

# **MODELOS DE PREDICCIÓN DEL DETERIORO EN SISTEMAS DE GESTIÓN DE PUENTES.**

**Juan José Clemente Tirado**

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Pantecnia Consulting, S.L.

Prof. Asoc. ETSICCP Universidad Politécnica de Valencia

[jjclemente@pantecnia.es](mailto:jjclemente@pantecnia.es)

## **Resumen**

La inversión de los diferentes países en las redes de transporte es enorme, incluyendo los puentes como elementos fundamentales y más vulnerables. El mantenimiento del patrimonio de puentes es una actividad que está comenzando a resultar económicamente crítica para los organismos gestores. Los puentes son diseñados para una determinada vida útil y se deterioran inevitablemente con el tiempo. Esto último unido al incremento incesante del peso de los vehículos y el volumen de tráfico, combinados con los recursos limitados destinados a operaciones de reparación y mantenimiento, conllevan a necesidad de establecer Sistemas de Gestión de Puentes (BMS) que ayuden a los gestores a optimizar las estrategias de mantenimiento durante la vida útil de las estructuras. En el presente documento se introducen los conceptos generales de los BMS, describiendo los módulos principales a nivel proyecto y haciendo hincapié en los modelos de predicción del deterioro como elemento fundamental en la optimización de estrategias de mantenimiento.

## **1. Introducción.**

El patrimonio de las vías de comunicación es enorme y los puentes constituyen los elementos más vulnerables de las mismas. Como orden de magnitud, los puentes representan el 2% de la longitud de las vías de comunicación y el 30% de su valor económico. La mayor parte de los puentes de las vías de comunicación en Europa han sido construidos en los últimos 50 años, aunque hay un número considerable de puentes mucho más antiguos que siguen en servicio.

El volumen y sobrecargas de tráfico aumentan incesantemente, sobre todo en vehículos pesados, sobrepasando las cargas para las que fueron diseñadas las estructuras. Otros efectos indirectos de este incremento del tráfico son el número de impactos contra tableros debidos a vehículos que exceden el galibo. El nivel de deterioro es también creciente debido a ambientes más agresivos, como por ejemplo el uso masivo de sales fundentes, así como a la tendencia a la disminución de los recubrimientos.

El mantenimiento de los puentes en un estado aceptable de servicio y seguridad (o fiabilidad) es muy complejo debido a la gran variedad de tipologías estructurales. Aunque la mayor parte de los puentes modernos son de hormigón armado o pretensado, también hay un número significativo de puentes metálicos y mixtos. La mayor parte de los numerosos puentes antiguos que siguen en

servicio son puentes arco de fábrica. Cada tipo estructural se comporta de forma diferente, sufre procesos de degradación diferentes y tiene por tanto necesidades de mantenimiento diferentes.

El incremento del número de estructuras, de su nivel de degradación y de las acciones a las que se ven sometidas, tiene como consecuencia la necesidad de una mayor frecuencia en las operaciones de mantenimiento y reparación, es decir una mayor repercusión económica. Sin embargo los presupuestos destinados al mantenimiento del parque de puentes no aumentan al mismo ritmo, por lo que se convierte en un problema de gran magnitud económica.

Por otra parte, tanto las operaciones de mantenimiento de los puentes como las no intervenciones están ligadas a otros costes indirectos derivados de las mismas: los costes “sociales”. Costes sociales son por ejemplo atascos e interrupciones de tráfico (por reparaciones o restricciones de carga), accidentes, nivel de desarrollo de una región, etc., que pueden llegar a ser económicamente mas relevantes que las propias inversiones en actividades de construcción.

Es necesaria por tanto una planificación sistemática del mantenimiento del patrimonio de los puentes considerando aspectos técnicos y económicos directos e indirectos, a corto y largo plazo y que permita a los gestores determinar el momento y la forma óptima de intervención en un conjunto de puentes, dado un presupuesto disponible. Los sistemas informáticos que permiten tener en cuenta todas estas variables se denominan Sistemas de Gestión de Puentes (*Bridge Management Systems, BMS*).

## **2. Sistemas de Gestión de Puentes.**

En las últimas décadas el número de puentes que requieren mantenimiento ha aumentado considerablemente, al tiempo que se reducen los recursos públicos destinados a dichas operaciones. Ello supone que la gestión del mantenimiento de los puentes debe realizarse en términos económicos además de técnicos, a través de la priorización de las inversiones basada en un análisis coste-beneficio. Para un análisis de este tipo es necesario cuantificar ya no solo aspectos técnicos “directos” derivados del estudio de las diferentes alternativas de inversión sino también indirectos derivados de costes sociales. Además dado que los recursos son escasos, es necesario tratar el problema de la gestión del patrimonio del conjunto de puentes mas que individualmente estructura a estructura.

El análisis coste-beneficio de diversas alternativas de mantenimiento requiere cuantificar factores como el coste de los atascos de tráfico, el ratio de deterioro de los puentes, la eficiencia (o beneficio) de las intervenciones (en incremento de fiabilidad y permanencia temporal), teniendo en cuenta el valor del dinero en el tiempo. Con todo ello es posible optimizar un programa de mantenimiento con el mínimo coste a largo plazo.

El concepto del Coste del Ciclo de Vida (CCV) es fundamental en los Sistemas de Gestión de Puentes. El coste de mantenimiento de un puente debe tener en cuenta no solo los costes originales sino también los costes futuros, que son dependientes de la estrategia de mantenimiento adoptada. Para aplicar este concepto, es necesario evaluar los costes y beneficios obtenidos a lo largo del tiempo para cada alternativa. La variable tiempo se tiene en cuenta a través de la tasa de descuento, que mide el valor actual de una inversión futura. La política mas beneficiosa es aquella que maximiza la diferencia entre los valores descontados de beneficios y costes (los costes incluyen tanto gastos en operaciones de mantenimiento como los sociales).

Si la opción optimizada supera el presupuesto destinado a mantenimiento en un periodo, los BMS deben ser capaces de buscar alternativas, realizando una optimización sometida a restricciones

presupuestarias, calculando a su vez el incremento en los costes a largo plazo y el decremento de la fiabilidad del conjunto de puentes derivados de las restricciones.

La estrategia mas adecuada para la gestión del mantenimiento del patrimonio de puentes es compleja ya que depende de numerosos factores, tanto directos (ej. operaciones de mantenimiento) como indirectos (ej. derivados de atascos e interrupciones de tráfico, que pueden llegar a ser económicamente mas relevantes que las propias inversiones en actividades de construcción). Para realizar una valoración económica es necesario conocer, al menos, las siguientes cuestiones (Brime, 2001) :

- Estado de conservación de las estructuras
- Capacidad de resistencia de las estructuras
- Ratio de Deterioro
- Opciones de mantenimiento disponibles (reparación, refuerzo o sustitución) y su eficiencia a lo largo del tiempo y coste
- Costes de las operaciones de construcción en obras de rehabilitación, refuerzo o sustitución
- Intensidades de tráfico y los costes asociados por atascos y decremento de seguridad vial
- Implicaciones en la seguridad de los usuarios y el tráfico (riesgo) si las obras no son realizadas
- Costes asociados a la gestión del tráfico

Un Sistema de Gestión de Puentes incorpora los siguientes módulos principales:

- Inventario del conjunto de puentes gestionados.
- Conocimiento del estado de conservación del puente y sus diferentes elementos
- Predicción del deterioro del puente y sus elementos.
- Evaluación de la capacidad portante de la estructura en un determinado periodo.
- Evaluación de los riesgos de los usuarios en función de su estado de conservación y su capacidad portante
- Gestión de restricciones operativas y rutas para convoyes de transportes especiales
- Evaluación de los costes de varias estrategias de mantenimiento y su predicción con el tiempo
- Evaluación de los costes indirectos asociados a aspectos socioeconómicos como la seguridad e impacto económico derivados de las restricciones o cortes de tráfico (en función de la importancia del puente)
- Optimización bajo restricciones presupuestarias
- Establecimiento de prioridades de mantenimiento
- Análisis de las inversiones en operaciones de mantenimiento, reparación, rehabilitación y sustitución a corto y largo plazo

Los modelos utilizados en cada uno de los módulos gestionan a su vez numerosas variables de entrada y proporcionan datos de salida que son introducidos en otros modelos. Las interrelaciones entre los diferentes datos de entrada y salida de los módulos son pues, complejas. Los modelos se suelen dividir en modelos a nivel *Proyecto* y modelos a nivel *Red*.

