

LA SEGURIDAD ESTRUCTURAL EN EL DISEÑO DE ELEMENTOS DE HORMIGÓN SOMETIDOS A FLEXIÓN

**Ing. Carlos Rodríguez García¹, Ing. René Blanco Heredia²,
Ing. José Ramón Díaz García³**

*1. Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”,
Vía Blanca km 3 ½, Matanzas, Cuba.*

*2. Empresa de Mantenimiento y Construcción de Matanzas
(Emcon), Callejón del Ángel No 7712 Matanzas, Cuba.*

*3. Empresa Producción Industrial, Combinado de prefabricado y
carpintería de madera Canaleta. Carretera el Roque km 1.
Municipio de Perico, Matanzas. Cuba*

Resumen.

La seguridad estructural es un tema de suma importancia para los proyectistas estructurales y especialistas en general, por la repercusión que tiene en el desempeño futuro de la obra. En este trabajo se abordan temas referentes a esta, analizando normativas distantes en tiempo y geografía, sus características generales y los puntos de coincidencia entre estas, se analizan el método de Momento tope, el de momento límite y el método de la ACI 318.

Palabras claves: seguridad estructural; flexión; tensiones admisibles; tensiones de rotura; estados límites.

Introducción

El hormigón estructural, como ciencia, forma parte del cúmulo de conocimientos necesarios en la formación del ingeniero civil actual. Diferentes temas son tratados, estos van, desde las propiedades de los materiales componentes, como son el acero y el hormigón generando un nuevo material, hasta las teorías de diseño, en la que se incluye la seguridad estructural.

Es precisamente el tema de la seguridad estructural donde se centrará el artículo, dada su importancia en el proceso del diseño, partiendo de que el proceso de diseño no es más que un proceso de modelación en que se incluyen, la modelación de la geometría de los elementos, así como su sistema de vínculos, el comportamiento de los materiales, las acciones externas, llamadas cargas y por último y no menos importante, las hipótesis en las que se basan los métodos que se emplean.

Explicar entonces en el artículo, los métodos que han trascendido en la historia del cálculo, para garantizar la seguridad estructural en el diseño, tomando el caso particular el de la flexión simple.

Como complemento a los textos existentes, surge entonces este trabajo, dirigido fundamentalmente a estudiantes de la carrera de ingeniería civil, permitiendo profundizar en un tema de tanta importancia, que se abordará de forma puntual, pero que es tan general como la ingeniería misma.

Desarrollo

Los elementos, cuya sollicitación principal es la flexión simple y recta, son encontrados prácticamente en todas las estructuras, como son los casos de vigas, losas y escaleras.

Las secciones de estos elementos, al estar sometidos a la acción externa de una carga normal a su eje longitudinal, originan una sollicitación, la cual se le ha llamado momento flector, girando las secciones y originando entonces una fibra en compresión y otra en tracción¹.

Esta sollicitación se encuentra, por supuesto, en elementos de hormigón, metal y madera, definiéndose como hormigón al producto resultante, fundamentalmente de la mezcla de áridos y un aglomerante (Acevedo, 1985) generalmente cemento Portland, y agua.

Este, como material pétreo, presenta muy buena resistencia ante los efectos de compresión, pero no así ante los de tracción, esta insuficiencia es contrarrestada con la colocación de acero dentro de la masa de hormigón, formándose entonces el hormigón armado; el cual resiste la flexión de forma más eficiente que el hormigón masivo.

¹ Para los casos de flexión simple.

Teorías de diseño de elementos de hormigón armado.

Unos de los iniciadores del hormigón armado como material de construcción fueron los franceses Monier y Coignet, que ya en 1861 dieron las primeras reglas para la fabricación de vigas, bóvedas, tubos y otros (Montoya, *et al.*, 2001).

En sus inicios sus creadores presentaban solo ideas de diseño, las cuales patentaban, pero no realizaban aportes a su teoría, en algunos casos logrando estos diseños a partir de pruebas experimentales, y utilizando teorías demostradas de elementos metálicos y obras de mampostería si armar.

