

# NUEVOS CONCEPTOS PARA LA EVALUACIÓN CUALITATIVA DE LA CONFIABILIDAD EN EL DISEÑO ESTRUCTURAL

Pavel Marek<sup>1</sup>, Milan Gustar<sup>2</sup>, Mauricio Sánchez-Silva<sup>3</sup>

**RESUMEN:** La calidad de los modelos mecánicos que describen el comportamiento estructural es ampliamente reconocida. Sin embargo, existe la percepción generalizada de que las especificaciones de diseño contenidas en los códigos conducen a estructuras que no son óptimas en términos de seguridad y economía. Esto se debe principalmente a: (1) la necesidad de establecer requisitos suficientemente amplios para cubrir un gran número de casos; y (2) a la utilización de modelos determinísticos que manejan de manera superficial la incertidumbre de las variables y el proceso. Dentro de la comunidad científica, esta situación ha generado un debate sobre la necesidad de la transición de una forma de pensamiento determinística a una interpretación completamente probabilística. Recientemente, un número importante de publicaciones internacionales indican que los avances computacionales han abierto una ventana muy promisoría para la modelación cualitativa de la confiabilidad y para la elaboración de códigos y reglamentaciones de diseño más eficientes. Para que este cambio sea posible, es necesario el desarrollo de nuevas estrategias fáciles de aplicar en la actividad diaria del diseño. Este artículo llama la atención sobre la importancia del diseño probabilístico, presenta los conceptos básicos y propone la utilización de métodos de simulación (eg. Monte Carlo) en aspectos prácticos de la actividad diaria del diseño.

## INTRODUCCIÓN

Los criterios de seguridad utilizados en los códigos de diseño durante la mayor parte del siglo XX han sido reemplazados progresivamente por la definición de una superficie de estado límite, que permite distinguir, en un espacio multidimensional, la región de “falla” y la región “segura”. La mayoría de códigos en la actualidad siguen la interpretación simplificada de la filosofía de estados límites expresada a través de medidas semi-probabilísticas como el diseño utilizando factores parciales (FP). En este proceso, la probabilidad y la estadística se han convertido en herramientas esenciales para el manejo de la incertidumbre, especialmente, en la definición de la teoría que soporta la modelación de la confiabilidad estructural y su aplicación al diseño. Sin embargo, aunque la filosofía de estados límites utiliza conceptos de probabilidad y estadística para el cálculo de los factores de carga y resistencia, desde el punto de vista del diseñador se percibe todavía como una aproximación determinística a la seguridad. Esta situación no ha cambiado con los recientes avances computacionales que, aunque han abierto una ventana muy promisoría para la modelación de la confiabilidad y para el desarrollo de códigos y reglamentaciones más eficientes, no ha logrado superar la dificultad matemática que involucra la teoría básica de confiabilidad y su extensión a la actividad práctica.

El futuro de los códigos de diseño estará determinado por una estrategia que requiere la utilización de: (1) modelos probabilísticos que describan el comportamiento de las variables aleatorias; y (2) herramientas sencillas que permitan la integración de los modelos mecánicos con los modelos probabilísticos. En este artículo se presenta una propuesta que significa el cambio de una mentalidad determinística a una probabilística mediante la utilización de herramientas de modelación muy sencillas y fáciles de implementar en la práctica. El artículo hace referencia al programa TEREKO de la Unión Europea que se ha concretado en la elaboración del método SBRA (Simulation-based Reliability Assessment) (Marek et. Al., 1995) que será explicado en detalle en las siguientes secciones (Marek et. al., 2001).

## ESTADO ACTUAL DEL DISEÑO

### Desarrollo de códigos de diseño

En los códigos se especifican los requerimientos que debe satisfacer el diseño para alcanzar un nivel de seguridad mínimo aceptable para la sociedad. La definición de valores particulares está sustentada en análisis de

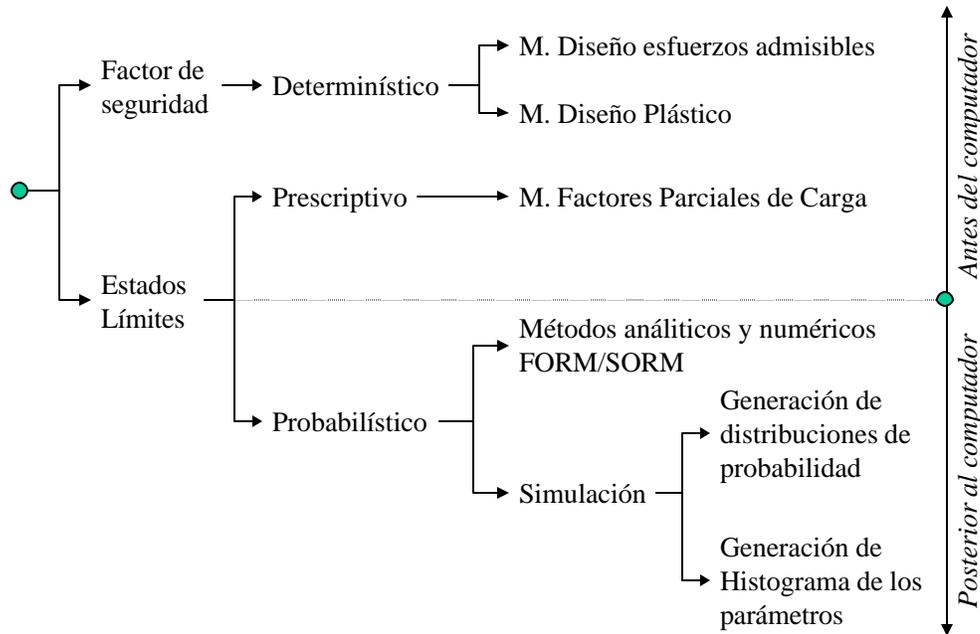
---

<sup>1</sup> ITAM Académia de Ciencias de República Checa. República Checa.

<sup>2</sup> ARTech, República Checa.

<sup>3</sup> Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia.

confiabilidad. La calidad y precisión de dichos análisis define la eficiencia y la versatilidad de los códigos. En la Figura 1 se presentan las diferentes alternativas para el desarrollo de códigos de diseño con base en las características del análisis de confiabilidad.



**Figura 1: Alternativas para el desarrollo de normativas con base en la evaluación de la confiabilidad (Marek et.al. 2001).**

Durante buena parte del siglo XX, la mayoría de los códigos siguieron una aproximación a la seguridad fundamentalmente determinística. Por ejemplo, se destacan el diseño bajo esfuerzos admisibles, que se utilizó durante mucho tiempo para el diseño de estructuras metálicas (AISC, 1989), y el método de diseño plástico, restringido a un número muy pequeño de casos. A partir de los años 60, se cuestionó fuertemente la calidad y eficiencia de estos métodos y los desarrollos posteriores condujeron a lo que hoy en día se conoce como códigos semi-probabilísticos. Sin embargo, a pesar de su extensa utilización, frecuentemente se publican nuevos artículos que resaltan la necesidad de moverse a métodos basados completamente en estadística y probabilidad (Marek, 1995).

