

SEGURIDAD Y DURABILIDAD ESTRUCTURAL: LA NECESIDAD DE INTEGRAR VARIAS DISCIPLINAS

M^a Carmen Andrade

Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja- CSIC-Madrid
Miembro del Proyecto SEDUREC-CONSOLIDER-INGENIO 2010

1. INTRODUCCION

El arte de construir y diseñar las construcciones es en actualidad una disciplina que ha alcanzado un alto grado de madurez de tal manera que, habiendo sido en el pasado una de las materias que atraía a los mejores talentos, asistimos en todo el mundo a un desplazamiento del interés de las nuevas generaciones hacia otras áreas que les resultan más novedosas. Quedan sin embargo importantes retos que resolver no solo en las áreas más cercanas a las aplicaciones prácticas sino también en temas tan esenciales como el nivel de Seguridad y de durabilidad que puede alcanzar el parque construido.

Así, las construcciones en la actualidad se calculan para que resistan con un cierto nivel de seguridad y funcionalidad durante una determinada vida en servicio (1). Pero los niveles de seguridad y durabilidad que respaldan las normas actuales no se dan de forma explícita en general y están basados mucho más en la experiencia que en cálculos rigurosos y en cuanto a las estructuras existentes, su seguridad real no es explicitada ni calculada a pesar de que existen las bases científicas que permitirían optimizar los cálculos y el diseño frente a las acciones (2-3). Tampoco es posible predecir de forma rigurosa la durabilidad esperable en una estructura en particular a pesar de los avances realizados en el conocimiento de la microestructura de los materiales estructurales.

Habiendo identificado la necesidad de predecir con rigor la durabilidad de las estructuras y definir su seguridad en las diversas etapas de su vida útil, cuatro grupos de investigación convergieron en la necesidad de trabajar de forma multidisciplinar para tratar de promover un avance significativo en el tratamiento de estas materias. Estos grupos son los correspondientes a 1) Instituto Eduardo Torroja-Corrosión, 2) Instituto Eduardo Torroja- Estructuras, 3) CIMNE y 4) Universidad Politécnica- Materiales.

En 2006 estos grupos se presentaron a una financiación del Programa CONSOLIDER-INGENIO 2010 y alcanzaron la financiación de un proyecto conjunto. El proyecto SEDUREC pretende, mediante la coordinación de los trabajos que actualmente ya desarrollan los grupos que lo conforman, producir un avance cualitativo en la temática con impacto a nivel internacional.

2. OBJETIVOS DEL PROYECTO CONSOLIDER-SEDUREC

La oportunidad de la temática se manifiesta en estos últimos años debido a la maduración de la necesidad de economizar los recursos y aumentar la sostenibilidad de las inversiones minimizando las operaciones de mantenimiento de las infraestructuras. Estas realidades han hecho más importante asegurar una más larga vida útil del parque construido y para ello es necesario plantearse una gestión diseñada para optimizar las inversiones planteando un mantenimiento racional y sistemático.

Los componentes del equipo SEDUREC han planteado un doble objetivo:

- a) por un lado pretenden la formación de un grupo de excelencia en la especialidad de ingeniería estructural-seguridad y durabilidad con una masa crítica mayor que la actual y por otro
- b) el objetivo científico lo centrarán en la elaboración de las bases de cálculo explícito de la seguridad y durabilidad que permitan el análisis de las estructuras existentes incluyendo los efectos de deterioro de las mismas, así como el diseño de nuevas estructuras con mejores características de resistencia y vida útil.

Los resultados de la investigación se concretarán en la propuesta de un *Manual de Aplicación de Seguridad y Durabilidad para estructuras existentes, de valor histórico o deteriorado*. La elaboración de estas bases supone tanto un reto científico como la transferencia de conocimientos al sector productivo.

El plan de trabajo se ha estructurado en las cuatro áreas temáticas siguientes:

2.1. Análisis y definición de escenarios de riesgo para las estructuras de construcción considerando de forma integral las acciones ambientales

Objetivo: Desarrollo de conceptos para la evaluación de los riesgos que integre métodos de análisis cualitativo y métodos de análisis cuantitativo teniendo en cuenta la estimación del riesgo mortal individual y de riesgo colectivo(4-8). Revisión de normas existentes y propuesta de mejora de

definición de escenarios de riesgo en al caso de acciones accidentales (fuego, impacto, explosiones, inundaciones, etc.) Criterios para la valoración de la eficacia de las medidas de reducción de los riesgos y finalmente la integración del síndrome de edificio enfermo mediante la definición de escenarios de riesgo y establecimiento de las bases de modelo de cálculo de emisiones contaminantes por materiales de construcción.

