

# Enfoque probabilístico del diseño estructural por estados límites

## Structural design probabilistic's approach for limit states

Óscar Javier Gutiérrez Junco\*

### RESUMEN

Se suele pensar que como resultado de diseñar estructuras siguiendo metodologías implantadas por códigos o normas estandarizadas se obtendrán finalmente construcciones sismorresistentes o antisísmicas exentas de cualquier problema estructural; sin embargo, el problema tiene un componente de incertidumbre que dificulta llegar a tal fin, e inclusive lo hace imposible. Se debe estar consciente de que no todas las suposiciones que hace el calculista coinciden siempre con la realidad; además, existe una compleja interacción de múltiples factores que junto con la utilización de metodologías de diseño insuficientes determinan un nivel de riesgo muchas veces inapropiado para los intereses de las personas que tienen que ver con la construcción.

Se espera dar una visión apropiada al lector del artículo sobre la importancia de investigar la incertidumbre y dispersión de las variables aleatorias que afectan el diseño, y, en general, sobre las ventajas de inmiscuir y aplicar conceptos probabilísticos en la ingeniería estructural.

Por último, se presentan unas reflexiones y conclusiones que destacan la tendencia del diseño estructural moderno.

**Palabras clave:** Diseño estructural, Estados límites, Incertidumbre estructural, Confiabilidad estructural.

### ABSTRACT

It is usually thought that as result of designing structures following methodologies implanted by codes or standardized norms, it will come out seismic resistant or antiseismic constructions without any structural problem; nevertheless the problem has an uncertainty component that makes it difficult to be fulfilled and even turns it impossible. One should be conscious that all suppositions that the engineer assumes not always agree with the reality; in addition there are a complex interaction of multiple factors, that along with the use of insufficient design methodologies, determine a level of risk often unsuitable for the interests of the people who has to do with the construction.

With the article is it hoped to shed an appropriate vision to the reader, on the importance of dispersion and uncertainty research of the aleatory variables that affect the design, and in general on the advantages to involve and to apply probabilistic concepts in structural engineering.

Finally there are reflections and conclusions included, in order to emphasize the modern structural design tendency.

**Key words:** Structural design, States limits, Structural uncertainty, Structural trustworthiness.

\* Ing. Civil, Especialista en Estructuras, Magíster en Ingeniería Civil. Docente Escuela de Ingeniería Civil – UPTC.

## Introducción

Para llegar al primer código de diseño estructural que utilizara conceptos del método de diseño por estados límites, en 1974, tuvieron que pasar más de 50 años de evolución de la teoría de la confiabilidad estructural; a partir de ese momento los códigos de diseño estructural fueron redireccionando su filosofía, dejando atrás métodos tradicionales plenamente determinísticos, reconociendo la importancia de tener en cuenta la variabilidad de los parámetros que intervienen en los diseños y ganando cada vez más carácter probabilístico. Si bien es cierto que no se ha escrito la última palabra en lo referente a la tendencia del diseño en el futuro, el *diseño por estados límites* es el considerado hoy por los códigos, teniendo en cuenta la probabilidad y los estudios estadísticos como aspectos fundamentales en el desarrollo de estructuras más confiables a través del empleo de factores de carga y de reducción de resistencia.

### 1. Método de diseño por estados límites

El diseño por estados límites es la metodología mediante la cual se busca reducir la probabilidad de falla de una estructura a valores aceptables, teniendo en cuenta las numerosas incertidumbres y tomando como referencia unos estados límites, definidos como aquellos sobre los cuales la estructura deja de cumplir su función o la razón para la que fue proyectada [1]. Los principales estados límites son: límites últimos y límites de funcionalidad.

**Límites últimos.** Se basan en la seguridad y capacidad de carga última de la estructura y comprenden aspectos como resistencia a la fluencia, a la fractura, al pandeo y al volcamiento, pérdida de equilibrio, plastificación, deformaciones excesivas y mecanismos de falla, entre otros.

