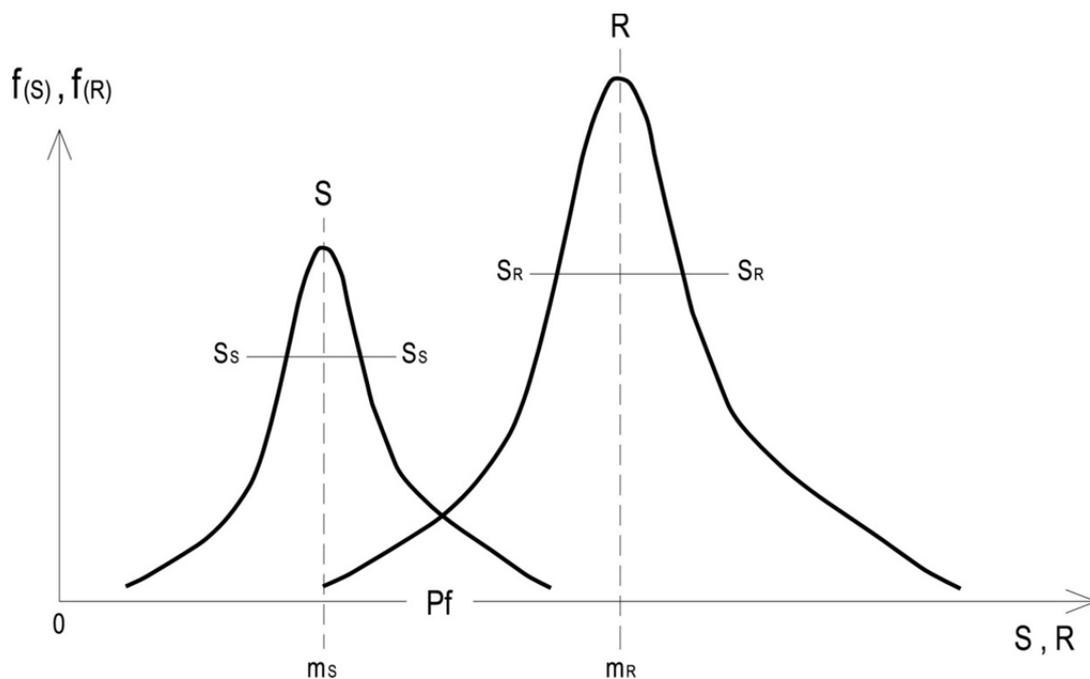


UNIVERSIDADE DA CORUÑA
ESCUELA UNIVERSITARIA DE ARQUITECTURA TÉCNICA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO:

**VERIFICACIÓN DE LA FIABILIDAD ESTRUCTURAL EN ESTRUCTURAS
EJECUTADAS MEDIANTE METODOLOGÍA PROBABILISTA**



Zacarías González Costa

Director: Dr. Emilio Mosquera Rey

Junio 2016

Quiero agradecer principalmente a mi Director de TFG, Dr. Emilio Mosquera Rey, por aceptar ser tutor de este trabajo, por su orientación y ayuda.

Pili gracias por todo, sin ello no habría sido posible.

A mi familia por apoyarme siempre en todos los pasos que fui dando a lo largo de toda mi vida.

A los profesores que me impartieron clase en estos años, de todos y cada uno de ellos me llevo valiosos conocimientos.

Y como no, a mis amigos y compañeros por estar siempre ahí cuando uno más lo necesitaba.

A todos muchas gracias.

RESUMEN

El aumento del parque construido lleva a una necesidad de mayor mantenimiento y a abordar la evaluación del grado de seguridad residual de las estructuras existentes. La diferencia fundamental entre la evaluación de estructuras existentes y el proyecto de estructuras de nueva construcción reside en el estado de información.

En la evaluación de la seguridad que presenta una estructura existente para las condiciones de uso actuales y futuras, es necesario abordar problemas distintos de los que habría que resolver en el dimensionado de estructuras de nueva construcción. En un dimensionado, las hipótesis de cálculo se basan en valores esperados de las cargas y de la resistencia de la estructura, y deben tener en cuenta las incertidumbres relacionadas con la ejecución. Cuando la estructura analizada existe ya, son muchas las incertidumbres que se pueden reducir porque es posible afinar los modelos de cálculo para cada caso, aprovechando los resultados de inspecciones, ensayos y mediciones in situ.