En la actualidad la gran mayoría de normativas siguen la filosofía de diseño con base en estados límites, también llamada Método de los Factores de Seguridad Parciales (Partial Safety Factors Method) (Marek et. Al. 2001). La filosofía de estados límites tiene su fundamento en el análisis de primer orden (First Order Reliability Method, FORM). Este método depende de la determinación del “Punto de diseño”, que está asociado a una medida de la seguridad del sistema (i.e.  $\beta$ )(Figura 2). La aplicación del análisis FORM conjuntamente con la utilización de los procedimientos de calibración adecuados condujeron a la elaboración de los códigos de diseño actuales. Por motivos prácticos, en las normativas actuales el nivel de confiabilidad se expresa a través de factores parciales (que se han reducido al mínimo posible). A pesar de que los conceptos probabilísticos respaldan este esquema, el formato aparece ante los ojos del ingeniero en la práctica como completamente determinístico.

Una comparación entre el EUROCODE (ENV-1991-1, Eurocode 1,1993), el código LRDF (AISC 1993), la norma canadiense (CISC 1974) y la norma alemana DIN (Kahlmeyer E., 1993) muestra que cada institución ha encontrado una alternativa diferente para definir su nivel de confiabilidad. Aunque todas utilizan factores parciales, se diferencian en las definiciones y análisis de cargas, resistencia, condiciones servicio, durabilidad y en la determinación de la reserva plástica de la estructura (Marek et. Al. 2001). Sin embargo, a pesar de las diferencias todas las normas tienen el mismo formato para garantizar la confiabilidad. Esto es, definen la sollicitación, mediante una carga “nominal” o “característica”, y un conjunto de factores parciales asociados. Aunque las normativas mencionadas representan el estado del arte en el diseño estructural, no han tenido en cuenta la evolución que ha tenido el análisis de la confiabilidad estructural durante los últimos años.

A finales de los años ochenta y principios de los noventa, la utilización del computador personal se convirtió en una herramienta del día a día del ingeniero afectando directamente los métodos de análisis y diseño. Sin embargo, el cambio solo se ha reflejado en una mayor capacidad para manejar grandes volúmenes de información a altas velocidades. Aunque esto ha traído consigo grandes ventajas, no representa un cambio significativo en la

ingeniería estructural. A manera de analogía, no es suficiente con colocarle una turbina a un globo para que mejore su rendimiento, se requiere cambiar el concepto de volar. De igual forma, es necesario revisar el concepto del diseño estructural de tal forma que los desarrollos computacionales sean parte de ese cambio.

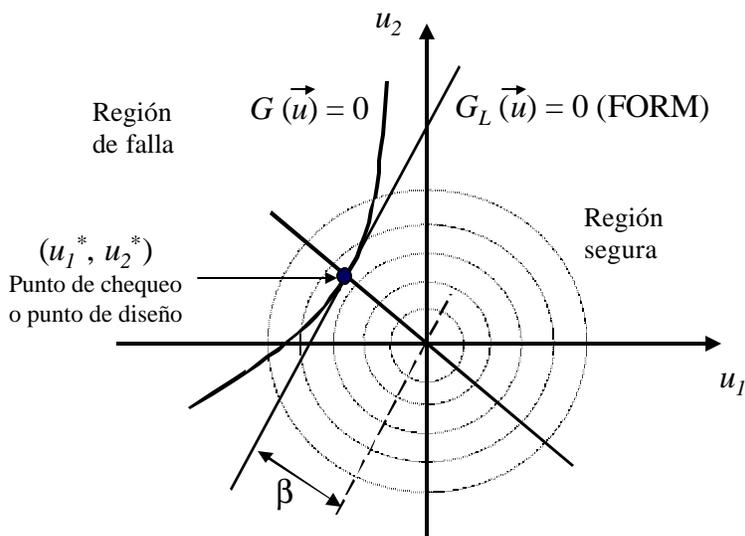


Figura 2: Definición del punto de diseño.

### PUNTO DE DISEÑO

La utilización del formato de código que utiliza Factores Parciales (FP) se basa en la identificación de los factores de carga y resistencia asociados al “punto de diseño”. El “punto de diseño” se define como la distancia mínima de la función de estado límite (ie.  $G(R,S) = 0$ ) al origen en el espacio transformado (ie.  $u = X-?/?$ ) (Figura 2). Ante la complejidad de la función de estado límite la solución se obtiene mediante el análisis de primer orden (i.e. FORM) que es una aproximación lineal (e.g., series de Taylor) a la solución en el “punto de diseño”. Entonces, los Factores Parciales (FP) se obtienen en términos de la relación entre los valores nominales (o característicos) de carga o resistencia y el valor que tome la variable en el punto de diseño dentro del espacio real (Figura 3).

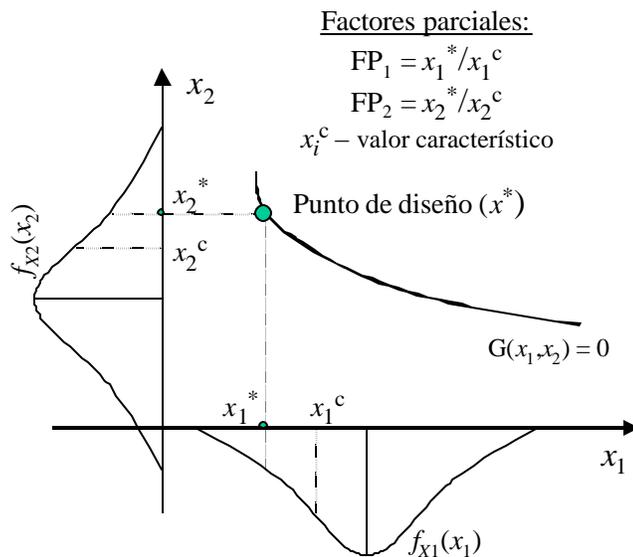


Figura 3: Definición de los factores parciales.

A pesar de la complejidad en el cálculo de los factores parciales, desde la perspectiva del ingeniero en la práctica, el diseño bajo esfuerzos admisibles utilizado en los primeros códigos es similar al formato de FP ya que este último utiliza dos factores (i.e. carga y resistencia) en vez de uno. Un aspecto importante y generalizado en la

mayoría de las normativas, es que la aplicación del método de los FP (al igual que el método del factor de seguridad) no exige que el ingeniero entienda las reglas detrás de la formulación de la normativa en términos de la confiabilidad.

La derivación de los códigos que siguen el formato de los FP exige un análisis semi-probabilístico, sin embargo, el procedimiento de calibración y el gran número de simplificaciones que se han introducido en el formato final dificulta la definición de su naturaleza. Iwankiw (2000) afirma que los actuales códigos deben definirse como “prescriptivos” en vez de “semi-probabilísticos”. Las actividades del diseñador están limitadas a la interpretación de ecuaciones, criterios, instrucciones, factores, etc. Además, la probabilidad de falla real no puede evaluarse explícitamente. Debido a la naturaleza determinística de los criterios y del formato en que se presenta el código, la participación del diseñador en el proceso está restringida al mínimo, la responsabilidad se transfiere a otras instancias y su creatividad se elimina por completo.