**Límites de funcionalidad.** Abarcan límites de comportamiento de la estructura asociados a su uso y ocupación; esto implica sucesos que pueden ocurrir bajo cargas de servicio como fatiga, deflexiones, deslizamientos, vibraciones, agrietamientos, deformaciones, hundimientos, corrosión, desgaste, incendios, etc.

La ecuación básica que define este método de diseño utiliza coeficientes de carga y resistencia y se puede expresar como:

$$\phi R_n \geq \sum \gamma_k Q_k \quad (1)$$

en esta expresión se representa el objetivo de la metodología, que es encontrar una estructura que tenga una resistencia mayor o igual al efecto de las cargas que actúan sobre ella.

Los términos de la ecuación se describen a continuación:

$\Sigma$ : Sumatoria para los diferentes tipos de carga.

$\phi$ : Coeficiente de reducción de capacidad o factor de resistencia. Es un valor menor que 1 y depende de la variabilidad en los materiales, propiedades, dimensiones, fabricación, incertidumbre en fórmulas, teorías, variabilidad entre lo que se piensa del modelo matemático y la estructura real.

$K$ : Tipo de carga.

$R_n$ : Resistencia nominal. Es la resistencia real del elemento estructural con base en sus propiedades y dimensiones nominales. Es calculada mediante una fórmula (según el código).

$\gamma_k$ : Factor de carga. Es un coeficiente de mayoración que tiene en cuenta las incertidumbres en el cálculo de las cargas (solicitaciones), tanto en su magnitud como en la posición de aplicación; además, la probabilidad de ocurrencia.

cia de estas cargas. El subíndice K se debe a que pueden ser varias clases de carga con diferentes características (muerta, viva, viento, sismo, etc.), cada una con diferente probabilidad y análisis estadístico. En general tiene en cuenta las incertidumbres debidas a las cargas.  $\gamma_K$  afecta cada tipo de carga  $Q_k$ .

$Q_k$ : Son las cargas que se tienen en cuenta en el diseño (D, L, W, etc.). Generalmente se toman los datos mínimos que se encuentran en los códigos o normas, o se hace un estudio específico para algún caso.

$\phi R_n$ : Resistencia de diseño.

$\sum \gamma_K Q_k$ : Resistencia requerida.

El proceso general de diseño consiste en dimensionar teniendo como referencia el estado límite más crítico y revisar después que no se alcancen el resto de estados límites [4].

## 2. Enfoque probabilístico

Considerando las cargas y resistencias de un elemento estructural de manera estadística, se puede suponer que sus distribuciones probabilísticas (funciones de densidad de

probabilidad) tienen forma de curva tipo campana, con un valor medio ( $R_m$  o  $Q_m$ ) y unas ciertas desviaciones estándar.

Sobrepasar un estado límite es hacer que ocurra que la sollicitación sea mayor que la resistencia, o sea  $Q > R$ . Dado que las variables, como máximo, solo se pueden determinar con cierto grado de aproximación debido a las incertidumbres inevitables del proceso en cuestión, esta última afirmación siempre será posible [2].

En la figura 1 se representan estas distribuciones para dos situaciones diferentes.

Un método determinístico definiría el mismo factor de seguridad en los dos casos mostrados en el gráfico (utilizando los valores medios), lo cual no es cierto, puesto que tanto las magnitudes de las resistencias como de las cargas son inciertas, y a la hora de utilizar un método determinístico las cantidades deberían tener un valor único bien definido.

En este caso la seguridad estructural es definida de manera más adecuada como una probabilidad pequeña de que  $Q$  exceda a  $R$ . La idea es mantener esta probabilidad tan baja y consistente como sea posible.