En estructuras existentes normalmente es posible incrementar el nivel de precisión de los modelos de cálculo a través de la adquisición de más datos sobre la estructura analizada. En la mayoría de los casos, el coste de la actualización de la información se compensa con una reducción significativa del coste de la intervención o de otros costes, puesto que una evaluación demasiado conservadora puede conducir a limitaciones no justificadas de las cargas variables de uso, así como a refuerzos o demoliciones innecesarias de estructuras existentes.

Actualmente no existen herramientas que permitan abordar fácilmente los problemas relacionados con la evaluación de la fiabilidad de estructuras existentes. Es por esto que este Trabajo Fin de Grado tiene por objetivo el acercarse a la edificación la verificación de la fiabilidad estructural de las estructuras ejecutadas mediante metodología probabilista.

PALABRAS CLAVE: Evaluación, Fiabilidad estructural, Estructuras existentes, Métodos probabilistas.

ABSTRACT

Increasing the park built leads to a greater need for maintenance and to address the residual assessing the degree of safety of existing structures. The fundamental difference between the evaluation of existing structures and structural design of new construction resides in the state of information.

In the safety assessment presented an existing structure for current and future conditions of use, it is necessary to address problems other than those that would be resolved in the dimensioning of newly built structures. In dimensioning, the calculation assumptions are based on expected values of the loads and the strength of the structure, and must take into account the uncertainties related to execution. When analyzed the structure already exists, there are many uncertainties may be reduced because it is possible to tune the calculation models for each case, using the results of inspections, tests and in situ measurements.

In existing structures it is usually possible to increase the level of accuracy of the calculation models through the acquisition of more data on the structure analyzed. In most cases, the cost of updating information is offset by a significant reduction in the cost of intervention or other costs, since a too conservative assessment can lead to limitations unjustified of variable loads of use, as well as reinforcements or unnecessary demolition of existing structures.

Currently there are no tools to easily address problems related to the assessment of the reliability of existing structures. That is why this Final Project aims to bring the building up the verification of the structural reliability of structures executed by probabilistic methods.

KEY WORDS: Evaluation, Structural reliability, Existing structures, Probabilistic methods.

ÍNDICE

	Página
1.- INTRODUCCIÓN	15
2.- LA SEGURIDAD ESTRUCTURAL	19
2.1.- Incertidumbres	22
2.2.- Fiabilidad estructural	23
2.3.- Métodos de comprobación de la seguridad	25
2.4.- El enfoque determinista y semi-probabilista de la seguridad estructural	26
2.5.- El enfoque probabilista de la seguridad estructural	29
3.- LAS ESTRUCTURAS EJECUTADAS	37
3.1.- Daños estructurales	38
3.2.- Mantenimiento estructural	40
4.- EVALUACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS EJECUTADAS	45
4.1.- Procedimiento	45
4.2.- Especificación de los objetivos de la evaluación	48
4.3.- Escenarios	48
4.4.- Evaluación preliminar	48
4.4.1.- Estudio de documentos y otras pruebas	48
4.4.2.- Inspección preliminar	48
4.4.3.- Controles preliminares	49
4.4.4.- Decisiones sobre las acciones inmediatas	49
4.4.5.- Recomendaciones para la evaluación detallada	49
4.5.- Evaluación detallada	49
4.5.1.- Búsqueda documental y revisión detallada	49
4.5.2.- Inspección detallada y ensayo de materiales	50
4.5.3.- Determinación de las acciones	50
4.5.4.- Determinación de las propiedades de las estructuras	50
4.5.5.- Análisis estructural	51
4.5.6.- Verificación	52
4.6.- Resultados de la evaluación	54
4.7.- Datos de la evaluación	54
4.7.1.- Acciones e influencias ambientales	54
4.7.2.- Propiedades de los materiales	55
4.7.3.- Propiedades de la estructura	56

