

**Título:** Libro de texto de Estructura y Resistencia de Materiales para diseñadores industriales.

**Autor:** Dr. Eduardo Dorta Baños, profesor titular ISDi (e-mail: [dbanos@isdi.co.cu](mailto:dbanos@isdi.co.cu)).

## RESUMEN

**Objetivos:** Adaptar los contenidos existentes en la literatura relacionada con la Resistencia Mecánica de los Materiales a los intereses de la formación del diseñador industrial.

### Métodos teóricos:

- Análisis y Síntesis.
- Deducción.
- Histórico-lógico.
- Enfoque de sistema.

### Métodos empíricos:

- La observación.
- La encuesta.

### Resultados.

El carácter multidisciplinario del trabajo del diseñador industrial requiere de conocimientos y de un lenguaje técnico, que le permita la comunicación con otros profesionales. En su tarea de proyectar objetos, el diseñador industrial debe tener presente la resistencia, rigidez y racionalidad de las estructuras, si tenemos en cuenta que cualquier producto requiere de un soporte estructural.

La información teórica con que se cuenta de Resistencia de Materiales está dirigida a la formación de Ingenieros Mecánicos y Civiles.

Los procedimientos expuestos en este texto, están centrados en el cálculo de los esfuerzos y la resistencia a la tracción-compresión, la flexión transversal y longitudinal, la torsión y los esfuerzos combinados, de manera aproximada, trabajando en el plano (fuerzas coplanares), que le permita al diseñador industrial presentar al ingeniero un diseño lo más cercano posible al producto final.

La metodología de cálculo está abierta a la introducción de diferentes materiales de posible aplicación en el Diseño.

**Conclusiones:** Este es un primer intento, para dar solución al vacío en literatura básica de la asignatura “Estructura y Resistencia de Materiales”.

## **INTRODUCCIÓN.**

El libro de texto “Estructura y Resistencia de Materiales para diseñadores industriales” tiene como objetivo fundamental, dotar a los estudiantes de cuarto año de Diseño Industrial de un material de estudio de la asignatura, que les posibilite reafirmar los conocimientos recibidos en clases y les sirva además, como documento base para la preparación con vistas a los seminarios y clases prácticas. El contenido está adaptado a las necesidades y exigencias reales del Diseño Industrial, despojándolo del contenido tradicional de estos materiales, dirigidos en lo fundamental a Ingenieros Mecánicos y Civiles.

Por lo antes expuesto, los procedimientos expuestos en este texto están centrados en el cálculo de los esfuerzos y la resistencia, de manera aproximada, trabajando en el plano (fuerzas coplanares), que le permita al diseñador industrial presentar al ingeniero un diseño lo más cercano posible al producto final.

La metodología de los cálculos, está abierta a la introducción de disímiles materiales de posible aplicación en el Diseño.

El libro de texto está estructurado en 7 capítulos:

**Capítulo I: Estructuras.**

**Capítulo II: Tracción-Compresión.**

**Capítulo III: Uniones.**

**Capítulo IV: Torsión.**

**Capítulo V: Flexión.**

**Capítulo VI: Esfuerzos Combinados.**

**Capítulo VII: Materiales Ecológicos y el Diseño.**

### **Capítulo I: Estructuras**

En el capítulo I se exponen los conceptos fundamentales de Resistencia de Materiales; la clasificación de las estructuras; se detallan los procedimientos para el cálculo de la resistencia de las estructuras con el empleo del método de los Nudos y el método de las Secciones y se explica el concepto de estructuras de construcción compuesta.

Dentro de los conceptos fundamentales de Resistencia de Materiales se presta especial atención a aquellos que debe dominar el diseñador industrial, tales como: Resistencia, rigidez, estabilidad, elasticidad y sólido elástico. Se detallan las características fundamentales de un sólido elástico: homogéneo, continuo e isótropo.

Se señalan las deformaciones más comunes que pueden sufrir las estructuras, motivadas por esfuerzos de tracción, compresión, torsión, flexión y por la combinación de estos esfuerzos (esfuerzos combinados).

Se explica que la deformación de un cuerpo cesa cuando las fuerzas internas entran en equilibrio con las externas. En este sentido se fundamenta la necesidad práctica del empleo de las hipótesis de Resistencia de Materiales, partiendo de que los

cuerpos reales tienen propiedades físico-mecánicas muy variadas que dificultan su examen teórico. En el texto se detallan las tres hipótesis a emplear.