En la Figura 1 se representa un esquema conceptual de un Sistema de Gestión de Puentes, los diferentes módulos que lo componen y sus interrelaciones (Brime, 2001).

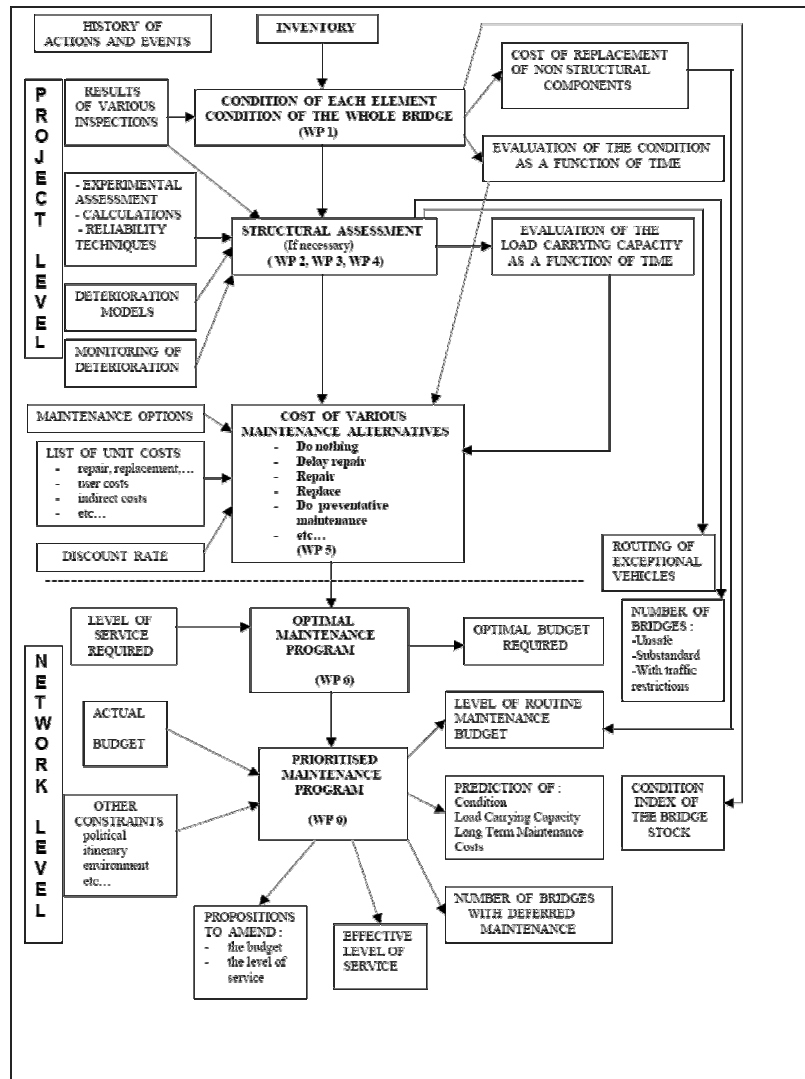


Figura 1. Estructura de un Sistema de Gestión de Puentes (Brime, 2001).

### Nivel Proyecto y Nivel Red.

Los BMS están generalmente estructurados en dos niveles: El nivel Proyecto está relacionado con la gestión técnica de estructuras individuales y el nivel Red, que gestiona el conjunto de puentes de la red y tiene en cuenta aspectos económicos y políticos. Ambos niveles de gestión están íntimamente relacionados.

a) Nivel proyecto. La información a nivel proyecto procede de cada uno de los puentes, elementos o componentes tratados individualmente y es necesaria para las actuaciones específicas en un puente particular. La información obtenida a partir de los módulos de Nivel Proyecto incluye:

- Medida del estado de los componentes y elementos estructurales de cada puente y del puente en general
- Capacidad portante de un puente y sus elementos estructurales mas vulnerables
- Estado actual de deterioro de de los elementos y componentes de un puente a fin de poder realizar predicciones futuras

- Predicción del tiempo en el que se producirá el fallo del puente
- Identificación de los requisitos de mantenimiento de cada puente
- Guía sobre las estrategias y métodos mas efectivos para el mantenimiento
- Programas de trabajos de mantenimiento incluyendo el plazo de ejecución a fin de minimizar los costes de interrupción dentro del marco del Coste del Ciclo de Vida (CCV).

b) Nivel Red. La información a nivel de red se refiere al conjunto del parque de puentes o a subconjuntos del mismo (ej. Determinada región o vía de comunicación, por tipos de estructura, etc.) y es utilizada para la gestión del patrimonio conjunto (planificación de inversiones, estado general de conservación, etc.). La información obtenida a partir de los módulos de Nivel Proyecto incluye:

- Optimización de los programas de mantenimiento (ej. utilizando algoritmos genéticos (Malioka y Onoufriou, 2002), programación dinámica o redes neuronales).
- Priorización de programas de mantenimiento cuando la optimización esta restringida por cuestiones presupuestarias.
- Valores de parámetros indicativos del estado del conjunto de la red de puentes considerada, como por ejemplo: nº de puentes con restricciones de carga en un momento determinado, nº de sustituciones de puentes por año, índice de fiabilidad medio de los puentes en un determinado momento, etc.
- Grado de cumplimiento de los parámetros indicativos del estado frente a unos determinados valores de referencia.
- Presupuesto de mantenimiento necesario para conseguir un determinado nivel de cumplimiento.

En los apartados siguientes se introducen los conceptos fundamentales de los módulos técnicos o de nivel proyecto en un BMS, acentuando en los diferentes modelos de predicción del deterioro como elemento clave en la optimización de estrategias de mantenimiento.

### **3. Evaluación del Estado.**

La aparición de desordenes en los puentes procede de diferentes factores: por una parte el natural proceso de deterioro de los materiales debido al envejecimiento de la estructura y por otra las acciones del tráfico (sobrecargas excesivas, impactos, etc.). El origen de los desordenes en las estructuras de los puentes pueden ser divididos en tres grandes grupos:

- Desordenes procedentes de defectos en el diseño. Incluyen entre otros: escasos recubrimientos, exceso de armadura, ausencia de juntas, diseño defectuoso de la red de drenaje, ASR, problemas geotécnicos, etc.
- Desordenes procedentes de una defectuosa construcción: mala calidad del hormigón, mal vibrado, curado inadecuado, movimientos de la armadura, defectos de inyección en el pretensado, protección superficial inadecuada, inadecuada impermeabilización del tablero, etc.
- Desordenes procedentes de acciones externas. Sobrecargas excesivas, impactos, ataque de cloruros, carbonatación, corrosión de las armaduras activas y pasivas, ciclos hielo/deshielo, bajo mantenimiento, etc.

El deterioro de un puente suele ser una combinación de varios de los factores mencionados, por lo que complica tanto la identificación de las causas de los desordenes como la modelización de la predicción.

Para un funcionamiento efectivo de los BMS es necesario un aporte sistemático de información de calidad sobre las condiciones del puente, coste de los proyectos de mantenimiento, reparación y rehabilitación y su eficiencia a lo largo del tiempo. La obtención de los datos, sobre todo los procedentes de inspecciones, es costosa y en muchas ocasiones no homogénea, lo que supone una merma de calidad en la información que resta rendimiento al sistema. Por ello es necesaria la definición de procedimientos eficaces de inspección que reduzcan el coste y mejoren la calidad de los datos, incluyendo procedimientos estandarizados de inspección visual, ensayos no destructivos y sistemas de adquisición de datos remotos.

