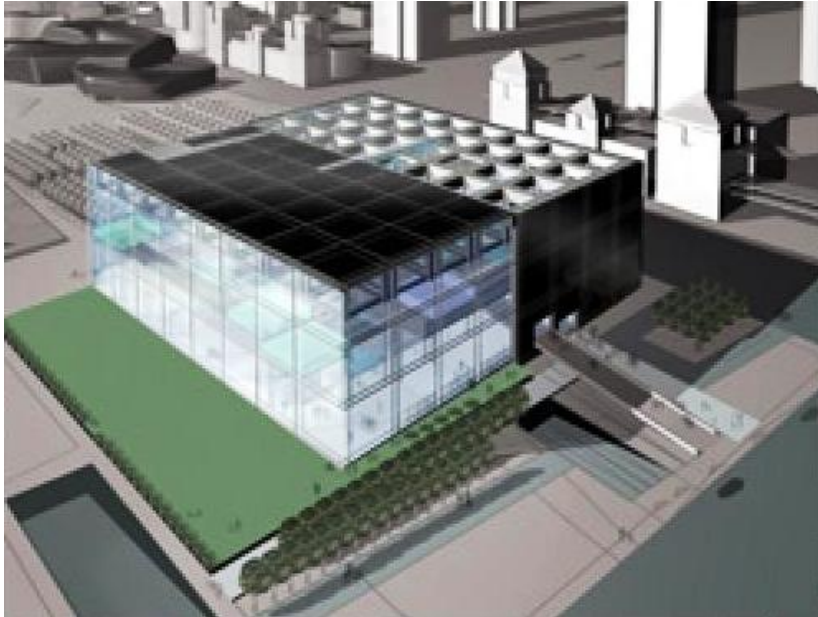


FIGURA 99: vista exterior del museo Guangdong.

- *La configuración en planta de este tipo de estructuras ha de estar muy relacionada a formas regulares, rectangulares o circulares, pero el uso del voladizo puede complementar el funcionamiento de los marcos no solo en su aspecto estructural sino también en el formal, ya que éstos pueden adoptar formas que complementen el diseño en planta.*

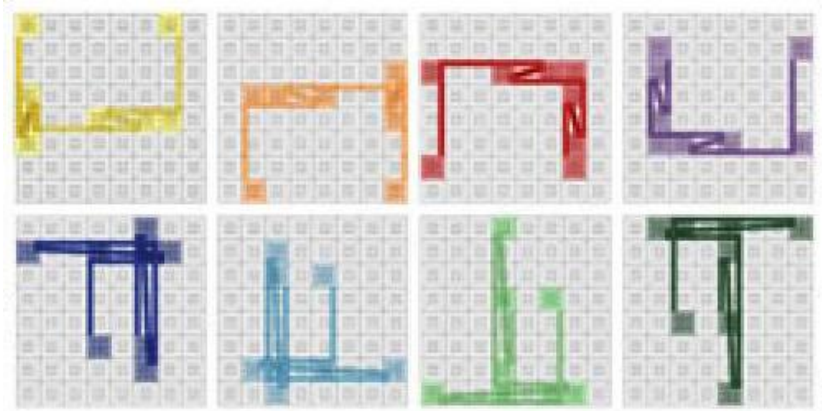


FIGURA 100: Composiciones conformantes de la propuesta.

- *Al adoptar los marcos rígidos como elementos estructurales, es de utilidad separar en planta los espacios por volúmenes definidos, ya que con esto se logra un comportamiento estructural mas regular y se evitan acciones y esfuerzos bruscos en el todo.*

Como muestran las figuras 99 y 100 los criterios anteriormente formulados y aquí expuestos, se ven fundamentados por este proyecto, ya que se está dando una planta rectangular y una división definida de volúmenes, que se ven complementados con la aplicación de los marcos rígidos.