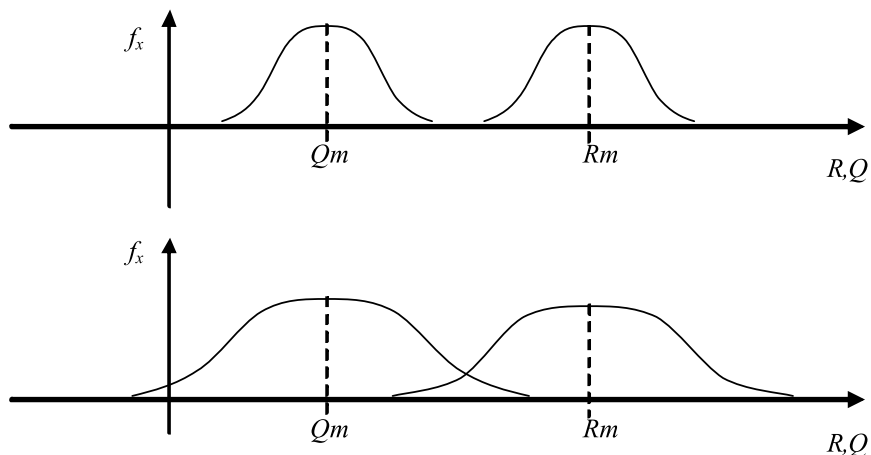


Fig. 1. Distribuciones de probabilidad de cargas y resistencias.

Con el objetivo de considerar esta situación de manera adecuada, en Estados Unidos, el ACI, el AISC y otras entidades escogieron el Modelo probabilístico de Cornell (1967), para tener en cuenta que la seguridad estructural es función de  $R$  (resistencia de la estructura) y de  $Q$  (efecto de las solicitaciones o cargas), y que estas dos variables tiene un comportamiento aleatorio.

Este modelo considera un análisis probabilístico de segundo momento (FORM/SORM), o sea, un procedimiento que emplea dos parámetros estadísticos para representar la aleatoriedad de las variables: los valores medios y los coeficientes de variación. Utiliza también el factor denominado 'índice de confiabilidad  $\beta$ ' (llamado antiguamente 'índice de seguridad'), que es el parámetro más importante existente en la actualidad para medir qué tan confiable es una estructura.

El 'margen de seguridad' se define como  $Z=R-Q$ . Debido a que  $R$  y  $Q$  son variables aleatorias, el margen de seguridad  $Z$  también es una variable aleatoria. Se considera que la estructura es adecuada cuando  $Z>0$ .

En la figura 2 se presenta un esquema de la función de densidad de probabilidad de  $Z$  para un elemento estructural.

Aunque la forma precisa de la función de densidad probabilística para  $R$  y para  $Q$ , y, por lo tanto, para  $Z=R-Q$ , no se conoce, este concepto puede utilizarse como una metodología racional para estimar la seguridad estructural.

Con base en esta figura, la probabilidad de falla del elemento es la probabilidad de que  $Z$  sea menor a cero, o sea:

$$P_f = P[(R-Q) < 0] \quad (2)$$

Dicha situación se representa con la parte sombreada de la figura. Entre menor sea la parte sombreada, más confiable será la estructura [7].

La figura 3 muestra una representación equivalente de la probabilidad de falla; en esta, por conveniencia, se grafica la función de densidad de probabilidad de  $\ln(R/Q)$ .