### 3.1. Estrategias de Inspección.

Hay diferentes procedimientos y niveles de inspección de puentes (Brime, 2001):

- Inspecciones Superficiales. El objetivo es determinar si aparecen grandes desordenes o defectos en los equipamientos que afecten al servicio. Es realizada de forma rutinaria por personal no necesariamente técnico.
- Inspecciones Generales. Consisten en un examen visual de todas las partes accesibles del puente. Son realizadas de forma periódica (1-3 años) por técnicos con cierta formación en inspección de puentes y su objetivo es la detección de los desordenes visibles y la evaluación de la condición de la estructura.
- Inspecciones Principales. Consisten en un examen visual de todas las partes de la estructura del puente utilizando medios de acceso y equipos específicos si son necesarios. Son realizadas de forma periódica (5-10 años, dependiendo del estado) por ingenieros con experiencia en inspección de puentes y su objetivo es la proporcionar una descripción detallada de los desordenes, la evaluación de la condición de la estructura y recomendaciones de intervención. Puede incluir la adquisición de ciertos datos simples mediante ensayos no destructivos.
- Inspección en Profundidad. Se efectúan en estructuras que vayan a sufrir una intervención de reparación e incluyen la toma de datos exhaustiva in situ y en laboratorio, a fin de determinar la causa del desorden y asegurar una reparación eficaz.
- Inspección Especial. Se efectúan campañas de inspección especial cuando aparece un problema particular detectado en una inspección o que afecta a un grupo de puentes similares. Por ejemplo: estructuras reforzadas con fibras de carbono, cimientos de puentes tras avenidas, estructuras tras sismos, etc.

### 3.2. Evaluación del Estado.

La información procedente de las inspecciones debe permitir la evaluación del estado de las estructuras de los puentes (supervisión del grado y la severidad de los desordenes) a fin de poder ser utilizada en los módulos de optimización de estrategias de mantenimiento. El *estado de conservación* de un determinado elemento es un parámetro cuantitativo obtenido a partir de valores, muchas veces cualitativos (visuales), procedentes de las inspecciones. Se calcula a partir de unos procedimientos estandarizados para cada tipo de elemento, sobre los que bien el técnico inspector otorga una determinada puntuación mas o menos subjetiva al estado del elemento a partir de apreciaciones visuales o ensayos básicos.

A partir del estado de conservación de los elementos individuales, hay varias formas de definir el *estado de conservación* del puente completo:

- Estado de conservación acumulado. Obtenido de la suma de los estados de conservación de los elementos individuales más dañados.
- El estado de conservación del puente se obtiene directamente del elemento en peor estado.
- Utilización de sistemas expertos. Inteligencia artificial: redes neuronales y algoritmos genéticos.

#### **4. Evaluación de la Capacidad Portante.**

El volumen de tráfico pesado y las cargas máximas permitidas aumentan incesantemente. Las redes de carreteras poseen un gran número de puentes antiguos diseñados con criterios diferentes a los actuales en materia de seguridad estructural. Además los puentes están sometidos a un proceso de deterioro inevitable que unido al incremento de las acciones del tráfico y medioambientales los pueden conducir a una pérdida de capacidad portante. Una insuficiente capacidad portante del puente afecta a la seguridad de los usuarios y a los costes asociados a las restricciones del tráfico. Por ello son necesarios métodos fiables, pero no excesivamente conservadores, para evaluar los puentes existentes.

La necesidad de evaluar estructuras existentes puede proceder de diversas situaciones: Cambio de uso anticipado, finalización de su vida útil, chequeo frente a acciones específicas (ej. Sismo), por requerimientos de compañías de seguros y propietarios, observación de una degradación de los materiales, daños estructurales derivados de acciones accidentales, errores en el diseño o construcción, dudas sobre la seguridad estructural, mal funcionamiento en servicio (vibraciones, deformabilidad, etc.).

##### **4.1. Métodos de Evaluación de la Capacidad Portante.**

Los requerimientos de seguridad y servicio para el diseño de nuevas estructuras según el Método de los Estados Límites, basado en criterios semi-probabilísticos, están presentes en la mayor parte de normas y códigos. En la fase de diseño las incertidumbres de los valores de las acciones que las afectan y su comportamiento resistente se reflejan en los correspondientes coeficientes parciales de seguridad.

La evaluación de una estructura existente puede diferir mucho del diseño de una nueva estructura debido a que las incertidumbres mencionadas pueden ser mayores (ej. Degradación) o menores (ensayos de comportamiento de los materiales, geometría, pruebas de carga, monitorización del comportamiento, etc.). Es decir, se puede disponer de mucha mayor información sobre la configuración de la estructura y su comportamiento, que puede ser empleada para actualizar las variables que intervienen en la evaluación de su nivel de seguridad. La evaluación de una estructura existente frente a requerimientos de seguridad y servicio, presentes y futuros, no se debería plantear con los mismos criterios que se utilizan para el dimensionamiento de una estructura similar mediante métodos semiprobabilistas, ya que estos se basan en valores esperados de acciones y resistencias y tienen en cuenta además incertidumbres relacionadas con la ejecución.

Dado que tanto los parámetros que representan las acciones, materiales y geometría (resistencias) están sometidas a incertidumbres, los podemos considerar de forma simplificada como variables aleatorias caracterizadas por unas determinadas funciones de distribución y densidad de probabilidad. De esta forma, el fallo de una estructura o elemento estructural es un evento probabilístico con una probabilidad de ocurrencia (probabilidad de fallo)  $p_f$ , que viene determinada por la probabilidad de que se cumpla un determinado requerimiento (ej. un estado límite).

Las técnicas de fiabilidad constituyen una herramienta que nos proporciona una base objetiva a la hora de tomar una decisión sobre el nivel de seguridad de la estructura que se está analizando ya que nos permite tener en cuenta en el análisis la información actualizada de las variables que intervienen en el proceso de evaluación.

Existen diversos métodos para cuantificar el nivel de seguridad de una estructura (llámese también capacidad portante, índice de fiabilidad o índice de capacidad) o elemento estructural existente:

- Nivel I. Uso de valores nominales de los parámetros más significativos y coeficientes de seguridad, previamente calibrados con métodos probabilistas más o menos simplificados, que cubren su posible variabilidad. Es el método utilizado en las diferentes Normas y Códigos de carácter semiprobabilista a través de los coeficientes parciales de seguridad. Su uso en la evaluación de estructuras existentes con los coeficientes parciales de seguridad calibrados para el diseño de nuevas estructuras puede conllevar resultados excesivamente conservadores y la reducción de dichos coeficientes no está regulada (salvo el Reino Unido donde existe la normativa específica BD/21). No obstante son de uso común en primeras evaluaciones y si el puente no supera la evaluación se pueden emplear los métodos probabilistas que se indican a continuación.
- Nivel II. Las variables más representativas se tratan como variables aleatorias, con unas distribuciones de probabilidad simplificadas (Ej. Normal). El nivel de seguridad de la estructura o elemento estructural se cuantifica a partir de una probabilidad de fallo calculada a través de simplificaciones y métodos aproximados como el FORM y SORM.
- Nivel III. Todas las variables que intervienen en la evaluación de la estructura se consideran variables aleatorias. El nivel de seguridad se cuantifica a través de su probabilidad de Fallo, calculada de forma “exacta” mediante técnicas de integración numérica (IN) o MonteCarlo a partir de funciones de densidad de probabilidad muy aproximadas a la realidad.

#### 4.2. Técnicas de Fiabilidad.

El análisis de fiabilidad de estructuras se puede utilizar en diversos contextos: estimación de la fiabilidad de una nueva estructura como alternativa al diseño basado en los métodos de Nivel I, estimación de la fiabilidad de una estructura existente y como estimación de la probabilidad de supervivencia en un periodo de tiempo dado. En los dos primeros casos, el análisis se basa en el modelo capacidad-demanda R-S, es decir, partiendo de los principios del análisis mediante estados límite, de forma general, en la evaluación del comportamiento de una estructura o elemento estructural se considera una respuesta resistente de la misma ( $R$ ) frente a unas determinadas sollicitaciones ( $S$ ). Podemos “medir” nuestro nivel de seguridad o la verificación del estado límite a través de la expresión  $g = R - S > 0$ , donde  $g = 0$  es la denominada ecuación del estado límite que estemos considerando.

