

LOS MÉTODOS PROBABILISTAS DE SEGURIDAD ESTRUCTURAL EN EL CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN

Luis Celorrio Barragué

Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de La Rioja

PROBABILISTIC METHODS OF STRUCTURAL SAFETY IN THE SPANISH TECHNICAL CODE OF BUILDING.

Abstract

The Annex C of the Basic Document SE Structural Safety in the Spanish Technical Code of Building (CTE) is the main reference within the Spanish standards about the explicit probabilistic methods, also named Structural Reliability methods. However, this Annex is only an informative annex and is not mandatory.

The CTE considers the following applications of the Structural Reliability methods: the first is calibration of safety partial factors to use in design equations for a type of structures. This subject is briefly described in this paper. The second application is the design of new structures where uncertain variables are considered explicitly by means of probability distributions. The third application is structural assessment of existing buildings. The Annex D of the DB-SE in CTE is about the last application.

This paper looks at code calibration process, considering two open problems: determination of a target reliability index for structures in the span of the code and calibration of safety partial factors when the objective is to search a target reliability index.

Keywords: *Structural Reliability; Spanish Building Technical Code; Safety Partial Factors; Code Calibration.*

Resumen

El Anejo C del Documento Básico de Seguridad Estructural (DB-SE) del Código Técnico de la Edificación (CTE) es la principal referencia normativa existente en España sobre los métodos probabilistas explícitos, más conocidos como métodos de Fiabilidad Estructural. Sin embargo, este Anejo tiene simplemente carácter informativo.

Este Anejo C cita las siguientes tres aplicaciones de los métodos de Fiabilidad Estructural. La primera es la calibración de coeficientes parciales de seguridad a utilizar en las ecuaciones de diseño para un tipo de estructuras determinado. A continuación considera la aplicación directa de los métodos de fiabilidad estructural con el fin de considerar de forma explícita la incertidumbre de las variables mediante distribuciones de probabilidad adecuadas. Finalmente, cita la valoración estructural de estructuras existentes que se trata en el Anejo D del DB-SE del CTE, también de carácter informativo.

Este artículo se centra en la primera de las aplicaciones, el proceso de calibración de código, estudiando dos problemas clave: la determinación del índice de fiabilidad objetivo o requerida para las estructuras a las que se aplica el código y el proceso de calibración de los coeficientes parciales de seguridad con el objetivo de que el índice de fiabilidad real esté próximo al índice de fiabilidad objetivo.

Palabras clave: *Fiabilidad Estructural; Código Técnico de Edificación; Coeficientes Parciales de Seguridad; Calibración de código.*

1. Introducción

En la práctica diaria, el arquitecto o ingeniero diseña estructuras teniendo en cuenta unos requisitos funcionales y unos requisitos normativos de seguridad estructural. Además trata de obtener diseños económicos y que sean respetuosos con el medio ambiente. Recientemente, se ha producido una amplia renovación de la normativa española de diseño estructural. Así, en el período 2006-2009, se han publicado el Código Técnico de la Edificación (CTE, 2009) y, una nueva versión de la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE, 2008). Además, el borrador de la Instrucción de Acero Estructural está muy adelantado. Las bases de diseño, común a todas las estructuras realizadas con cualquier tipo de material (acero, hormigón, madera, etc) están recogidas en el DB – SE del CTE. Con el CTE se pretende que todas las estructuras de edificación tengan la misma seguridad con independencia del material con el que estén construidas.

2. Método de los estados límite

El método usado habitualmente para verificar la seguridad de una estructura es aplicar el método de los estados límites. En este método se trata de verificar que se cumplen determinadas restricciones denominadas estados límites. Estos pueden ser de dos tipos:

Estados Límite Últimos: que sirven para verificar la exigencia de seguridad estructural. Son E.L.U. los estados límites de agotamiento, de estabilidad al vuelco, estabilidad elástica o pandeo, deformaciones inelásticas.

Estados Límite de Servicio: sirven para verificar el cumplimiento de la exigencia de actitud al servicio. Entre los E.L.S. se encuentran los que consideran deformaciones excesivas y vibraciones.