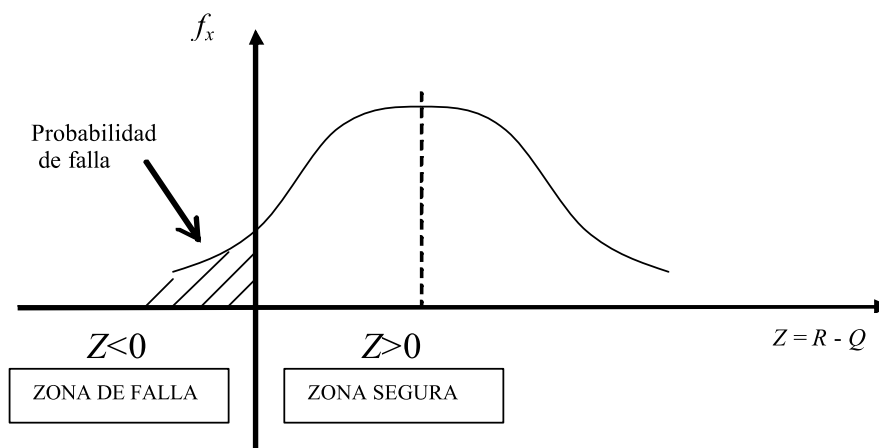


Fig. 2. Zona de falla y zona segura de un elemento estructural.

Para esta situación, la medida equivalente de probabilidad de falla es:

$$P_f = P\left[\left(\frac{R}{Q}\right) < 1\right] \quad (3)$$

o en términos de logaritmos:

$$P_f = P\left[\ln \frac{R}{Q} < 0\right] \quad (4)$$

Debe recordarse que el logaritmo de 1 es cero y, entonces, si el logaritmo de R/Q es menor que cero, el estado límite se habrá excedido.

La ecuación (4) es la utilizada en el desarrollo de criterios del LRFD [6].

Considerando la siguiente definición de la variable U,

$$U = \frac{\ln \frac{R}{Q} - \left[\ln \frac{R}{Q}\right]_m}{\sigma_{\ln\left(\frac{R}{Q}\right)}} \quad (5)$$

en donde  $\left[\ln \frac{R}{Q}\right]_m$  y  $\sigma_{\ln\left(\frac{R}{Q}\right)}$  son la media

y la desviación estándar del logaritmo natural de (R/Q), se puede deducir que

$$P_f = P\left[\ln \frac{R}{Q} < 0\right] =$$

$$P_f = P\left[U < \frac{\left[\ln \frac{R}{Q}\right]_m}{\sigma_{\ln\left(\frac{R}{Q}\right)}}\right] = \Phi\left[\frac{\ln(1) - \left[\ln \frac{R}{Q}\right]_m}{\sigma_{\ln\left(\frac{R}{Q}\right)}}\right] = \Phi\left[-\frac{\left[\ln \frac{R}{Q}\right]_m}{\sigma_{\ln\left(\frac{R}{Q}\right)}}\right] = \Phi[-\beta] \quad (6)$$

donde  $\Phi$  (También llamada  $F_u$ ) es la función de distribución de probabilidad acumulada para la normal estándar.

De esta ecuación se encuentra que:

$$\beta = \frac{\left[\ln \frac{R}{Q}\right]_m}{\sigma_{\ln\left(\frac{R}{Q}\right)}} \quad (7)$$

donde  $\beta$ , como se dijo antes, es el índice de confiabilidad.

El índice de confiabilidad es el valor con el cual se multiplica la desviación estándar de  $\ln(R/Q)$  para definir la localización de la media o valor medio de  $\ln(R/Q)$  a partir del eje de las ordenadas. Es una medida de la confiabilidad del diseño, ya que entre mayor sea el número de desviaciones estándar entre el valor medio y el área sombreada, mayor será la confiabilidad.

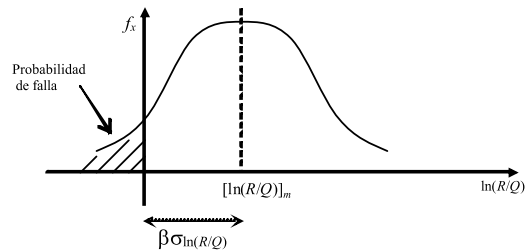


Fig. 3. Definición del índice de confiabilidad.

