

DEFORMACIONES DE LAS ESTRUCTURAS

Ing. Roberto F. Morales

Prof. Titular de Estructuras V

Todo elemento estructural sometido a la acción de cargas se deforma. En la mayoría de los casos las deformaciones son imperceptibles, y deben ser medidas con el auxilio de instrumentos.

Podemos definir la deformación de un elemento estructural como una alteración del estado físico debido a una fuerza mecánica externa, a una variación de temperatura, a un cedimiento de apoyos, etc.

La deformación puede ser elástica, cuando desaparece al cesar la acción que lo produce, por lo que las partículas elementales del cuerpo vuelven a su posición inicial; y permanente, cuando persiste después de desaparecer la causa que lo ha producido. El elemento en el primer caso tiene un comportamiento **elástico** y en el segundo un comportamiento **plástico o anelástico**.

En la Naturaleza no existen deformaciones exclusivamente elásticas o exclusivamente permanentes, pues cualquier cuerpo estructural, después de ser deformado, al cesar la acción, no vuelve nunca a las condiciones iniciales; así, aplicando un esfuerzo pequeño a un cuerpo muy poco elástico, la deformación tiende a anularse al menos en parte. En la práctica diremos que el cuerpo se comporta elásticamente cuando la deformación permanente que sufre es casi imperceptible.

Para extendernos sobre las deformaciones de los elementos estructurales, vamos a clasificar los mismos y las cargas que originan las deformaciones.

ELEMENTOS ESTRUCTURALES

Definimos como elemento estructural a uno cualquiera de sus componentes, viga, losa, columna, etc. Pues si bien la estructura debe funcionar, y lo hace, como un conjunto, para un correcto análisis debemos conocer el comportamiento de cada uno de los elementos.

Podemos clasificar los elementos estructurales según su forma:

- elementos con **una dimensión** dominante; por ejemplo: vigas, columnas, pilares, pilotes.
- elementos con **dos dimensiones** dominantes; por ejemplo: losas, tabiques antisísmicos, láminas, bóvedas, etc.
- elementos con las **tres dimensiones semejantes**; por ejemplo: bloques de cimentación, cabezales de pilotes.

Los elementos también pueden ser clasificados según el material que lo constituye, atendiendo a que la calidad del material usado es decisivo en la importancia de las deformaciones:

- Acero
- Hormigón armado
- Hormigón pretensado
- Hormigón simple o en masa
- Madera
- Mampostería de ladrillo o piedra

CARGAS

Las cargas que actúan sobre los elementos estructurales pueden ser:

- **Cargas concentradas:** son cargas en las que el total de la fuerza está aplicada en un área muy pequeña, que idealmente se puede asimilar a un punto.
- **Cargas repartidas uniformemente:** se trata de cargas que actúan a lo largo del elemento con un valor uniforme; cuando la carga repartida, lo es sobre un elemento de dos dimensiones dominantes, tenemos una carga repartida uniforme extendida una superficie.
- **Cargas repartidas variables:** se trata de cargas repartidas que actúan sobre la barra, pero con valores variables a lo

largo de la misma. El mismo concepto se extiende a las cargas extendidas a los elementos estructurales de dos dimensiones dominantes.

El origen de una carga puede ser:

- Peso propio: es la carga originada por el peso del elemento resistente.
- Cargas permanentes: son las cargas debidas a partes de la construcción que no son estructurales, pero están fijadas a la misma permanentemente.
- Cargas de servicio o sobrecargas: son las cargas de uso, son las que debe resistir la estructura diseñada.
- Cargas por fenómenos meteorológicos: son las originadas por el viento a la nieve.
- Cargas sísmicas: son las originadas por un sismo, tectónico o volcánico; inclusive sismos originados por la acción humana (sismos inducidos).
- Presiones o empujes: cargas originadas por el empuje de suelos, líquidos, con dirección predominantemente horizontal.

ELECCIÓN DEL TIPO ESTRUCTURAL

Al analizar el comportamiento de una estructura, y de sus elementos componentes; para diseñarla es importante que el tipo de solución estructural no sólo esté en función de las cargas y luces libres, sino también del material a utilizar.

Para un mismo edificio, el tipo de solución más adecuado no es necesariamente el mismo cuando el material es hormigón armado, en vez de hormigón pretensado. Cada material tiene un comportamiento diferente y diferentes soluciones en los detalles constructivos. Estas diferencias van a influir, en gran medida, en el proyecto de instalaciones, terminaciones, etc., inclusive en las tareas de mantenimiento del edificio durante su vida útil.