Dado que tanto los parámetros que representan las acciones, materiales y geometría están sometidas a incertidumbres, los podemos considerar de forma simplificada como variables aleatorias caracterizadas por unas determinadas funciones de distribución y densidad de probabilidad.

De esta forma, el fallo de una estructura es un evento probabilístico con una probabilidad de ocurrencia (probabilidad de fallo)  $p_f$ , que viene determinada por la probabilidad de que  $S$  sea mayor que  $R$ :

$$p_f = \text{prob}\{(R - S) < 0\} = \text{prob}\{g < 0\}$$

donde,  $S$  y  $R$  son variables aleatorias asociadas con las solicitaciones y resistencias o respuesta de la estructura respectivamente y  $g = R - S$  es la función del estado límite que se esté considerando,  $g \leq 0$  corresponde al estado de fallo y  $g > 0$  al estado seguro ( $g = 0$  es la denominada función o superficie de fallo o del estado límite).

Dado que  $R$  y  $S$  son en realidad funciones de otras variables aleatorias básicas  $X_i$ , la probabilidad de fallo también puede expresarse como:

$$p_f = \text{prob}\{g(X_1, X_2, \dots, X_n) < 0\}$$

Si una variable aleatoria  $X_i$  la caracterizamos mediante una función de distribución  $F_{X_i}(s)$ , que representa la probabilidad de que  $X_i$  sea menor o igual que un determinado valor  $s$ , y una función de densidad de probabilidad (si la tiene)  $f_{X_i}(s)$ , definidas como:

$$F_{X_i} = \text{prob}\{X_i \leq s\} \quad f_{X_i}(s) = \frac{d}{ds} F_{X_i}(s)$$

la probabilidad de fallo, se puede expresar entonces como la integral volumétrica extendida al dominio de fallo  $g \leq 0$ :

$$p_f = \int_{g(X_i) \leq 0} dF_{X_i}(s) = \int_{g(X_i) \leq 0} f_{X_i}(s) ds$$

La resolución de esta integral de forma numérica para funciones  $g(X_i)$  complejas requiere un gran esfuerzo computacional. Se han desarrollado técnicas específicas, bien analíticas o numéricas (FORM – *First Order Reliability Method*, SORM – *Second Order Reliability Method*, Integración numérica de la función límite, técnicas de MonteCarlo, DARS, etc.).

Es decir, desde un enfoque probabilista, para el cálculo de  $p_f$ , se necesita en primer lugar conocer las funciones de densidad de probabilidad que representen las incertidumbres de las variables  $X_i$  y en segundo lugar calcular la probabilidad de fallo mediante alguno de las técnicas mencionadas.

Una vez realizado el análisis probabilística, la evaluación del nivel de seguridad de la estructura o parte de ella se puede expresar:

$$p_f = \text{prob}\{g(X_1, X_2, \dots, X_n) < 0\} < p_{f,adm}$$

donde  $p_{f,adm}$  es el valor admisible de la probabilidad de fallo.

La fiabilidad de una estructura o probabilidad de supervivencia  $p_s$  respecto a un determinado estado límite es el complementario de la  $p_f$ :

$$p_s = 1 - p_f$$

El *índice de fiabilidad*  $\beta$ , relacionado con la  $p_f$  es el valor estándar con el que se mide la fiabilidad en los métodos de Nivel II, y se define como:

$$\beta = -\Phi^{-1}(p_f) = \Phi^{-1}(p_s) \quad \text{o bien} \quad p_f = \Phi(-\beta)$$

donde  $\Phi$  es la inversa de la distribución Normal.

## **5. Modelización de las Estructuras Deterioradas.**

En un sistema de gestión de puentes es necesario conocer el nivel de seguridad de una estructura (llámese también capacidad portante, índice de fiabilidad o índice de capacidad) sometida a un cierto nivel de deterioro, tanto actual como futuro. Es importante diferenciar entre el estado de deterioro de un puente y el efecto de dicho deterioro en la capacidad portante. Un puente puede tener un alto grado de deterioro y sin embargo no sufrir una disminución de la capacidad portante significativa. Por contra un puente con un bajo nivel de deterioro (ej. Corrosión localizada de un tendón de pretensado) puede tener muy mermada su capacidad portante.

Es necesario por tanto conocer la influencia de las diferentes formas de deterioro en la evaluación de la capacidad portante de los puentes. En general, hay muy pocos procedimientos específicos disponibles. Los métodos generales utilizados para la mayor parte de formas de deterioro son:

- Reducción del área de la sección transversal. El método más común para determinar la resistencia de una estructura deteriorada es considerar únicamente las propiedades del material sano, mediante medición directa o ensayos no destructivos (END).
- Factor de Estado. Cuando las mediciones no sean posibles o aparezcan incertidumbres en la determinación de la resistencia, se puede utilizar un *factor de estado* para determinar la reducción de la resistencia. Su valor está basado en el juicio del ingeniero, y es por tanto un método altamente subjetivo que se puede usar como aproximación cuando no existen otros datos.
- Modificación de las propiedades del Hormigón. Se pueden obtener datos sobre la resistencia del hormigón a través de extracciones de testigos y END. En la evaluación de una estructura de hormigón se utilizan diversas propiedades del mismo a fin de verificar su comportamiento frente a diferentes estados límite, obtenidas a partir de la resistencia a compresión simple. En un hormigón deteriorado estas relaciones entre propiedades del hormigón pueden no ser aceptables, por lo que es necesaria la medición de las mismas directamente mediante ensayos específicos.
- Modificación de las propiedades del Acero. La corrosión del acero puede ser tenida en cuenta mediante la reducción del área de la sección transversal. No hay referencias de modificación de la relación  $\sigma$ - $\epsilon$ , sin embargo la corrosión puede afectar a la ductilidad y las propiedades de fatiga del hormigón armado.
- Modificación de la Adherencia. En general, la corrosión reduce la adherencia y la ductilidad. Hay diversas formulaciones que relacionan la adherencia y el grado de corrosión.
- Modificación del Comportamiento estructural. Cuando el nivel de deterioro de una estructura es alto, los mecanismos de resistencia de una estructura pueden verse modificados. Es necesaria la consideración de estos efectos en el análisis estructural.
- Esfuerzos Adicionales. Algunas formas de deterioro pueden suponer la aparición de tensiones en la estructura (ej. expansión por ASR coaccionada por la armadura o restricciones externas) que deben ser tomadas en cuenta a la hora de evaluar la estructura.

La evaluación de estructuras existentes deterioradas es compleja y altamente dependiente de la experiencia del ingeniero y de la información disponible obtenida a través de una investigación detallada in situ y por tanto costosa. Por ello solo se utiliza en casos en los que existe un considerable nivel de deterioro que se presume afecta sensiblemente a la capacidad portante. La aplicación de los métodos expuestos para cada forma específica de deterioro y su introducción en los diferentes modelos de resistencia se puede consultar en (Brime D11, 2001) y en el proyecto europeo Contecvet.

## **6. Predicción del Deterioro.**

El deterioro de una estructura es un proceso natural inevitable. Los efectos en un puente pueden ser los siguientes: reducción de la capacidad portante, reducción de la vida útil, incremento de las restricciones de tráfico, disminución de la seguridad de los usuarios (ej. desprendimientos de material), afección a la estética, etc. Estos efectos pueden ser mas o menos importantes en función del tipo de puente, ubicación e importancia estructural del elemento que se deteriora.