2.2 Desarrollo de métodos numéricos específicos para estructuras deterioradas y de Patrimonio Histórico

Objetivo: Desarrollar métodos de cálculo novedosos (9-11) basados en combinación de métodos de elementos finitos, elementos discretos y técnicas de partículas para predecir la evolución en el tiempo de la capacidad resistente de estructuras existentes y estimar su nivel de seguridad bajo diversas acciones ordinarias y extraordinarias. Los métodos de cálculo serán de aplicación a estructuras de hormigón en masa y armado, a estructuras metálicas y a estructuras históricas formadas por materiales de mampostería. En todos los casos se tendrá en cuenta los efectos de interacción con el terreno de cimentación, así como los efectos medioambientales.

2.3 Desarrollo de modelos de cálculo de la vida útil integrando las solicitaciones mecánicas y ambientales y realizando un análisis del ciclo de vida,

Objetivo: Desarrollo y calibración con estructuras reales, tanto armadas como pretensadas, de modelos de corrosión de armadura: cálculo del periodo de iniciación y propagación con el cálculo de los costes asociados son el fin de realizar análisis del ciclo de vida (12-15). Aplicación al caso de estructuras corroídas y de patrimonio histórico y calibración de coeficientes parciales de seguridad para estructuras existentes y deterioradas

2.4 Integración de parámetros microestructurales con el comportamiento estructural

Objetivo: Caracterización de parámetros mecánicos de los materiales para su incorporación en modelos estructurales y el estudio del efecto en el material de acciones accidentales (16). Desarrollo de materiales más tolerantes al daño y nuevas técnicas de detección del deterioro y de la corrosión.

3. CICLO DE VIDA DE LAS ESTRUCTURAS

Cada vez más se plantea la necesidad de acudir a inversiones privadas para acometer la construcción en grandes estructuras o de mega-proyectos. Ello implica la concesión de la construcción y explotación de las infraestructuras por un tiempo definido como una forma de financiación que no gravite sólo sobre los presupuestos generales del

estado. Dado que estos megaproyectos terminan revirtiendo al cabo de un tiempo al estado, éste debe fijar unos mínimos de calidad y seguridad en el momento de la reversión, lo que implica para el concesionario temporal de la infraestructura la necesidad de comparar constantemente su nivel de conservación con los objetivos de seguridad y correcto mantenimiento.

En la figura 1 que también se utilizó para la solicitud del programa Grupos de Excelencia de la Comunidad de Madrid que resultó en la formación del Grupo DUMEINPA, se muestra de forma muy esquemática las etapas de gestión de infraestructuras relacionadas con su diseño, construcción, mantenimiento, reparación y demolición. El re-uso de los materiales resultantes de la demolición llevaría al reciclado y al cierre del llamado *Ciclo de Vida* de las construcciones.

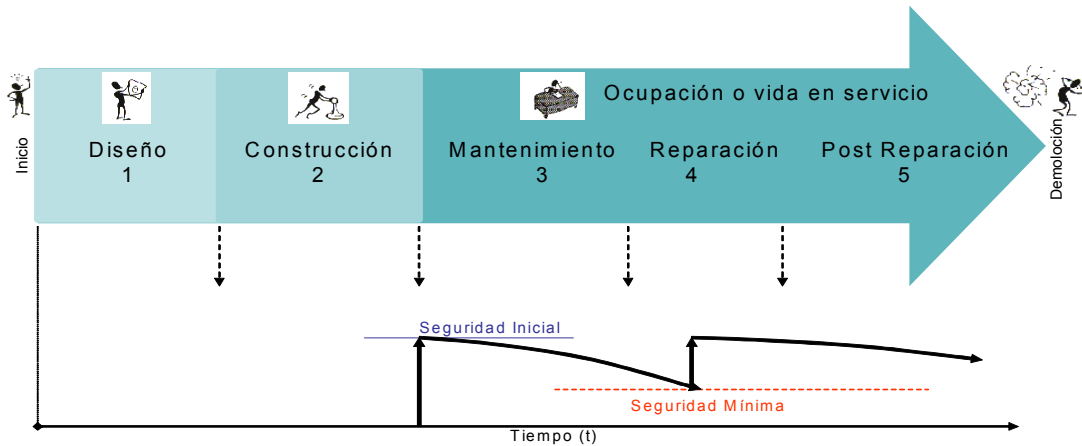
La aportación novedosa de SEDUREC se centrará en introducir los conceptos de *Seguridad* y *Economía* de una forma sistemática y racional en el proceso llegando a la cuantificación y modelación del mismo. Para ello es imprescindible el trabajo integrado de diversas disciplinas, ya que no existen grupos a nivel internacional en este momento que tengan miembros que conozcan todas las disciplinas que necesitan converger para aportar un Manual como el que se pretende desarrollar en SEDUREC.