El proyectista debe considerar en el diseño del edificio las alternativas que ofrecen los diferentes materiales, la modalidad de uso del mismo, costo, uso de sistemas constructivos patentados, disponibilidad de mano de obra calificada, movimiento de equipo a la ubicación de la obra.

Es importante considerar los puntos citados al seleccionar el tipo estructural a usar.

Seleccionados los materiales y el tipo de estructura a utilizar, el especialista en estructuras determina las **cargas previsibles** sobre la estructura.

Hablamos de cargas previsibles, porque las cargas que debe soportar una estructura a lo largo de su vida útil, pueden estimarse usando valores mínimos especificados por los códigos, o mediante un estudio más detallado cuando el destino no se encuentra contemplado en los códigos. Pero, estas cargas pueden variar si se modifica el destino o uso del edificio. Por supuesto, se espera que en caso de un uso diferente del edificio, se verifique la capacidad de resistencia de la estructura bajo las nuevas cargas. Esta verificación es recomendable, incluso, cuando el cambio de destino implica una disminución de las cargas de servicio.

En el proceso de cálculo de las cargas es importante contemplar la combinación o superposición de cargas con distintos orígenes. Por ejemplo: un muro de sótano está soportando carga vertical (del entrepiso) y un empuje horizontal resultante de la presión lateral del suelo. Otro caso frecuente, es la superposición de cargas verticales y cargas de presión y succión en cubiertas de edificios industriales o grandes depósitos, originadas por el viento. En zonas de actividad sísmica, como es el caso de la provincia de Mendoza, se analiza la acción combinada de las cargas estáticas más las cargas dinámicas producidas por los sismos.

Habiendo definido el tipo estructural y seleccionado el material estructural, según el destino se conoce las cargas previsibles.

La etapa siguiente será calcular numéricamente la magnitud de los esfuerzos en cada elemento estructural. De este proceso se

obtienen los valores de las solicitaciones de flexión, corte, compresión, tracción y torsión para cada uno, según su función. Salvo casos ideales teóricos, todos estos esfuerzos están presentes en cualquier elemento de una estructura, pero afortunadamente, generalmente sólo uno o dos de ellos tienen una magnitud decisiva para verificar la capacidad de resistencia del mismo.

El proceso de verificación se realiza con las dimensiones prefijadas de la estructura, se verifica la capacidad de resistencia en las secciones más solicitadas, ya sea para un solo esfuerzo o para una combinación de ellos, por ejemplo: flexión y compresión en columnas, flexión y corte en vigas. Si los esfuerzos superan su capacidad de resistencia será necesario ajustar las dimensiones de los elementos, hasta que alcancen la capacidad de resistencia necesaria. Ello implica, por supuesto, un control de los valores de los esfuerzos con las nuevas dimensiones.

DEFORMACIONES Y CONTINUIDAD EN UNA ESTRUCTURA

Todo cuerpo sobre la Tierra está sometido a la acción de fuerzas. Una de ellas es intrínseca al mismo cuerpo, es su peso, y salvo que el cuerpo sea alejado de la Tierra no puede abstraerse a esta fuerza.

Al peso del cuerpo, se le suman otras fuerzas, y los elementos estructurales en una obra de arquitectura, están ideados para resistir esta suma de fuerzas.

Por la acción de las cargas (fuerzas) un elemento estructural se deforma. Esta deformación en magnitud y sentido, depende de la fuerza que la origina, de las dimensiones del elemento y del material usado.

Las deformaciones responden a las siguientes relaciones:

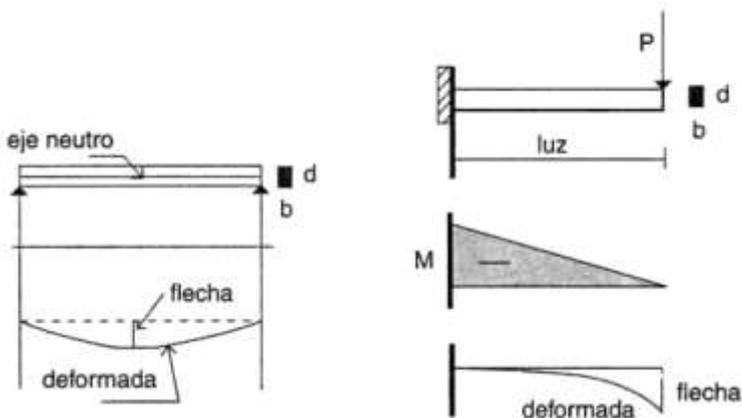
- a **mayor** carga, **mayor** deformación
- a **mayor** dimensión longitudinal (luz), **mayor** deformación
- a **mayor** sección resistente, **menor** deformación
- a **mejor** material (mayor módulo E), **menor** deformación

