

# ESFUERZO Y DEFORMACION

## Introducción

El diseño de cualquier elemento o de un sistema estructural implica responder dos preguntas: ¿El elemento es resistente a las cargas aplicadas? y ¿Tendrá la suficiente rigidez para que las deformaciones no sean excesivas e inadmisibles? Las respuestas a estas preguntas implican el análisis de la *resistencia* y *rigidez* de una estructura, aspectos que forman parte de sus requisitos. Estos análisis comienzan por la introducción de nuevos conceptos que son el *esfuerzo* y la *deformación*, aspectos que serán definidos a continuación (Salvadori y Heller, 1998; Timoshenko y Young, 2000).

## Esfuerzo

### Idea y necesidad del concepto de esfuerzo

Las fuerzas internas de un elemento están ubicadas dentro del material por lo que se distribuyen en toda el área; justamente se denomina *esfuerzo* a la fuerza por unidad de área, la cual se denota con la letra griega sigma ( $\sigma$ ) y es un parámetro que permite comparar la resistencia de dos materiales, ya que establece una base común de referencia.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:  $P$ ≡ Fuerza axial;  
 $A$ ≡ Área de la sección transversal.

Cabe destacar que la fuerza empleada en la ec. 1 debe ser perpendicular al área analizada y aplicada en el centroide del área para así tener un valor de  $\sigma$  constante que se distribuye uniformemente en el área aplicada. La ec. 1 no es válida para los otros tipos de fuerzas internas<sup>1</sup>; existe otro tipo de ecuación que determine el esfuerzo para las otras fuerzas, ya que los esfuerzos se distribuyen de otra forma.

### Unidades

El esfuerzo utiliza unidades de fuerza sobre unidades de área, en el sistema internacional (*SI*) la fuerza es en Newton (*N*) y el área en metros cuadrados ( $m^2$ ), el esfuerzo se expresa por  $N/m^2$  o pascal (*Pa*). Esta unidad es pequeña por lo que se emplean múltiplos como el es el kilopascal (*kPa*), megapascal (*MPa*) o gigapascal (*GPa*). En el sistema americano, la fuerza es en libras y el área en pulgadas cuadradas, así el esfuerzo queda en libras sobre pulgadas cuadradas (*psi*). Particularmente en Venezuela la unidad más empleada es el  $kgf/cm^2$  para denotar los valores relacionados con el esfuerzo (Beer y Johnston, 1993; Popov, 1996; Singer y Pytel, 1982; Timoshenko y Young, 2000).

## Deformación

### Concepto

La resistencia del material no es el único parámetro que debe utilizarse al diseñar o analizar una estructura; controlar las deformaciones para que la estructura cumpla con el propósito para el cual se diseñó tiene la misma o mayor importancia. El análisis de las deformaciones se relaciona con los cambios en la forma de la estructura que generan las cargas aplicadas.

---

<sup>1</sup> Fuerza cortante, momento flector y momento torsor.

Una barra sometida a una fuerza axial de tracción aumentara su longitud inicial; se puede observar que bajo la misma carga pero con una longitud mayor este aumento o alargamiento se incrementará también. Por ello definir la *deformación* ( $\varepsilon$ ) como el cociente entre el alargamiento  $\delta$  y la longitud inicial  $L$ , indica que sobre la barra la deformación es la misma porque si aumenta  $L$  también aumentaría  $\delta$ . Matemáticamente la deformación sería:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} \quad (\text{Ec. 2})$$

Al observar la ec. 2 se obtiene que la deformación es un valor adimensional siendo el orden de magnitud en los casos del análisis estructural alrededor de  $0,001^2$ , lo cual es un valor pequeño (Beer y Johnston, 1993; Popov, 1996; Singer y Pytel, 1982).

## Diagrama esfuerzo - deformación

El diseño de elementos estructurales implica determinar la resistencia y rigidez del material estructural, estas propiedades se pueden relacionar si se evalúa una barra sometida a una fuerza axial para la cual se registra simultáneamente la fuerza aplicada y el alargamiento producido. Estos valores permiten determinar el esfuerzo y la deformación que al graficar originan el denominado *diagrama de esfuerzo y deformación*.

