

# **ESTRUCTURAS DE ACERO**

## **COMPORTAMIENTO Y DISEÑO**

**OSCAR DE BUEN LOPEZ DE HEREDIA**

*Profesor de Estructuras y Jefe de la División de Ingeniería Civil, Topográfica y Geodésica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Ingeniero Consultor.*



**NORIEGA EDITORES**

**E D I T O R I A L L I M U S A**

**MÉXICO • ESPAÑA • VENEZUELA • ARGENTINA  
COLOMBIA • PUERTO RICO**

# Prólogo

Este libro está basado en los dos cursos semestrales sobre diseño avanzado de estructuras de acero que imparte el autor en la División de Estudios Superiores de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

La filosofía que ha servido de base para los cursos mencionados y para la elaboración del libro es que el diseño estructural es mucho más que la aplicación de un grupo de especificaciones, sin saber a veces demasiado bien de donde provienen y sin conocer adecuadamente su campo de aplicación y sus limitaciones.

Para diseñar una estructura correctamente se debe conocer el comportamiento de cada uno de los elementos que la componen y el del conjunto constituido por ellos, desde el instante en que empiezan a aplicarse las cargas hasta que éstas alcanzan las intensidades máximas que puede soportar la estructura, de modo que una vez construida trabaje de manera correcta en condiciones de servicio, y tenga un coeficiente de seguridad adecuado contra la falla.

En los seis primeros capítulos se estudian miembros aislados sometidos a tensión, flexión, torsión, compresión y flexocompresión. En cada caso se describen las respuestas bajo sollicitaciones de magnitud creciente, primero en el intervalo elástico y después fuera de él, se identifican las diversas formas posibles de falla y se discuten los medios más adecuados para evitarlas. El tratamiento mencionado hace que no se separen arbitrariamente, como es muy común en la literatura, los comportamientos elástico y plástico.

En el capítulo 7 se trata, con bastante amplitud, la teoría de placas, consideradas como los elementos que forman todos los perfiles de acero estructural, ya sea laminados o hechos con placas soldadas, y en el 8 se cubren las traveses armadas esbeltas.

Por último, los tres capítulos finales están dedicados al estudio de los marcos rígidos, que constituyen el sistema más usado en la actualidad en edificios con estructura de acero. También se considera cómo se comportan en los dos intervalos, elástico e inelástico.

El libro está destinado al diseño de estructuras de acero, y en él no se tratan los métodos de análisis elástico; sin embargo, sí se estudia con cierta amplitud el análisis plástico, pues se considera que es todavía relativamente poco conocido en nuestro medio, a pesar de sus ventajas en algunos problemas de diseño y de la necesidad de conocer el comportamiento plástico de las estructuras si se quieren obtener diseños eficientes, aun cuando se hagan, en teoría, por métodos elásticos.

## VIII Prólogo

Puesto que el énfasis está puesto en el comportamiento, el libro no está basado en ningún código de especificaciones; sin embargo, al resolver algunos problemas de diseño es indispensable completar la información teórica y experimental con las recomendaciones contenidas en una norma; en ese caso se han utilizado principalmente las "Especificaciones para el Diseño, Fabricación y Montaje de Acero Estructural para Edificios" publicadas por el Instituto Americano de la Construcción en Acero (A.I.S.C.) en febrero de 1969, teniendo en cuenta también las adiciones y modificaciones incluidas en los suplementos 1 a 3, de noviembre 1970, diciembre 1971 y junio 1974. También se han empleado, en ocasiones, el Reglamento de las Construcciones para el Distrito Federal, de 1976, y algunas normas europeas. (El A.I.S.C. publicó en noviembre de 1978 una nueva versión de sus especificaciones; en los aspectos que interesan en este libro sigue siendo igual a la de 1969 con los suplementos mencionados, por lo que todas las fórmulas utilizadas aquí siguen en vigor en las normas de 1978).