De acuerdo con Rackwitz (2000) el análisis de confiabilidad de primer y segundo orden FORM/SORM ya está bien definido y, a parte de algunos aspectos técnicos menores, muy poco puede añadirse y muy poco puede eliminarse. La comunidad científica está satisfecha con los resultados obtenidos, sin embargo, para los ingenieros que utilizan los códigos en la actividad diaria, no existe información sobre la utilización e interpretación de FORM/SORM. La pregunta que sigue a este hecho es indudablemente: qué se requiere para pasar esta información a quienes realmente diseñan y construyen las edificaciones?

## DE UN ANÁLISIS DETERMINÍSTICO A UNO PROBABILÍSTICO

Las alternativas para una transición de un análisis determinístico a un análisis de confiabilidad completamente probabilístico (Figura 1) son:

**Aproximación analítica o numérica:** considera como información de entrada múltiples variables aleatorias cuyo comportamiento ha sido previamente determinado mediante el análisis estadístico y probabilístico de información existente. La solución se obtiene mediante la integración directa de la integral de convolución:  $p_f = P[G(\bar{X}) \leq 0] = \int \dots \int_{G(\bar{x}) \leq 0} f_{\bar{x}}(\bar{x}) d\bar{x}$  o mediante una aproximación numérica utilizando métodos de primer o segundo orden FORM/SORM.

**Técnicas de simulación:** consisten en la generalización de un gran número de experimentos (posibles resultados que puede tomar el sistema) con base en muestras “aleatorias” artificiales del comportamiento de los parámetros fundamentales que definen el modelo mecánico del sistema. El método más utilizado para este tipo de análisis es la simulación de Monte Carlo que puede mejorarse con técnicas como el muestreo por importancia (Melchers, 2000).

La solución mediante integración directa solo es posible en algunos casos y la solución numérica puede ser complicada para su aplicación en la práctica. La aplicación de los métodos analíticos requiere conocer en detalle los conceptos fundamentales del análisis de confiabilidad y contar con experiencia en áreas como optimización y procesos estocásticos. Por otro lado, las técnicas de simulación son estrategias sencillas que pueden implementarse de manera muy eficiente con el apoyo del computador. Por ejemplo, mediante el método de Monte Carlo el diseñador puede llevar a cabo el análisis de la interacción de un gran número de variables sin aplicar complicados e inconvenientes análisis matemáticos.

## MÉTODOS DE SIMULACIÓN: MONTE CARLO

El sistemático desarrollo y utilización de los métodos de Monte Carlo se inició en 1940 y su nombre se le otorgó en referencia a la ciudad de Monte Carlo, en el principado de Mónaco, debido a la similitud entre el carácter aleatorio y estadístico de la simulación y los juegos de azar. Esta técnica utiliza el muestreo aleatorio para simular artificialmente el comportamiento del sistema. Para el análisis de confiabilidad esto significa, en su forma más simple, que para cada variable  $X_i$  se debe tomar un valor aleatorio  $x_i$  con el cual se revisa, mediante la evaluación de la función de confiabilidad, si el estado límite ha sido violado (i.e.,  $G(\mathbf{x}_i) \leq 0$ ). Este procedimiento se repite un número significativo de veces. Entonces, para  $N$  simulaciones, la probabilidad de falla se puede aproximar mediante (Melchers, 2000):

$$P_f = \frac{n(G(\mathbf{x}_i) \leq 0)}{N} \quad (1)$$

donde  $n(G(\mathbf{x}_i) \leq 0)$  corresponde al número de simulaciones para los cuales el resultado es una falla del sistema. Note que el número de ensayos debe ser consistente con la precisión con la cual se quiere calcular la probabilidad de falla. Por ejemplo, para un valor de probabilidad de falla estimado del orden de  $10^{-4}$  se requieren más de 10,000 simulaciones.

Recientemente, se han presentado un gran número de artículos que muestran el potencial de las técnicas de simulación para la solución de problemas en ingeniería (Schueller et. Al. 2000). Para el caso de la ingeniería estructural, se destaca la importancia que ha tomado la simulación utilizando Monte Carlo para la evaluación de la confiabilidad y en particular su potencial para ser utilizada como parte de códigos de diseño.

La aplicación e interpretación de un proceso de simulación que se pueda utilizar en el diseño práctico es una tarea difícil. Esto significaría que el ingeniero no sería simplemente un interprete de instrucciones, sino que se involucraría activamente en el procedimiento de evaluación de la confiabilidad. Para que esto sea posible, se requiere revisar los conceptos y el proceso de diseño, hacer “re-ingeniería” a todos los procedimientos y formatos de los códigos actuales. Además, se necesitaría un cambio de mentalidad referida en particular a los aspectos legales y de responsabilidad. En este artículo se presenta un procedimiento piloto para lograr este objetivo: SBRA (Simulation-based reliability Assessment) (Marek et. al., 1995).

## MÉTODO SBRA

### Conceptos básicos

El método SBRA se propone como una alternativa para lograr la transición del proceso de diseño hacia una estrategia completamente probabilística.

En el método SBRA las variables de entrada tienen un carácter aleatorio y se modelan mediante distribuciones estadísticas truncadas (limitadas) que representan su naturaleza incierta. La distribución estadística se describe en forma no-paramétrica mediante un histograma. La evaluación de la confiabilidad se realiza mediante la comparación entre un valor de referencia (VR) y el efecto de la carga S. Esta interacción se evalúa utilizando la simulación estocástica y el método de Monte Carlo en el espacio definido por VR y S. La función de estado límite o función de confiabilidad (FC) está definida por  $FC(RV-S) = RV-S$  y permite dividir el espacio en un dominio “seguro” y un dominio “inseguro”. Para el cálculo de la probabilidad de falla,  $P_f$ , no se requiere determinar el “punto de diseño” y en consecuencia, no es necesario definir factores parciales. Esta aproximación puede extenderse también a problemas de durabilidad en los cuales la determinación de la probabilidad de falla es función del tiempo (i.e.,  $P_f(t)$ ). Puesto que las bajas probabilidades de falla se encuentran en las regiones extremas (“tail”) de las funciones de densidad de probabilidad, SBRA utiliza el método de Monte Carlo directo para la estimación de la probabilidad de falla  $P_f$ . Por último, la confiabilidad se determina comparando la probabilidad de falla con un valor de probabilidad de falla objetivo  $P_d$  especificado previamente (e.g. en los códigos de diseño).

### Representación de variables

#### Definición de histogramas

En la mayoría de casos, las variables aleatorias no pueden describirse mediante parámetros estadísticos de distribuciones comunes. En consecuencia, SBRA utiliza la representación no-paramétrica de variables mediante histogramas. En el método SBRA, la mayoría de variables de entrada se definen mediante un histograma dentro de un intervalo finito  $[a, b]$  en vez de utilizar una distribución con un dominio infinito (e.g. una distribución normal) (Marek and Gustar, 1993). Los histogramas son aproximaciones a la distribución original por medio de distribuciones discretas o segmentadas (Figura 4). En ambos casos, el rango (dominio) de la función de probabilidad se divide en intervalos y el valor de cada intervalo corresponde a su frecuencia relativa.