Estableciendo el índice de confiabilidad  $\beta$  como un valor determinado, los códigos de diseño pueden calibrarse teniendo como referencia diseños sustentados a través de criterio, adaptación, optimización o por una combinación de estos. Al mantener un valor constante de  $\beta$  en un diseño, se está fijando una confiabilidad constante para todos los elementos estructurales similares; de esta manera se obtiene una medida invariante de la seguridad [8].

Con la teoría de primer orden,  $\beta$  (ec. 7) se puede escribir simplificada como:

$$\beta = \frac{\ln \frac{R_m}{Q_m}}{\sqrt{V_R^2 + V_Q^2}} \quad (8)$$

donde  $R_m$  y  $Q_m$  son los valores medios de la resistencia y del efecto de las cargas, y  $V_R$  y  $V_Q$  son los coeficientes de variación correspondientes.

Debido a la definición de  $\beta$  se puede considerar que no hay falla cuando

$$\ln \frac{R_m}{Q_m} > \beta \sqrt{V_R^2 + V_Q^2} \quad (9)$$

y despejando  $R_m$ , utilizando las propiedades de los logaritmos, esto equivale a:

$$R_m \geq e^{\left(\beta \sqrt{V_R^2 + V_Q^2}\right)} Q_m \quad (10)$$

se llega a la definición de un factor de seguridad central  $\theta$ :

$$\theta = e^{\left(\beta \sqrt{V_R^2 + V_Q^2}\right)} \quad (11)$$

y con esta definición, el criterio para un diseño probabilístico de primer orden, dado por la ecuación 10, se puede expresar como:

$$R_m \geq \theta Q_m \quad (12)$$

$\theta$  corresponde a una medida de la tendencia central del factor de seguridad y tiene en cuenta las incertidumbres correspondientes al carácter aleatorio del efecto de las cargas y de la resistencia.

Fijando un valor de  $\beta$ , el factor de seguridad central hallado se puede descomponer para que tenga en cuenta de manera independiente las incertidumbres tanto de las cargas como de la resistencia. A su vez, los coeficientes de carga y de resistencia hallados de esta forma se pueden descomponer para tener en cuenta de manera independiente los diferentes tipos de carga y de elementos estructurales.

Como se aprecia en la descripción de los términos de la ecuación básica de la metodología del diseño por estados límites (ver punto 2), la resistencia real de la estructura depende de diferentes factores aleatorios; teniendo en cuenta esto, la resistencia verdadera se puede expresar como:

$$R = M F P R_n \quad (13)$$

en donde M, F y P son variables aleatorias que se consideran independientes y que representan las diferencias entre la resistencia verdadera y la nominal; M tiene en cuenta las debidas al material, como su rigidez y resistencia; F, las incertidumbres de la fabricación, o sea, las diferencias entre el elemento idealmente diseñado y el elemento que queda en la estructura después de la construcción, y P, las asociadas a las hipótesis de cálculo y modelos de diseño; esta última variable se conoce como 'Factor profesional'.

De manera aproximada, el coeficiente de variación de la resistencia,  $V_R$ , se puede calcular como:

$$V_R \approx \sqrt{V_M^2 + V_F^2 + V_P^2} \quad (14)$$

en donde  $V_M$ ,  $V_F$  y  $V_P$  son los coeficientes de variación de M, F y P, que entran en la determinación del factor de reducción de resistencia,  $f$ , mediante la ecuación:

$$\phi = \frac{R_m}{R_n} e^{(-\alpha \beta V_R)} = \gamma_R e^{-\beta \alpha V_R} \quad (15)$$

en donde  $\alpha$ . es un coeficiente de linealidad, que es una corrección de las variabilidades de la resistencia y la sollicitación (función de separación),  $\beta$  es el índice de confiabilidad y el parámetro  $\gamma_R$  es el cociente entre la resistencia media y la resistencia de diseño.

Al igual que con la resistencia, en los términos de la ecuación básica de la metodología del diseño por estados límites (ver punto 2) se percibe que el efecto de las cargas también depende de diferentes factores aleatorios [5].