Los aspectos de Seguridad estructural, Economía y Modelación resultan pues esenciales y son los aspectos más novedosos en los objetivos que se han planteado. Los avances que se produzcan será esencial transmitirlos a los jóvenes técnicos e investigadores para que los conocimientos se incorporen a las disciplinas básicas de las nuevas generaciones, de ahí que la formación sea un aspecto esencial también en el Proyecto SEDUREC.

Volviendo a los aspectos de Seguridad, Economía y Modelación, no existen en la actualidad Códigos que guíen al propietario de las infraestructuras en la gestión técnica de su parque construido. Tampoco conoce los riesgos que determinadas intervenciones o reparaciones pueden introducir en los usuarios por lo que debe recurrir a la opinión de expertos o consultoras que realizan su dictamen en base a la experiencia previa subjetiva y no sistematizada utilizando programas y sistemas expertos desarrollados de forma empírica que tratan de ser una Ayuda a la Toma de Decisiones que todo propietario tiene que realizar a lo largo del Ciclo de Vida de sus infraestructuras (17).

Si se entiende que toda infraestructura es una inversión económica con fines sociales, en la figura 2 se muestra, como las etapas del ciclo de vida deben estar enmarcadas en un análisis de la

Figura 1. Etapas de la vida de estructuras de las construcciones



rentabilidad de la inversión. Realizada la inversión es necesario crear un Inventario de las estructuras o de sus elementos y luego a programar visitas de inspección periódicas para dictaminar cual es el estado actual y las necesidades de mantenimiento y reparación. En función del estado actual de la estructura se procede la evaluación de su seguridad y, en su caso, a su reparación. El objetivo es mantener actualizada y rentable la inversión realizada.

Para el gestor de un sistema técnico, así como para la sociedad, el aspecto primordial es pues la limitación de los riesgos a un nivel aceptable con un costo razonable.

4. INTEGRACIÓN DE LAS SOLICITACIONES AMBIENTALES EN EL CICLO DE VIDA

Las construcciones y edificaciones además de estar diseñadas para operar con niveles de funcionalidad y seguridad adecuados, lo deben hacer durante un periodo que se conoce como *vida útil*. Esta vida útil o de *servicio* en la mayoría de los casos no se define

en las normas explícitamente debido básicamente a tres motivos: 1) el desconocimiento que se tiene de la durabilidad real (debido a la variedad de ambientes y procesos posibles de deterioro), 2) las consecuencias legales que tendría para el proyectista que se definiera y no se alcanzara. y 3) las implicaciones económicas que implican el interés en que esta vida en servicio sea lo más larga posible.

La experiencia muestra que todos los materiales de construcción envejecen y se degradan en contacto con los agentes atmosféricos y del medio ambiente por lo que lo crucial es conseguir velocidades de deterioro lo suficientemente lentas para que la vida en servicio supere los 50 o 100 años sin labores y los costos asociados de mantenimiento.