Se especifica la clasificación de las fuerzas externas en concentradas, repartidas (distribuidas), estáticas, dinámicas, activas y reactivas.

En el texto se puntualiza, que las dimensiones y los materiales para la elaboración de los objetos se eligen de modo que cuando actúan sobre ellos fuerzas externas, las deformaciones no excedan los límites de las elásticas, ya que cuando esto ocurre, el enlace recíproco entre las partículas del cuerpo se altera y este se destruye.

Se explica el concepto de tensión (esfuerzo) y su unidad de medida de acuerdo al Sistema Internacional (SI) en Newton/metro cuadrado ( $N/m^2$ ).

Se da la clasificación de las estructuras en Armaduras, Marcos y Máquinas y se detallan sus características y se ejemplifican con fotos.



Fig. 1 Armadura

Fig. 2 Marco

Fig. 3 Máquina

En este capítulo I se da una detallada explicación de los dos métodos de cálculo de la resistencia de las estructuras, el método de los Nudos y el de las Secciones. Como resultado de esta explicación se arriba a la conclusión, que en caso de estructuras simples debemos emplear el método de los Nudos y ante estructuras complejas, es más factible el empleo del método de las Secciones.

Concluye este capítulo con la referencia a las estructuras de construcción compuesta, que son aquellas estructuras que están constituidas por la combinación de dos o más materiales tales como: acero, hormigón, madera y albañilería. También se denomina de este modo a aquellos elementos compuestos por un mismo material, pero con diferente resistencia y/o diferentes etapas de construcción.

Se ponen ejemplos de estructuras de construcción compuesta y se ilustran algunas de ellas.

## Capítulo II: Tracción-Compresión.

En este capítulo se trata sobre las tensiones originadas producto de las fuerzas de tracción-compresión. De diferentes formas se ilustra la acción de estas fuerzas. Se explica el proceso de cálculo de las tensiones normales que se generan producto de las fuerzas de tracción-compresión:

$$\sigma = N/A$$

$\sigma$  - Tensión Normal (N/m<sup>2</sup>)

$N$  - Normal (N)

$A$  - Área de la sección transversal (m<sup>2</sup>).

Se desarrolla el concepto de “estado tensional uniforme” y su uso en la práctica, así como la Ley de Hooke y su fórmula asociada, profundizando en las particularidades de su uso, en especial en el Módulo de Elasticidad.

Se aborda la temática de los coeficientes de seguridad, al nivel que es necesario conocer por el diseñador industrial y el concepto de “Tensión Admisible” y su importancia para todos los cálculos de resistencia de las estructuras.

Empleando el esquema del proceso de alargamiento de una probeta de acero, se ilustra el comportamiento de un material elástico y sus diferencias con un material plástico.

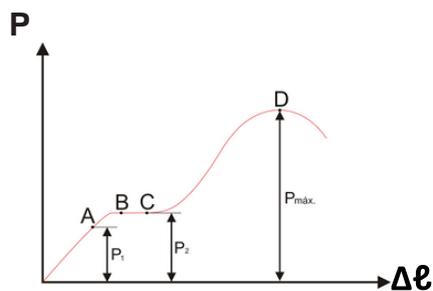


Fig. 4 Alargamiento acero

Como aspecto medular de este capítulo se destaca la fórmula que caracteriza la “condición de resistencia” en los casos de tensión producto de la acción de las fuerzas de tracción-compresión:

**Tensión permisible:**  $\sigma_{MÁX} = N/A \leq [\sigma_{adm}]$

Cierra este capítulo con la acción de la tracción-compresión en planos inclinados y los procedimientos para el cálculo de las tensiones en estos casos.

## Capítulo III: Uniones.

En el capítulo III se expone la clasificación general de las uniones, especificando que solo se recogerán los elementos teóricos del cálculo de las uniones roscadas, remachadas y soldadas que son las más empleadas en el Diseño.

En el texto se ilustran y refrescan algunos conocimientos acerca de las uniones roscadas, remachadas y soldadas, y se expone la metodología de cálculo de la resistencia de cada una de ellas.