La comprobación de estos estados límites se realiza utilizando reglas de diseño. Los efectos de las acciones y las resistencias se introducen mediante valores representativos con un contenido estadístico más o menos rico (valores característicos). Además se introducen unos coeficientes parciales en la regla de diseño. En el caso más simple, consideramos dos variables: resistencia (R_d) y efecto de las acciones (E_d). La estructura es fiable cuando se verifica la siguiente regla de diseño:

$$E_d - R_d < 0 \quad (1)$$

donde E_d es el valor de cálculo del efecto de las acciones y R_d es el valor de cálculo del efecto de la resistencia. La denominación “valor de cálculo” es el equivalente a la denominación “design value” (valor de diseño) que aparece en la versión inglesa de los Eurocódigos y, de ahí, el subíndice d .

Los valores de cálculo son función de los valores característicos R_k y E_k y de los coeficientes parciales de seguridad γ_R y γ_E . Por tanto, la regla anterior se escribe:

$$\gamma_E E_k - \frac{R_k}{\gamma_k} < 0 \quad \text{con} \quad E_d = \gamma_E E_k \quad \text{y} \quad R_d = \frac{R_k}{\gamma_k} \quad (2)$$

En un caso general, el efecto de las acciones E_d y la resistencia R_d son funciones de los valores de cálculo de las variables básicas. Las expresiones de E_d y R_d que aparecen en las ecuaciones de diseño prácticas en los códigos, son del tipo:

$$\begin{aligned} E_d &= E\{F_{d1}, F_{d2}, \dots, a_{d1}, a_{d2}, \dots, \theta_{d1}, \theta_{d2}, \dots\} \\ R_d &= R\{f_{d1}, f_{d2}, \dots, a_{d1}, a_{d2}, \dots, \theta_{d1}, \theta_{d2}, \dots\} \end{aligned} \quad (3)$$

donde, F_d son los valores de diseño de las acciones, a_d son los valores de diseño de las propiedades del material, θ_d son los valores de diseño de las variables θ que tienen en cuenta las incertidumbres del modelo y f_d son los valores de cálculo de las propiedades del material. Estas ecuaciones se pueden escribir en función de los valores característicos y de los coeficientes parciales de seguridad y de los coeficientes de combinación.

$$\begin{aligned} E_d &= \gamma_{Ed} E\{\gamma_{gj} G_{kj}; \gamma_P P; \gamma_{q1} Q_{k1}; \gamma_{qi} \psi_{0i} Q_{ki}; a_d \dots\} \\ R_d &= \frac{R\{f_k / \gamma_m; a_d \dots\}}{\gamma_{Rd}} \end{aligned} \quad (4)$$

Donde G_k es valor característico del efecto producido por las acciones permanentes, P es el valor del efecto de la acción de pretensado y Q_{ki} son los valores característicos de los efectos de las acciones variables.

Hay que notar que, además de los coeficientes parciales de las variables de acciones ($\gamma_{gj}, \gamma_P, \gamma_{qi}$) y de resistencia (γ_m), se han incorporado los coeficientes parciales γ_{Ed} y γ_{Rd} para tener en cuenta las incertidumbres de los modelos de efecto de las acciones y de resistencias.

Los valores característicos, llevan el subíndice k y corresponden a un fractil especificado a priori de las funciones de distribución de las variables básicas. En ocasiones se utilizan otros valores representativos como valores nominales o valores medios.

Los valores de cálculo (de diseño) de las resistencias se obtienen como un valor de la resistencia dividido por un coeficiente parcial de seguridad (típicamente ≥ 1) y los valores de cálculo (de diseño) para los efectos de las cargas se introducen como valores característicos multiplicados por coeficientes parciales de seguridad (típicamente ≥ 1).

Además, es necesario introducir otros coeficientes que se llaman coeficientes de combinación o de simultaneidad ψ_{0i} (típicamente ≤ 1) para tener en cuenta que la probabilidad de que, simultáneamente, se superen los valores de cálculo de dos o mas cargas variables es reducida. Estos coeficientes de combinación aparecen en las ecuaciones de diseño de los códigos multiplicando a una a más de las cargas variables.