Aunque está basado en un curso de postgrado, este libro puede utilizarse a nivel de licenciatura, escogiendo adecuadamente los temas que se tratarán en clase y los que deberán leer los estudiantes como complemento fuera de las aulas. Además, puede ser utilizado como libro de consulta por ingenieros y arquitectos dedicados al diseño de estructuras de acero. Al final de cada capítulo se incluye una lista bastante extensa de referencias.

Oscar de Buen López de Heredia.

México, D. F.

# Contenido

INTRODUCCION .....	XVII
Referencias .....	XXIII
<b>CAPITULO 1. Tensión .....</b>	<b>1</b>
1.1 Introducción .....	1
1.2 Diseño .....	2
1.3 Ejemplo .....	2
1.4 Estructuras hiperestáticas formadas por barras en tensión ..	2
1.4.1 Solución elástica .....	2
1.4.2 Comportamiento elasto-plástico .....	3
1.4.3 Análisis plástico .....	3
1.4.4 Discusión de resultados .....	4
1.5 Problemas .....	5
<b>CAPITULO 2. Flexión .....</b>	<b>7</b>
2.1 Introducción .....	7
2.2 Comportamiento de una barra flexionada .....	8
2.3 Comportamiento de vigas que fallan por exceso de flexión en el plano de las cargas .....	10
2.3.1 Obtención de la gráfica momento-curvatura de una sección rectangular sin esfuerzos residuales, sometida a flexión alre- dedor de su eje centroidal y principal x .....	10
2.4 Teoría plástica simple .....	14
2.4.1 Hipótesis fundamentales .....	14
2.4.2 Comportamiento de vigas bajo carga creciente .....	15
2.4.3 Determinación directa de la carga de colapso .....	21
2.5 Diseño por flexión de una viga .....	22
2.6 Importancia del endurecimiento por deformación .....	23
2.7 Teoría plástica simple aplicada a estructuras reticulares ....	25
2.7.1 Características del diagrama de momentos flexionantes co- respondiente al colapso de una estructura .....	25
2.7.2 Teoremas fundamentales del análisis plástico .....	25
2.8 Métodos generales de análisis plástico .....	28
2.8.1 Método estático .....	28
2.8.2 Método de los mecanismos .....	29
2.8.3 Ejemplos .....	32

## X Contenido

2.8.4	Aplicación del método de los mecanismos a estructuras con barras inclinadas .....	35
2.8.5	Distribución plástica de momentos .....	38
2.8.6	Ejemplos .....	40
2.8.7	Cargas distribuidas .....	49
2.9	Ejemplos de diseño .....	56
2.10	Cortante .....	63
2.10.1	Introducción .....	63
2.11	Comportamiento elástico .....	64
2.11.1	Especificaciones para diseño .....	66
2.12	Comportamiento inelástico .....	66
2.12.1	Especificaciones para diseño .....	69
2.13	Problemas .....	71
	Referencias .....	74
<b>CAPITULO 3. Torsión .....</b>		<b>75</b>
3.1	Introducción .....	75
3.2	Teoría de la torsión pura (o torsión de Saint Venant) .....	75
3.3	Analogía de la membrana .....	77
3.3.1	Sección rectangular angosta .....	78
3.3.2	Torsión pura de barras de sección transversal abierta formada por rectángulos angostos .....	79
3.3.3	Torsión pura de secciones huecas de paredes delgadas .....	81
3.4	Torsión pura en el intervalo inelástico .....	83
3.5	Torsión no uniforme de barras de sección transversal abierta y de paredes delgadas .....	84
3.5.1	Cálculo de los esfuerzos y del momento resistente producidos por la oposición al alabeo .....	86
3.5.2	Aplicación de los resultados anteriores a barras de sección transversal I .....	92
3.6	Torsión primaria en estructuras .....	103
3.7	Problemas .....	103
	Referencias .....	105
<b>CAPITULO 4. La columna aislada .....</b>		<b>107</b>
4.1	Introducción .....	107
4.2	Nociones de inestabilidad .....	108
4.2.1	Modelo con un grado de libertad .....	108
4.2.2	Modelo con dos grados de libertad .....	110
4.3	Comportamiento de columnas de diferentes longitudes .....	112
4.4	Pandeo elástico .....	113
4.5	Pandeo por flexión .....	119
4.5.1	Pandeo elástico .....	119
4.5.2	Determinación de la carga crítica .....	121
4.5.3	Esfuerzo crítico .....	123
4.5.4	Longitud efectiva .....	123
4.5.5	Pandeo inelástico .....	126
4.5.6	Teoría del módulo tangente .....	127
4.5.7	Teoría del módulo reducido .....	127
4.5.8	La contribución de Shanley .....	129
4.6	Obtención de curvas para el diseño de columnas cargadas axialmente .....	131