Si todos los valores dentro de un intervalo se representan mediante un valor único (e.g. el valor medio del intervalo), el histograma aproxima a la variable original mediante una distribución discreta (Figura 4a). Si la distribución de la variable dentro de cada intervalo del histograma se supone uniforme, el histograma aproxima a la distribución original de la variable mediante una distribución segmentada (Figura 4b). Aunque el tamaño de los intervalos puede variar dentro de un histograma, la utilización de intervalos de la misma longitud es una alternativa apropiada para la modelación.

La utilización de histogramas es una aproximación muy eficiente a funciones de probabilidad irregulares y a datos obtenidos a partir de pruebas de materiales y registros históricos (León García, 1994). Aunque parte de la información de la distribución original se pierde mediante la discretización, en la medida en que el número de intervalos es mayor, las precisiones aumentan. En alguna medida la pérdida de precisión es un problema menor comparado con la eficiencia computacional y la relevancia de los resultados.

## Generación de valores de carga aleatorios

Puesto que el proceso de simulación de SBRA utiliza técnicas de Monte Carlo, se requiere la generación de valores aleatorios para cada una de las variables de entrada al modelo mecánico. El valor que tomen las variables debe ajustarse a su naturaleza aleatoria representada a través de histogramas (Figura 4).

Una de las ventajas de la utilización de histogramas es que la información puede almacenarse eficientemente en la memoria del computador para utilizarla posteriormente en la generación de números aleatorios (Figura 5). El proceso utilizado por SBRA para calcular el valor aleatorio de la variable  $X$ ,  $\hat{x}$ , es el método de la distribución inversa. Este método permite calcular un valor aleatorio de la variable  $X$  a partir de un número aleatorio  $u$  definido en el intervalo  $(0,1)$  siguiendo una distribución uniforme. Entonces,

$$\hat{x} = F_X^{-1}(u) \quad (2)$$

donde  $F_X^{-1}()$  es la función de distribución inversa de  $F_X(x)$ , también llamada función cuantil. El proceso de generación de números aleatorios que siguen una función de distribución  $F_X(x)$  puede resumirse de la siguiente forma: (1) generar un número aleatorio en el intervalo  $(0,1)$  que siga una distribución uniforme; y (2) calcular el valor de la variable  $\hat{x}$ , utilizando la ecuación 2 (o sea,  $\hat{x} = F_X^{-1}(u)$ ). Este procedimiento puede observarse en la Figura 5 para el caso de una distribución discreta y una distribución segmentada.

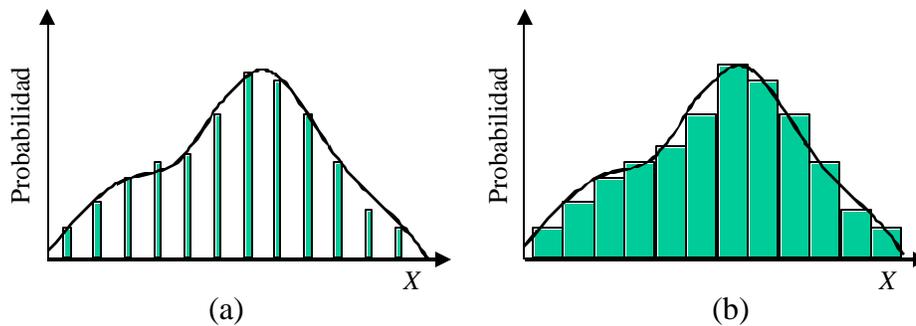


Figura 4: Aproximación a las distribuciones estadísticas mediante distribuciones discretas (a) y segmentadas (b) (Marek et. al., 2001).

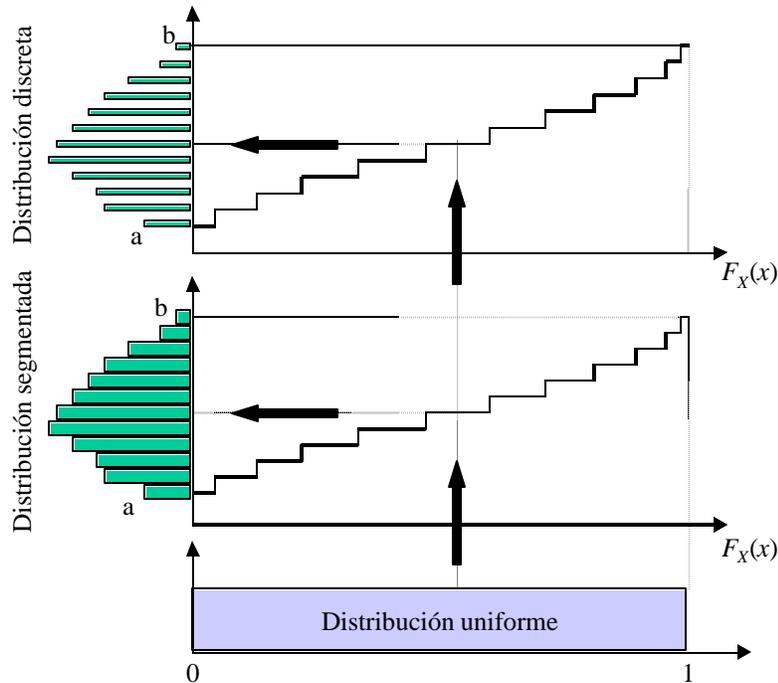


Figura 5: Generación de valores aleatorios utilizando distribuciones discretas y segmentadas.

## Modelación de cargas

Un aspecto fundamental en la definición de un código es el manejo de la sollicitación (cargas) sobre la estructura. En los códigos actuales, la naturaleza aleatoria de las cargas se expresa en términos de su valor “nominal” y de los factores parciales (Figura 3), suponiendo que las cargas no cambian en el tiempo.

En el método SBRA las cargas se modelan utilizando curvas de duración de carga (CDC) (Load Duration Curves, LDC que pueden transformarse en histogramas uni- o multidimensionales (Marek y Gustar, 1989). Las cargas individuales y sus efectos sobre la estructura no se representan mediante valores característicos con sus respectivos factores de carga, sino a través de CDC asociadas a histogramas definidos para un período de tiempo preestablecido y limitados a un intervalo definido. En la Figura 6a se presenta esquemáticamente la historia de carga  $F(t)$  durante la vida útil de una estructura y en la Figura 6b se presenta la historia de carga reorganizada en orden de intensidad. La curva CDC modificada coloca la intensidad mínima a la izquierda y distribuye las cargas de acuerdo con su intensidad terminando con el valor máximo a la derecha. SBRA utiliza las curvas modificadas de carga para definir los histogramas que se utilizarán en la simulación de Monte Carlo (Figura 7).