Es necesario considerar en el diseño todas las posibles combinaciones de cargas y sus magnitudes. Al reconocer las diferencias en la variabilidad entre las cargas, es razonable introducir coeficientes diferentes de carga para tipos diversos de cargas.

Es posible demostrar que los factores de carga se pueden calcular de manera aproximada, como se muestra a continuación:

$$\gamma_D = \frac{D_m}{D} e^{(\alpha^2 \beta V_D)} \quad (16)$$

$$\gamma_L = \frac{L_m}{L} e^{(\alpha^2 \beta V_L)}$$

o en general  $\gamma_i = \lambda_i e^{\beta \alpha^2 V_i}$ ,

donde  $\lambda_i$  es el cociente entre el valor medio de la carga  $i$  y el utilizado en el diseño.

Nuevamente  $\alpha$  es un coeficiente de linealidad y  $V_D$  y  $V_L$  corresponden a los coeficientes de variación para la carga muerta y la carga viva, respectivamente, los cuales se calculan de la siguiente forma:

$$V_D = \sqrt{V_{SD}^2 + V_{AD}^2} \quad (17)$$

$$V_L = \sqrt{V_{SL}^2 + V_{AL}^2}$$

donde S hace referencia a la carga sostenida y A a las diferencias entre la estructura tridimensional real y el modelo matemático simplificado que se utiliza en el análisis.

### 3. Otros métodos de diseño

El reconocimiento de la variabilidad de los factores que intervienen en el diseño de las estructuras determina el enfoque probabilístico con que se ha planteado el diseño estructural moderno; la introducción de este enfoque coincidió con la adopción del concepto de estados límites y ha ido relegando las tradicionales formas de diseño; algunas de estas han adoptado conceptos probabilísticos, pero inicialmente fueron establecidas sobre bases completamente determinísticas.

Vale la pena aclarar que actualmente los llamados diseño plástico, diseño a resistencia última y diseño con factores de carga y resistencia son aplicaciones o casos especiales del método general llamado diseño a estados límite.

#### 3.1 Diseño para esfuerzos de trabajo

También es llamado diseño elástico y pretende garantizar que en cualquier punto de la estructura los máximos esfuerzos ocasionados por cargas de trabajo (aquellas que si han sido escogidas adecuadamente rara vez serán superadas durante la vida útil) no exceden los esfuerzos admisibles establecidos para ese material. En este método se analiza la estructura bajo cargas de servicio suponiéndola elástica y se garantiza una resistencia adecuada.

Los 'esfuerzos admisibles' se obtienen dividiendo los esfuerzos de falla del material por 'factores de seguridad', escogidos más o menos arbitrariamente.

El método supone que todos los tipos de carga tienen la misma variabilidad. El esfuerzo admisible se obtiene de la capacidad de la estructura al ser sobrecargada.

El diseño elástico es considerado actualmente aceptable solo si no se cuenta con otra interpre-

tación más adecuada del comportamiento estructural.

### 3.2 Diseño a la resistencia última

Este método, concebido de manera determinística, considera como referencia el estado límite de falla y fija una relación entre la carga última y la de trabajo. El factor de seguridad es aplicado a las cargas, de manera que no se tiene en cuenta sus variabilidades. Estos factores de carga tampoco tienen en cuenta los riesgos de una posible falla, de tal manera que no se puede hacer distinción entre los diferentes tipos de comportamiento de los materiales constitutivos.

El método tiene la posibilidad de considerar la respuesta de la sección transversal completa de los elementos y no simplemente un esfuerzo local, lo cual lo hace más acorde con la realidad que el método elástico.

Tiene el problema de que se limita al análisis del comportamiento último de la estructura, o sea, ante cargas últimas, y no tiene en cuenta el funcionamiento de esta ante cargas de servicio, lo que también puede ser crítico.

A este método también se le conoce como método de la resistencia y actualmente es una aplicación del diseño a estados límites, habiéndosele introducido conceptos probabilísticos, y constituye el método de diseño de concreto por excelencia.