4.7	Influencia de los esfuerzos residuales sobre la capacidad de carga axial de las columnas de acero estructural .....	134
4.7.1	Cálculo de los esfuerzos críticos en columnas con esfuerzos residuales .....	137
4.7.2	Columnas hechas con placas soldadas .....	143
4.8	Pandeo en el intervalo de endurecimiento por deformación .	144
4.9	Fórmulas de diseño .....	148
4.10	Fórmulas empíricas .....	152
4.11	Diseño basado en la resistencia última .....	154
4.12	Problemas .....	157
	Referencias .....	158
<b>CAPITULO 5. Pandeo lateral de vigas .....</b>		<b>161</b>
5.1	Introducción .....	161
5.2	Pandeo lateral elástico .....	162
5.2.1	Vigas I sometidas a flexión pura .....	162
5.2.2	Influencia de las condiciones de apoyo y de carga .....	166
5.2.3	Vigas de sección transversal rectangular, maciza o hueca ...	172
5.3	Pandeo lateral inelástico .....	173
5.3.1	Comportamiento de vigas de diversas longitudes .....	173
5.3.2	Pandeo lateral de vigas de longitud intermedia .....	174
5.3.3	Determinación de la carga de pandeo de acuerdo con la teoría del módulo tangente .....	176
5.4	Inestabilidad de vigas completamente plastificadas .....	180
5.4.1	Requisitos de contraventeo en diseño elástico y plástico ...	182
5.4.2	Capacidad de rotación .....	182
5.4.3	Pandeo lateral de vigas bajo momento uniforme .....	183
5.4.4	Pandeo lateral de vigas bajo momento variable .....	186
5.5	Diseño de vigas cuya capacidad de carga está regida por la resistencia al pandeo lateral .....	192
5.6	Fórmulas aproximadas para la determinación de la carga crítica de pandeo .....	196
5.6.1	Secciones I y H, laminadas o formadas por tres placas soldadas .....	196
5.6.2	Secciones J de lámina delgada .....	199
5.7	Especificaciones para diseño .....	199
5.7.1	Diseño basado en esfuerzos permisibles. Secciones abiertas .	199
5.7.2	Diseño basado en esfuerzos permisibles. Secciones en cajón .	208
5.7.3	Diseño plástico .....	209
5.8	Ejemplos .....	211
5.9	Problemas .....	219
	Referencias .....	220
<b>CAPITULO 6. Flexocompresión .....</b>		<b>223</b>
6.1	Introducción .....	223
6.2	Comportamiento de barras flexocomprimidas .....	224
6.2.1	Columnas aisladas .....	224
6.2.2	Columnas que forman parte de marcos .....	227
6.2.3	Curvas momento-rotación de barras flexocomprimidas aisladas .....	228
6.3	Piezas cortas, sin problemas de inestabilidad .....	230
6.3.1	Tratamiento elástico .....	230

