

Confiabilidad estructural de componentes mecánicos con daño

R. Mussini & H. Cancela

2020

Referencias

Principal:

[1] Transparencias del Prof. R. Mussini.

Complementarias:

[2] P. Thoft-Christensen and M. J. Baker, *Structural reliability theory and its applications*, Springer-Verlag, 1982.

[3] Robert E. Melchers and Andre T. Beck, *Structural Reliability Analysis and Prediction*, Third Edition, John Wiley & Sons, 2018.

[4] CRR 398/2001 HSE Report, *Probabilistic methods: uses and abuses in structural integrity*, HSE, 2001.

[5] BS 7910:2013+A1:2015: *Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures*, BSI, 2015.

Resumen

- Incertidumbre
- Confiabilidad estructural
- Verificación de la confiabilidad estructural
- Consideración de la incertidumbre en procedimientos de evaluación de integridad estructural

Definiciones

Episteme: conjunto de conocimientos que condicionan las formas de entender e interpretar el mundo en determinadas épocas (fuente: <https://dle.rae.es/>).

Epistémico, ca: derivado de episteme (fuente: <https://dle.rae.es/>).

Términos

Incertidumbre

Tipos de incertidumbre en confiabilidad estructural

- Ya fueron mencionadas al principio del curso algunas fuentes de incertidumbre en variables de entrada del análisis de confiabilidad estructural, vinculadas fundamentalmente a la presencia de imperfecciones geométricas generadas por daño de fabricación y/o de servicio.
- En un sentido mas general, las diferentes incertidumbres en el análisis de confiabilidad estructural pueden ser clasificadas o incluidos en al algunos de los siguientes grupos:
 - a) incertidumbre epistémica (derivada de la falta ó gaps en el conocimiento acerca de un fenómeno)*
 - b) incertidumbre aleatoria (intrínseca del componente que esta siendo analizado)*

Reducción de la incertidumbre

- Incertidumbre epistémica - requiere mas investigación acerca de un fenómeno básico, o problema tecnológico de forma tal de poder mejorar su comprensión acerca del mismo.
- Incertidumbre aleatoria - podría ser reducida recopilando más datos e información, mejorando un modelo numérico ó mejorando la estimación de parámetros estadísticos de una distribución de entrada.
- Si bien mucho se ha mencionado acerca de la distinción entre la incertidumbre epistémica y aleatoria, es claro que ambas consisten en estados de conocimiento incompleto, ya sea acerca de la comprensión de un fenómeno ó acerca de datos e información relevante.
- En adelante no se considerará la anterior clasificación, al describir ocho diferentes tipos de incertidumbre.

Tipos de incertidumbre I

- 1) **Incertidumbre fenomenológica** - como ya se ha mencionado, algunas veces un fenómeno aparentemente “inimaginable” ocurre causando una falla estructural. Dos ejemplos vinculados con este tipo de incertidumbre son los casos de fractura de los cascos de los buques de la serie Liberty (USA, 1943) y el colapso del puente Tacoma Narrows (USA, 1940).
- 2) **Incertidumbre en la decisión** - esta vinculada a la decisión acerca de si un fenómeno específico ha ocurrido, o no en una estructura. En términos de los estados límites, tiene que ver exclusivamente con la decisión de si una violación del estado límite ha ocurrido, esto es

$$G(\{X\}) = Z(\{X\}) \leq 0$$

- 3) **Incertidumbre del modelo** - esta vinculada con el uso de una o más relaciones simplificadas entre variables estructurales básicas para representar las “relaciones reales” de un fenómeno de interés. Esto es, que tan bien una función de estado límite (modelo), $G(\{X\}) = Z(\{X\})$ representa el comportamiento real de un sistema físico.