Con el transcurso del tiempo comenzaron a surgir verdaderos investigadores que, basados en leyes clásicas de la elasticidad, trataron de aplicarlas al análisis y diseño de elementos de Hormigón Armado; así fue surgiendo la llamada Teoría Elástica; estas teorías fueron evolucionando hasta llegar a la teoría de Estados Límites. (López, 1978)

Con la intensificación de los estudios sobre dicho material se perfeccionó el método anterior en cuanto a su basamento, lo que trajo consigo la aparición de un nuevo método de cálculo conocido como **método de tensiones admisibles** por el cual se determinan las tensiones de trabajo correspondientes a los esfuerzos que se derivan de las acciones exteriores (cargas de servicio) y se comparan con las denominadas tensiones admisibles de los materiales (Díaz, 2012).

Este método considera la ley del comportamiento elástico, por lo que resulta imposible conocer las reservas de las resistencias de las estructuras, debido a esto surge otro método conocido como **método de tensiones de rotura**. Este método se ajusta mejor a las propiedades elasto-plásticas del hormigón, en este se considera la condición real elasto-plástico del hormigón estudiándose en la cuarta fase (Díaz, 2012).

El hombre continuó la búsqueda de un nuevo método que satisficiera las verdaderas necesidades de los elementos estructurales y su mayor acercamiento posible a las características de los materiales, es así entonces que surge el **método de los estados límites** (MEL), el cual se fundamenta en la obtención de un diseño donde las cargas y las tensiones a las que está sometido el material que se emplee en el elemento a diseñar, así como las deformaciones y desplazamientos que en ella se originan, tanto en el período de construcción como durante su vida útil, estén cerca de los límites permisibles para cada caso, sin llegar a sobrepasarlos. (Hernández y Hernández, 2010, 214)

Los primeros trabajos sobre la aplicación de este método de diseño estructural aparecen en la década de los 50 como resultado de investigaciones de varios científicos rusos, instaurándose como normativa en la URSS; en los años 60 en Cuba los estudios realizados por el Ing. Pimpo Hernández Pérez permitieron la más pronta introducción del método en el país. (Díaz, 2012)

Características de los métodos de diseño

En la actualidad conviven tres generaciones de proyectistas diseñando y revisando elementos sometidos a flexión por varios métodos de cálculo (Díaz, 2012), con sus respectivas consideraciones, dentro de ellas lo referente a la seguridad estructural.

Método de Momento Tope

Método de cálculo existente en Cuba desde los años 70, por el cual han sido calculados infinidad de estructuras; como principio considera actuando sobre toda el área útil una tensión de compresión igual al 75 % de la resistencia característica minorada, y tomar el momento del volumen de tensiones en relación con el centroide de las fuerzas del acero en tracción o menos comprimido, quedándonos entonces:

$$M_T = 0.75 \cdot R_b^* \cdot S_h \quad (1)$$

El término S_h representa el momento estático del área útil con relación al refuerzo, su valor es:

$$S_h = b \cdot h^2 / 2 \quad (2)$$

Por lo que queda entonces definida como profundidad tope, o mayor profundidad posible del bloque de compresiones a la mitad del peralte efectivo de la sección.

Finalmente sustituyendo la ecuación 2 en la 1 obtenemos:

$$M_T = 0.375 \cdot R_b^* \cdot b \cdot h^2 \quad (3)$$

Momento límite

A este método se le conoce como método de momento límite debido a que las investigaciones realizadas han probado que en flexión simple el valor del momento estático llega a tener un límite para la cual la sección falla por agotamiento del hormigón antes que por el refuerzo (Medina y Ruiz, 2008, 155), pudiéndose decir que aunque se aumente el área del refuerzo la sección de hormigón no podrá soportar ningún incremento del momento flector.