Los diagramas son similares si se trata del mismo material y de manera general permite agrupar los materiales dentro de dos categorías con propiedades afines que se denominan materiales *dúctiles* y materiales *frágiles*. Los diagramas de materiales dúctiles se caracterizan por ser capaces de resistir grandes deformaciones antes de la rotura, mientras que los frágiles presenta un alargamiento bajo cuando llegan al punto de rotura.

### Elementos de diagrama esfuerzo - deformación

En un diagrama se observa un tramo recta inicial hasta un punto denominado límite de proporcionalidad. Este límite tiene gran importancia para la teoría de los sólidos elásticos, ya que esta se basa en el citado límite. Este límite es el superior para un esfuerzo admisible.

Los puntos importantes del diagrama de esfuerzo deformación son:

- Límite de proporcionalidad: hasta este punto la relación entre el esfuerzo y la deformación es lineal;
- límite de elasticidad: más allá de este límite el material no recupera su forma original al ser descargado, quedando con una deformación permanente;
- punto de cedencia: aparece en el diagrama un considerable alargamiento o cedencia sin el correspondiente aumento de carga. Este fenómeno no se observa en los materiales frágiles;
- esfuerzo último: máxima ordenada del diagrama esfuerzo - deformación;
- punto de ruptura: cuanto el material falla.

Dado que el límite de proporcionalidad, elasticidad y punto de cedencia están tan cerca se considera para la mayoría de los casos como el mismo punto. De manera que el material al llegar a la cedencia deja de tener un comportamiento elástico y la relación lineal entre el esfuerzo y la deformación deja de existir (Beer y Johnston, 1993; Popov, 1996; Singer y Pytel, 1982).

## Ley de Hooke

En el diagrama esfuerzo - deformación, la línea recta indica que la deformación es directamente proporcional al esfuerzo en el tramo elástico, este principio conocido como la *ley de Hooke* (véase Ecuación 3). Asimismo, la proporción representada por la pendiente de la recta, es constante para cada material y se llama *módulo de elasticidad* ( $E$ ), valor que representa la rigidez de un material.

---

<sup>2</sup> Corresponde a un alargamiento del 0,1 por ciento de la longitud inicial.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (\text{Ec. 3})$$

Desarrollando la Ecuación 3, podemos inferir la expresión de alargamiento indicada en la Ecuación 4 (Beer y Johnston, 1993; Singer y Pytel, 1982; Timoshenko y Young, 2000).

$$E = \frac{P}{\frac{\delta}{L}} \Rightarrow E = \frac{PL}{A\delta} \Rightarrow \delta = \frac{PL}{AE} \quad (\text{Ec. 4})$$

## Seguridad

El diseño de estructuras implica obtener dimensiones de elementos que sean tanto económicos como seguros durante la vida de la estructura. Para ello se emplea el término *estado límite*<sup>3</sup> el cual según las nuevas especificaciones puede estar relacionado con la pérdida de la capacidad de carga o con el deterioro gradual que hace que la estructura no cumpla con la función asignada o con la fatiga<sup>4</sup> del material.

El concepto de estado límite permite establecer un enfoque más racional al problema de la seguridad estructural<sup>5</sup> al emplear la estadística como medio para analizar la variabilidad de la magnitud de las cargas así como de las propiedades de los materiales. Siendo el diseño seguro de un elemento la relación entre los efectos de las cargas multiplicados por un factor que deben ser menores a la resistencia del material disminuida (véase la Ecuación 5).

$$\sum \gamma_i Q_i \leq \phi R_n \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:  $Q_i$  ≡ Efecto de la carga  $i$ ;  
 $\gamma$  ≡ Factor de mayoración de carga que debe ser mayor a 1;  
 $R_n$  ≡ Resistencia nominal del material;  
 $\phi$  ≡ Factor de resistencia que debe ser menor a 1.

La ecuación 5 dice que el diseño consiste en trabajar con cargas mayores a las esperadas actuando sobre un material con una resistencia menor a la supuesta. La resistencia supuesta de un material o esfuerzo último para efectos de diseño se dice que es el esfuerzo de cedencia, ya que una estructura con un comportamiento más allá del límite elástico es lo que se considera para la mayoría de los casos como un estado no deseado en la estructura por las implicaciones de las deformaciones permanentes y la pérdida de la relación lineal entre el esfuerzo y la deformación.