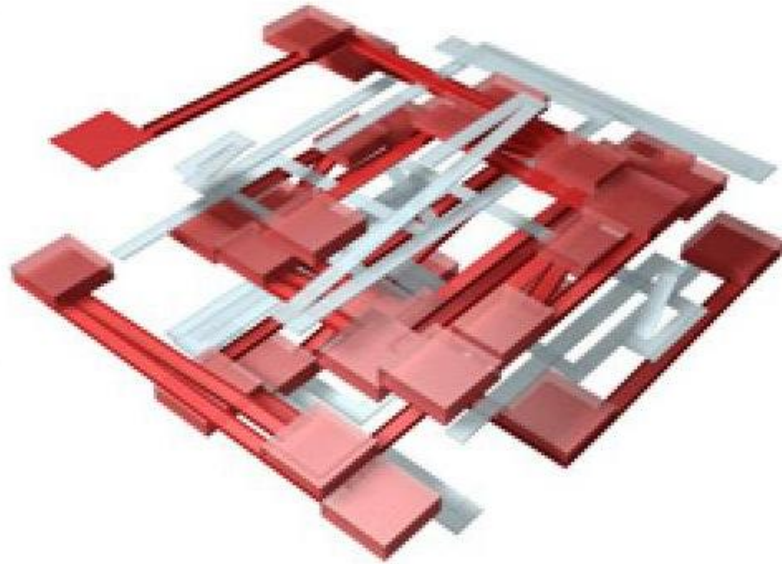


FIGURA 101: disposición volumétrica de los elementos.

En la figura 102 se muestra la aplicación de una retícula de vigas, como complemento al espacio generado por los marcos, se complementa este además con uno de los criterios formulados en el capítulo XIII.

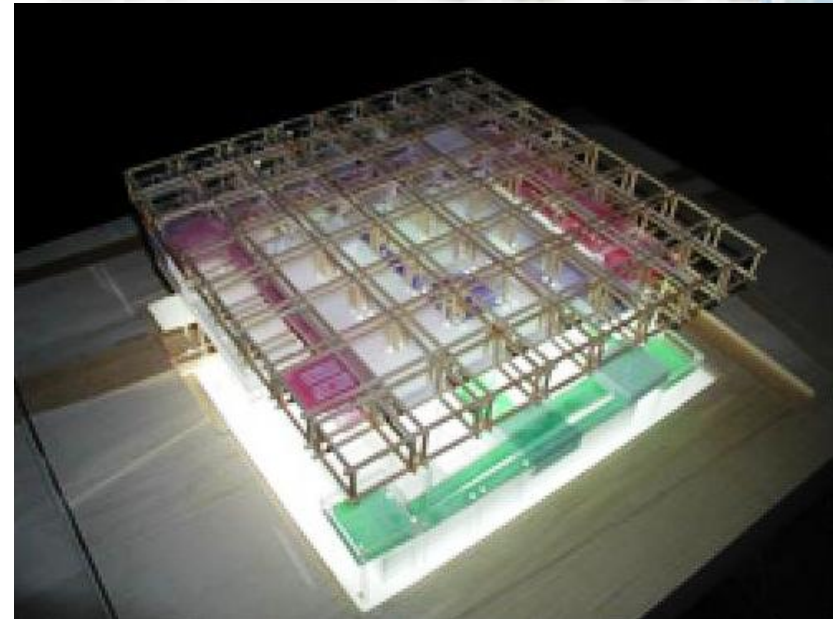


FIGURA 102: vista exterior del museo.

- *El uso de una grilla modular en el proceso de diseño facilitara la aplicación de las estructuras masivas, ya que por su naturaleza rectilínea su aplicación en patrones regulares y ordenados es más sencilla y optimizará su comportamiento estructural.*





FIGURA 103: perspectiva interior.

La comprensión de los elementos conformantes de las estructuras masivas (columnas, vigas y losas) facilitará su empleo y aplicación, ya que gracias al avance tecnológico y constructivo actual, son pocas las formas que resultan inconstruibles.

Este proyecto de Eisenman ejemplifica a cabalidad la aplicación de este tipo de estructuras.

S
a
m
u
a
y
n
a
P
a
G
b
a
l
r
o
c
i
a





16.6 ESTRUCTURAS VERTICALES

16.6.1 CITY TOWER DE MOSCÚ

Por: Norman Foster

“La Torre de la Ciudad de Moscú – Más alta que cualquier edificio en Europa- es una nueva e innovadora adición a la línea de rascacielos de esta ciudad. Con su forma única, esta torre será visible desde el corazón de Moscú. Este edificio continúa la investigación práctica en el campo de los edificios tanto de manera estructural, funcional, ambiental y urbana en una nueva dimensión. El uso mixto del proyecto - incorporando apartamentos, hotel, oficinas y espacios comerciales – poseerá un ciclo de energía pionero en arquitectura sostenible y reforzará la vitalidad social y económica de la ciudad de Moscú.