4.7.4.- Dimensiones	56
4.8.- Informe de la evaluación	56
5.- ACTUALIZACIÓN DEL ESTADO DE LA ESTRUCTURA	61
5.1.- Los ensayos	61
5.2.- Las intervenciones	64
5.3.- Actualización de las propiedades	66
5.4.- Evaluación de la fiabilidad dependiente del tiempo	71
6.- MÉTODO BAYESIANO	77
6.1.- Conceptos básicos de la estadística	78
6.2.- Estimación de percentiles	79
6.3.- Estimación de percentiles mediante el método Bayesiano	83
7.- ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA CARACTERÍSTICA DEL HORMIGÓN MEDIANTE LA REALIZACIÓN DE ENSAYOS	91
7.1.- Ensayos	91
7.2.- Histograma	92
7.3.- Estimación de la resistencia característica del hormigón	94
8.- ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA CARACTERÍSTICA DEL HORMIGÓN MEDIANTE EL MÉTODO BAYESIANO	99
8.1.- Información previa	99
8.1.1.- Estudio número 1	100
8.1.2.- Estudio número 2	101
8.1.3.- Estudio número 3	101
8.1.4.- Estudio número 4	102
8.1.5.- Estudio número 5	103
8.1.6.- Estudio número 6	103
8.1.7.- Estudio número 7	104
8.1.8.- Estudio número 8	105
8.1.9.- Estudio número 9	105
8.1.10.- Estudio número 10	106
8.1.11.- Cálculo de la Información Previa	107
8.2.- Estimación de la resistencia característica del hormigón	109
8.2.1.- Estimación mediante el método Bayesiano	110
8.2.2.- Estimación mediante el método de predicción de percentiles	111
8.3.- Influencia de la información previa en el método Bayesiano	112

8.3.1.- Media grande y variación de la media pequeña	112
8.3.2.- Media grande y variación de la media grande	114
8.3.3.- Media pequeña y variación de la media pequeña	117
8.3.4.- Media pequeña y variación de la media grande	119
8.3.5.- Desviación estándar grande y variación de la desviación estándar pequeña	121
8.3.6.- Desviación estándar grande y variación de la desviación estándar grande	123
8.3.7.- Desviación estándar pequeña y variación de la desviación estándar pequeña	125
8.3.8.- Desviación estándar pequeña y variación de la desviación estándar grande	127
9.- CONCLUSIONES	131
10.- BIBLIOGRAFÍA	137
11.- INFOGRAFÍAS	141

1

INTRODUCCIÓN

1.- INTRODUCCIÓN

El uso continuado de las estructuras existentes es de gran importancia debido a que el entorno construido es un enorme activo económico y político, cada vez más grande. La evaluación de las estructuras existentes es ahora una de las principales tareas en la arquitectura. Al técnico estructural se le pide cada vez más idear formas para alargar la vida útil de las estructuras, teniendo en cuenta a la vez, unos costes ajustados.

Se requiere pues un establecimiento de principios para la evaluación de las estructuras existentes, ya que se basa en un enfoque que es sustancialmente diferente del diseño de nuevas estructuras y requiere un conocimiento más allá del alcance de los códigos de diseño.

El objetivo de estos códigos de diseño es el poder calcular las estructuras con unos coeficientes de seguridad que permitan un índice de fiabilidad que nos den las suficientes garantías de seguridad, y a la misma vez, obtener un diseño óptimo y no sobredimensionado. En la actualidad, el método de cálculo de estructuras contemplado en las normativas estatales, el Código Técnico de Edificación (CTE), y la norma EHE, se basan en el método de los coeficientes parciales de seguridad. Este método es semi-probabilístico, y esto quiere decir que las incertidumbres de las variables que intervienen en el cálculo, tales como las acciones y las resistencias, se han estudiado previamente mediante un estudio probabilístico para poder definir unos coeficientes de seguridad con los que calcular con una garantía de seguridad mínima.

Los técnicos pueden aplicar métodos específicos para la evaluación de la estructura, aprovechándola y así reducir los gastos de un cliente. El objetivo final es la de limitar la intervención a una construcción, una meta que está claramente de acuerdo con los principios del desarrollo sostenible.