El anterior enfoque se denominaba diseño por el diseño por esfuerzos de trabajo y consistía en usar un esfuerzo admisible que es una fracción del esfuerzo último, así, esta fracción se convertía en el factor de seguridad de la estructura (Galambos, Lin y Johnston, 1999; Nowak y Collins, 2000; Popov, 1996; Segui, 2000; Timoshenko y Young, 2000).

## Diseño de elementos sometidos a fuerza axial

El empleo de la Ecuación 1 no tiene muchas aplicaciones en los problemas del análisis estructural, el objetivo de un diseño de estructuras es determinar las dimensiones de un elemento estructural que sea la sección más económica dentro del límite de la seguridad. Así el diseño de secciones sometidas a fuerzas de tracción según los dos enfoques de diseños es:

<sup>3</sup> Margen que separa un estado deseado de un estado no deseado en la estructura.

<sup>4</sup> Pérdida de esfuerzos bajo cargas repetidas.

<sup>5</sup> Este método se denomina *LRFD* según sus siglas en inglés, Load and Resistance Factor Design.

$$A_g \geq \frac{P_u}{\phi F_y} \text{ Enfoque LRFD} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:  $A_g$  ≡ Área total de la sección transversal requerida;  
 $P_u$  ≡ Fuerza axial mayorada;  
 $F_y$  ≡ Esfuerzo de cedencia de material  
 $\phi$  ≡ Factor de resistencia igual a 0,9 (Galambos, Lin y Johnston, 1999).

$$A_{req} \geq \frac{P}{F_{adm}} \text{ Enfoque esfuerzos de trabajo} \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde:  $A_{req}$  ≡ Área total de la sección transversal requerida;  
 $P$  ≡ Fuerza axial actuante;  
 $F_{adm}$  ≡ Esfuerzo admisible igual a una fracción del esfuerzo último.

El enfoque LRFD es empleado actualmente en el diseño de estructuras de acero y de concreto armado. Por otra parte, para el diseño de la madera desde el año 2005, en EE. UU. este enfoque esta comenzando a implementarse; en la actualidad para el diseño de madera se sigue empleando el enfoque de esfuerzos de trabajo. La tabla 1 indica los valores de cedencia para diferentes calidades del acero y la Tabla 2 los esfuerzos admisibles para diferentes tipos de madera.

Tabla 1. Valores de cedencia para diversos aceros.

Material	$F_y$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$F_y$ (MPa)
Acero ASTM A36	2500	248
Acero ASTM A615 grado 40	2800	275
Acero ASTM A615 grado 60	4200	415

Tabla 2. Valores de los esfuerzos admisibles para distintos tipos de madera (Centeno, 1986).

Tipo de madera	$F_{adm}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$F_{adm}$ (MPa)
A	140	13,7
B	105	10,3
C	75	7,4
D	55	5,4

## Referencias

- Beer, F. y Johnston, E. (1993). Mecánica de materiales. Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Interamericana, S.A.
- Centeno, Julio (1986). Esfuerzos de diseño para maderas venezolanas. Mérida, Venezuela: Instituto Forestal Latinoamericano (IFLA)
- Galambos, T.; Lin, F. y Johnston, B. (1999). Diseño de estructuras de acero con LRFD. Naucalpan de Juarez, México: Prentice Hall Hispanoamericana, S.A.
- Nowak, A. y Collins, K. (2000). Reliability of structures. EE. UU.: McGraw-Hill Companies, Inc.
- Popov, E. (1996). Introducción a la mecánica de sólidos. México, D.F., México: Editorial Limusa, S.A. de C.V.
- Seguí, W. (2000). Diseño de estructuras de acero con LRFD. México, D.F., México: Internacional Thomson Editores, S.A. de C.V.

- Salvadori, M. y Heller, R. (1998). Estructuras para arquitectos. Buenos Aires, Argentina: Kliczkowski Publisher.
- Singer, F. y Pytel, A. (1982). Resistencia de materiales. México, D.F., México: Harla, S.A. de C.V.
- Timoshenko S. y Young, D. (2000). Elementos de resistencia de materiales. México D.F., México: Editorial Limusa, S.A. de C.V.