Basado en una geometría altamente eficiente derivada de una planta triangular, esta ciudad vertical es un poderoso triunvirato de Tres brazos conectados a una columna central verde que se extiende por toda la torre. Más amplia en la base y disminuida en su conclusión, la forma piramidal es elegante y esbelta en su perfil, y beneficiada por una eficiente composición alcanza la



máxima estabilidad con la menor estructura, así como la más efectiva distribución del espacio. Esta torre está reforzada para resistir los empujes del viento por una serie de elementos diagonales que se extienden desde la base hasta la espina central de una manera triangular. Apoyada sobre estas columnas inversas, esta disposición inusual soporta las cargas del edificio así como enriquece su distintiva fachada.⁸

Este rascacielos ejemplifica varios de los principios y criterios para estructuras verticales, ya que tanto la disposición en planta, la cual se distribuye en tres módulos rectangulares convergentes en el centro y triangulados, como su composición volumétrica atienden a brindar estabilidad al conjunto, no sólo estructural sino visualmente.

FIGURA 104: Vista exterior.



S
a
m
u
a
y
n
o
P
a
b
a
l
o
c
i
a

⁸ www.fosterandpartners.com



A continuación dos de los criterios formulados:

Las estructuras verticales han de basar su aplicación en dos principios básicos, el primero, la selección de la ubicación de los apoyos (descritos anteriormente) y el segundo, la forma de estabilización a emplear en el objeto arquitectónico.

En este tipo de estructuras la forma en planta es de vital importancia para el correcto funcionamiento estructural del proyecto, ya que las formas resultantes de una u otra configuración en planta, pueden repercutir de manera favorable o desfavorable para el proyecto.



S
a
j
m
a
y
n
a
P
a
b
a
i
r
c
i
a

FIGURA 105: Diferentes vistas del City Tower.





16.6.2 RASCACIELOS RETORCIDO, MALMO, SUECIA.

Por: Santiago Calatrava

Este edificio presenta una configuración bastante única, a continuación se tratara de dar un análisis del comportamiento estructural del mismo. Como puede apreciarse en la imagen 106, este edificio está dividido en nueve módulos, los cuales van rotando en torno a un eje central, cada uno de estos módulos se comporta de la misma manera, por lo que al rotarse van dando estabilidad al conjunto. Esto responde a un principio básico de diseño como lo son los planos seriados, que en este caso serían módulos.



FIGURA 106: vista exterior.



FIGURA 107: vista exterior.

S
a
m
u
a
y
n
o
P
a
b
a
i
r
c
i
a





En las imágenes de esta pagina se muestra como se aplica otro principio básico, la incorporación de un elemento estabilizador del conjunto, que si observamos además presenta una triangulación con los elementos que lo conectan al edificio, los cuales se ubican en la unión de un módulo con otro, ya que es en estos puntos donde se van a dar los mayores esfuerzos; estos elementos absorberán parte de estos esfuerzos y los transmitirán al elemento estabilizador, el cual los conducirá directamente al suelo.



FIGURA 108: vista exterior.



S
a
j
m
u
a
y
n
o
a
P
a
b
a
i
r
o
c
i
a

FIGURA 109: vista exterior.





**16.6.3 TORRE DE APARTAMENTOS,
NUEVA YORK, EE. UU.**

Por: Santiago Calatrava

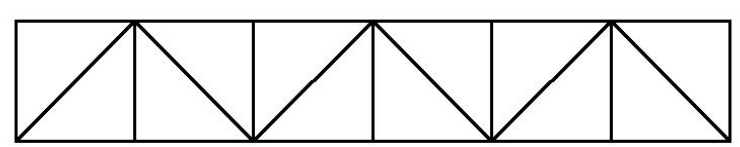


FIGURA 111: Analogía con una armadura de barras paralelas.



FIGURA 110: Perspectiva exterior.

Para el análisis estructural de este edificio sería útil aplicar una analogía con una armadura de barras paralelas, ya que se presentaría el mismo comportamiento, dos barras paralelas que conducen las cargas al suelo y elementos intermedios triangulados que transmiten las cargas a las barras paralelas. Nuevamente el traslape de los cubos da una estabilidad al conjunto, ya que si imaginamos la planta de este edificio, descubriríamos una planta rectangular completamente regular.



FIGURA 112: vista del modelo.

S
a
m
u
a
y
n
o
P
a
b
l
o
c
i
a





16. 6. 4 TORRE RESIDENCIAL ZLOTA 44, VARSOVIA, POLONIA.

Por: Daniel Libeskind

“A los ojos de alguien que conoce íntimamente la cultura polaca y habiendo vivido bajo sus lineamientos, enmarcados entre la destrucción causada por los Nazis y la opresión de la Unión Soviética, este edificio representa la nueva dirección para Polonia, este y oeste.