A pesar de que ya se tiene bastante experiencia en los deterioros prematuros sufridos por las estructuras de construcción, los requisitos existentes en la mayoría de normativas son todavía claramente insuficientes y se basan en el cumplimiento de una serie de simples reglas de buena práctica. En el caso del hormigón armado y pretensado se definen unas dosificaciones mínimas (máxima relación agua –

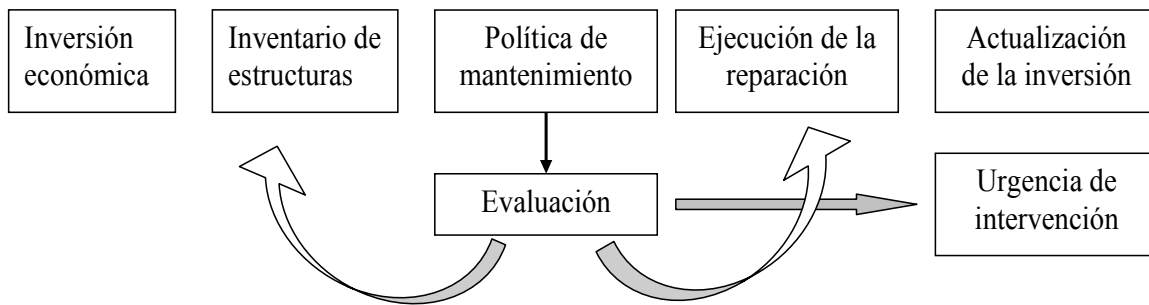
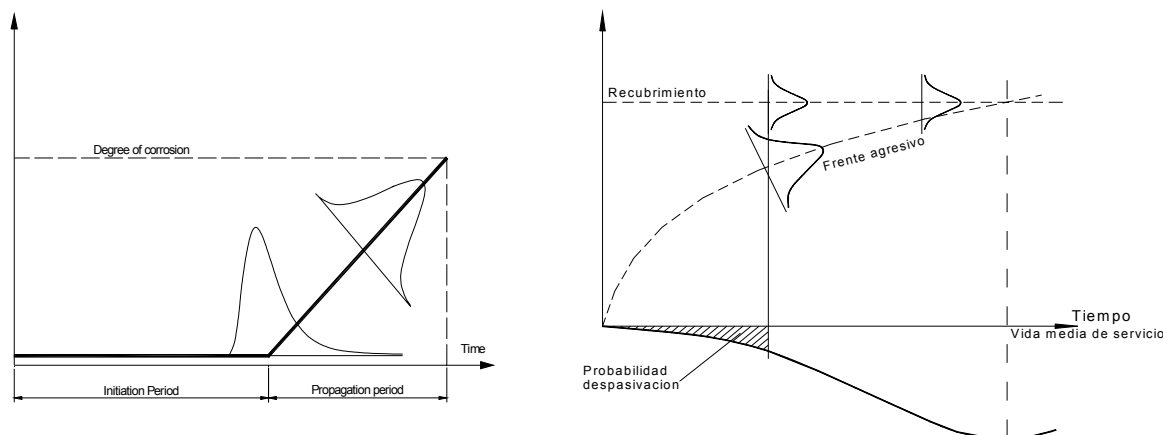


Figura 2. Inversión económica y su actualización que enmarca las etapas básicas en la gestión técnica de infraestructuras

Figura 3. Variación estadística en la penetración de sustancias agresivas en el hormigón y sus efectos sobre la probabilidad de corrosión de la armadura.



cemento y mínima cantidad de cemento) junto con un recubrimiento mínimo para cumplir con este aspecto.

En la actualidad no existen modelos o métodos de cálculo integrales aceptados que permitan traducir en la normativa la durabilidad de las construcciones. Existen modelos parciales, basados en general en procesos de difusión cuyas condiciones de contorno se separan bastante de la realidad pero no existen métodos que permitan abordar el cálculo de la vida útil acometiendo todas las etapas que pasará la estructura en los distintos ambientes donde va estar ubicada y mucho menos existe un tratamiento unificando las acciones mecánicas con las de ataque ambiental.

A pesar de los avances producidos en los últimos veinte años se detecta una falta de relación entre estos avances y los criterios de diseño recogidos por las normativas de cálculo estructural puesto que no se han producido variaciones considerables en los requisitos establecidos por las normativas. A este aspecto es interesante resaltar el gran avance que ha supuesto la nueva Instrucción de Hormigón Estructural (EHE) en la que la durabilidad de la estructura es considerada desde la fase de diseño de ésta.