Un parte fundamental en un BMS es la predicción del estado de conservación o grado de deterioro del puente o sus elementos en un determinado con vistas a la planificación y optimización de las estrategias de mantenimiento. Los costes de mantenimiento o intervención en una estructura son altamente dependientes del tiempo en el que se efectúan, por lo que el conocimiento del *ratio de deterioro* permite al gestor evaluar el momento mas oportuno para la intervención. Intervenciones realizadas en momentos diferentes al óptimo (ej. demasiado pronto o demasiado tarde) pueden tener mayor repercusión económica por dos motivos:

- En el cálculo del coste del ciclo de vida de una estructura, los costes de mantenimiento presentan una reducción de factor  $(1.06)^{-n}$  para calcular el Valor Actual Neto (VAN), donde 1.06 representa una tasa de descuento del 6% y  $n$  es la edad del puente en la que se realiza la intervención de mantenimiento.
- Los costes de una intervención aumentan desproporcionadamente con el nivel de deterioro de una estructura; además los costes asociados a interrupciones de tráfico asociadas con los trabajos de reparación suelen incrementarse con la envergadura de los mismos.

En el estado actual del conocimiento, no es posible mas que estimar el ratio de deterioro de una estructura o elemento, por lo que la determinación del momento óptimo de intervención solo puede ser determinado aproximadamente. No obstante las consecuencias de una intervención excesivamente tardía parecen mas onerosas que las de una intervención demasiado pronta. Las intervenciones pueden realizarse en periodos diferentes del óptimo también por motivos operativos, entre otros: Limitaciones presupuestarias, intervenciones antes de tiempo en un conjunto de puentes de una determinada carretera para concentrar las interrupciones de tráfico, etc.

El nivel de mantenimiento es otro factor que influye en el ratio de deterioro de los puentes por dos motivos: (1) reduce el gradiente del ratio de deterioro y (2) mejora el estado de conservación. El mantenimiento preventivo se centra en el primer motivo mientras que las intervenciones de reparación, rehabilitación o refuerzo producen ambos efectos.

### **6.1. Modelos de Deterioro.**

Es difícil generalizar el ratio de deterioro de los puentes o sus elementos estructurales ya que, además de las numerosas tipologías y composición de materiales constructivos, están sometidos a diferentes macro/microclimas y condiciones de construcción (curado, recubrimientos, A/C, etc.). Por otro lado están los diferentes tipos de deterioro de los materiales (cloruros, corrosión, carbonatación, hielo/deshielo, ASR, sulfatos, etc.) así como su interacción y efectos en la capacidad resistente de la estructura.

Los modelos de deterioro físico de los diferentes elementos estructurales que conforman el puente, deben tener en cuenta las incertidumbres de los procesos de deterioro dependientes del tiempo, así como sus consecuencias en la fiabilidad estructural del mismo. De forma genérica y con vistas a la implementación en un BMS, el deterioro de una estructura es un proceso dependiente del tiempo

que puede ser modelizado matemáticamente de diversas formas (Van Noortwijk, 1998): (1) Función del ratio de fallo, (2) modelo Markoviano, (3) proceso estocástico o (4) índice de fiabilidad dependiente del tiempo.

#### 6.1.1. Función del Ratio de Fallo.

Una función de distribución de la vida de un elemento o estructura representa la incertidumbre sobre el tiempo de fallo de la misma. Si dicha función de distribución de probabilidad  $F(t)$  tiene una función de densidad de probabilidad  $f(t)$ , la función del ratio de fallo  $r(t)$  se define (Barlow y Proschan, 1965) como:

$$r(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{F(t)}$$

donde  $r(t)dt$  representa la probabilidad de que un elemento de edad  $t$  falle en el intervalo  $[t, t+dt]$ . En una estructura, el ratio de fallo se incrementa con el tiempo, pasando por diferentes estados de degradación sobre los que nos interesa obtener información. Por ello, un modelo de estas características no es interesante en un entorno de gestión de estructuras puesto que solo es capaz de ofrecernos un dato: el valor de la probabilidad de fallo, es decir si falla o no falla de acuerdo con unos objetivos preestablecidos.

#### 6.1.2. Modelo de deterioro basado en un Proceso Estocástico.

Otra forma de tener en cuenta las incertidumbres en los procesos de deterioro dependientes del tiempo es considerarlo como un proceso estocástico (Van Noortwijk, 1998). Procesos estocásticos utilizados en modelización del deterioro son el proceso Gaussiano y el proceso Gamma. Un proceso Gamma es un proceso estocástico con incrementos independientes, no negativos, representados por una función de distribución Gamma. Conceptualmente se ajusta bien al proceso de deterioro de una estructura que aumenta con el tiempo en una dirección, frente a otros como el Gaussiano (basado en el movimiento Browniano) en el que la resistencia de la estructura con el tiempo aumenta y disminuye alternativamente.

La ventaja de los procesos Gamma de deterioro es que la modelización de las inspecciones in situ es bastante natural, ya que los resultados obtenidos de las mismas consisten generalmente en mediciones de incrementos de deterioro. Información mas detallada sobre los procesos estocásticos se puede encontrar en el modelo del Rijkswaterstaat (Van Noortwijk, 1998 y Bakker, et al, 1999) donde el envejecimiento está modelizado mediante un proceso gamma de deterioro.

#### 6.1.3. Modelo de deterioro basado en el índice de fiabilidad dependiente del tiempo.

Según Frangopol y Das (Frangopol y Das, 1999) la mayoría de intervenciones depende fundamentalmente de una disminución de la capacidad portante del puente (sistema), mas que de su estado de conservación o nivel de deterioro de elementos independientes del mismo. La capacidad portante del puente, entendida en términos de *índice de fiabilidad* puede ser por tanto el parámetro que nos defina el ratio de deterioro del puente.

El perfil de fiabilidad  $\beta(t)$  se define como la variación del índice de fiabilidad con el tiempo (Thoft-Christensen, 1996). Puentes similares diseñados y construidos en idénticas condiciones poseen diferentes índices de fiabilidad con el paso del tiempo (Frangopol y Das, 1999). Ello es debido a varios factores que pueden ser modelizados como variables aleatorias. Las ocho variables aleatorias

que afectan al perfil de fiabilidad de un puente o conjunto homogéneo de puentes se muestran en la Figura 2 (Frangopol *et al*, 2001) y son las siguientes:

- Índice de fiabilidad inicial,  $\beta_0$
- Tiempo de inicio del deterioro,  $t_I$
- Ratio de deterioro del índice de fiabilidad sin mantenimiento,  $\alpha$
- Tiempo de aplicación de la primera intervención preventiva de mantenimiento,  $t_{PI}$
- Tiempo de reaplicación de la intervención preventiva de mantenimiento,  $t_P$
- Duración del efecto de la intervención preventiva de mantenimiento en el índice de fiabilidad,  $t_{PD}$
- Ratio de deterioro del índice de fiabilidad en periodos de mantenimiento preventivo,  $\theta$
- Incremento del índice de fiabilidad al realizar una intervención de mantenimiento,  $\gamma$

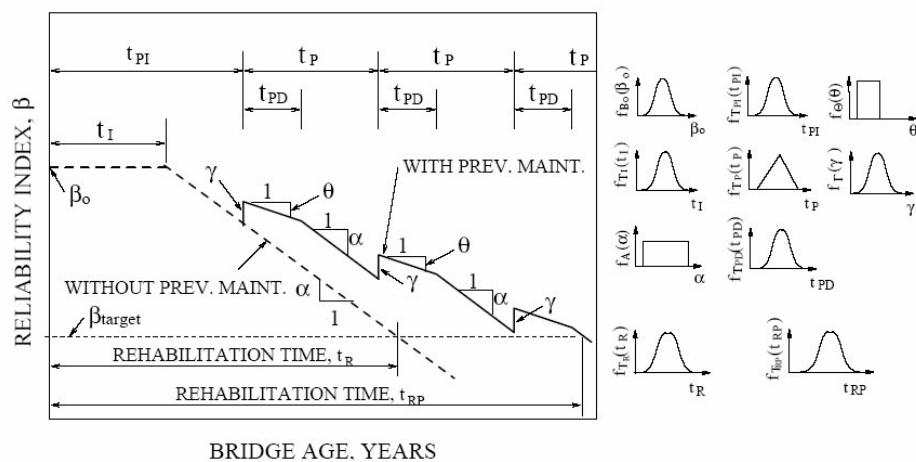


Figura 2. Perfiles de Fiabilidad y variables aleatorias asociadas para los casos con y sin mantenimiento preventivo. (Frangopol *et al*, 2001).