Las consideraciones económicas, sociales y de sostenibilidad, dan como resultado una mayor diferenciación en la fiabilidad estructural para la evaluación de las estructuras existentes que para el diseño de nuevas estructuras, es por ello que para la evaluación de las estructuras existentes deberemos de utilizar métodos probabilísticos por ser la metodología más rigurosa y científica.

La dificultad principal radica en la necesidad de definir las variables básicas de forma más cuidadosa ya que para usar los métodos probabilistas se deben considerar las variables básicas como aleatorias y esto nos conlleva no sólo conocer la estadística sino

que también se hace necesaria la distribución de probabilidad. Al respecto de esta metodología, el CTE en el Anexo C hace una introducción así como también el Eurocódigo en el Anexo B.

Construir estructuras es una actividad económica que como cualquier otra implica la asunción de ciertos riesgos. Valorar el coste del fallo de una estructura implica valorar la vida humana, por lo tanto es un tema crítico el poder determinar la inversión razonable que nos permite evitar accidentes con consecuencias no deseadas. Los riesgos que han tenido más trascendencia en los últimos tiempos son los relativos al mundo financiero: La quiebra del grupo *Lehman Brothers* es un claro ejemplo de las graves consecuencias que podemos tener si trabajamos con riesgos mal controlados.

Actualmente no existen herramientas que permitan abordar fácilmente los problemas relacionados con la evaluación de la fiabilidad de estructuras existentes. Es por esto que este Trabajo Fin de Grado tiene por objetivo el acercar a la edificación la verificación de la fiabilidad estructural de las estructuras ejecutadas mediante metodología probabilista.

2

LA SEGURIDAD ESTRUCTURAL

2.- LA SEGURIDAD ESTRUCTURAL

El principal objetivo del Proyecto en Ingeniería Estructural, se basa en que la estructura cumpla de forma satisfactoria la función para la que inicialmente fue concebida; el mantenimiento de esta función a lo largo de la vida útil de la misma, depende de múltiples factores o parámetros que tradicionalmente han sido considerados como cantidades deterministas. Sin embargo:

- a) Los parámetros implicados en el Proyecto son inciertos por lo que deberán tratarse en forma estadística como variables aleatorias; en este sentido, problemas tales como las combinaciones de carga no pueden formularse sin razonamientos que impliquen consideraciones probabilistas.
- b) La falta de información acerca del comportamiento estructural, combinada con la utilización de códigos que incorporan factores relativamente altos de seguridad, pueden llevar a la conclusión, aún mantenida por algunos ingenieros y público en general, de que la seguridad absoluta puede alcanzarse.

A pesar de las salvedades anteriores, una observación de los datos indicados en la Tabla 2.1, permite afirmar que el riesgo de muerte por fallos estructurales es muy pequeño; siendo, por el contrario, su importancia relativa muy grande, lo que implica que los niveles aceptables de la probabilidad de fallo sean del orden de 10^{-3} ó 10^{-6} , para el caso de estructuras cuyo funcionamiento incorrecto trajese como consecuencia la pérdida de vidas humanas.

EXPOSICION	RIESGO DE MUERTE POR HORA POR CADA 10^8 PERSONAS EXPUESTAS	HORAS DE EXPOSICIÓN POR PERSONA EXPUESTA Y POR AÑO	RIESGO DE MUERTE POR CADA 10^4 PERSONAS EXPUESTAS POR AÑO
Alpinismo Internacional	2.700	100	27
Pesca de arrastre	59	2.900	17
Transporte aéreo (tripulaciones)	120	1.000	12
Minería de Carbón	21	1.600	3,3
Desplazamientos en automóvil	56	400	2,2
Construcción	7,7	2.200	1,7
Transporte aéreo (pasajeros)	120	100	1,2
Accidentes domésticos	2,1	5.500	1,1
Trabajo en Fábrica	2	2.000	0,4
Fuego en edificios	0,15	5.500	0,08
Fallo estructural	0,002	5.500	0,001

Tabla 2.1. Riesgos asumidos socialmente según actividades humanas (Gómez, M. S. y Alarcón, E.; 1992)

Hasta épocas relativamente recientes, el método utilizado para el establecimiento de la seguridad estructural ha sido el denominado en TENSIONES ADMISIBLES, y en él se supone a la estructura trabajando en régimen elástico, lo que permite determinar un valor máximo de la tensión, que se compara con el obtenido al dividir una tensión típica del material por un COEFICIENTE DE SEGURIDAD establecido en base a la experiencia. La situación se complica cuando, por ejemplo, se trata con estructuras (hormigón, madera) en las que las hipótesis de comportamiento lineal no son válidas más que para ciertos niveles de carga o bien cuando aparecen efectos especiales tales como abolladuras, alabeo de las secciones, etc.