Es una respuesta a la destrucción de Varsovia y la reconstrucción de la post Guerra rusa. Este edificio ofrece una nueva luz con su fachada, su forma y su silueta, una nueva línea que se dibuja en el entorno y será leída por Varsovia. Este edificio no es otro edificio corporativo, es uno que abraza las aspiraciones de la ciudad y su mentalidad económica. La cara este del edificio esta delimitada por el paso del sol que proveerá la luz natural necesaria a los edificios circundantes. Es un edificio unico en Varsovia delimitado y formado por su historia. Este proyecto se ubicará entre los mejores del mundo por su diseño innovador.”



FIGURA 113: vista de conjunto

S
a
j
m
u
a
y
n
o
P
a
b
l
o
c
i
a





FIGURA 114: perspectiva exterior.

S
a
m
u
a
y
n
a
P
a
G
b
l
r
o
c
i
a





16.6.5 GATEWAY ART TOWER, CULVER CITY, CALIFORNIA

Por: Eric Owen Moss

“La Torre de Arte Gateway incluirá la demolición de 487 metros cuadrados de un edificio de mampostería de dos plantas que data de 1940 y será sustituido por una estructura de acero de 139 metros cuadrados. Situado en la prominente esquina de la Avenida Hayden y el Boulevard Nacional, la estructura funcionara como una “entrada”, anunciando a los visitantes el desarrollo de la ciudad.

El proyecto visualiza una torre de luz de 22 metros de altura y aproximadamente 9.25 metros de diámetro. La forma de esta torre está compuesta por una serie de segmentos cónicos, cada uno de ellos mide entre 0.30 metros y 1.85 metros de altura, definidos por una viga de acero. Cada segmento cónico es único. La intención de estas superficies es alcanzar una forma casi escultórica visualmente. Esta torre posee cinco niveles en Alturas de 3.70 metros, cada uno de ellos alcanzado y conectado por una escalera y elevador envueltos en vidrio. La base de este edificio ha sido excavada para proveer un mirador.

Ingeniería Estructural: Arup, Los Angeles.”⁹

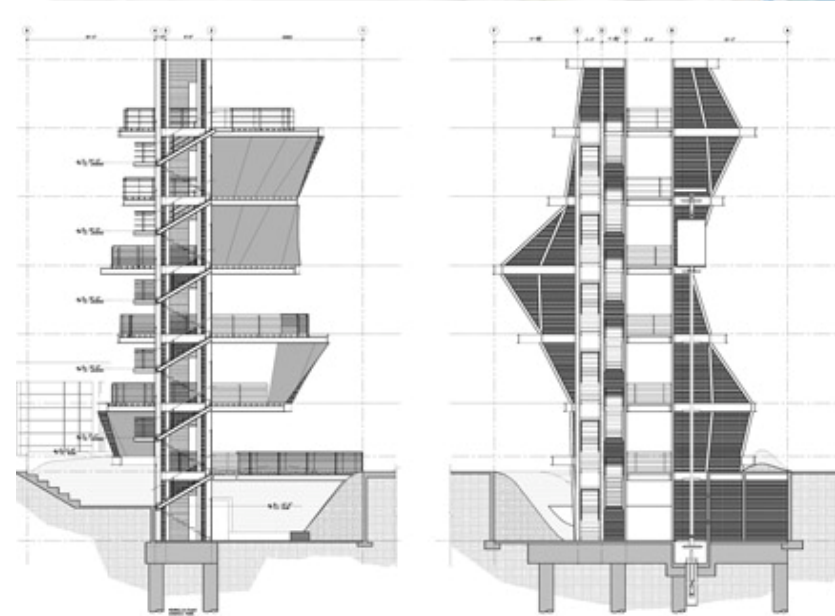


FIGURA 115: perspectiva interior.

En la figura 115 se presenta una sección de la torre Gateway, en donde se puede apreciar el módulo de gradas, el cual puede ser entendido bajo el concepto de un núcleo central, aunque su ubicación en planta no sea necesariamente en el centro, como lo muestra la figura.

S
a
m
u
a
y
n
a
P
a
b
a
l
r
o
c
i
a

⁹ www.ericowenmoss.com





FIGURA 116: Vistas exteriores del edificio.