Las funciones de densidad de probabilidad de las variables aleatorias  $\beta_0$ ,  $t_I$ ,  $\alpha$ ,  $t_{PI}$ ,  $t_P$ ,  $t_{PD}$ ,  $\theta$  y  $\gamma$ ; para un grupo de puentes mixtos se puede encontrar en (Frangopol *et al*, 2001). El método de simulación de MonteCarlo es utilizado para generar conjuntos aleatorios a partir de las funciones de densidad de probabilidad de las ocho variables aleatorias y tener en cuenta la propagación de las incertidumbres durante la vida de las estructuras.

La gestión basada en criterios de fiabilidad representa el futuro de los modelos de predicción en los BMS. Su principal ventaja es que se basa directamente en el índice de fiabilidad (o capacidad portante) del puente, lo que facilita en gran medida la adopción de criterios directos de intervención y vida útil. Por el contrario es un método complejo en el que los efectos de las intervenciones de mantenimiento son difíciles de estimar.

#### 6.1.4. Modelo de deterioro Markoviano.

Asumen que la condición de un elemento o estructura puede ser definida en términos de un número determinado de *estados de conservación*, de tal forma que el condición del siguiente estado o intervalo solo depende de la condición del estado anterior y de la acción a realizar, y de ninguna otra variable mas, incluido el tiempo. Unas probabilidades de transición enlazan el estado actual con una determinada intervención o nivel de mantenimiento con un estado futuro y pueden ser entendidas como el *ratio de deterioro* del elemento. La probabilidad de transición se define como la

probabilidad de que un determinado componente estructural cambie de un estado de conservación a otro (el mismo o peor), dependiendo de la acción de mantenimiento (incluyendo la opción de no realizar ninguna acción). Una propiedad de las cadenas de Markov es que la probabilidad de paso hacia otro estado (aumento del deterioro) no depende del historial del proceso, sino de la condición y acción previa. El tiempo de transición de un estado a otro puede tener una determinada distribución de probabilidad.

Su gran ventaja es que expresa sus predicciones de la misma forma en la que normalmente que se realizan las inspecciones en una estructura, ya que al estar basado en unos determinados estados de conservación es fácilmente adaptable a los datos procedentes de una inspección visual y permite incorporar nuevas inspecciones.

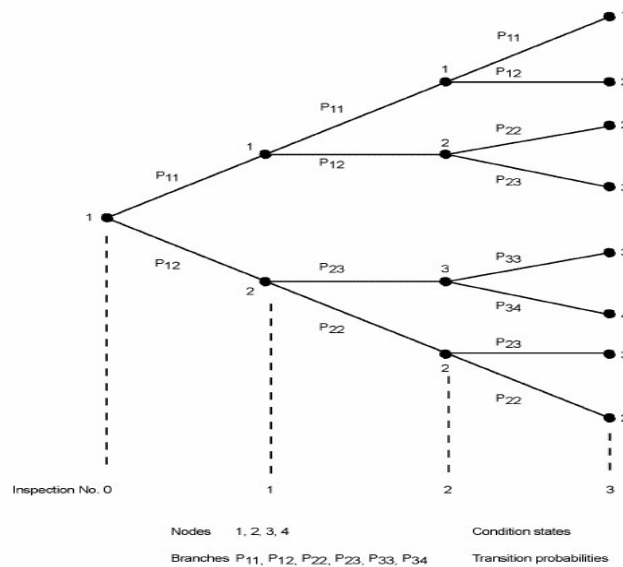


Figura 3. Diagrama de modelo de deterioro basado en una Cadena de Markov. Los nudos (1,2,3,...) representan los estados de conservación y las ramas ( $p_{11}, p_{12}, \dots$ ) representan las probabilidades de transición. (Brime, 2001).

Un diagrama del tipo de la Figura 3 puede ser utilizado para determinar la probabilidad de encontrarse en un estado determinado en un momento determinado (ej. la probabilidad de estar en el estado 2 en la segunda inspección es:  $p_{11}p_{12}+p_{12}p_{22}$ ) y para determinar el estado de conservación medio de la red en un momento determinado (ej. el estado de conservación medio  $C_m$  en la segunda inspección es:  $C_m=p_{11}^2+2(p_{11}p_{12}+p_{12}p_{22})+3p_{12}p_{23}$ ).

El procedimiento para determinar las probabilidades de transición es el siguiente (Brime, 2001):

- Agrupación de todos los elementos estructurales de similares características (tipología constructiva, material, medio ambiente, etc.) en un determinado número de grupos.
- Para cada grupo de elementos, y a partir de los estados de conservación de cada uno de sus miembros obtenidos durante las inspecciones, determinar la función que mejor ajuste la variación de estado medio de conservación con el tiempo (F).
- A partir del modelo de cadenas de Markov se determina el estado de conservación medio para diferentes edades, en función de unas probabilidades de transición (PT).
- Utilizando técnicas de optimización se encuentra el conjunto de probabilidades de transición que minimicen las diferencias entre F y PT para intervalos temporales específicos.

Las probabilidades de transición así ajustadas representan una buena aproximación al ratio de deterioro de un determinado grupo de elementos similares, y están basadas en el resultado de las inspecciones realizadas a elementos con diferentes edades. A partir del estado de conservación de un determinado elemento individual en un momento dado (edad) y las probabilidades de transición óptimas relacionadas con esa edad, se puede realizar la predicción de su estado futuro. En esencia, un modelo markoviano de deterioro determina el ratio de deterioro de un grupo de elementos de similares características y lo aplica a un elemento concreto del que se conoce su estado de conservación para predecir su cambio de estado con el tiempo. Este modelo está descrito con más detalle en (Vassie, 1998).

El modelo de deterioro markoviano es el más utilizado en los grandes BMS como el Pontis (Thompson, 1993) o el Bridgit (Lipkus, 1993). También es muy utilizado como modelo de predicción en la mayoría de los sistemas de gestión de pavimentos. El sistema Pontis utiliza la programación lineal markoviana para optimizar la estrategia de costes de mantenimiento de conjuntos de elementos comunes de los puentes, previamente definidos denominados “*CoRe elements*”.

Las limitaciones de este modelo, según (Frangopol y Das, 1999) y (Frangopol *et al.*, 2001), son las siguientes: (1) el deterioro de un elemento está basado en apreciaciones fundamentalmente cualitativas (visuales), (2) el grado de deterioro se representa como una función de valores discretos (estados), (3) la predicción del deterioro solo depende del estado de deterioro actual y no del historial previo y (4) el deterioro del sistema o del puente (entendido como conjunto de elementos) no está considerado explícitamente.

## 6.2. Comparación de los modelos.

La comparación entre los modelos de deterioro se puede resumir en términos de capacidad portante o índice de fiabilidad a través de la siguiente expresión (Van Noortwijk y Frangopol, 2004), donde,  $r_0$  es la resistencia (estado de deterioro) inicial,  $R(t)$  es la resistencia en el momento  $t$ ,  $S(t)$  es la sollicitación en el momento  $t$  y  $X(t)$  es la cantidad acumulada de deterioro en  $t$ . Obviamente  $R(t) = r_0 - X(t)$ :

$$\beta(t) = -\Phi(F(t)) = -\Phi^{-1}\left(\Pr \text{ob} \left\{ \min_{0 \leq u \leq t} R(u) - S(u) < 0 \right\}\right)$$

Los modelos basados en el ratio de fallo están basados en  $F(t)$ , la función de distribución de probabilidad que representa la incertidumbre sobre el tiempo de fallo de la estructura, definida anteriormente. Los modelos markovianos están basados en diferentes estados de conservación  $R(t)$ , definidos de forma discreta y sus probabilidades de transición que determinan su variación en el tiempo. Los procesos estocásticos de deterioro modelizan las incertidumbres de  $X(t)$ . Finalmente, los modelos de deterioro basados en el índice de fiabilidad dependiente del tiempo se centran en  $\beta(t)$ .