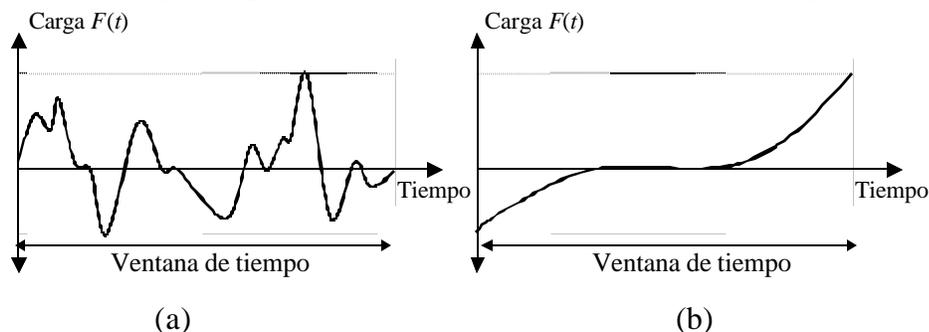


Figura 6: (a) Historia de carga en el tiempo; (b) reorganización de la historia de carga.

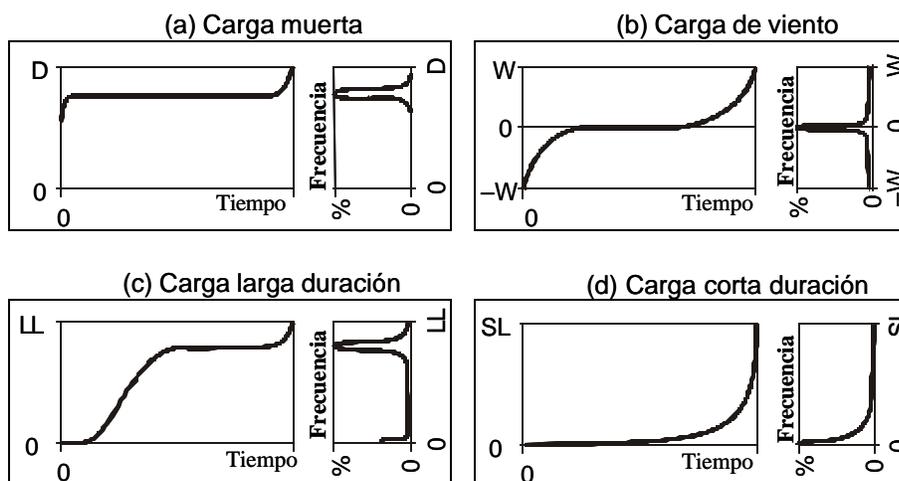


Figura 7: Ejemplos de curvas de duración de carga con sus respectivos histogramas.

## Valores de referencia

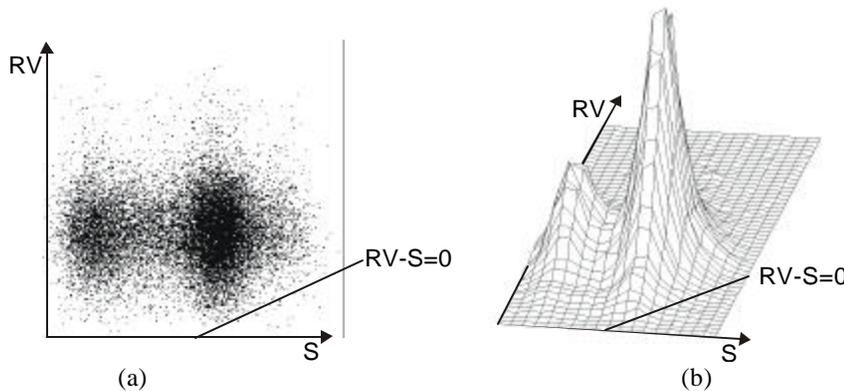
Los valores de referencia (VR) son valores límites particulares que permiten definir la resistencia o los límites de servicio de una estructura y sus componentes. Los valores de referencia son parte esencial de la función de estado límite o función de confiabilidad (FC) (i.e.,  $FC = G(VR-S)$ ). Los valores de referencia pueden ser valores expresados en forma de histogramas o valores específicos como, por ejemplo, la deflexión máxima de una viga bajo condiciones de servicio (i.e.  $L/360$ ). Los valores de referencia también pueden expresarse en forma compuesta cuando la solución involucra el análisis de diferentes componentes o modos de falla. Los valores de referencia son, en general, variables aleatorias expresadas a través de funciones de densidad de probabilidad representadas como histogramas.

Los valores de referencia están relacionados con los modelos estructurales y las características de la función de confiabilidad. La determinación de los valores de referencia depende de aspectos tales como: datos estadísticos

confiables del comportamiento de las variables, conocimiento del problema y concenso entre las partes involucradas (diseñador, usuario, dueño y las autoridades competentes).

### **Función de confiabilidad**

La confiabilidad de una estructura se obtiene comparando la probabilidad de falla calculada con el valor de probabilidad objetivo establecida por los códigos de diseño. La probabilidad de falla  $P_f$  se obtiene mediante simulaciones de Monte Carlo, mientras que la probabilidad objetivo  $P_d$ , es un valor previamente asignado que depende de estudios económicos, de la experiencia del evaluador y de observaciones de eventos pasados, entre otros. El valor de  $P_d$  está asociado al problema de la aceptabilidad del riesgo que ha sido ampliamente discutido por Sánchez-Silva (2001) y Sánchez-Silva y Rackwitz (2002). Para el cálculo de la probabilidad de falla, la definición de la región “segura” y “falla” para el análisis de confiabilidad puede estar bien definida (Figura 8a) o definirse de forma difusa (Figura 8b).



**Figura 8: Definición de región “segura” e “insegura en función de la función de confiabilidad.**

### **El método SBRA**

El método SBRA ha sido propuesto como un apoyo para el diseño y el análisis de confiabilidad de elementos estructurales. Este método ha sido implementado a través de un software que incluye los siguientes programas básicos: Anthill<sup>TM</sup>, Mstar<sup>TM</sup>, ResCom<sup>TM</sup>, LoadCom<sup>TM</sup>, MatCom<sup>TM</sup> y DamAc<sup>TM</sup>. Utilizando estos programas se puede modelar desde el análisis y la combinación de cargas hasta la evaluación de la seguridad estructural (e.g., resistencia, durabilidad, fatiga, etc.). En todos los programas el usuario puede modificar y ajustar los parámetros de las variables de entrada al sistema según los requerimientos del problema. Esto permite, además del estudio de confiabilidad, analizar el comportamiento del sistema ante variaciones o cambios en las condiciones internas o externas y determinar la importancia relativa de cada variable en la respuesta. En la actualidad se han desarrollado más de 500 ejemplos en áreas y con temas diversos en los que se muestra la utilidad y el potencial de SBRA (Marek et. al., 1995, 1998, 2001).

### **EJEMPLOS**

#### **Ejemplo 1: Confiabilidad de una barra de acero**

Suponga que se quiere calcular la probabilidad de falla  $P_f$  de una barra de acero A-36M con un área transversal de 1000 mm<sup>2</sup>, sometida a tensión bajo tres tipos de solicitación: (1) carga muerta, (2) carga viva de corta duración y (3) carga viva de larga duración (Figura 9).