## XII Contenido

6.3.2	Tratamiento plástico .....	230
6.4	Piezas largas flexionadas alrededor de uno de sus ejes centroidales y principales .....	238
6.5	Piezas largas que fallan por exceso de flexión en el plano de los momentos. Comportamiento elástico .....	238
6.5.1	Factor de amplificación .....	239
6.5.2	Terminación del comportamiento elástico .....	240
6.5.3	Cálculo aproximado del factor de amplificación .....	242
6.5.4	Otras condiciones de carga .....	247
6.5.5	Ecuaciones de interacción .....	248
6.6	Piezas largas que fallan por exceso de flexión en el plano de los momentos. Comportamiento inelástico .....	250
6.6.1	Cálculo de la resistencia máxima .....	251
6.7	Curvas de deformación de las columnas .....	265
6.7.1	Relaciones fundamentales .....	266
6.7.2	Obtención de las CDC .....	268
6.7.3	Empleo de las curvas de deformación .....	270
6.7.4	Empleo de las curvas momento-rotación .....	274
6.8	Pandeo de piezas largas flexionadas alrededor de su eje de mayor momento de inercia .....	276
6.8.1	Pandeo elástico .....	277
6.8.2	Pandeo inelástico .....	279
6.9	Piezas largas en flexión biaxial .....	285
6.9.1	Solución elástica .....	286
6.9.2	Solución inelástica .....	294
6.10	Especificaciones para diseño .....	298
6.10.1	Diseño basado en esfuerzos permisibles .....	299
6.10.2	Diseño plástico .....	301
6.10.3	Determinación del coeficiente $C_m$ recomendado por el AISC para columnas cuyos extremos pueden desplazarse linealmente (marcos "no contraventeados") .....	306
6.10.4	Otras especificaciones .....	307
6.11	Problemas .....	308
	Referencias .....	310
<b>CAPITULO 7. Placas .....</b>		<b>313</b>
7.1	Introducción .....	313
7.2	Comportamiento de placas comprimidas .....	314
7.3	Placas comprimidas en una sola dirección .....	315
7.3.1	Pandeo elástico .....	316
7.3.2	Interacción de los elementos planos que forman una sección .....	329
7.3.3	Pandeo inelástico .....	335
7.4	Otras condiciones de carga .....	338
7.5	Placas sometidas a esfuerzos longitudinales no uniformes ...	339
7.5.1	Pandeo elástico .....	340
7.6	Placas sometidas a fuerzas cortantes aplicadas en los bordes .	342
7.6.1	Pandeo elástico. ....	342
7.7	Placas sometidas a la acción combinada de fuerzas longitudinales y fuerzas cortantes .....	344
7.8	Pandeo inelástico .....	346

7.9	Placas atiesadas .....	348
7.9.1	Placas comprimidas en una sola dirección .....	348
7.9.2	Placas sometidas a flexión .....	354
7.9.3	Placas sometidas a fuerzas cortantes aplicadas en los bordes ..	358
7.9.4	Placas bajo flexión y cortante combinados .....	361
7.9.5	Pandeo inelástico .....	361
7.10	Resistencia posterior al pandeo .....	365
7.10.1	Placas comprimidas .....	366
7.10.2	Placas en cortante puro .....	368
7.11	Efecto de las imperfecciones iniciales sobre el comporta- miento de las placas .....	370
7.12	Cálculo de la resistencia posterior al pandeo .....	371
7.12.1	Placas comprimidas apoyadas en los dos bordes longitudina- les .....	371
7.12.2	Placas en cortante puro .....	375
7.12.3	Placas en cortante puro, con atiesadores transversales y lon- gitudinales combinados .....	381
7.13	Pandeo en el intervalo de endurecimiento por deformación ..	382
7.13.1	Pandeo de placas ortotrópicas .....	382
7.13.2	Pandeo por torsión del patín comprimido .....	385
7.14	Aplicaciones de la teoría del pandeo de placas al diseño de miembros estructurales .....	387
7.14.1	Diseño basado en esfuerzos permisibles .....	387
7.14.2	Diseño basado en la resistencia posterior al pandeo .....	395
7.14.3	Diseño plástico .....	412
7.15	Problemas .....	413
	Referencias .....	417
<b>CAPITULO 8. Trabes armadas .....</b>		<b>419</b>
8.1	Introducción .....	419
8.2	Criterios de diseño .....	419
8.3	Diseño basado en la resistencia al pandeo .....	420
8.3.1	Patines .....	420
8.3.2	Alma .....	420
8.3.3	Atiesadores .....	423
8.3.4	Ejemplo 8.1 .....	426
8.4	Diseño basado en la resistencia real de la trabe .....	428
8.4.1	Resistencia a la flexión .....	428
8.4.2	Resistencia a la fuerza cortante .....	433
8.4.3	Resistencia bajo la acción combinada de flexión y fuerza cortante .....	437
8.4.4	Factores adicionales en el diseño del alma .....	439
8.4.5	Ejemplo 8.2 .....	441
8.5	Problemas .....	445
	Referencias .....	447
<b>CAPITULO 9. Marcos rígidos I: Conceptos generales .....</b>		<b>449</b>
9.1	Introducción .....	449
9.2	Elementos que componen un marco rígido .....	450
9.3	Comportamiento de marcos rígidos .....	451
9.3.1	Formas de falla .....	451
9.3.2	Diseño .....	452