En este campo existe una propuesta reciente formulada al Comité CEN 250 sobre Eurocódigos sobre un tratamiento de la durabilidad mediante la teoría de los estados límites. Esta propuesta ha sido realizada a partir de los resultados del Proyecto de financiación europea DURACRETE: *Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Structures*, donde participaron miembros del IETcc. La propuesta se basa en necesaria una caracterización estadística (figura 3-izquierda) previa de todas las variables que influyen en el una caracterización estadística de las variables y a través

del estudio económico de su repercusión en el ciclo de vida se establece cuál debe ser el nivel de seguridad necesario en el diseño de estructuras durables o cual es la seguridad en estructuras existentes. Para los análisis económicos del ciclo de vida se debe emplear una metodología de cálculo en la que no sea necesario el cálculo de la probabilidad de fallo a lo largo del tiempo en los casos de análisis de la degradación de la estructura.

Al adoptar para la durabilidad la teoría de los estados límites, el procedimiento de cálculo sería paralelo al del resto de los estados límites (figura 3-derecha). Siendo R (el recubrimiento en el caso de la corrosión de armaduras y S la resistencia y la acción (ambiental en el caso de la durabilidad) a que se encuentra sometida la estructura, ambas variables estocásticas. La probabilidad de que un elemento o una estructura falle a un tiempo t será (1) :

$$\begin{aligned} PF(t) &= P(R(t) < S(t)) \\ &= P(R(t) - S(t) < 0) = P(G(t) < 0) \end{aligned} \quad (1)$$

Donde $G(\cdot)$ es la llamada función de estado límite.

En los problemas de las acciones mecánicas es usual considerar las resistencias independientes del tiempo y tomar para las acciones valores representativos de todo el periodo de vida útil (17). En el caso de la durabilidad esto no es posible y ambas deben ser consideradas como función del tiempo. En lugar de determinar la probabilidad de fallo se utiliza el llamado *índice de fiabilidad* β relacionado biunívocamente con aquella siendo Φ la función de densidad de probabilidad normalizada de Gauss:

$$P_F = P(G(t) < 0) = \Phi(-\beta) \quad (2)$$

La minimización de la probabilidad de fallo tiene que estar balanceada por el costo que ello implica,

tanto los costes de construcción como los de mantenimiento y los derivados de los posibles daños (18-20). Para cada escenario de riesgo previsible, el coste total de un elemento estructural vendrá dado por la siguiente expresión:

$$C_T = C_{ini} + \sum_{i=0}^{t_L} \frac{M_i}{(1+r)^i} + \sum_{i=0}^{t_L} P_F(t_i) \frac{D_i}{(1+r)^i} \quad (3)$$

Donde: C_T es el coste total capitalizado del elemento estructural, C_{ini} es el coste inicial de construcción, M_i es el coste de mantenimiento del elemento estructural en el año i , r es la tasa de capitalización, $P_F(t_i)$ es la probabilidad de fallo del elemento en el tiempo t_i y D_i son los posibles daños causados por el fallo en el tiempo t_i . La función de coste total capitalizado, como es conocido, tendrá un mínimo ya que el resultado de la suma de los costes iniciales más los costes de reparación por la probabilidad de que la estructura falle, tendrá un mínimo que corresponderá al óptimo económico que se pretende hallar.

5. NUEVOS MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DE LA SEGURIDAD Y DURABILIDAD DE LAS ESTRUCTURAS

En el proyecto SEDUREC se abordarán también los aspectos del modelado que contemplen accidentes o roturas frágiles. También en este caso las técnicas de reevaluación son cruciales ya que los procesos de accidente que someten al material a altas tensiones locales o temperaturas lo que puede producir cambios muy importantes en el material, hasta tal punto que su microestructura y propiedades se ven severamente modificadas.

Como herramienta integradora de todos estos aspectos, se desarrollarán modelos matemáticos y métodos numéricos correspondientes a cada tipología estructural. Se prestará especial atención al desarrollo de interfaces de usuario sencillas y prácticas que faciliten la generación de datos y la visualización de los resultados del cálculo. Asimismo, se adaptarán todos los programas de cálculo para que puedan utilizarse en ordenadores paralelos o en régimen de cálculo distribuido (grid-computing). El objetivo es poder resolver estructuras reales, que involucran cientos de millones de incógnitas, en tiempos de cálculo razonables.