PROCESO PARA EL DISEÑO Y CÁLCULO DE UNA ESTRUCTURA



Una vez verificada la capacidad de resistencia de la estructura, por el método elástico o el método a la rotura, si los elementos estructurales cumplen con ciertas condiciones de diseño y dimensiones mínimas, exigidas por los códigos, no es necesario realizar otra verificación. Como ejemplo el dimensionamiento de una viga simple de hormigón armado cuya altura total es mayor que el límite fijado por la norma para controlar la flecha.

En general para vigas o losas de grandes luces, es conveniente calcular la flecha (máximo valor de la deformada del eje neutro de la viga), aunque las normas no lo exijan específicamente. La limitación de la flecha, a un valor máximo aceptable, nos permite controlar la utilidad del elemento estructural flexionado. De poca utilidad sería una losa con una flecha de 1 cm o más en su centro.



Veamos unos ejemplos de vigas, en los que las tensiones admisibles a flexión no es superada, pero la flecha va más allá de los valores máximos reglamentados. Para una ménsula con una carga concentrada en el extremo libre, su flecha se determina con:

$$f = \frac{P \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot J}$$

siendo E el módulo de elasticidad del material y J el momento de inercia de la sección. Si la sección es rectangular y el material estructural es homogéneo, calculamos la tensión en la sección más solicitada con:

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad \text{donde es}$$

$M = -P \cdot l$ máximo momento flector en el empotramiento. $W = b \cdot d^2 / 6$ módulo resistente de la sección.

Operando con las fórmulas que expresan la flecha, la tensión por flexión y el módulo resistente, expresamos la flecha en función de otras variables, y tenemos

$$f = \frac{2 \sigma l^2}{3 E d} \quad (a)$$

fórmula en la que para un valor límite de la tensión o en la sección más solicitada, vemos que incrementado la altura "d" de la sección disminuye la flecha.

Para una viga simple, la flecha se expresa en el caso de carga uniforme extendida a toda su longitud:

$$f = \frac{5 \cdot q \cdot l^4}{384 \cdot E \cdot J}$$

donde q es el valor de la carga uniforme, expresada por unidad de longitud. La tensión en la sección más solicitada se calcula, como en el caso anterior con:

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad \text{donde es}$$

$M = q \cdot l^2 / 8$ máximo momento flector en el centro de la viga. Operando como en el caso de la ménsula expresamos la flecha:

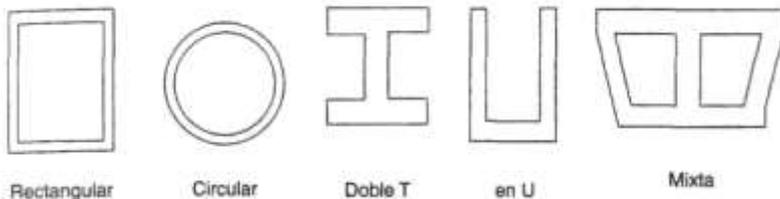
$$f = \frac{10 \sigma l^2}{43 E d} \quad (b)$$

donde son válidos los conceptos dados para la fórmula (a).

Estos ejemplos sencillos, muestran la importancia que tiene controlar las deformaciones de las estructuras, aunque el valor de la tensión o no supere los valores límites fijados en los códigos.

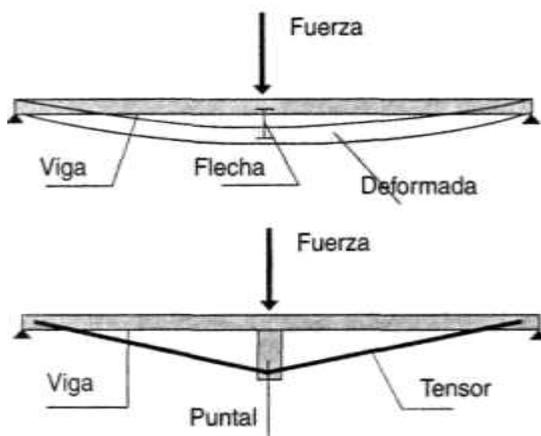
El método más directo para lograrlo es reducir la deformabilidad de la barra diseñado una sección con mayor momento de inercia. Esto significa usar una sección de mayores dimensiones y más cantidad de material.