El CTE, de igual forma que otros códigos modernos, como los Eurocódigos, utiliza este método de verificación de la seguridad estructural y de la aptitud al servicio, que considera coeficientes parciales de seguridad en la formulación de las expresiones de los estados límites. A este método de verificación se le denomina "semiprobabilista" o método de nivel 1 (ver Tabla 1). El término "semiprobabilista" no está universalmente aceptado en la normativa y en la literatura sobre el tema. Alternativamente, aparece la denominación de método de valores de diseño, que se ha traducido en España, como método de los valores de cálculo. El término "semiprobabilista" proviene del hecho de que las variables básicas no se

describen con su distribución de probabilidad completa sino mediante un único parámetro que es su valor representativo.

Tabla 1.- Jerarquía de Métodos de Fiabilidad Estructural.

Nivel	<i>Métodos de cálculo</i>	<i>Distribuciones de probabilidad</i>	<i>Función de estado límite</i>	<i>Incertidumbre</i>	<i>Medida obtenida como resultado</i>
I: "Métodos de los códigos"	(Calibración de las reglas existentes en los códigos mediante métodos de niveles 2 o 3)	No se usan	Funciones lineales (generalmente)	Coefficientes arbitrarios	Coefficientes parciales
II: "Métodos de momento segundo"	'Algebra de los dos primeros momentos'	Sólo distribución normal	Lineal o aproximada una lineal	Se puede introducir mediante los dos primeros momentos (asimiladas a distribuciones normales)	Probabilidad de fallo nominal P_{fN}
III: "Métodos exactos"	Transformación	Convertidas a distribuciones normales equivalentes	Lineal o aproximada a una lineal	Variables aleatorias con distribuciones marginales	Probabilidad de fallo P_f
	Integración numérica y simulación	Cualesquiera	Cualquier tipo		
IV: Métodos de decisión	Cualquiera de los anteriores considerando los datos económicos				Coste mínimo o Máximo beneficio RBDO

3. Métodos probabilistas explícitos.

El CTE, al igual que los Eurocódigos, permite usar métodos probabilistas explícitos o basados en la teoría de fiabilidad estructural para el diseño de estructuras, es decir los métodos de nivel 2, 3 y 4 de la Tabla 1. Así, el apartado 3.5 (2) del DB-SE dice:

(2) En el marco del método de los estados límite, el cumplimiento de las exigencias estructurales se comprobará utilizando el formato de los coeficientes parciales (véase apartado 4). Alternativamente, las comprobaciones se podrán basar en una aplicación directa de los métodos de análisis de fiabilidad (véase Anejo C).

La cláusula 3.5 (5) del Eurocódigo EN 1990: 2002 "Bases de diseño estructural" expresa de forma similar:

(5) Como alternativa, pueden emplearse procedimientos de cálculo basados en métodos probabilísticos.

Y añade dos notas:

NOTA 1- La autoridad correspondiente puede establecer condiciones de uso específicas

NOTA 2- Como base de método probabilísticos, véase el Anexo C de EN 1990.

Por tanto, se puede tomar el Anejo C del CTE y de forma supletoria en Anexo C de EN 1990 como base para la utilización de los métodos probabilísticos. Otras fuentes adecuadas son las normas internacionales, como ISO 2394, el Código Modelo Probabilista editado por el Joint Committee on Structural Safety (JCSS, 2002) y los textos sobre fiabilidad estructural (Thoft-Christensen and Baker, 1992), (Melchers, 1999), (Ditlevsen and Madsen, 2007), (Lemaire, 2009).

El anejo C de CTE-BS-SE está inspirado en el Anexo C de EN-1990 y fundamentalmente en la norma ISO 2394 (1998) ya que es, prácticamente, la traducción del Anexo E de esta norma. El anejo C del CTE, al igual que el Anexo E de la ISO 2394 tiene carácter informativo. Este hecho se debe a que los métodos probabilistas son difíciles de aplicar y tienen una aceptación muy escasa. Sin embargo, en los últimos años han adquirido mayor relevancia debido a la aparición de ordenadores más potentes y el desarrollo de algoritmos eficientes.

El Anejo C menciona como aplicaciones principales de los métodos probabilistas las siguientes:

- Calibración de los coeficientes parciales de seguridad o calibración de código.
- Dimensionado de estructuras nuevas aplicando directamente los métodos de fiabilidad estructural.
- Evaluación estructural de construcciones existentes, para la cual se toma como guía el Anejo D de CTE-DB-SE.