Se puede denominar como momento límite (S_y), al máximo de momento que de acuerdo con el máximo valor de momento estático que según la norma cubana podrá suministrar una sección cualquiera en función del hormigón. La ecuación general de momento límite queda entonces de la siguiente forma:

$$M_L = R_b^* \cdot S'_y \quad (4)$$

En este caso el valor de S_y varía, para hormigones usuales, de un 75% a un 85 % del momento estático de la sección (S_h), dependiendo principalmente del tipo de acero, este factor será entonces C_h , quedando entonces la ecuación de momento límite:

$$M_L = C_h \cdot R_b^* \cdot S_h \quad (5)$$

Método unificado de la ACI " American Concrete Institute "

El aporte fundamental que los autores han encontrado en este método consiste en el llamado Factor de Resistencia del Hormigón (β) que variando desde valores de 0.85 hasta 0.65 hace que el aporte del hormigón como material no sea constante, sino que se toma por primera vez un aporte variable de la capacidad del hormigón en función de la resistencia requerida en el diseño.

Hay que destacar que los países desarrollados como es el caso de los Estados Unidos de América, donde nace el Método Unificado, han podido desarrollar a través de la tecnología un control casi estricto de la calidad de los materiales empelados en la confección del hormigón armado, que ha hecho desaparecer los llamados coeficientes de minoración de la resistencia de los materiales

De igual forma, un estudio riguroso de las acciones externas, han llevado a diferenciar los coeficientes de mayoración, llamados de de factorización, de las cargas permanentes, de uso, ecológicas, etc. Este estudio presenta en nuestros días un alto rango de probabilidad de ocurrencia, por lo que comienza a desaparecer el concepto de método semi probabilísticos, utilizado hasta hace poco tiempo.

Por estas razones, en flexión simple y recta, sólo se utiliza el llamado factor de reducción de resistencia.

Seguridad Estructural

Todos los parámetros que intervienen en el equilibrio de cualquier estructura (en particular en una de hormigón armado) tienen una variabilidad intrínseca al incompleto conocimiento que sobre ella posee el analista.

Esta variabilidad incluye tanto a las propiedades de la estructura (resistencias, geometría, etc), como a las solicitaciones e incluso a los modelos de cálculo utilizados. Incluye también la ignorancia sobre el fenómeno de acuerdo con el estado del arte, aunque esta variabilidad suele llamarse Incertidumbre. (Lima, *et al.*, s.f)

La seguridad de una estructura está asociada a cuestiones netamente probabilísticas, es decir, que es posible establecer con cierta exactitud (dependiendo del desarrollo de las teorías específicas) la probabilidad de ocurrencia de un determinado evento (Lima, *et al.*, s.f), este concepto está intrínsecamente relacionado con los conceptos de confiabilidad y economía.

Según Hernández y Hernández, 2010, se definen como:

Confiabilidad: indica qué probabilidad de ocurrencia existe para determinado fallo.

Economía: procura el diseño óptimo para que la estructura sea confiable al menor costo.

Seguridad estructural en el Método de Momento Topo

El método, según López, 1978, considera la seguridad por tres canales simples:

1. Utiliza valores característicos, tanto para los materiales como para las acciones o cargas.
2. Utiliza coeficientes para transformar los valores característicos de los materiales y acciones en valores de cálculo.
3. Garantiza que las solicitaciones determinadas sobre la base de los valores de cálculo de las acciones o cargas sean, como máximo, iguales a las que pueda soportar la estructura o elemento sobre la base de las resistencias de cálculo de los materiales y para el estado límite considerado.

Como se comenta en el punto dos, se utilizan coeficientes para transformar los valores característicos, estos dependerán primeramente del tipo de material; estos coeficientes tienen en cuenta la reducción de la resistencia de los materiales, que está relacionado con el control de la calidad a la hora de la fabricación y colocación, para el acero se asume un 5% y para el hormigón un valor del 16% en contra.

Acero:

$$R_a^* = \frac{R_{ak}}{\gamma_a} \quad (6)$$

Donde $\gamma_a = 1.2$, tanto para acero en tracción como en compresión.

Hormigón:

$$R_b^* = \frac{R'_{bk}}{\gamma_b} \quad (7)$$

Donde γ_b depende del tipo de control de fabricación y colocación.