Para reducir la cantidad de material y el peso del elemento estructural se diseñan piezas con secciones hueca, en forma de T o U, como se muestra.



SECCIONES ALIGERADAS

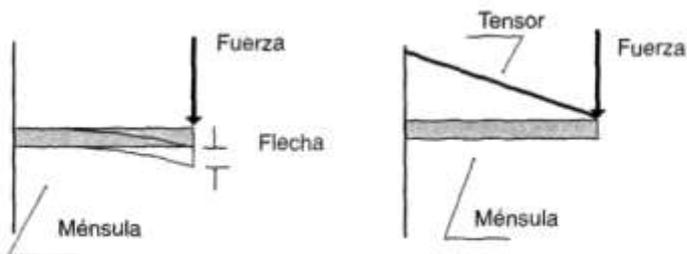
Pueden buscarse otras soluciones para reducir la flecha de un elemento flexado, sin un aumento importante de la sección, como se muestra:



En la Viga Simple la colocación de un Tensor permite controlar la deformación

La incorporación de los tensores en los ejemplos permite controlar la deformación, se puede considerar que la viga y el tensor (en conjunto) forman solo elemento estructural; aunque, si diseñamos una

estructura con los elementos similares, obtenemos una estructura reticulada.



Control de la deformación de un voladizo con tensor



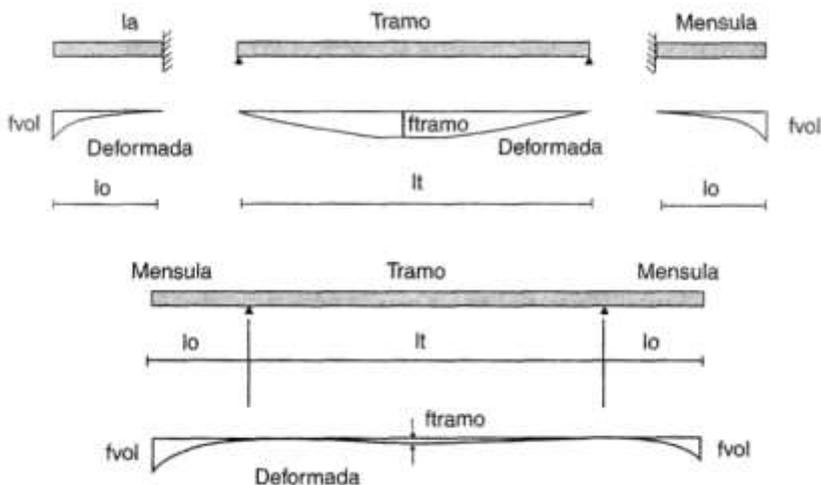
EVOLUCIÓN DE LAS TIPOLOGÍAS HACIA LA ESTRUCTURA CONTINUA

Hasta ahora hemos analizado modos de controlar las deformaciones en elementos estructurales desvinculados, veamos ahora un caso simple, que es la misma influencia de dos ménsulas extremas en una viga simple. La presencia de las mismas contribuye a reducir la flecha del tramo.

Esto se explica por la existencia de una colaboración entre la viga

simple, de un tramo, y las dos vigas ménsulas unidas a ella en los extremos. Esta colaboración conocida como **continuidad estructural**, reduce el valor del máximo momento flector en el tramo, y es equivalente a la reducción de las cargas en el tramo de la viga, sólo para la flexión.

La continuidad estructural funciona si existe una unión entre dos elementos estructurales que garantice la transferencia de las solicitaciones. Las uniones pueden diseñarse para la transferencia de todas las solicitaciones o sólo de algunas de ellas. Como ejemplo tenemos las uniones articuladas, que pueden transmitir esfuerzos axiales, pero no tienen la capacidad de transmitir flexiones.



Influencia de la continuidad en la deformación de una viga con ménsulas

La estructura principalmente mural de fines del siglo XIX en la arquitectura, se caracterizaba por una distribución de material con capacidad para funcionar como elemento resistente y de cerramiento. Cuando se dominan las técnicas que permiten una unión íntima entre vigas y columnas, se pueden diferenciar las funciones resistentes y las funciones de cerramiento y división.

Así llegamos a proyectar un esqueleto principal con sus características independientes de resistencia y elasticidad, al que serán vinculadas otras partes del edificio que cumplen funciones no estructurales. Así, pueden diseñarse edificios con esqueletos aporticados de uno o más pisos, que conforman un entramado de elementos rectos o curvos unidos entre sí para alcanzar una continuidad total, continuidad que permite el **flujo** de tensiones con una transmisión ordenada de fuerzas y momentos de elemento en elemento.