## 7. Referencias.

Bakker, J.D., H.J. van der Graaf, and J.M. van Noortwijk (1999). Model of lifetime-Extending Maintenance. In M.C. Forde, editor, *Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Structural Faults and Repair, London, United Kingdom, 1999*. Edinburgh: Engineering Technics Press.

Barlow, R.E., and F. Proschan (1965). *Mathematical Theory of Reliability*. New York: John Wiley and Sons.

BRIME Project (Bridge Management in Europe), Deliverable D14, - Final Report. Contract No.: RO-97-SC.2220 (2001).

Contecvet: EC Innovation Programme IN309021: *A validated User's Manual for assessing the residual life of concrete structures*. The basic objective of this project was to scale up for industrial use, the innovative results from BRITE-EURAM 4062.

Frangopol, D.M., and P.C. Das (1999). Management of bridge stocks based on future reliability and maintenance costs. *Bridge Design, Construction, and Maintenance*, Institution of Civil Engineers, Thomas Telford, London, 45-58.

Frangopol, D.M., J.S. Kong, and E.S. Gharaibeh (2001). *Reliability-based life-cycle management of highway bridges*. *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 15, No. 1, 27-34.

Frangopol, D.M., E. Brühwiler, M.H. Faber, and B. Adey, editors, *Life-Cycle Performance of Deteriorating Structures: Assessment, Design and Management*, pages 384-391. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers (ASCE), 2004.

Lipkus, S. E. 1993. NCHRP project 12-28(2)A: *bridge management system software*. In *Computing and building engineering: proceedings of the Fifth International Conference (V-ICCCBE), Anaheim, California, June 7-9, 1993*, ed. L. F. Cohn, 1049-1056. New York, NY: American Society of Civil Engineers.

Malioka, V., Onoufriou, T.: Bridge Management and Maintenance Planning Optimisation Using Genetic Algorithms. First International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management IABMAS 2002. Barcelona, 14-17 July, 2002

Sarja, A., and E. Vesikari. Performance Systematics and Methodology for Lifetime Maintenance and Repair Planning of Structures. LIFECON Deliverable D2.1A-E draft 2. June 2002.

Thoft-Christensen (1996). *Reliability profiles for concrete bridges*. In D.M. Frangopol and G. Hearn, editors, *Structural Reliability in Bridge Engineering*, McGraw-Hill, New York, 239-244.

Thompson, P. D. 1993. Pontis bridge management system. In *Proceedings, Pacific Rim TransTech Conference, July 25-28, 1993, Washington State Convention Center, Seattle, Washington, USA*, ed. W. P. Carr, 500-506, vol. 2. New York, NY: American Society of Civil Engineers.

Thompson, P. D. 1993. Pontis: *the maturing of bridge management systems in the USA*. In *Bridge management 2: inspection, maintenance assessment and repair*, ed. J. E. Harding, G. A. R. Parke, and M. J. Ryall, 971-978. London: T. Telford.

Van Noortwijk, J.M. (1998). *Optimal replacement decisions for structures under stochastic deterioration*. In A.S. Nowak, editor, *Proceedings of the Eighth IFIPWG 7.5 Working Conference on Reliability and Optimization of Structural Systems, Kraków, Poland, 1998*, University of Michigan, Ann Arbor, 273-280.

Van Noortwijk, J.M. y Frangopol, D.M. "Deterioration and maintenance models for insuring safety of civil infrastructures at lowest life-cycle cost". Published in D.M. Frangopol, E. Brühwiler, M.H. Faber, and B. Adey, editors, *Life-Cycle Performance of Deteriorating Structures: Assessment, Design and Management*, pages 384-391. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers (ASCE), 2004.

Vassie P R (1998). *Whole life costing of maintenance options*. Papers, The Management of Highway Structures, 22-23 June.

## **8. Bibliografía Extendida.**

### **8.1. Referencias generales sobre los Sistemas BMS**

American Association of State Highway and Transportation Officials. 1993. Guidelines for bridge management systems. Washington, DC: AASHTO.

Aylon, N. 1993. Bridge management systems in the information era. In 1993 TAC Annual Conference Proceedings, Ottawa, Ontario, B73-B90, vol. 2. Ottawa, Ontario: TAC.

Bridge management system detects fatigue cracks. 1992. *Better Roads* 62 (9):24-25.

Cesare, M. J. C. Santamaria, C. J. Turkstra, E. Vanmarcke. 1994. Risk-based bridge management: optimization and inspection scheduling. *Canadian Journal of Civil Engineering* 21 (6):897-902.

Chase, Steven B. 1995. Research needs for bridge management. In *Restructuring--America and beyond: proceedings of Structures Congress XIII*, Boston, MA, April 2-5, 1995, ed. M. Sanayei, 670-671, vol. 1. New York, NY: American Society of Civil Engineers.

Engineering Foundation. 1990. *Managing America's aging bridge system: issues and directions*: Sheraton Palm Coast, Palm Coast, Florida, November 11-15, 1989: proceedings. New York, NY: United Engineering Trustees, Inc.

Glagola, D. M. and W. T. Scherer. 1992. Development of a bridge performance prediction model as a rational basis for a structures management system. Charlottesville, VA: University of Virginia, Department of Civil Engineering.

Gordon, S. and D. O'Connor. 1992. Bridge management, evaluation, and rehabilitation: a survey of current practice. In *Bridge rehabilitation: proceedings of the 3rd International Workshop on Bridge Rehabilitation*, June 14-17, 1992, ed. G. Konig, and A. S. Nowak, 79-88. Berlin: Ernst & Sohn.

Gralund, M. S. and J. A. Puckett. 1993. Bridge management at the local government level. Laramie, WY: Mountain-Plains Consortium.

Grivas, D. A. and B. C. Schultz. 1994. Integration of pavement and bridge management systems: a case study. *Proceedings of the Third International Conference on Managing Pavements*, 22-28, vol. 1. Washington, DC: Transportation Research Board.

Hearn, G. and D. M. Frangopol, and M. Chakravorty. 1994. Structures Congress XII: proceedings of papers presented at the Structures Congress '94, Atlanta, GA, April 24-28, 1994, 290-295. New York, NY: American Society of Civil Engineers.

\*Hearn, G. 1995. Structural engineering applications in bridge management systems. In *Restructuring--America and beyond: proceedings of Structures Congress XIII*, Boston, MA, April 2-5, 1995, ed. M. Sanayei, 672-673, vol. 1. New York, NY: American Society of Civil Engineers.

Hudson, R. W., R. F. Carmichael, S. W. Hudson, M. A. Diaz, and L. O. Moser. 1993. Microcomputer bridge management system. *Journal of Transportation Engineering* 119 (1):59-76.

Hulsey, J. L., P. A. Koushki, and L. Raad. 1992. Revisiting management information systems for the allocation of funds for highway activities/projects/maintenance. Seattle, WA: Transportation Northwest (TransNow), Department of Civil Engineering, University of Washington.

Ismart, D. 1994. State management systems: overview of ISTE requirements and current implementation. *TRNews* 173:2,4.

James, R. W., G. Stukhart, A. Garcia-Diaz, R. Bligh, and J. Sobanjo. 1991. Analytical approach to the development of a bridge management system. *Transportation Research Record* 1290:157-170.

Kaderbek, S. L. 1994. What a bridge management system can do for a large city. *Transportation Research Circular* 423:116-119.

Kuennen, T. 1993. Conference spotlights newest bridge management systems. *Roads and Bridges* 31 (11):30.

Kurt, C. E. 1988. Bridge management system software for local governments. *Transportation Research Record* 1184:50-55.

Kurt, C. E. 1990. Microcomputer aided management system. In *Microcomputer applications in transportation III: proceedings of the International Conference on Microcomputers in Transportation*, ed. K. S. Opiela, 805-816, vol. 2. New York, NY: American Society of Civil Engineers.

O'Connor, D. and R. Drumm. 1994. Bridge management systems: advancing the science. *TRNews* 173:17-21.