Además el anejo C describe de forma breve los conceptos fundamentales que se utilizan en fiabilidad estructural: tipos de incertidumbres asociadas a variables básicas, distribuciones estadísticas recomendadas para modelar las variables básicas (normal, lognormal, Weibull, etc), función de estado límite, probabilidad de fallo, índice de fiabilidad, dominio de fallo, dominio seguro, métodos de fiabilidad estructural para el cálculo de la probabilidad de fallo, etc.

Centramos nuestra atención en la primera de las aplicaciones, es decir, la calibración de código y describimos como podemos determinar el nivel de fiabilidad exigible a una estructura de un tipo determinado y como determinamos los coeficientes parciales de seguridad para que la estructura diseñada utilizando dichos coeficientes tenga un índice de fiabilidad estructural lo más próximo posible al índice de fiabilidad objetivo.

4. Nivel de Fiabilidad Requerido

Un problema que está en discusión en la comunidad científica es el del Nivel de Fiabilidad o de Seguridad Estructural exigido para una estructura. No hay un procedimiento simple o directo de obtener un índice de fiabilidad “correcto” o “verdadero”. Este problema lo trata el CTE en el apartado C.4 Niveles de fiabilidad. Sin embargo, existen datos que nos ayudan a seleccionar el índice de fiabilidad objetivo, β_i , para un tipo de estructuras específico. Entre estos datos tenemos los índices de fiabilidad de las estructuras existentes. Se puede tomar como valor del índice de fiabilidad objetivo para determinado estado límite el valor promedio del índice de fiabilidad de las estructuras existentes para dicho estado límite. Este método posee la ventaja de mantener la nueva metodología de diseño compatible con la experiencia existente.

Otra forma de seleccionar el valor de β_i es por comparación. ¿Cuántas víctimas debido a colapsos de estructuras están los habitantes de un país dispuestos a soportar cada año? La respuesta a esta cuestión es difícil. A partir de la comparación de estadísticas para distintas actividades con riesgo (conducir un vehículo, viajar en avión, etc) se pueden establecer un valor de probabilidad de fallo o unos niveles de riesgo aceptables. El CTE considera dos medidas:

Nivel de riesgo aceptable para una actividad dada, de que se produzcan accidentes o pérdidas de vidas humanas considerando el número total de participantes en dicha actividad, y que se expresa como probabilidad de fallo objetivo

$$P_f^t = \frac{\text{n}^\circ \text{ de accidentes o fallecimientos durante el desarrollo de una actividad}}{\text{número de personas que desarrollan una actividad}} \quad (5)$$

Nivel de riesgo aceptable para la sociedad, que puede ser estimado mediante la relación entre el número de accidentes respecto al tamaño total de la sociedad.

$$P_f^t = \frac{\text{n}^\circ \text{ de accidentes o fallecimientos durante el desarrollo de una actividad}}{\text{número de individuos del país o de la sociedad}} \quad (6)$$

Estas dos medidas para el nivel de la probabilidad de fallo pueden ser bastante diferentes, especialmente para actividades con riesgo. Otra manera de determinar una probabilidad de fallo objetivo o, equivalentemente, un índice de fiabilidad objetivo es obtener un equilibrio desde el punto de vista económico entre las consecuencias de un fallo estructural de un edificio y el coste de las medidas de protección y seguridad. Así, la probabilidad de fallo objetivo se puede determinar resolviendo el problema:

$$\min_{P_f} C_{tot} = C_b + C_m + \sum(C_f P_f) \quad (7)$$

Siendo C_{tot} , los costes totales, C_b los costes de la construcción inicial, es decir, los costes de proyecto y de la ejecución, C_m los costes de inspección, mantenimiento y demolición. El término $\sum(C_f P_f)$ considera todas las situaciones de riesgo independientes y todos los posibles mecanismos de fallos. Este término incluye los costes estructurales debidos al fallo, así como otros costes difíciles de cuantificar como son los costes medioambientales y los costes debidos a la pérdida de vidas humanas.