El valor de referencia puede expresarse utilizando el modelo mecánico  $RV = A \times F_y$ , donde A es el área de la sección transversal y  $F_y$  la resistencia a fluencia (o esfuerzo de cedencia). Dada la naturaleza aleatoria de las variables involucradas, el área y la resistencia a la fluencia se consideran como variables aleatorias. Entonces, el área de la sección trasversal A se describe como:

$$A = A_{nom}A_{var}$$

donde  $A_{nom}$  es el valor nominal del área transversal y  $A_{var}$  es su variación. La variación del área se supuso como normalmente distribuida y limitada a un rango [900 mm<sup>2</sup>, 1100 mm<sup>2</sup>]. La variación sobre la resistencia del acero se obtuvo mediante ensayos de laboratorio. La solicitación sobre la barra de acero resulta de la combinación de los

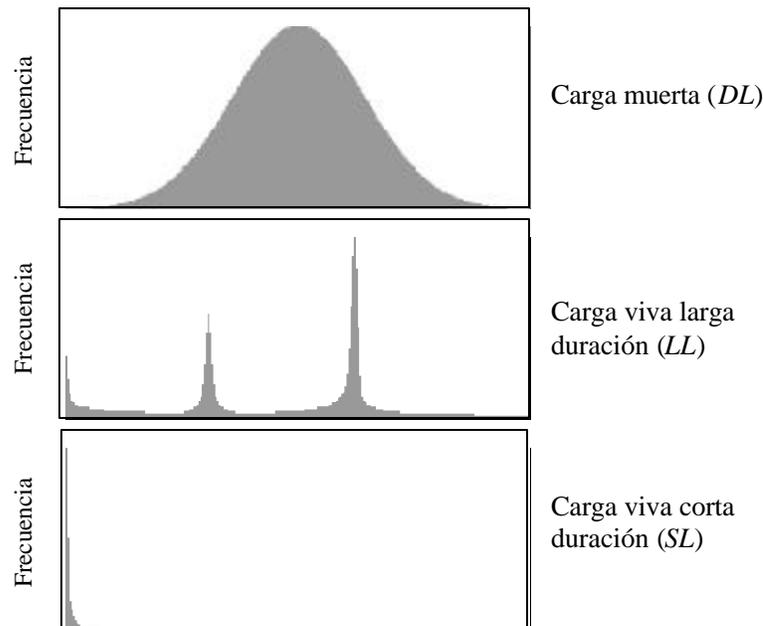
tres tipos de sollicitación, esto es:  $S = DL + LL + SL$ . Todas las cargas fueron caracterizadas por un histograma (Figura 7), por lo tanto, el efecto de la sollicitación puede describirse como:

$$S = DL \times DL_{var} + LL \times LL_{var} + SL \times SL_{var}$$

donde  $DL_{var}$ ,  $LL_{var}$  y  $SL_{var}$  representan la variación de cada tipo de sollicitación. Esta variación está descrita por los histogramas mostrados en la Figura 9. Si se supone que los valores extremos (o sea valores de diseño) son  $DL_d = 100KN$ ,  $LL_d = 100KN$  y  $SL_d = 100KN$ , entonces:

$$S = 100,000 \times DL_{var} + 100,000 \times LL_{var} + 100,000 \times SL_{var}$$

La función de confiabilidad está definida por  $FC = G(RV, S) = RV - S$ , por lo tanto, la región “segura” corresponde a aquellas situaciones en las cuales  $RV \geq S$ , mientras que la región de “falla” está definida por  $RV \leq S$ . La probabilidad de falla de la varilla está definida por  $P_f = P[RV \leq S]$  y puede estimarse utilizando la distribución estadística de FC. Este valor se compara posteriormente con el valor de  $P_d$  para determinar si el diseño cumple con los requisitos de confiabilidad preestablecidos.



**Figura 9: Histogramas de carga para las sollicitaciones sobre la varilla.**

Puesto que  $RV$  y  $S$  dependen de muchas variables aleatorias, la solución analítica para determinar  $FC$  es extremadamente complicada; una solución analítica sólo sería posible mediante un gran número de simplificaciones. Ante esta situación, la simulación utilizando Monte Carlo surge como una muy buena alternativa. En cada paso de la simulación se genera un valor aleatorio asociado a cada variable  $X_i$  y con estos valores se evalúa la función  $FC()$ . Después de un número relevante de simulaciones, los resultados se tabulan en un histograma. Para determinar la probabilidad de falla de la varilla, se llevaron a cabo 10,000 simulaciones (usando el programa M-Star<sup>TM</sup>) con las que se obtuvo una probabilidad de falla estimada de  $P[FC < 0] = 0.00003$  (Figura 10).

En SBRA, el programa Anthill<sup>TM</sup> permite graficar los resultados de la simulación en el plano definido por las variables  $RV$  y  $S$  como se muestra en la ventana 2D de la Figura 11. En la esquina inferior derecha del recuadro (ventana 2D de la Figura 11) se puede observar la función  $FC = G(RV, S) = RV - S = 0$  que divide las regiones “segura” y de “falla”. La probabilidad de falla se calcula como el número de ocurrencias en la región de falla (simulaciones con  $RV \leq S$ ) dividida por el número total de simulaciones (Ecuación 1). En la ventana 2D de la Figura 11 también se puede extraer información visual sobre la interacción entre  $RV$  y  $S$  y, de una forma muy aproximada, sobre la forma de la distribución de  $FC$ ,  $RV$  y  $S$ . Los histogramas para  $FC$ ,  $RV$  y  $S$  que se obtuvieron durante el proceso se muestran en el área de trabajo presentada en la Figura 11.

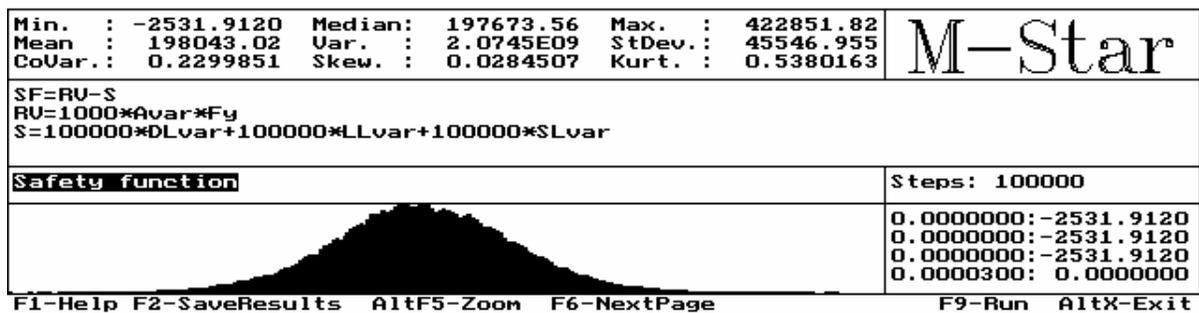


Figura 10: Función de seguridad SF para la varilla calculada con el programa M-Star™.