$\gamma_b = 1.50$ Fabricación y control muy controlados.

$\gamma_b = 1.60$ Fabricación y control controlados normalmente.

$\gamma_b = 1.75$ Fabricación y control tengan poco control o cuando ciertos elementos como paredes y columnas sean fundidos verticalmente.

Estas resistencias características (R_k) se obtienen mediante la expresión:

$$R_k = R_m (1 - \lambda \delta) \quad (8)$$

Donde:

R_m – Valor medio de las resistencias.

δ – Coeficiente de dispersión.

λ – Coeficiente que depende de la probabilidad deseada y el número de muestras utilizadas para el ensayo.

Los valores de λ dependen del material y del número de ensayos realizados, los cuales, se pueden obtener de la tabla 1 y 2, para el hormigón y el acero respectivamente.

Tabla 1. Valor del coeficiente λ para el hormigón según número de ensayos.

Nº de ensayos	6	7	8	9	10	15	20	25	30
λ	1.13	1.11	1.10	1.09	1.08	1.07	1.06	1.05	1.00

Fuente: López, 1978.

Tabla 2. Valor del coeficiente λ para el acero según número de ensayos.

Nº de ensayos menos 1	9	10	15	20	25	30
λ	1.83	1.81	1.75	1.72	1.71	1.64

Fuente: López, 1978.

Para las solicitaciones se aplica el coeficiente de mayoración, cuyo fin es según López, 1978:

- a) Tener en cuenta las variaciones que puedan tener las acciones y que se traduzcan en condiciones más desfavorables para la estructura.
- b) Cubrir algunos de los factores que se dificultan de ser analizados estadísticamente, como calidad, control de la obra, coincidencia entre el cálculo y la realidad, importancia que pueda tener el fallo de la estructura o de algunos de sus elementos.

El coeficiente de mayoración (γ_s) queda representado por:

$$\gamma_s = \gamma_{s1} \cdot \gamma_{s2} \quad (8)$$

Donde los factores γ_{s1} y γ_{s2} responden a los criterios de a y b , respectivamente.

Seguridad estructural en el método de Momento Límite

En este método es muy similar al método anterior, utiliza además de los valores característicos de cargas y resistencias de materiales, coeficientes de carga y mayoración y coeficientes de minoración de la resistencia.

Al igual que el método anterior, este mantiene la probabilidad de obtener valores inferiores a los característicos en un 5 y 16 % para acero y hormigón respectivamente, al igual que mantiene los valores del coeficiente λ según número de ensayos.

En el caso de las resistencias de cálculo minoradas, según Medina y Ruiz, 1991:

Acero:

La ecuación del cálculo de la resistencia e cálculo para el acero, coincide con la ecuación 6; y para el valor del coeficiente de minoración, según Medina y Ruiz, 1991, se establecen los siguientes valores para los estados límites últimos:

$\gamma_a = 1.15$ para valores mínimos garantizados de resistencia de acero.

$\gamma_a = 1.20$ para valores característicos de resistencia de acero.

En el estado límite de utilización:

$\gamma_a = 1.00$ para valores característicos de resistencia de acero.

Hormigón:

Este caso coincide con el descrito para el método de momento tope.

Seguridad estructural en el método unificado de la ACI.

La norma ACI 318 2005, según Rodríguez y Blanco, 2013, tiene en cuenta diferentes aspectos para la seguridad estructural, dentro de estos se encuentran:

- Valores característicos de las resistencias.
- Los valores característicos de las acciones.
- Factorización de las solicitaciones.
- Factor de reducción de resistencia (strength reduction factor) (FRR)

Valores característicos de las resistencias

Admitiendo que la distribución de frecuencias de la resistencia a compresión del hormigón sigue una ley normal (tipo Gauss), el valor característico de la resistencia se rige por la expresión:

$$f'_c = f'_{cr} - t \cdot s \quad (10)$$

Donde:

- f'_c - Resistencia característica del hormigón
- f'_{cr} - Resistencia media de rotura a compresión del hormigón
- t - Factor de modificación de la desviación estándar de la muestra
- s - Desviación estándar

La desviación (s) se puede calcular según la ecuación 11, siempre que la planta de elaboración del hormigón cuente con un registro adecuado de 30 ensayos consecutivos, con materiales y condiciones similares a las esperadas (ACI 318, 2005).

$$s = \left[\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)} \right]^{1/2} \quad (11)$$

Donde:

- s - Desviación estándar
- x_i - Ensayo individual de resistencia
- n - Número de ensayos
- \bar{x} - Promedio de n resultados de ensayos

Cuando se dispone de menos de 30 ensayos, pero con un mínimo de 15, la desviación estándar de la muestra calculada se incrementa por el Factor de modificación de la desviación estándar de la muestra (t) según la tabla 3. Este procedimiento da como resultado una resistencia promedio requerida más conservadora (mayor). Los factores de la Tabla 3 están basados en la distribución de muestreo de la desviación estándar de la muestra y proporcionan una protección (equivalente a la del registro de 30 ensayos) contra la posibilidad de que la muestra reducida subestime la verdadera desviación estándar de la población (ACI 318, 2005).

Tabla 3. Factor de modificación de la desviación estándar de la muestra (t).

Nº de ensayos	Factor de modificación de la desviación estándar de la muestra
15	1.16
20	1.08
25	1.03

≥ 30	1.00
-----------	------

Fuente: ACI 318, 2005.

Algunos autores, según Hernández y Hernández, 2010, emplean el coeficiente de variación (δ), que representa la desviación estándar de la muestra expresada como porcentaje de la resistencia promedio, y que se expresa de la manera siguiente:

$$f'_c = f'_{cr} (1 - t \cdot \delta) \quad (12)$$

Donde coeficiente de variación (δ) se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\delta = \frac{s}{f'_{cr}} = \frac{1}{f'_{cr}} \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{i=n} (f'_{ci} - f'_{cr})^2}{n-1}} \quad (13)$$

Factor de reducción de resistencia. Generalidades.

La resistencia de diseño proporcionada por un elemento, sus conexiones con otros elementos, así como por sus secciones transversales, en términos de flexión, carga axial, cortante y torsión, deben tomarse como la resistencia nominal multiplicada por los factores ϕ . (ACI 318, 2005)

Por lo tanto, para el diseño o revisión de los elementos solicitados a flexión (vigas y losas), la resistencia nominal de la sección transversal (M_n) se debe reducir aplicando el factor de resistencia ϕ a fin de obtener la resistencia de diseño (ϕM_n) de la sección,

$$M_u \geq \phi M_n \quad (14)$$

Los propósitos del factor de reducción de resistencia ϕ según ACI 318, 2005, son:

- 1) Tomar en consideración la probabilidad de presencia de elementos con una menor resistencia, debida a variación en la resistencia de los materiales y en las dimensiones.
- 2) Tomar en consideración las inexactitudes de las ecuaciones de diseño.
- 3) Reflejar el grado de ductilidad y confiabilidad requerida para el elemento bajo los efectos de la carga sometida a consideración.
- 4) Reflejar la importancia del elemento en la estructura.

El valor del coeficiente reductor (ϕ) varía; en la zona de compresión controlada tiene un valor fijo de 0.65 o 0.75 (en dependencia del refuerzo transversal utilizado), en la zona de transición varía hasta llegar a la tracción controlada con un valor de 0.9.