Fig. 5 Tornillos, remaches y soldadura.

**Tensión admisible a la tracción de la *unión roscada*:**

$$[\sigma_{adm \ u/r}] \leq 0,8 [\sigma_{adm}]^{(1)}$$

**Tensión admisible al corte (cizallamiento) de la *unión roscada*:**

$$[\tau_{adm \ u/r}] \leq (0,6-0,8) [\tau_{adm}]^{(2)}$$

**Tensión admisible al corte (cizallamiento) de la *unión remachada*:**

$$[\tau_{admr}] = Q_r/2R(e-0,5d) S \leq [\tau_{adm}]^{(3)}$$

**Tensión admisible a la compresión de la *unión remachada*:**

$$[\sigma_{adm \ u/r}] = N/S (b-Rd) \leq [\sigma_{adm}]^{(4)}$$

**Las *costuras a tope* se calculan a tracción:**

$$P_s \leq SL [\sigma_{adms}]^{(5)}$$

**Las *costuras de cordón* se calculan al corte:**

$$P_s \leq 0,7 SL [\tau_{adms}]^{(6)}$$

#### Capítulo IV: Torsión.

A los elementos de las estructuras sometidos a torsión se le llaman “barras”.

La deformación de torsión es la experimentada por un cuerpo sometido a un momento torsor externo, producido por un par de fuerzas ejercidas en puntos separados de su superficie. Existe un eje central que no se deforma, el eje neutro. Con esta definición comienza el capítulo IV del texto.

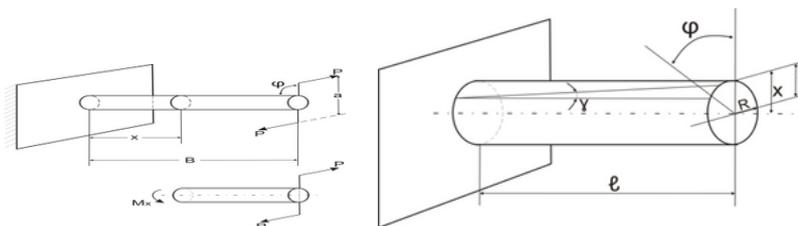


Fig. 6 Barra sometida a torsión.

En este capítulo se detallan los conceptos de “ángulo absoluto de torsión” ( $\varphi$ ) y “ángulo relativo de torsión” ( $\theta$ ), así como la relación entre ellos:  $\theta = \varphi/l$ .

Un elemento importante que se destaca es el llamado “cizallamiento relativo” ( $\gamma$ ), que no es más que el ángulo de desplazamiento de las fibras longitudinales de una barra, al actuar en ella un momento torsor. Se expresa su vínculo con los conceptos anteriores:  $\gamma l = \varphi R$  y  $\gamma = \theta R$ .

Al final del capítulo se explica la condición de resistencia de una estructura a la torsión:

$$\tau_{\max} = M_{\text{tor}} / W_p \leq [\tau_{\text{admtor}}] \quad (7)$$

Donde:

$M_{\text{tor}}$  – Momento de torsión que actúa en la sección a calcular, en Nmm.

$W_p$  – Momento polar de resistencia, en mm<sup>3</sup> ( tabla).

$\tau_{\text{máx}}$  – tensión admisible en MPa.

### Capítulo V: Flexión.

A los elementos de las estructuras sometidos a flexión transversal se le llaman “vigas”.



Fig. 7 Viga sometida a flexión transversal.

En las secciones transversales de las vigas surgen, durante la flexión, dos factores de fuerza internos: Un momento flector ( $M_F$ ) y una fuerza transversal de corte ( $Q$ ):

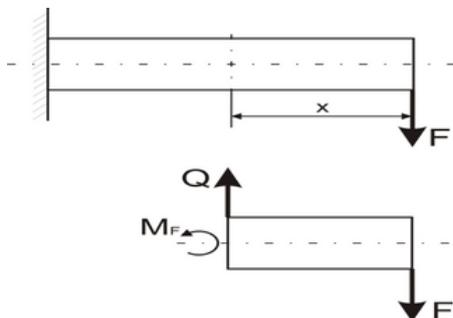


Fig. 8 Viga bajo fuerza (seccionada)

Se da en el texto una metodología sencilla para determinar la resistencia de la viga a la flexión transversal y la metodología para la representación gráfica del momento flector y la fuerza transversal de corte.