La puesta a punto de los métodos de cálculo plástico de estructuras provocó, en los años 50, la reconsideración de los métodos de cálculo basados en el coeficiente de seguridad, y abrió el camino a la filosofía del cálculo en ESTADOS LIMITES, que arranca del reconocimiento del carácter incierto de cargas y acciones y establece un número finito de modos de fallo o estados límites, entendidos como los márgenes dentro de los que se considera satisfactoria la respuesta de la estructura, y frente a los que se establecen los niveles de seguridad correspondientes.

Esta última filosofía, ha sido la adoptada por las Normas españolas de estructuras de acero y hormigón y es la base conceptual de los Eurocódigos que regularán las construcciones en los próximos años.

Los fallos se relacionan con estados límites que pueden clasificarse en:

1. **Estados Límites Últimos**, establecen condicionantes relativos al colapso total o parcial de la estructura, como:
 - Rotura de secciones críticas
 - Pandeo por inestabilidad elástica o plástica
 - Pérdida global de equilibrio (vuelco, mecanismo, etc.).
2. **Estados Límites de Servicio**, relacionados con la funcionalidad de la estructura, entre ellos pueden citarse:
 - Flechas
 - Fisuración
 - Vibración, etc.

3. Estado Límite de Durabilidad, relacionado con la posibilidad de no alcanzar la vida útil de diseño como consecuencia de los procesos de degradación de los materiales en el medio, se pueden citar:

- Corrosión.
- Arenización.
- Pudrición, etc.

Por lo tanto, el fallo puede ser definido como la violación de uno de estos estados límite. A partir de las definiciones anteriores, el fallo no significa necesariamente el colapso de un elemento o sistema estructural. Con el fin de poder llevar a cabo un análisis estructural, los estados límite deben ser descritos cuantitativamente, esto se realiza con la ayuda de las llamadas funciones de estados límite (o rendimiento, función, G). La función de estado límite se define de la siguiente manera:

$G < 0$ - funcionamiento no deseado, la estructura no es segura.

$G = 0$ - un estado límite, es decir, el límite entre funcionamiento seguro e inseguro.

$G > 0$ - el funcionamiento deseado, la estructura es segura.

En la forma más simple de la función de estado límite se expresa como:

$$G = C - D$$

Dónde: C indica la capacidad de una estructura o un elemento estructural (por ejemplo, la resistencia, R .) y D es la demanda (por ejemplo, el efecto de la carga, S).

En general se proyecta para el estado límite más crítico y el resto se comprueba.

El Proyecto Estructural se realiza utilizando Normas o Códigos, que describen las mínimas consideraciones que deben tenerse en cuenta para el diseño, análisis y construcción de cada tipo estructural.

Hasta hace poco estos códigos podían considerarse como documentos en los que la práctica cotidiana estaba codificada, garantizando estructuras del lado de la seguridad, aunque no siempre económicas. La seguridad se alcanzaba, en la mayoría de los casos, no por un conocimiento profundo de las acciones, materiales y respuesta del sistema, sino por la codificación de prácticas comprobadas.

En la actualidad, diferentes códigos están poniéndose al día incorporando conceptos probabilistas; así, por ejemplo el diseño denominado LRFD (Load and

Resistance Factor Design) basado en conceptos probabilistas, ha sido propuesto tanto en Estados Unidos como en Europa.

En España esta línea se inició en los años 60 con las Normas relativas a estructuras de hormigón armado, siguiendo las de acero la misma filosofía.