La expresión anterior es una expresión muy simplificada que proviene de una formulación coste – beneficio más general, en la que se trata de maximizar la utilidad que tiene una estructura para la sociedad (o para el propietario de la estructura, en algunas ocasiones) durante su tiempo de vida esperado.

5. Probabilidad de fallo nominal

El apartado C.4.3 del anejo C del DB-SE remarca que la probabilidad de fallo teórica (y el índice de fiabilidad correspondiente) obtenida aplicando los métodos de fiabilidad estructural es un valor nominal que no representan la frecuencia real de los fallos estructurales. La probabilidad de fallo teórica es, generalmente, menor en un orden de magnitud que la tasa de fallos real. La diferencia entre una y otra se debe a que la seguridad de una estructura no está afectada sólo de las incertidumbres de los parámetros que intervienen en el cálculo, sino que también depende de otros factores importantes como son la calidad de la construcción o los errores humanos. Sin embargo, las probabilidades de fallo teóricas sirven como una medida que permite comparar dos estructuras desde el punto de vista de su seguridad estructural. Así, podemos afirmar que si la probabilidad de fallo teórica de una estructura es menor que la de otra, también lo es su tasa real de fallos.

La tabla C.2 del anejo C (Tabla 2) representa los valores recomendados para el índice de fiabilidad requerido, referidos a todo el periodo de servicio. Generalmente se suele utilizar un valor de $\beta_i = 3.8$ en las verificaciones de Estados Límites Últimos. Para los Estados Límite de Servicio se toman valores más pequeños.

Tabla 2. Valores nominales, referidos a todo el periodo de servicio, del índice de fiabilidad requerido β_i

Coste relativo producido por un aumento de fiabilidad	Consecuencias de un fallo estructural			
	Despreciables	Pequeñas	Moderadas	Grandes
Elevado	0	1.5	2.3	3.1
Moderado	1.3	2.3	3.1	3.8
Bajo	2.3	3.1	3.8	4.3

6. Método de los valores de diseño

El método basado en los valores de cálculo, mejor llamado, método de los valores de diseño tiene poca aplicación práctica. Este método consiste en determinar los valores de cálculo de las variables básicas X_1, X_2, \dots, X_n , en la ecuación de estado límite $g(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0$ utilizando el Método de Fiabilidad de Primer Orden (FORM). A estos valores de cálculo los llamamos $x_{1d}, x_{2d}, \dots, x_{nd}$. La verificación del estado límite se realiza sustituyendo las variables básicas por sus valores de cálculo en la expresión $g(X_1, X_2, \dots, X_n) \geq 0$, es decir, comprobando que $g(x_{1d}, x_{2d}, \dots, x_{nd}) \geq 0$, ya que se considera que $g(X_1, X_2, \dots, X_n) \geq 0$ corresponde a estados seguros.

La poca aplicación práctica del método es consecuencia del hecho de que si para aplicar el método es necesario realizar un análisis de fiabilidad estructural completo que ya da como resultado si se verifica o no la ecuación de estado límite, no tiene sentido obtener los valores de diseño de las variables aleatorias a partir del punto de fallo más probable (o punto de diseño) del FORM para sustituirlos como valores de cálculo en la expresión $g(x_{1d}, x_{2d}, \dots, x_{nd}) \geq 0$.

El anejo C del DB-SE da unos valores aproximados de los coeficientes de sensibilidad α_i que permiten determinar los valores de cálculo sin necesidad de realizar un análisis FORM completo.

7. Calibración de los coeficientes parciales de seguridad

Como ya se ha expresado, el método habitual que utiliza el ingeniero para comprobar los estados límites es el métodos basado en los coeficientes parciales. El apartado C.7.2 del Anejo C del DB-SE trata el procedimiento de calibración de estos coeficientes parciales.

El punto de partida en un formato del código, es decir, una ecuación de diseño expresada en función de valores característicos de las variables básicas y de coeficientes parciales de seguridad. El objetivo de la calibración consiste en la deducción de estos coeficientes parciales de modo que la fiabilidad estructural que se obtiene aplicado dicho conjunto de coeficientes se desvíe lo menos posible de la fiabilidad requerida u objetivo. Además se busca que el valor de la fiabilidad obtenida utilizando el conjunto de coeficientes parciales

calibrado tenga poca variación, es decir, sea lo más uniforme posible para las distintas situaciones de diseño para los que se aplica el formato del código.