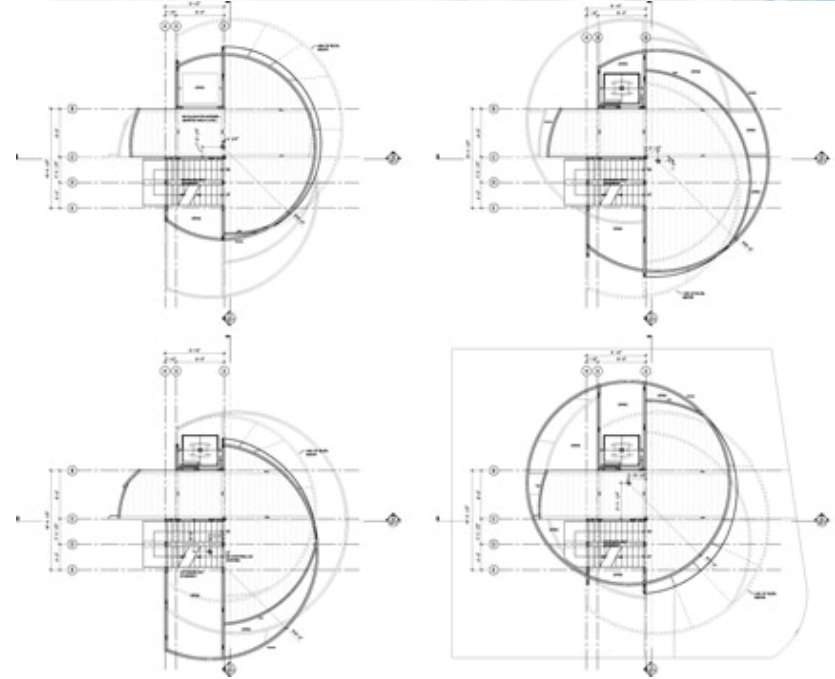


FIGURA 117: plantas de la torre Gateway.

Como puede entenderse en su configuración volumétrica, la disposición de las diferentes plantas da una estabilidad al conjunto, de manera similar al rascacielos diseñado por Calatrava en Suecia.





Conclusiones, Recomendaciones y Bibliografía



CONCLUSIONES

- La comprensión y el entendimiento del funcionamiento de los diferentes sistemas estructurales y sus componentes, facilita su selección y aplicación, así como la sustentación de la elección de uno u otro sistema estructural.
- Cada proyecto es único y posee cualidades y características propias por lo que no se pueden formular “recetas de cocina” para la selección y aplicación estructural, sino siempre se necesita del criterio propio del diseñador.
- La función, forma y estructura no se encuentran en puntos antagónicos entre sí y como se demostró en la tercera parte muchos proyectos sumamente interesantes tanto formal como funcionalmente son el producto de la correcta aplicación de conceptos básicos.





RECOMENDACIONES

- Promover el estudio del campo estructural, ya que es muy limitada la información que se tiene sobre el tema.
- Comprender que un proyecto arquitectónico de un gran contenido formal responde y es posible únicamente si es construible, lo cual depende de la estructura.
- Reflexionar acerca de la semiología estructural, su contenido y el mensaje que transmite al usuario, ya que éste en un punto que muchas veces se deja a un lado y no se toma en cuenta en la realización y concepción de un proyecto.





BIBLIOGRAFÍA

- Ambrose, James. **Análisis y Diseño de Estructuras**. Editorial Limusa. 2da Edición. 1998.
- Engel, Heinrich. **Sistemas de Estructuras**. H. Blume Ediciones. España, Última edición. 1998.
- Escobar, Jorge. **Introducción a la Tipología Estructural**. Editorial Plus Ultra, S.A. Guatemala 1997.
- Gordon, John. **Structures or why things don't fall down**. Da Capo Press. 2003.
- Meli, Roberto. **Diseño Estructural**. Editorial Limusa. 2da Edición. 2000.
- Moore, Fuller. **Comprensión de las Estructuras en la Arquitectura**, Editorial McGraw Hill. España 2000.
- Salvadori, Mario. **Why Buildings Stand Up**, 1990.
- Salvadori, Mario y Heller Robert. **Estructuras para Arquitectos**. Editorial La Isla. Buenos Aires. 1990.
- Salvadori, Mario y Mathys Levy. **Diseño Estructural en Arquitectura**. Editorial Continental, S. A., México. 1988.
- Schodeck, Daniel. **Structures**. Editorial Prentice Hall. Quinta Edición. 2004





PAGINAS WEB CONSULTADAS:

- www.fosterandpartners.com
- www.ericowenmoss.com
- www.calatrava.com
- www.eisenmanarchitects.com
- www.daniel-libeskind.com

S
a
j
m
u
a
y
n
o
a
P
a
G
b
l
r
o
c
i
a