### 3.3 Diseño plástico

El diseño plástico para estructuras metálicas plantea que el estado límite de resistencia se alcanza al llegar al momento plástico ( $M_p$ ) de los elementos, es decir, cuando todas las fibras de la sección transversal llegan a  $F_y$ . En este método no se consideran otros estados límite como inestabilidad, fatiga o fracturas frágiles. Además, el análisis plástico reconoce que la capacidad de carga de una viga no se consume

necesariamente cuando se llega al momento  $M_p$  en algún lugar de la viga; en lugar de ello, los momentos flectores son capaces de redistribuirse a otras partes menos esforzadas de la viga.

### 3.4 Diseño con factores de carga y resistencia

Es el método utilizado actualmente en el diseño de estructuras de acero, siguiendo la filosofía del diseño por estados límite. Se basa en un modelo probabilístico de las cargas y la seguridad estructural.

## 4. Sumario de ventajas y desventajas del método de los estados límites

#### Ventajas:

- Tiene en cuenta probabilidades, con lo cual emplea una herramienta que considera las incertidumbres debidas a los factores que intervienen en un diseño estructural.
- Detrás de este método existe mucho estudio estadístico, que hace que sus resultados sean más parecidos a los reales que los de otros métodos. Cuando no se tienen esos estudios estadísticos, se tienen en cuenta los datos dados por la experiencia y el buen juicio.
- El diseño se realiza para estados últimos, pero de todas formas se revisa y, por lo tanto, se analiza para condiciones de funcionamiento.
- Tiene en cuenta que todas las cargas no tienen las mismas probabilidades de ocurrencia.
- Es posible acondicionarlo a las condiciones de un lugar determinado (por ejemplo, Colombia), de tal manera que se pueden modificar los índices de confiabilidad sin que se cambie la filosofía general del diseño. Sin embargo, esto necesita de mucho trabajo y de medios económicos.



- Tiene en cuenta variabilidad en la calidad de los materiales, en la fabricación y en la metodología empleada (incertidumbres entre el modelo matemático y el real).
- Tiene en cuenta la plastificación de toda la sección y no solo de una de sus fibras. Por lo tanto, refleja mejor y más exactamente el comportamiento de los materiales.
- Permite tener un valor de la confiabilidad del diseño ( $\beta$ ).
- El valor del índice de confiabilidad puede ser variado para tener en cuenta las diferentes estructuras según su importancia.
- Tiene toda una base probabilística y estadística.
- Al ser un método con fundamentos más racionales, permite al ingeniero entender y controlar de mejor manera el comportamiento de las estructuras, lo cual lleva a diseños más económicos y a estructuras más confiables.
- Tiene más sentido y coherencia su utilización en el diseño sísmico.
- El proyectista se hace más conciente de la variabilidad de las cargas y les da un peso diferente, dado su nivel de determinación.
- Su filosofía facilita incorporar los avances que se logren en el campo del diseño estructural y permite encontrar niveles de optimización.

#### **Desventajas:**

- No tiene en cuenta el factor de incertidumbre debido al error humano.
- Más complicado.
- No hay modo de calibrar materiales o sistemas nuevos.
- Incierto, si no hay estudios estadísticos.

- Subjetivo al estimar probabilidades aceptables.
- Necesita inversión económica para investigar la incertidumbre y dispersión de las variables aleatorias que entran en el diseño.

## **5. Conclusiones y reflexiones finales**

Como se vio en el transcurso del artículo, el *enfoque probabilístico del diseño estructural por estados límites* ofrece grandes ventajas frente a metodologías determinísticas, en las cuales el factor de seguridad empleado no considera de la mejor manera aspectos como la importancia y probabilidad de presentación de las diferentes sollicitaciones y la incertidumbre de los aspectos técnicos que intervienen en un diseño, al igual que la presente en el control de calidad de los materiales, en la construcción y en el funcionamiento de la estructura diseñada.