El proceso de calibración de los coeficientes parciales de seguridad se desarrolla en 5 etapas:

7.1. Definición del campo de aplicación o alcance del código.

En esta etapa se especifica el tipo de estructuras que cubre el código. Se especifican, por ejemplo, el dominio geográfico de validez del código, los tipos de materiales usados, función deseada de las estructuras, modos de fallo y propiedades geométricas de las estructuras. Así, es necesario definir de manera precisa el dominio del código (por ejemplo: estructuras de acero, estructuras offshore, torres de aerogeneradores, estructuras de madera, etc).

En esta etapa se define también el formato del código, en este caso, el formato de coeficientes parciales

$$g\left(\frac{f_{k1}}{\gamma_{m1}}, \frac{f_{k2}}{\gamma_{m2}}, \dots, \gamma_{f1}F_{k1}, \gamma_{f2}F_{k2}, \dots\right) \geq 0 \quad (8)$$

El formato del código consta de un conjunto específico de valores característicos y de coeficientes parciales.

7.2. Objetivo del código

Hay que determinar claramente el objetivo del código. En el caso de la calibración de los coeficientes parciales de seguridad el objetivo es maximizar la utilidad esperada de la estructura o conseguir que el índice de fiabilidad esté tan próximo como sea posible al índice de fiabilidad objetivo.

7.3. Obtener la Frecuencia de Ocurrencia de los parámetros estructurales

En esta etapa se determinan los datos estructurales más importantes para los que se debe satisfacer el objetivo del código. Por ejemplo, hay que diferenciar los casos de carga más habituales de los más raros.

Selección de un conjunto de N elementos estructurales representativos que cubran adecuadamente el campo de aplicación del formato de código. Estos elementos estructurales están caracterizados por diferentes formas geométricas, diferentes dimensiones, diferentes ratios de las variables aleatorias, por ejemplo, valores diferentes de la relación entre cargas variables y carga total, y diferentes modelos estadísticos para las variables aleatorias, etc.

Esta etapa incluye el dimensionado de los N elementos estructurales representativos, aplicando un conjunto inicial de coeficientes parciales $(\gamma_{m1}, \gamma_{m2}, \dots, \gamma_{f1}, \gamma_{f2}, \dots)$. A cada uno de estos elementos estructurales le corresponde un índice de fiabilidad $\beta_j, j = 1 \dots N$. Además, se le asigna un peso w_j para tener en cuenta la frecuencia relativa de ocurrencia de dicho elemento estructural en la práctica profesional.

7.4. Seleccionar una función de penalización.

En esta etapa se define una medida para el grado de ajuste entre los índices de fiabilidad $\beta_j, j = 1 \dots N$ que proporciona el formato del código para los N elementos estructurales representativos y el índice de fiabilidad objetivo β_t . El β_t se puede determinar mediante los

procedimientos señalados anteriormente o a partir de los índices de fiabilidad de las estructuras existentes, en cuyo caso lo calculamos mediante:

$$\Phi(\beta_i) = \sum_{j=1}^N w_j \Phi(\beta_j) \quad (9)$$

Generalmente se utiliza una función de penalización de tipo cuadrático para medir este grado de ajuste:

$$\min_{\gamma} W(\gamma) = \sum_{j=1}^N w_j (\beta_j(\gamma) - \beta_i)^2 \quad (10)$$

donde $w_j, j = 1, \dots, L$ son coeficientes ponderadores que indican la frecuencia relativa de las diferentes situaciones de diseño, con $\sum_{j=1}^N w_j = 1$.

Se suele tomar como valores iniciales de los coeficientes parciales de seguridad $(\gamma_{m1}, \gamma_{m2}, \dots, \gamma_{f1}, \gamma_{f2}, \dots)$, los valores establecidos en el CTE, o por otro código (Eurocódigo) de uso habitual para el campo de aplicación considerado.