La incorporación de estos nuevos conceptos a otras Normas industriales, es lenta debido fundamentalmente a:

- Problemas prácticos ocasionados por las numerosas restricciones existentes en el proyecto y por la complejidad inherente a la determinación de la respuesta del sistema.
- La falta de datos referentes a cargas, resistencia y otras variables implicadas en el proyecto.
- La incertidumbre en la cuantificación de los niveles de seguridad aceptados por la sociedad.
- La inercia al cambio de los profesionales en ingeniería.

La ventaja de la utilización de estos nuevos códigos descansa en la posibilidad de: incrementar la seguridad global para iguales costes de construcción o bien, que para idénticos o más consistentes niveles de seguridad los costes sean más bajos.

Las ventajas anteriores pueden conseguirse con una valoración racional de las diferentes fuentes de incertidumbre, asociadas a cada tipo estructural y con el estudio de las posibles interacciones entre las mismas.

2.1.- Incertidumbres

Por lo general, todas las variables básicas utilizadas en ingeniería estructural tienen asociadas algún tipo de incertidumbre; hecho reconocido, implícitamente, en todos los códigos mediante el factor de seguridad; siendo inútil, por tanto, argumentar que los valores de todas las variables están acotados o pueden estarlo mediante controles adecuados, pudiendo utilizar estas cotas como valores base para el proyecto. En ingeniería estructural tales argumentos no son válidos:

- Los límites superiores de los valores de las cargas y los inferiores de la resistencia de los materiales no son fácilmente identificables.

- En el caso que tales cotas existiesen, su utilización como valores de cálculo podría ser irracional y conducir a la realización de proyectos antieconómicos.
- Los límites impuestos por los controles de calidad, verificaciones, etc., nunca pueden aceptarse como fiables al 100%; piénsese, por ejemplo, en el caso en el que las propiedades son evaluadas mediante rotura de probetas.

En el marco de la Teoría de la Fiabilidad Estructural, Armen Der Kiureghian, establece los siguientes tipos de incertidumbres:

- 1. Incertidumbres físicas:** Son consecuencia de la variabilidad inherente a las magnitudes físicas implicadas en el problema (dimensiones, propiedades, del material, cargas, resistencia, etc.).
- 2. Incertidumbres estadísticas:** Surgen de los modelos probabilistas utilizados para caracterizar a las Variables Básicas del problema, y son consecuencia de las aproximaciones que, debido a la falta de información, han de formularse para elegir las Funciones de Distribución y estimar los parámetros de las mismas.
- 3. Incertidumbres del modelo:** Generadas como consecuencia de las hipótesis simplificadoras (homogeneidad; comportamiento elástico, elasto-plástico; pequeñas deformaciones; condiciones de contorno) realizadas en los modelos matemáticos utilizados para describir un fenómeno tan complejo como es la respuesta del sistema estructural.

Mientras que la variabilidad de los dos últimos tipos de incertidumbres puede reducirse, mediante el estudio y la investigación, las correspondientes al primer tipo son inevitables.