Los nuevos programas de cálculo (10-11) se basan en el método de los elementos discretos (MED), el método de elemento finitos (MEF), el método de partículas (PFEM). La construcción de estas técnicas permitirán simular como mayor precisión problemas complejos de seguridad estructural incluyendo efectos de interacción de las estructuras en el medio

circundante (terreno, agua, aire). El desarrollo y adaptación de estas formulaciones irán acompañados de **nuevos modelos constitutivos** aplicables al comportamiento del suelo y de la estructura, al estudio de interacciones entre estructurales discretas diferentes, así como también para el análisis comparativo de resultados de seguridad de construcciones por medio de diferentes tecnologías numérica.

6. AGRADECIMIENTOS

Se hace constar el reconocimiento al Ministerio de Educación y Ciencia la financiación concedida en el programa Ingenio 2010- CONSOLIDER 2006.

7. REFERENCIAS

1. EN 1992-1-1 Eurocódigo 2 Parte 1.1 Proyecto de estructuras de hormigón. Reglas generales. European Committee for Standardization, Brussels, 2005.
2. E. Torroja - *La determinación del coeficiente de seguridad en las distintas obras..* Instituto Eduardo Torroja. Madrid
3. *Structural Safety*. J. Ferry Borges. 2ª Ed. LNEC. Lisbon 1971
4. JCSS -*Probabilistic assessment of existing structures*. Ed. By D. Diamantidis, RILEM publications.
5. CIB Publication 259. *Risk assessment and risk communication in civil engineering*. Editors: Vrouwenvelder, T., Holicky, M., Tanner, P., Lovegrove, R. and Canisius, G. International Council for Research and Innovation in Building and Construction, CIB nº 259, Rotterdam, 2001. ISBN 90-6363-026-3, 62 pages.
6. Hambly, E.C. and Hambly, E.A. "Risk evaluation and realism". Paper 10324, Proc. Inst. Civil Engineers, Civil Engineering 102, 1994.
7. Henley, E. J., Kumamoto H. (1981) "*Reliability Engineering and risk assessment*", Prentice Hall, Englewood Clifss NJ.
8. Melchers R.E. (1983) "*Structural Reliability, Analysis and Prediction*", Ellis Horwood Limited. Jhon Wiley & sons
9. Zienkiewicz, O.C. and Taylor, R.L. The finite element method. 5th Edition, 3 Volumes, Butterworth-Heinemann, 2000.
10. Oñate, E. (1992). Cálculo de Estructuras por el Método de los Elementos Finitos. CIMNE, 850 pp., Barcelona, 1ª edición, 1992, 2ª edición 1995.
11. Oñate, E., Rojek, J., Miquel, J., Zárate, F. and Recarey, C. Advances in the development of discrete element method and finite element method for predicting wear in rock cutting tools. Research Report CIMNE, 2004.

12. CONTECVET IN30902I, "A validated users manual for assessing the residual life of concrete structures", DG Enterprise, CEC, (2001). (The manual for assessing reinforced structures affected by reinforcement corrosion can be seen at the web sites of IETcc (www.ietcc.csic.es) and GEOCISA (www.geocisa.es)
13. ACI (1991) – Comité 201: *Proposed revision of: Guide to Durable Concrete*. ACI materials Journal, Vol. 88 n° 5, pp. 544 – 582
14. Tanner P. Reliability-based evaluation concept for everyday use. In: *Saving Buildings in Central and Eastern Europe*, IABSE Report N° 77, Zürich, 1998.
15. Izquierdo, D. Andrade C. Arteaga A. (2000) *Risk analysis of crack width limit state due to reinforcement corrosion*. RILEM Workshop on life prediction and aging management of concrete structures. Cannes. Francia.
16. Elices M (1996) *Mecánica de la fractura aplicada a sólidos elásticos bidimensionales* ETSI Caminos, UPM.
17. Frangopol D. M. (1997) "Application of life cycle reliability – based criteria to bridge assessment and design ", "Safety of Bridges" Institution of Civil Engineers. Highways Agency. Ed. by Tomas Telford.
18. Ehlen. (1997) "Principles of whole life costing", "Safety of Bridges" Institution of Civil Engineers. Highways Agency. Ed. by Tomas Telford.
19. Ditlevsen, O, Madsen, H. O. (1996) *Structural Reliability Methods*. Ed. Wiley.
20. Hasofer, A. M. and Lind, N. C.; Exact and Invariant Second Moment Code Format. Journal of the Engineering Mechanics Division ASCE, Vol. 100, 1974, p. 111-121.