A diferencia de otros textos, en este se profundiza en lo relacionado con la Flexión Longitudinal, por su importancia para el diseñador industrial, al estar este fenómeno vinculado a vigas sometidas a cargas longitudinales, como son las patas de sillas, mesas, pedestales y otras estructuras, donde el largo es muy superior al diámetro o grosor.

El cálculo de la flexión longitudinal se hace preferentemente a la compresión, disminuyendo la tensión admisible en un grado, que depende de la magnitud de flexibilidad de la barra ( $\lambda$ ).

$$\sigma = N/A \leq \varphi[\sigma_{adm}] \quad (8)$$

$\varphi$  - coeficiente de corrección, cuya magnitud depende de la flexibilidad de la barra ( $\lambda$ ).

Se explica detalladamente todo el proceso de cálculo del coeficiente de corrección y se incluyen todas las tablas necesarias para ese cálculo.

### Capítulo VI: Esfuerzos Combinados.

El estado deformado compuesto se presenta en aquellos casos en que un elemento de la estructura está sometido, simultáneamente, a varias de las deformaciones simples antes estudiadas.

**Uniones por remache:** cizallamiento y compresión. Actúan tensiones normales y tangenciales.

**Tornillos:** tracción debido a la fuerza de apriete, y torsión, causada por el momento torsor. Actúan tensiones normales de tracción y tensiones tangenciales de torsión.

Se explica que las tensiones normales, equivalentes a la acción conjunta en los materiales plásticos (por ejemplo el acero) se determinan de acuerdo con la **3ra teoría de la resistencia**, por las fórmulas:

En tornillos:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} = \sqrt{\frac{F^2}{A^2} + \frac{3M_T^2}{W_p^2}} \leq [\sigma_{admF}] \quad (9)$$

En árboles:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} = \frac{\sqrt{M_F^2 + M_T^2}}{W} \leq [\sigma_{admF}] \quad (10)$$

Las tensiones equivalentes ( $\sigma_{eq}$ ) se comparan con las tensiones normales admisibles a la flexión  $[\sigma_{admF}]$  para obtener la condición de resistencia en elementos sometidos a la acción de esfuerzos combinados:

## Capítulo VII: Materiales Ecológicos y el Diseño.

En este capítulo se refleja un resumen de búsqueda bibliográfica referente a las propiedades mecánicas avanzadas de algunos de los principales materiales empleados en el Diseño. En este sentido se reflejan elementos novedosos acerca del mejoramiento en los últimos años de las propiedades mecánicas de los materiales cerámicos, los plásticos y los metales.



Fig. 9 Diferentes usos de materiales cerámicos.

En los materiales cerámicos se hace hincapié en los avances logrados para disminuir su fragilidad. En 1975, se descubre un mecanismo de reforzamiento de matrices cerámicas (partículas de  $ZrO_2$ ). El salto de los valores de resistencia mecánica fue espectacular, de 500 MPa en 1970 a 2500 MPa en 1990.

Los basados en Nitruro de Silicio poseen elevados módulos elásticos; elevada dureza; son buenos aislantes eléctricos; poseen alta conductividad térmica; así como estabilidad química y térmica.

Los que poseen gradiente de composición (determinada propiedad varía a lo largo del volumen) se caracterizan por su elevada dureza y alta conductividad térmica.

Los elaborados sobre la base de Alúmina poseen alta resistencia térmica y mecánica, son además muy aislantes.

En cuanto a los plásticos, se puntualiza que el desarrollo de la Química Orgánica ha permitido polímeros con diferentes estructuras y propiedades, para cualquier aplicación y se pone como ejemplos el Kevlar con 150 GPa y densidad de  $1,45 \text{ g/cm}^3$  (acero- 200 GPa y  $7,8 \text{ g/cm}^3$ ); las Fibras de Carbono (400 GPa y  $1,9 \text{ g/cm}^3$ ) que se refuerzan con materiales compuestos (fibras de alto módulo + resina epóxida).



Fig. 10 Diferentes usos de materiales plásticos.