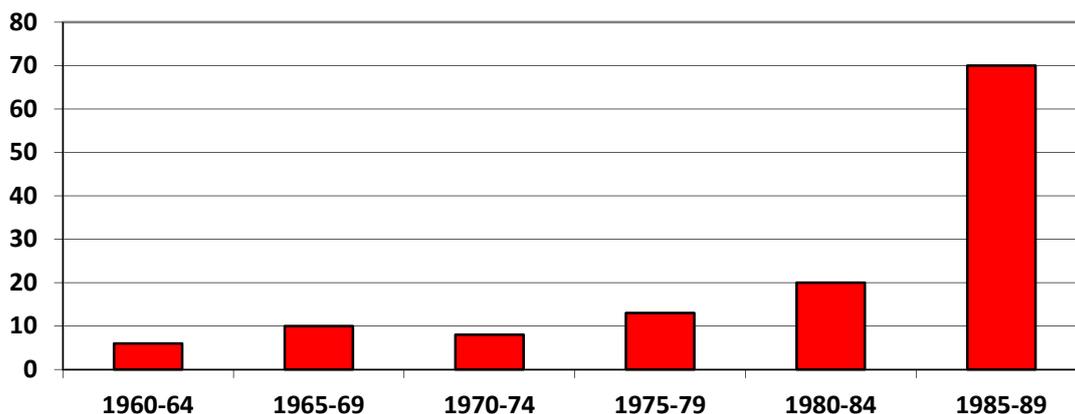
2.2.- Fiabilidad estructural

El término "fiabilidad" se utiliza con cierta frecuencia de una manera un tanto vaga e imprecisa. A menudo el concepto de fiabilidad se percibe de una forma radical, la estructura es o no es fiable. Conforme a esta mentalidad, si una estructura es calificada como fiable se transmite la idea de que "Un fallo en esta estructura no sucederá nunca". La aseveración en términos negativos ("esta estructura no es fiable") suele ser entendida con mucho más acierto: los fallos se aceptan como una parte del mundo real y la probabilidad o frecuencia de su aparición puede ser, en consecuencia, objeto de estudio.

La definición de Fiabilidad Estructural, debe recoger cuatro conceptos importantes:

1. Requisitos (prestaciones) - definición del fallo estructural.
2. Periodo de tiempo - estipulación de un determinado tiempo de servicio T .
3. Nivel de fiabilidad - determinación de la probabilidad de fallo P_f .
4. Condiciones de uso - acotación de las incertidumbres.

La Teoría de la Fiabilidad, aplicada inicialmente a procesos industriales de producción en serie, fue adaptada en 1960 al campo de la Ingeniería Estructural con objeto de elaborar métodos que permitiesen determinar los niveles de seguridad de los Sistemas Estructurales, en base a un tratamiento racional de las incertidumbres existentes en los mismos. Momento a partir del cual esta área de investigación ha experimentado un fuerte impulso, y las bases teóricas desarrolladas han pasado de ser un tema de investigación académica a un conjunto de metodologías con un amplio rango de aplicación práctica.



Fiabilidad estructural. Número de artículos

A modo de ejemplo una interesante frase, atribuible a un antiguo presidente de la prestigiosa asociación escocesa de Ingenieros Estructurales:

“La ingeniería estructural es el arte de modelizar materiales que no comprendemos del todo, en formas que no podemos analizar de un modo preciso, para soportar esfuerzos que no podemos evaluar adecuadamente, de manera que el público en general no tenga razón alguna para sospechar de la amplitud de nuestra ignorancia.”

La frase es reconocedora de la gran cantidad de incertidumbres que hay sobre el hecho estructural. Lo que convierte a las variables intervinientes en variables con más o menos aleatoriedad.

2.3.- Métodos de comprobación de la seguridad

Dependiendo del grado de información de que se dispusiese, acerca del problema estructural; el JCSS (Joint Committe on Structural Safety), agrupó los métodos de verificación de la seguridad en los siguientes niveles:

JERARQUÍA DE LOS MÉTODOS DE FIABILIDAD ESTRUCTURAL					
NIVEL	PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO	DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD	FUNCIONES DE FALLO	CONSIDERACIÓN DE INCERTIDUMBRES	RESULTADO
1 Norma y Códigos	Calibración mediante métodos de Nivel II y III	No se consideran	En general lineales	Determinista (valores característicos)	Factores de seguridad parciales
2	Métodos de Nivel II	Distribuciones normales o asimilables	Lineales o aproximadas como lineales	Momentos de 2º Orden	Probabilidad de Fallo
3 Métodos exactos	Algoritmos de transformación	Cálculo de la Normal equivalente	Lineales o aproximadas como lineales	Variables aleatorias	Probabilidad de Fallo
	Métodos de integración numérica y simulación	Tipo Arbitrario	Tipo Arbitrario		
4 Métodos de decisión	Cualquiera de los anteriores + Coste Generalizado				Optimización de Coste Generalizado

Nivel I

Con una base semiprobabilista, utilizan Factores Parciales de ponderación de las cargas, γ_S , y resistencia, γ_R , relacionados con los valores característicos predefinidos o valores nominales, se incluye en este nivel el tradicional formato en Tensiones Admisibles.

Este tipo de procedimientos fue inicialmente designado como formato en Estados límites; sin embargo, es preferible este término para designar los límites de separación entre el fallo y la seguridad.