Definitivamente, la variabilidad de todos estos aspectos determina de manera muy importante lo que podemos considerar como el margen de seguridad en un diseño estructural y, por lo tanto, en una construcción realizada.

La dispersión de las variables aleatorias no permite definir simplemente un factor de seguridad que suponga valores admisibles. En cambio, es más congruente pensar en valores aceptables de probabilidad. El nivel de aceptación debería tener en cuenta aspectos que diferencien los lugares y los momentos de aplicación del diseño, considerando situaciones particulares relacionadas, por ejemplo, con la expectativa de vida, las condiciones sociales y culturales, el grado de adelanto tecnológico y la capacidad económica; no obstante reflejar esto en una normativa, exige un enorme trabajo multidisciplinario.

Es de aclarar que de la manera como hoy está planteado el *método de diseño por estados límites* en las diferentes normativas a escala

mundial, no constituye un método completamente probabilístico, ya que, aunque hace un análisis de confiabilidad, no lo hace de forma detallada, y aunque se encuentran unos factores de carga y de resistencia, no se tiene en cuenta un análisis del comportamiento global para el diseño completo de la estructura. De acuerdo con esto y con que el modo de empleo de dichos factores, se hace prácticamente de manera determinística; estrictamente hablando, dicho análisis es semiprobabilístico. También es claro que en el estado actual de conocimiento, de investigación y de acumulación de información, un método que intente ser completamente probabilístico puede resultar inmanejable, insostenible y fácilmente inconsistente, ya que con demasiados factores se pierde el control sobre el problema, por lo que resulta de mayor utilidad en el momento un análisis aproximado, como el que se viene haciendo.

Por último, es obvio que la última palabra en el diseño de estructuras todavía no se ha dicho, y faltará mucho tiempo para que se llegue a una teoría que concentre todas las expectativas al respecto. Si bien es cierto que el *método por estados límites* abrió un nuevo panorama para la ingeniería estructural, los últimos adelantos muestran que temas como la optimización de costos, la reducción de la variabilidad de los parámetros de diseño, la inclusión del factor error humano, la creación de nuevas y mejores técnicas para el manejo de incertidumbres relacionadas con variables aleatorias y su correlación, la libre modificación de los factores parciales –impuestos por los códigos de acuerdo con necesidades particulares o personales, manteniendo niveles de seguridad adecuados [3]– y, en general, aspectos

relacionados con la confiabilidad desempeñarán un papel fundamental en los futuros códigos de diseño.

## 6. Referencias

- [1] Apuntes de clase de la materia Mecánica Estructural Avanzada, dictada por el Ing. Jairo Uribe Escamilla. Universidad Nacional, 1999.
- [2] Apuntes de clase de la materia Confiabilidad Estructural, dictada por el Ing. Mauricio Sánchez Silva. Universidad de los Andes, 2002.
- [3] J. Espinosa, M. Sánchez: «Revisión de los criterios de confiabilidad del código de diseño estructural como alternativa para la competitividad». *Revista de Ingeniería* 13: 31-36. Bogotá: Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería, mayo de 2001.
- [4] NSR-98. Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente.
- [5] R. Rackwitz: «Reliability analysis – a review and some perspectives». *Structural Safety* 23(4): 365-395, 2001.
- [6] R. Tide: «Derivation of the LRFD Column Design Equations». *Engineering Journal* 38(3): 137-139. American Institute of Steel Construction. Inc. Tirad Quarter. 2001.
- [7] G. Valencia: *Estructuras de acero, Diseño con factores de carga y resistencia*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 1997.
- [8] Y. Wen: «Reliability and performance – based design»: *Structural Safety* 23(4): 407-428, 2001.

Fecha de recepción: 9 de septiembre de 2005

Fecha de aprobación: 2 de diciembre de 2005