La función de penalización de suma de cuadrados tiene la ventaja de que muy simple y la solución de problema de optimización puede simplificarse mucho si $\beta_j(\gamma)$ tiene una expresión explícita simple. A pesar de todo, esta función es simétrica respecto a β_i , es decir, sólo depende de la diferencia $\beta_j - \beta_i$, y las estructuras con un índice de fiabilidad más pequeño que el objetivo no están más penalizadas que las estructuras con un índice de fiabilidad mayor. Lind usa otra función de penalización (Gayton *et al*, 2004):

$$\min_{\gamma} W(\gamma) = \sum_{j=1}^N w_j (k(\beta_j(\gamma) - \beta_i) + \exp(-k(\beta_j(\gamma) - \beta_i)) - 1) \quad (11)$$

donde $k > 0$ es el parámetro de curvatura. Esta función penaliza los índices de fiabilidad menores que el índice de fiabilidad objetivo. Cuando el parámetro k aumenta esta función es penaliza más los $\beta_j < \beta_i$ que la función de mínimos cuadrados.

7.5. Optimización del formato del código

El formato de código que se obtiene resolviendo el problema de optimización anterior es complejo puesto que debe logra el mejor ajuste con el índice de fiabilidad objetivo. Sin embargo, para el ingeniero estructural es deseable que el formato de código sea sencillo. En esta etapa se ajustan los coeficientes parciales de seguridad llegando a un acuerdo de compromiso entre simplicidad y grado de ajuste al objetivo.

8. Conclusiones

El Código Técnico de la Edificación ha introducido en la normativa española sobre seguridad estructural los métodos de la Teoría de Fiabilidad Estructural. Estos métodos, aunque son de difícil aplicación, se emplean cada vez más en el diseño de estructuras sometidas a acciones extremas: edificios de gran altura, torres de aerogeneradores, plataformas offshore, etc.

Este artículo se ha centrado en una de las aplicaciones más importantes de estos métodos que es la de calibración de código, es decir, la determinación del índice de fiabilidad objetivo y la determinación de los coeficientes parciales de seguridad, acordes con este índice de fiabilidad objetivo, que se utilizan en las ecuaciones de diseño que utiliza el ingeniero estructural en la práctica diaria.

Es fundamental que el comité redactor de un código exija la misma seguridad estructural, en términos de nivel de fiabilidad, a las estructuras independientemente del tipo de material empleado. Además, es responsabilidad de este comité el proponer valores adecuados de los coeficientes calibrados, de forma que se obtenga un acuerdo de compromiso entre seguridad y ahorro económico.

9. Referencias

CTE.(2009) Código Técnico de la Edificación. Ministerio de la Vivienda.
www.codigotecnico.org

Ditlevsen , O. and Madsen, H.O.(2007).Structural Reliability Methods, accessible en on-line
<http://www.web.mek.dtu.dk/staff/od/books/OD-HOM-StrucRelMeth-Ed2.3.7-June-September.pdf>

2008). Instrucción de Hormigón Estructural. Comisión Permanente del Hormigón. Ministerio de Fomento.

EUROCÓDIGO EN-1990: 2002 Bases de Diseño Estructural. AENOR.

Gayton, N. Mohamed, A., Sorensen, J.D., Pendola M., Lemaire M.,(2004) Calibration methods for reliability-based design codes. *Structural Safety* 26 , 91-121.

ISO 2394: General principles on reliability for structures. 1998 (E). Second Edition International Organization for Standardization. Suiza.

JCSS (2002), Probabilistic Model Code. Joint Committee on Structural Safety (JCSS).
<http://www.jcss.ethz.ch>

Lemaire, M., (2009), *Structural Reliability*, Wiley-ISTE

Melchers (1999), *Structural Reliability Analysis and Prediction*. Second Edition, Robert E. Melchers. John Wiley & Sons. 1999

Thoft-Christensen, P and Baker. M., *Structural Reliability: Theory and Its Applications*. Springer Verlag, 1982.

Correspondencia (Para más información contacte con):

Luis Celorrio Barragué

Departamento de Ingeniería Mecánica.

Universidad de La Rioja

Edificio Departamental,

Luis de Ulloa 20, 26004 Logroño.

Phone: 34-941299542

E-mail: luis.celorrio@unirioja.es; luis.celorrio@gmail.com

URL: www.unirioja.es