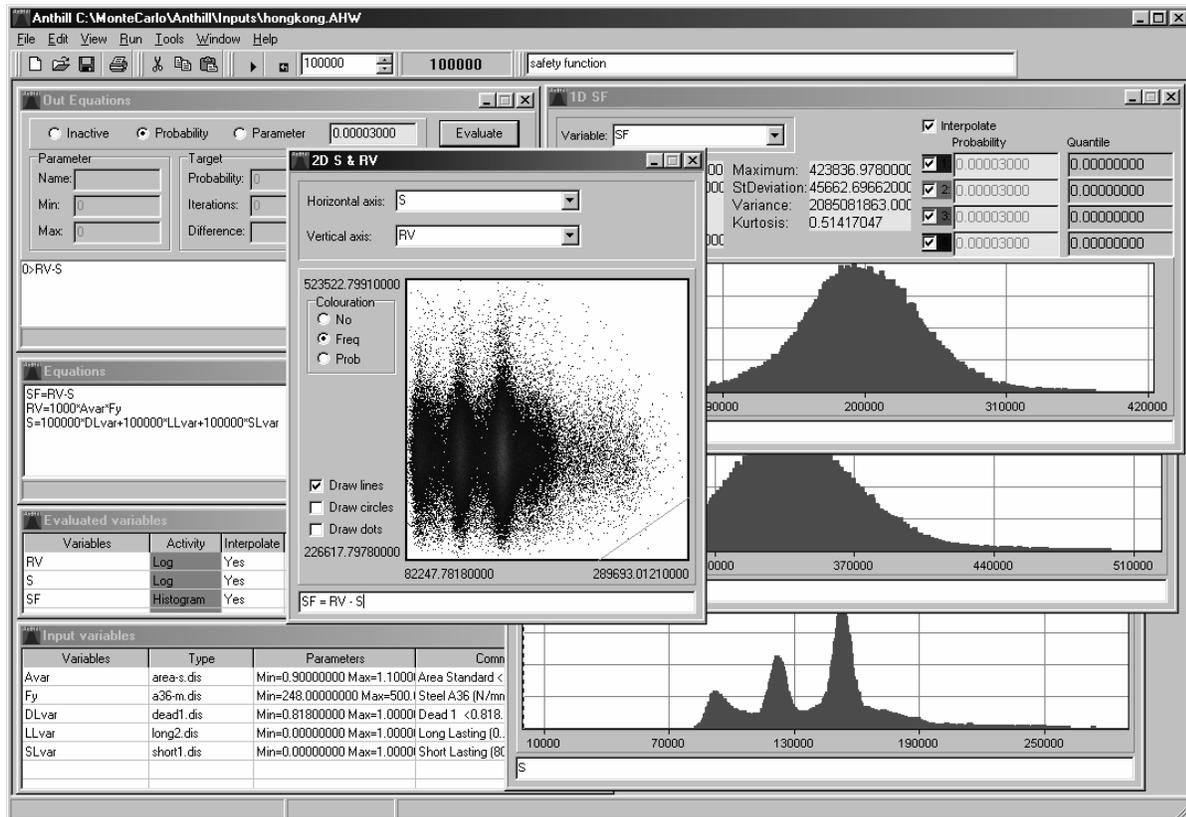


Figura 11. Cálculo de la probabilidad de falla  $P_f$  utilizando el programa Anthill™.

## Ejemplo 2: Revisión de la confiabilidad

Se requiere revisar la seguridad de la viga en voladizo mostrada en la Figura 12. La viga metálica S235 tiene un módulo elástico de sección  $S_{NOM} = 4.42 \times 10^4 \text{ m}^3$  y una sección transversal I-26. Suponga que se han tomado las medidas de arrostramiento necesarias para prevenir el pandeo lateral. El valor de la probabilidad objetivo ha sido definida como  $P_d = 0.00007$ .

La revisión de la seguridad requiere, en primer lugar, definir la función de seguridad:

$$FC = (R_M - Q_M)$$

donde  $R_M$  representa la resistencia a flexión y  $Q_M$  el momento flector en el apoyo. La combinación de carga para la sección crítica de la viga está dada por:

$$Q_M = F_1 L + F_2 L + \frac{wL^2}{2}$$

$$Q_M = (F_1 \times (LL_{var} \times L)) + (F_2 \times (SL_{var} \times L)) + (w \times DL_{var} \times L^2/2)$$

La resistencia de la viga puede expresarse como:

$$R_M = (S_{NOM} \times S_{var})(0.9 F_y)$$

El programa MStar™ se utilizó para evaluar la función de seguridad. En el proceso de evaluación se realizaron 1,000,000 de simulaciones y los resultados se muestran en la Figura 13. El análisis mostró que la probabilidad de falla de la viga es de  $P_f = 0.00001$  la cual es menor que  $P_d = 0.00007$ . Por lo tanto la estructura es segura.

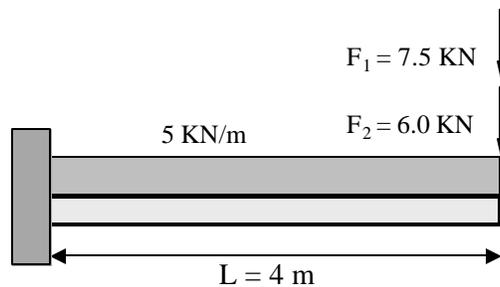


Figura 12: Sección longitudinal de la viga de concreto reforzado (Ejemplo 2).

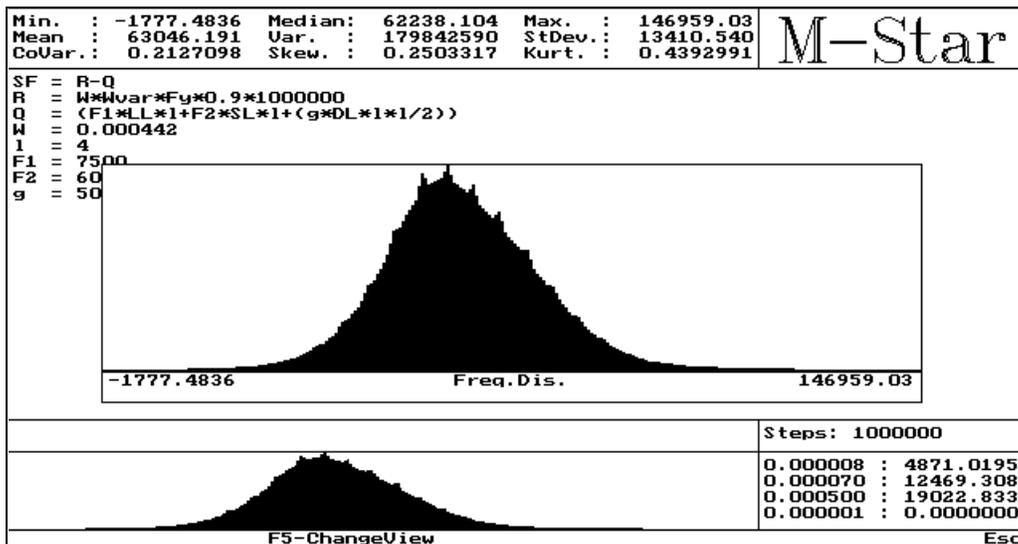


Figura 13: Resultados del análisis de confiabilidad de la viga en voladizo (Ejemplo 2).

## ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD DE SISTEMAS

Las aplicaciones de SBRA en la actualidad están limitadas, con algunas excepciones, al cálculo de la confiabilidad de componentes y sistemas sencillos. La extensión de SBRA al análisis de sistemas complejos está siendo estudiada por Dostal et al. (2001) y los resultados han demostrado que esta tarea es posible y muy prometedora.