Esta variación se puede observar en la siguiente figura:

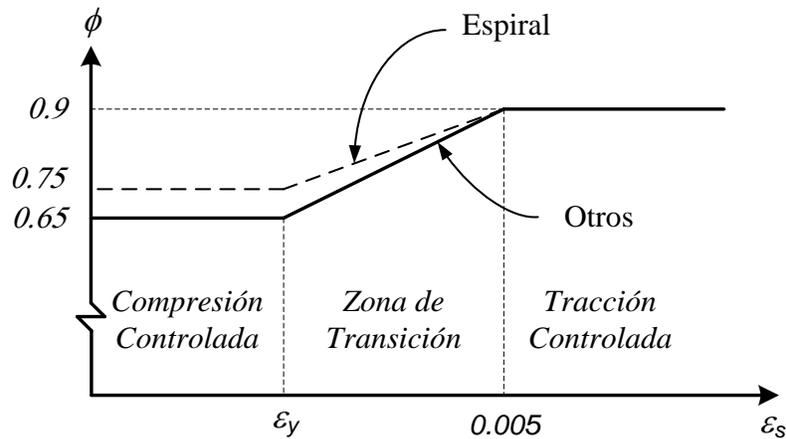


Figura 1 Variación de ϕ con respecto a la deformación unitaria neta del acero en tracción

Fuente: Rodríguez y Blanco, 2013.

Conclusiones

Como se ha expresado, en el proceso de diseño intervienen varias variables, de las cuales no se conoce con exactitud sus valores, alguno de estas son los valores de resistencia de los materiales, los valores reales de las cargas, las características reales de las estructuras y las simplificaciones derivadas de su análisis. A razón de estas y otras invariantes surgen los diferentes criterios de la seguridad estructural.

Con el paso del tiempo y en dependencia también de la región, estos criterios se han ido modificando; en los dos primeros métodos analizados la seguridad se adopta de forma similar coincidiendo prácticamente en todo, análisis de cargas, tratamiento estadístico y mayoración, tratamiento de la resistencia de los materiales, cálculo de los valores característicos y la minoración de los mismos, y finalmente el tratamiento de las solicitaciones, las cuales son afectadas por un coeficiente, llamado de mayoración.

No ocurriendo de igual forma en el diseño según la ACI 318, en este se trata también las cargas y resistencias características pero si bien bajo conceptos similares, lo hace de forma diferente.

Esta normativa no contempla una reducción de la resistencia de cálculo de los materiales; utiliza, sin embargo, un coeficiente reductor, con función similar al coeficiente de mayoración, este último con el fin de mayorar la solicitación actuante y el primero con el de disminuir la resistencia, un mismo fin pero enfocado de forma diferente. Este método unificado de la ACI lo podemos catalogar como menos conservador.

Bibliografía.

- Acevedo, J.; Martínez, E.; Díaz, E.; Amat, E., 1985. *Materia les de Construcción*. La Habana (Cuba).
- American Concrete Institute, 2005. *Building Code Requirements for Reinforced Concrete. ACI 318 2005*. MICHIGAN: American concrete Institute (USA).
- Díaz, J. R., 2012. *Estudio comparativo de los resultados obtenidos en el diseño de la flexión simple y recta*. Tesis en opción al título de Ingeniero Civil. Universidad de Matanzas, Matanzas (Cuba).
- Hernández, J. J.; Hernández, J. A., 2010. *Hormigón Estructural. Diseño por estados límites. (Parte 1)*, (Cuba).
- Jiménez Montoya, P.; García Meseguer, A.; Morán Cabré, F. 2001. *Hormigón Armado 14a Edición*. Gustavo Gili. ISBN: 84-252-1825-X. Barcelona (España).
- Lima, E. L.; Hernández, V.; Bissio, J. F., s.f. *Hormigón armado: Notas sobre su evolución y la de su teoría*, consultado: octubre 28 de 2013, disponible en: <http://www.ing.unlp.edu.ar/construcciones/hormigon/ejercicios/Sem-ha-1.pdf>.
- López Agüero, R. (Comp). (1978). *Elementos de Estructuras de Hormigón Armado*. Ciudad de la Habana: Ed. Pueblo y Educación. Tomo I
- Medina Torri, F.; Ruiz Alejo, L. 1991. *Hormigón Estructural*. Editorial Pueblo y Educación, Vol. I. La Habana (Cuba).
- Rodríguez García, C.; Blanco Heredia, R., 2013. Influencia del factor de reducción de la resistencia en el diseño de columnas mediante Diagramas de Interacción, *Avanzada Científica*, 16 (2).