Purvis, R. L. and H. P. Koretzky. 1988. Bridge safety inspection quality assurance -- Pennsylvania Department of Transportation. *Transportation Research Record* 1184:10-21.

Romack, George P. 1995. Bridge management systems. In *Restructuring--America and beyond: proceedings of Structures Congress XIII*, Boston, MA, April 2-5, 1995, ed. J. Sanayei, 680-681, vol. 1. New York, NY: American Society of Civil Engineers.

Saito, M. and K. C. Sinha. 1987. Review of current practices of bridge management at the state level. *Transportation Research Record* 1113:1-8.

- Shirole, A. M. 1994. Bridge management to the year 2000 and beyond. *Transportation Research Circular* 423:150-153.
- Shirole, A. M., W. J. Winkler, and J. J. Hill. 1991. Bridge management systems -- state of the art. *Transportation Research Record* 1290:149-156.
- Shirole, A. M., W. J. Winkler, and M. W. Fitzpatrick. 1994. Bridge management decision support. *Transportation Research Circular* 423:27-34.
- Transportation Research Board. 1994. Characteristics of bridge management systems: presentations from the 7th Conference on Bridge Management, Austin, Texas, September 15-17, 1993. *Transportation Research Circular* 423:1-160.
- U.S. Congress House Committee on Public Works and Transportation. 1989. The status of the nation's highways and bridges: conditions and performance: report of the Secretary of Transportation to the United States Congress, pursuant to sections 307(e) and 144(i) of Title 23, United States Code. Washington, DC: U.S. G.P.O.
- Wells, D. T., W. T. Scherer, and J. P. Gomez. 1993. State of the art of bridge management system. In *Infrastructure planning and management: proceedings of two parallel conferences, June 21-23, 1993, Denver, Colorado*, ed. J. L. Gifford, D. R. Uzarski, and S. MacNeil, 182-186. New York, NY: American Society of Civil Engineers
- Zuk, W. and J. Newbrough. 1991. An expert system as applied to bridges: testing phase. Charlottesville, VA: Virginia Transportation Research Council.
- Zuk, W. 1991. Expert system for determining the disposition of older bridges. *Transportation Research Record* 1290:145-148.

## 8.2. Modelización.

- Arockiasamy, M. 1994. Knowledge based expert system for rating Florida Briges. Final Report. vol. 2. 115p.
- Al-Subhi, K. M., D. W. Johnston, and F. Farid. 1990. Opbridge: an integrated bridge budget forecasting and allocation module at the state level. *Transportation Research Record* 1268:95-109.
- Arockiasamy, M., M. Sawka, V. Sinha, and M. El Shahawy. 1993. Knowledge-based expert system approach to analysis and rating of Florida bridges. In *Bridge management 2: inspection, maintenance assessment and repair*, ed. J. E. Harding, G. A. R. Parke, and M. J. Ryall, 458-464. London: T. Telford.
- Cesare, M., J. C. Santamarina, C. J. Turkstra, and E. Vanmarcke. 1993. Risk-based bridge management. *Journal of Transportation Engineering* 119 (5):742-750.
- Ghosh, M. and F. Moses. 1991. Reliability and load modeling for bridge management. *Transportation Research Record* 1290:176-184.
- Harper, W. V. and K. Majidzadeh. 1991. Optimization enhancements for an integrated bridge management system. *Transportation Research Record* 1304:87-93.
- Harper, W. V. and K. Majidzadeh. 1993. Integrated pavement and bridge management optimization. *Transportation Research Record* 1397:83-89.
- Harper, W. V., A. Al-Salloum, S. Al-Sayyari, S. Al-Theneyan, J. Lam, and C. Helm. 1990. Selection of ideal maintenance strategies in a network-level bridge management system. *Transportation Research Record* 1268:59-67.
- Harper, W. V., J. Lam, A. Al-Salloum, S. Al-Sayyari, S. Al-Theneyan, G. Ilves, and K. Majidzadeh. 1990. Stochastic optimization subsystem of a network-level bridge management system. *Transportation Research Record* 1268:68-74.
- Hopwood, T. and V. G. Oka. 1989. Development of a priority ranking system for bridge rehabilitation or replacement. Frankfort, KY: University of Kentucky, College of Engineering.
- Jiang, Y., M. Saito, and K. C. Sinha. 1988. Bridge performance prediction model using the Markov chain. *Transportation Research Record* 1180:25-32.
- Johnston, D. W., C. Chen, and I. Abed-Al-Rahim. 1994. Developing user costs for bridge management systems. *Transportation Research Circular* 423:139-149.
- Kleywegt, A. J. and K. C. Sinha. 1994. Tools for bridge management data analysis. *Transportation Research Circular* 423:16-26.
- McGhee, K. K., G. R. Allen, and W. T. McKeel, Jr. 1993. Development of performance and deterioration curves as a rational basis for a maintenance management system for structures. Charlottesville, VA: Virginia Transportation Research Council.

- Rewinski, S. 1991. Fuzzy algorithm in bridge and pavement management systems. In *Artificial intelligence and civil engineering*, ed. B. H. V. Topping, 77-81. Edinburgh: Civil-Comp Ltd.
- Saito, M. and K. C. Sinha. 1991. Delphi study on bridge condition rating and effects of improvements. *Journal of Transportation Engineering* 117 (3):320-334.
- Saito, M., K. C. Sinha, and V. L. Anderson. 1988. Bridge replacement cost analysis. *Transportation Research Record* 1180:19-24.
- Sanders, D. H. and Y. J. Zhang. 1994. Bridge deterioration models for states with small bridge inventories. *Transportation Research Record* 1442:101-109.
- Scherer, W. T. and D. M. Glagola. 1993. Overview of Markovian models for bridge management systems. In *Infrastructure planning and management: proceedings of two parallel conferences, June 21-23, 1993, Denver, Colorado*, ed. J. L. Gifford, D. R. Uzarski, and S. MacNeil, 382-386. New York, NY: American Society of Civil Engineers.
- Scherer, W. T. and D. M. Glagola. 1994. Markovian models for bridge maintenance management. *Journal of Transportation Engineering* 120 (1):37-51.
- Soderqvist, M. K. and M. Veijola. 1993. BMS modelling of bridge stock performance. In *Proceedings, Pacific Rim TransTech Conference, July 25-28, 1993, Washington State Convention Center, Seattle, Washington, USA*, ed. W. P. Carr, 131-137, vol. 2. New York, NY: American Society of Civil Engineers.
- Tee, A. B., M. D. Bowman, and K. C. Sinha. 1988. Fuzzy mathematical approach for bridge condition evaluation. *Civil Engineering Systems* 5 (1):17-24.
- Vanmarcke, E., C. Turkstra, and C. Santamarina. 1991. *Infrastructure risk management: prioritizing bridges for maintenance and rehabilitation*. [New York, NY: Department of Transportation, University Centers Program].
- Wang, T. 1984. *Computer rating system for bridge rating and fatigue life analysis*. Miami, FL: Florida International University, Department of Civil Engineering.
- Weissmann, J., W. R. Hudson, N. H. Burns, and R. Harrison. 1989. *A bridge management system module for the selection of rehabilitation and replacement projects*. Austin, TX: Center for Transportation Research, Bureau of Engineering Research, The University of Texas at Austin.
- Weissmann, J., R. Harrison, N. H. Burns, and W. R. Hudson. 1990. *Selecting rehabilitation and replacement bridge projects*. In *Extending the life of bridges*, ed. G. W. Maupin, B. C. Brown, and A. G. Lichtenstein, 3-18. Philadelphia, PA: American Society of Testing and Materials.
- Yanev, B. S. 1994. User costs in a bridge management system. *Transportation Research Circular* 423:130-138.
- Yi, J. and K. C. Sinha. 1989. Dynamic optimization model for bridge management systems. *Transportation Research Record* 1211:92-100.
- Yi, J., M. Saito, and K. C. Sinha. 1988. Bridge performance prediction model using the Markov chain. *Transportation Research Record* 1180:25-32.