Además de que el análisis de sistemas es complejo puesto que se requiere el manejo de enormes cantidades de datos e información, la implementación práctica requiere la solución de un sistema de ecuaciones no-lineales muy grande. La extensión del método descrito en este artículo al análisis de sistemas debe tener en cuenta aspectos como la modelación y análisis de sistemas estáticamente indeterminados, debe incluir alternativas para llevar a cabo análisis estáticos y dinámicos y debe considerar el comportamiento elástico y plástico, entre otros. Además,

para el cálculo de la confiabilidad es necesario identificación los modos fundamentales de falla y los valores de referencia correspondientes.

Aunque es claro que la aplicación de un método como SBRA es significativamente más costoso en términos de tiempo de computador que la aplicación de cualquiera de los métodos determinísticos, para sistemas complejos presenta otras ventajas como la posibilidad de manejar modelos de dependencia difíciles de resolver analíticamente. Desde la perspectiva computacional, existen técnicas de procesamiento en paralelo (Papadrakis, 1999) muy eficientes que colocan la simulación a un nivel competitivo con métodos tradicionales. Esta alternativa es muy promisoría dado que de las técnicas de Monte Carlo no requieren un proceso en serie. Además, la diferencia entre el costo de utilizar SBRA y un análisis determinístico puede reducirse, no solo sacando provecho de los procesadores en paralelo, sino, explotando la estructura del problema. Es en este aspecto en el cual se requiere una revisión del concepto básico y de los procesos de diseño.

## RESUMEN Y CONCLUSIÓN

La práctica de la ingeniería civil necesita alternativas novedosas que le permitan prestar el mejor servicio posible a la sociedad. Para los ingenieros, la transición de una forma de pensamiento determinística a una interpretación completamente probabilística es esencial. Este cambio es importante porque reconoce la incertidumbre y la naturaleza aleatoria de las variables, así como su interacción. Herramientas fáciles de usar como técnicas de simulación asociadas a los grandes desarrollos computacionales son factores que van a permitir en el futuro la fácil evaluación cualitativa de la confiabilidad. Estos modelos permitirán conocer con certeza la participación de cada una de las variables en el comportamiento del sistema y diseñar programas de optimización que permitan tomar decisiones apropiadas que garanticen un balance entre la seguridad y la inversión.

Llevar a la práctica las técnicas de simulación (eg. Monte Carlo), como una herramienta práctica para el diseño, requiere de un proceso de concientización y educación muy importante. Es necesario llevar a cabo seminarios y cursos y desarrollar libros de texto que permitan preparar a los ingenieros para enfrentar problemas de la vida real. Especial énfasis debe dársele a los conceptos que soportan la evaluación probabilística de la confiabilidad estructural ya que se espera el desarrollo de códigos completamente probabilísticos en un futuro próximo.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo brindado a este proyecto por la Grant Agency of the Czech Republic (Proyecto No. 103/01/1410, No.103/096/K034, y 105/01/0783), y por la iniciativa Leonardo da Vinci Agency de la Unión Europea, proyecto piloto No.: CZ/98/1/82502/PI/I.1.1.a/FPI.

## REFERENCIAS

- AISC (1989). Allowable Stress Design Specifications for structural steel buildings. American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois, Estados Unidos.
- AISC (1993). Load and Resistance Factor Design Specifications for structural steel buildings. American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois, Estados Unidos.
- Brozzetti, J., Guštar, M., Ivanyi, M., Kowalczyk, R., Marek, P. y Vaitkevicius, V. (1998-2000). Tereco – Teaching Reliability Concepts using Simulation Technique. Leonardo da Vinci Project No. CZ/98/1/82502/PI/I.1.1.a/FPI, Bruselas, Bélgica.
- CISC (1974). Steel structures for Buildings: Limit States Design. Standar CSA-516.1-1974. Canadian Institute of Steel Construction, Notario, Canadá.
- Dostál, Z., Marek, P., Guštar, M. y Fegan, G. (2001). Issues related to the Application of SBRA in the Reliability Assessment of Structural Systems. ICOSSAR, California, Estados Unidos.
- ENV-1991-1, Eurocode 1 (1993). Basis of design and actions on structures, Part 1: Basis of Design CEN, Bruselas, Bélgica.
- Guštar, M. (2000). Comparison of discrete and piecewise-uniform distribution used for statistical distributions generation in Monte Carlo simulation programs. MCS2000, Monte Carlo, Mónaco.
- Iwankiw, N. AISC, Chicago. Comunicación personal.
- Kahlmeyer, E. (1993). Stahlbau nach DIN 18800 (11.9). Werner-Verlag, Dusseldorf, Alemania.
- León-García, A. (1994). Probability and Random Processes for Electrical Engineering, Addison-Wesley.
- Marek, P., Brozzetti, J. y Guštar, M. (ed.). (2001). Probabilistic Assessment of Structures using Monte Carlo Simulation. Background, Exercises and Software. ITAM CAS Praga, República Chaca.
- Marek, P., Gustar, M. y Anagnos T. (1995). Simulation-based Reliability Assessment for Structural Engineers, CRC Press Inc. Boca Ratón, Florida.

- Marek, P. y Guštar, M. (1993). Anthill Method for Analysis of Multi-Component Variables, Research Report, Department of Civil Engineering, San Jose State University, California, Estados Unidos. Reporte sin publicar.
- Marek, P., Guštar, M. y Anagnos, T. (1995). Simulation-Based Reliability Assessment for Structural Engineers. CRC Press, Boca Raton, Florida, Estados Unidos.
- Marek, P., Guštar, M. y Bathon, L. (1998). Tragwerksbemessung. Von deterministischen zu probabilistischen Verfahren. ACADEMIA Prague.
- Marek, P. y Guštar, M. (2001). [www.itam.cas.cz/SBRA](http://www.itam.cas.cz/SBRA).
- Papadrakakis, M. y Kotsopoulos, A. (1999). Parallel solution methods for stochastic finite element analysis using Monte Carlo simulation, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 168, pp. 305-320.
- Popela, P. (1997). Random numbers generators in technical applications, Grant Agency of the Czech Republic (Projects No. 103/98/0215), reporte sin publicar de investigación.
- Rackwitz, R. (2000). Reliability Analysis – Past, Present and Future. 8<sup>th</sup> ASCE Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability, Universidad de Notre Dame, Indiana, Estados Unidos.
- Sánchez-Silva, M. (2001). Basic concepts in risk analysis and the decision making process. J. Civil Engineering and Environmental Systems, Vol 18, No. 4.
- Sánchez-Silva, M. y Rackwitz, R. (2002). Socio-economic implications of the Life Quality Index in the design of structures to withstand earthquakes. To be published.
- Schuëller, G. I. (ed.). (1997). State of the Art Report of IASSAR on Computational Stochastic Mechanics. Probabilistic Engineering Mechanics, 12 (4), pp. 197-313.
- Schuëller, G. I. (1997). Structural Reliability - Recent Advances . (Keynote) ICOSSAR'97, Kyoto.
- Schuëller, G. I. y Spanos, P. D. (ed.) (2000). Proceedings of MCS2000 – Monte Carlo, MCS2000, Mónaco.