Tipos de incertidumbre II

- 4) Incertidumbre en la predicción** - muchos problemas en análisis de confiabilidad involucran la predicción futura del comportamiento de una estructura para un tiempo de servicio especificado. Por ejemplo, el comportamiento para un tiempo de dos años después de haber iniciado el servicio de la estructura. La estimación de la confiabilidad estructural, depende del estado del conocimiento disponible para el, o los analistas.
- 5) Incertidumbre física** - la incertidumbre física es aquella que esta asociada con la inherente naturaleza aleatoria de las variables de entrada. Por ej.,
- (1) variación de la tension de fluencia
 - (2) variación de la tenacidad a la fractura
 - (3) variabilidad de las cargas
 - (4) variabilidad de las características geométricas de las imperfecciones

Tipos de incertidumbre III

- 6) **Incertidumbre en la medición** - la variación en los resultados obtenidos al medir una propiedad o dimensión, expresa la suma de las fluctuaciones inherentes al objeto en observación (incertidumbre física) y de las fluctuaciones inherentes al método y equipamiento de medición (incertidumbre en la medición). Esto último ya fue desarrollado con anterioridad.

- 7) **Incertidumbre estadística** - los estimadores estadísticos tales como la media muestral y otros momentos de mayor orden pueden ser determinados a partir de datos disponibles (muestras), y luego ser usados para postular una adecuada función de densidad de probabilidad (*pdf*) con sus respectivos parámetros característicos. Generalmente, las observaciones muestrales no representan perfectamente el comportamiento de la variable en sí. Adicionalmente, diferentes datos de muestras usualmente producirán diferentes estimadores estadísticos. Lo anterior, es la causa de la denominada incertidumbre estadística.

Tipos de incertidumbre IV

8) Incertidumbre debida al error humano - en forma similar al efecto de la incertidumbre que existe en el comportamiento humano durante las fases de diseño, fabricación y uso de las estructuras, también existirá incertidumbre de esta misma variable durante el análisis de confiabilidad; a modo ilustrativo se muestra en la siguiente transparencia una estadística de diferentes tipos de errores humanos vinculados con la ocurrencia de fallas estructurales.

Table 2.2 Error factors in observed failure cases.

Factor	%
Ignorance, carelessness, negligence	35
Forgetfulness, errors, mistakes	9
Reliance upon others without sufficient control	6
Underestimation of influences	13
Insufficient knowledge	25
Objectively unknown situations (unimaginable?)	4
Remaining	8

Adapted from Matousek and Schneider (1976).

Diferentes tipos de error humano que conducen a incertidumbre.

Confiabilidad estructural

Confiabilidad estructural - nueva definición ampliada

- Ya al principio del curso fue adelantada una definición general de confiabilidad estructural. En este momento, luego de haber incorporado el concepto de *estado límite*, se está en condiciones de reformular y ampliar la definición general de confiabilidad estructural anterior.
- En el sentido más general, la confiabilidad de una estructura o componente es su habilidad para satisfacer el propósito de su diseño durante algún período de tiempo especificado.
- En un sentido más restricto, es la *probabilidad* de que una estructura o componente no alcance cada *estado límite especificado* durante un dado *período de referencia*.

Influencia del tiempo en la confiabilidad estructural

En general, la confiabilidad estructural y por tanto la p_f dependen de:

- el tiempo de exposición al medio y a las cargas actuantes en la estructura (por ej. si las cargas son estáticas o de fatiga y si la atmósfera es salina o de otro tipo, cual fue el tiempo de operación)
- las propiedades de los materiales con que están fabricadas las estructuras (por ej. la resistencia al creep en función del tiempo en las tuberías de un horno de proceso)
- la magnitud del daño (características geométricas de las imperfecciones) en función del tiempo (por ej. distribución del pitting y de su profundidad)

Clasificación de métodos de confiabilidad estructural en función de la influencia del tiempo

- Ya fué dada anteriormente una clasificación de los métodos de confiabilidad estructural la cual tenía en cuenta las posibles formas de resolver la integral de p_f .
- Considerando ahora la influencia del tiempo, los diferentes métodos de análisis de confiabilidad estructural pueden ser clasificados como,
 - a) *métodos independientes del tiempo*
 - b) *métodos dependientes del tiempo*
- Un problema que involucra un mecanismo de daño dado el cual es dependiente del tiempo, podría ser analizado considerando la p_f en un instante dado. Obviamente, esto debería quedar **explícitamente indicado** en el informe del resultado del análisis de confiabilidad.