Se señala que los materiales plásticos compuestos introdujeron una revolución en las industrias aeronáutica y aeroespacial. Hoy un avión comercial tiene un 30 % de su peso en materiales compuestos, con el correspondiente ahorro de peso ( $D=1,9 \text{ g/cm}^3$  Vs  $2,7 \text{ g/cm}^3$  el Aluminio).

Se ilustra el empleo de los policarbonatos, el poliuretano, el poliestireno, el ETFE, el etileno y propileno sin petróleo, así como los bioplásticos de la familia LATIGEA.

En cuanto a los metales, se señala que el Cobre, el Estaño, la Plata, el Oro y el Hierro, no envejecen, gracias a la investigación incesante de sus propiedades mecánicas, físicas y químicas. Los metales son viables económicamente, presentan elevadas propiedades mecánicas, elevada resistencia a la corrosión, así como fácil procesamiento y aleación.

Al Acero y sus aleaciones, al Aluminio y sus aleaciones y a las Superaleaciones está dedicado este acápite del último capítulo.



Fig. 11 Estructuras de Acero, Aluminio y Superaleaciones.

El Acero, fabricado desde 1855 y de los más estudiados (> 2000 tipos) ha sufrido importantes transformaciones. En la década de los 80 los aceros HSLA redujeron el peso de las carrocerías y estructuras en un 35 % y características mecánicas superiores (límite elástico 300 MPa a 550 MPa). En los últimos 20 años se ha logrado más alta resistencia, con cargas de rotura de 15000 MPa (se puede colgar un peso de 150 Kgf en un hilo de acero de  $1 \text{ mm}^2$  sin que se rompa).

Se exponen las características y se ilustran ejemplos de aceros de Fase Dual, a los cuales la Ferrita le proporciona ductibilidad y la Martensita le confiere alta resistencia; los TRIP que con Ferrita, Bainita y Austenita, poseen excelente ductibilidad y endurecimiento por transformación martensítica durante el proceso de deformación. De la misma forma se exponen e ilustran otros tipos de aceros como los TWIP y los Superbanáticos.

En cuanto al Aluminio se muestra su vertiginoso desarrollo con el aumento de la producción (en 1900 - 8 toneladas y en 1999 - 24 millones ton). Es un gran competidor con el acero, con una densidad ( $2,7 \text{ g/cm}^3$ ) x ( $7,8 \text{ g/cm}^3$  el acero), mayor resistencia a la corrosión y elevadas propiedades mecánicas.

La familia de las aleaciones de aluminio es grande, y sus propiedades dependerán de la combinaciones (Cu, Mn, Si, Mg, Zn o Li) para cada uso específico. Por ejemplo, en un AIRBUS 380 hay un 61% de aleaciones de aluminio y un 7% de glare (aleación Al+Vidrio laminado).

Se ilustran las aleaciones de Al-Mg, con excepcional comportamiento mecánico; las aleaciones de Al-Li, con disminución de la densidad a 2,54 g/cm<sup>3</sup> y aumento del módulo elástico; las aleaciones de 3ra generación AL-Li, con la cualidad de la facilidad de soldarse.

Por último se trata el tema de las Superaleaciones, sobre la base de níquel al 35%, empleada en la Industria aeroespacial y generación de energía eléctrica. Se pone como ejemplo que el aspa de una turbina puede estar trabajando durante 35000 horas a 1200°C sin sufrir daños mecánicos, ni de corrosión.

Cierra este último capítulo del texto una reseña futurista sobre el empleo del Grafeno.

### **Bibliografía:**

- \* Beer F. P. y E. Russell, Mecánica vectorial para ingenieros, Edición Revolucionaria, La Habana, 1988 (dos tomos).
- \* Feodosiev V.C., Resistencia de Materiales. Editorial MIR, Moscú, 1980.
- \* Stiopin P.A., Resistencia de Materiales. Editorial MIR, Moscú, 1979.
- \* Sokolov F., Mecánica Industrial. Editorial MIR, Moscú, 1986.
- \* Movnin S. y otros, Fundamentos de Mecánica Técnica. Editorial MIR, Moscú, 1985.
- \* Miroliubov I. y otros, Problemas de Resistencia de Materiales. Editorial MIR, Moscú, 1971.
- \* Berazaín A., Mecánica Teórica, Departamento de Diseño Industrial, ISDI, 2005.