#### XIV Contenido

9.3.3	Curvas carga-desplazamiento .....	453
9.4	Métodos aproximados para obtener las curvas carga-desplazamiento .....	453
9.4.1	Hipótesis relativas al material .....	453
9.4.2	Hipótesis relativas al efecto de las deformaciones sobre el equilibrio de miembros aislados y de la estructura completa .....	454
9.4.3	Métodos de análisis .....	454
	Referencias .....	459
<b>CAPITULO 10. Marcos rígidos II: Pandeo .....</b>		<b>461</b>
10.1	Introducción .....	461
10.2	Inestabilidad elástica de marcos rígidos .....	461
10.3	Pandeo elástico. Métodos para la obtención de las cargas críticas .....	462
10.4	Cálculo de cargas críticas por el método de las rigideces .....	463
10.4.1	Ejemplos .....	465
10.5	Marcos rígidos de varios pisos. Soluciones aproximadas .....	474
10.5.1	Pandeo de conjunto de marcos rígidos .....	475
10.5.2	Pandeo de columnas aisladas .....	476
10.5.3	Pandeo lateral de un entrepiso .....	490
10.5.4	Pandeo de marcos no contraventeados .....	499
10.6	Pandeo inelástico de marcos rígidos .....	509
10.7	Pandeo de marcos contraventeados .....	509
10.8	Pandeo de marcos no contraventeados .....	512
10.8.1	Soluciones analíticas .....	513
10.8.2	Métodos aproximados .....	514
10.9	Problemas .....	525
	Referencias .....	527
<b>CAPITULO 11. Marcos rígidos III: Diseño .....</b>		<b>529</b>
11.1	Introducción .....	529
11.2	Marcos de un nivel .....	529
11.2.1	Marcos de dos aguas .....	530
11.3	Marcos de dos niveles .....	552
11.4	Marcos de varios niveles .....	566
11.5	Análisis elástico y diseño basado en esfuerzos permisibles ..	567
11.5.1	Análisis de primer orden .....	567
11.5.2	Análisis de segundo orden .....	567
11.5.3	Resumen de métodos empleados para el diseño de columnas de marcos rígidos analizados elásticamente .....	587
11.6	Análisis y diseño plástico .....	589
11.6.1	Introducción .....	589
11.6.2	Edificios con marcos contraventeados .....	591
11.6.3	Edificios con marcos no contraventeados .....	619
11.7	Observaciones sobre el comportamiento de los marcos rígidos ..	648
	Referencias .....	649
<b>APENDICE A. Ecuaciones generales de equilibrio de segundo orden de la barra recta y de sección transversal constante ..</b>		<b>651</b>