Verificación de la confiabilidad estructural

Verificación de la confiabilidad estructural

Hasta ahora se han mencionado diferentes métodos que conducen a realizar estimaciones de la probabilidad de falla.

Obviamente, como en todo análisis de ingeniería, siempre es necesaria la **verificación** de la estimación obtenida (o valor estimado) de \tilde{p}_f contra un cierto “valor objetivo (target) de probabilidad de falla” el cual será representado como p_f^{target} . Debiéndose verificar, a partir del resultado del análisis de confiabilidad estructural lo siguiente,

$$\tilde{p}_f < p_f^{target}$$

Ó de forma similar, que el “valor objetivo (target) de confiabilidad estructural”, $R^{STR-target}$ sea,

$$R^{STR-target} > R^{STR} = 1 - \tilde{p}_f$$

Ej. valores indicativos de p_f^{target} en construcciones civiles

Average number of people placed in danger	Economic consequences		
	Not serious	Serious	Very serious
Small (<0.1)	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
Average	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
Large (> 10)	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}

Nota: el período de referencia no aparece especificado en la fuente original.

Relación entre el análisis de confiabilidad estructural y el análisis cuantitativo de riesgo

- No es poco común encontrar en la bibliografía un uso indistinto de los términos probabilidad de falla, p_f y “tasa de fallas” (failure rate, failure frequency), f_{rate} . No obstante, este último término es utilizado para cuantificar el número de eventos de falla / unidad de tiempo en un tipo específico de estructuras (por ej. en tuberías de un dado rango de diámetros, usadas en la industria del gas).
- Igualmente, debe reconocerse que el valor de f_{rate} es influenciado por el valor de p_f y que cuanto mayor sea la p_f , mayor será la f_{rate} .
- La f_{rate} es utilizada comúnmente en la metodología de “análisis cuantitativo de riesgo”, y está basada en el uso de la estadística actuarial.

$$Risk = C f_{rate} ; \frac{Consecuencias}{unidad\ de\ tiempo}$$

- Donde C son las consecuencias expresadas por evento de falla (por ej. número de muertes / por evento de falla, millones de U\$\$ / evento de falla, ...).

Consideración de la incertidumbre en procedimientos de evaluación de integridad estructural

Consideración de la incertidumbre en procedimientos de evaluación de integridad estructural I

Los procedimientos de evaluación de integridad estructural consideran **algunos tipos de incertidumbre** a través de la realización de,

- un análisis determinístico usando límites inferiores (lower bound) ó superiores (upper bound) de todas las variables estructurales de entrada, tales como la tensión de fluencia, tenacidad a la fractura, tamaño de fisura, cargas aplicadas y tensiones residuales (lower and upper bound analysis)
- un análisis probabilístico usando funciones de densidad de probabilidad como variables estructurales de entrada, para obtener así el valor estimado de la probabilidad de falla, \tilde{p}_f debiendose verificar luego que,

$$\tilde{p}_f < p_f^{target}$$

Consideración de la incertidumbre en procedimientos de evaluación de integridad estructural II

- un análisis usando factores parciales de seguridad, los cuales son aplicados a algunas de las variables estructurales de entrada, para asegurar así un dado valor de probabilidad de falla p_f^{target} . Este tipo de análisis es designado algunas veces como “análisis semi-probabilístico”. Ver como ejemplo la tabla en la siguiente lámina para el caso de fisuras

Y también combinando los diferentes tipos de análisis antes mencionados.

Ejemplo de selección de factores parciales de seguridad en función del valor de p_f^{target}

En la tabla se muestran los valores de factores parciales de seguridad para el caso de la profundidad de una fisura superficial, γ_a en función p_f^{target} , tal cual son sugeridos en los procedimientos SINTAP/FITNET y BS 7910.

p_f^{target}	$2,3 * 10^{-1}$	$1,0 * 10^{-3}$	$7,0 * 10^{-5}$
COV_a	γ_a	γ_a	γ_a
0,10	1,00	1,40	1,50
0,20	1,05	1,45	1,55
0,30	1,08	1,50	1,65
0,50	1,15	1,70	1,85

COV_a - coeficiente de variación en la medición de la dimensión a