Con la continuidad surgen nuevas necesidades en el cálculo. Ya no es posible considerar cada elemento estructural como algo aislado e independiente, con condiciones de apoyo propio. En las estructuras continuas es indispensable examinar la resistencia de la estructura en conjunto, contemplando la multiplicidad de uniones internas y externas.

La continuidad estructural, es lograda en construcción con el colado en las estructuras de H° A°, con las soldaduras en las estructuras metálicas y el encolado en las estructuras de madera.

Aunque hace años que se diseñan estructuras continuas de edificios, en la mayoría de los casos el análisis se limita a descomponer la estructura en **estructuras planas**. Así, la continuidad dio vida y desarrollo a estructuras formadas por pórticos y muros elásticos, en los que se trató de salvar las dificultades de cálculo o eliminar dudas o particularidades de funcionamiento poco claras, reduciendo la hiperestaticidad con la introducción de nudos o articulaciones. Con el desarrollo de métodos y programas de computación, se superó la parte más costosa y compleja que representa el cálculo numérico.

Paralelamente al progreso de los métodos y herramientas de cálculo, se advirtió que la hiperestaticidad de un sistema continuo elástico, aunque demanda un proceso de cálculo más laborioso, permite aprovechar la reserva de seguridad que significa la redistribución de esfuerzos en los restantes elementos, cuando uno de ellos se acerca a su capacidad límite de resistencia.

Esta cualidad que otorga la continuidad a una estructura, tiene un significado más profundo, que es la mutua colaboración entre los diferentes elementos del sistema estructural.

Si se extiende el estudio de la estructura, inicialmente descompuesta en subestructuras planas, al espacio, considerando la redistribución de tensiones en la estructura espacial, se pueden obtener estructuras más económicas y racionales. Esta ventaja se hace más importante con el desarrollo de materiales con mayor resistencia, como los hormigones de alta performance, combinación que abre camino a obras de una envergadura que pocos especialistas en estructuras imaginaban una década atrás.

Así, se abrió un nuevo modo de ver y de considerar la estructura, y, desde hace tiempo, los especialistas en estructuras las analizaron **especialmente**, dejando de lado el criterio de **estructura plana**, a la que se llega por la descomposición ideal de la verdadera estructura, método usado en estructuras sencillas donde el análisis tridimensional no aporta ventajas significativas.

En estructuras sometidas a cargas horizontales, el análisis espacial permite considerar en su justa medida la función resistente de todos los elementos estructurales.

Si analizamos, por ejemplo, un entrepiso constituido por una losa de $H^\circ A^\circ$. Para el cálculo, generalmente se analiza una faja independiente de ancho unitario, considerada como una viga con sus vínculos extremos apoyados. Pero, en realidad, cuando la carga no está extendida a toda la losa, sino que está actuando únicamente en la faja considerada, ésta no puede deformarse aislada, sin arrastrar consigo las fajas vecinas, las cuales, oponiéndose contribuyen a la resistencia y a reducir las deformaciones.

De este análisis del comportamiento del entrepiso como estructura continua deriva de inmediato al caso de la **placa o superficie elástica**, elemento estructural en el que las tensiones internas creadas por una carga parcial no fluyen, por así decir, en un camino único, sino que se transmiten a través de toda la superficie, aprovechando la colaboración de cada parte con una reducción notable de los valores de las tensiones.

En base al mismo concepto, podemos reemplazar los apertamientos planos formados por vigas rectilíneas o de eje curvo, para sustituirlos por apertamientos espaciales integrados por

conexiones de superficies planas o curvas. Se abandona el concepto de estructura plana con el flujo de tensiones a través de vigas y columnas de sección limitada, por estructuras con el flujo de tensiones repartido en superficies más amplias, las que, al repartirse en una zona mayor tienen una reducción de los valores unitarios y permiten obtener un notable ahorro de material.

El análisis de la estructura de un edificio como estructura espacial, está facilitada por la capacidad de cálculo numérico de las computadoras y de programas orientados a esa finalidad, y que asimismo permiten analizar diferentes propuestas estructurales para así seleccionar la más conveniente. Aprovechando una de las características más interesantes de las estructuras continuas, que es brindar una amplia gama de soluciones para un diseño edilicio dado.

El proyectista se dejará guiar en cada caso, dentro de su libertad de elección, por el criterio que responda mejor a las condiciones de entorno, destino, costos, plazos de ejecución, y por supuesto seguridad. Todo ello sustentado por un profundo conocimiento de la teoría de las estructuras y las tecnologías constructivas.