Nivel II

Métodos que utilizan procedimientos aproximados para obtener valores numéricos de la probabilidad de fallo.

Frecuentemente están asociados con una representación simplificada de las Distribuciones de Probabilidad, ya que solamente utilizan para definir las hasta los momentos de 2º orden e inferiores: valor medio, desviación típica y covarianza, con objeto de caracterizar la correlación entre las distintas variables.

Nivel III

Implican una descripción probabilista completa de la Función de Distribución conjunta de las variables básicas que afectan a la respuesta de la estructura.

Nivel IV

Métodos que evalúan la probabilidad de fallo con objeto de minimizar el coste generalizado de la estructura: construcción + mantenimiento + reparación, en caso de fallo. Este tipo de procedimientos son apropiados para sistemas estructurales (puentes de autopista, etc.) en los que las pérdidas económicas producidas, en el caso de funcionamiento incorrecto de la estructura, sean mucho mayores que las expectativas de pérdidas de vidas humanas, o factores tales como los ecológicos o culturales.

Aunque los cuatro niveles representan una jerarquización de los procedimientos existentes para evaluar la seguridad; la clasificación no es, en modo alguno, exhaustiva, es el caso de procedimientos que utilizando más información de la requerida en los métodos de Nivel II, no disponen de datos suficientes como para poder evaluar la distribución de probabilidad conjunta tal y como demandan los de Nivel III.

2.4.- El enfoque determinista y semi-probabilista de la seguridad estructural

En el enfoque determinista, la seguridad de la capacidad (C) de una estructura para soportar una carga siempre supera el efecto de la carga o de la demanda (D) que se le imponga con un margen significativo generalmente expresado a través del llamado coeficiente de seguridad:

$$\text{Coeficiente de Seguridad} = \frac{\text{Capacidad o Resistencia (C)}}{\text{Demanda o Solicitación (D)}} = \frac{R}{S} \quad (2.1)$$

Esto se ilustra en la figura 2.1 donde la línea en la posición "C" indica la magnitud de la fuerza o la "capacidad". Esto podría ser, por ejemplo, la fuerza requerida para causar colapso de la estructura, o la tensión en un elemento que podría causar fallo del material. La línea "D" representa la máxima sollicitación o "demanda" esperada, es el

efecto de carga sobre la estructura; de nuevo esto puede ser medido como una fuerza o una tensión. Mientras la magnitud de "C" sea mayor que la de "D", existirá un margen (o coeficiente) de seguridad.

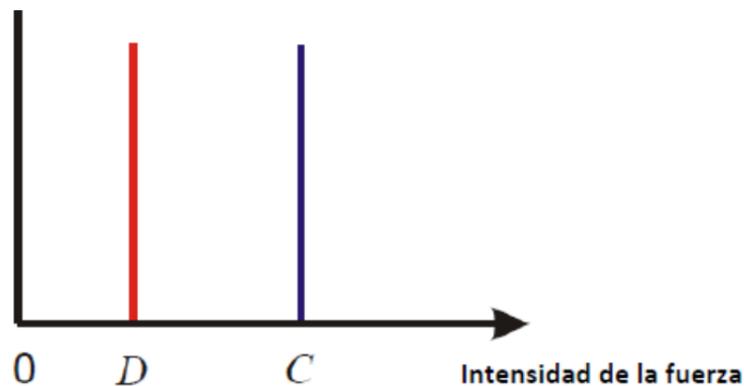


Fig. 2.1 Diagrama esquemático que ilustra el enfoque determinista de seguridad estructural

La principal limitación del enfoque determinista para seguridad estructural, es que no admite la posibilidad de fallo, pero los fallos ocurren. Si el coeficiente de seguridad se reduce en un 30% ¿en qué cantidad de ha incrementado el riesgo de fallo? Por otro lado, si el coeficiente de seguridad se incrementa en un 30% ¿en cuánto se ha reducido el riesgo de fallo estructural? El modelo no tiene una respuesta.

Las incertidumbres de la Capacidad (C) y de la Demanda (D), se reconoce en el enfoque normativo de los coeficientes parciales de seguridad. Este enfoque asocia valores característicos D_K y C_K con demanda y capacidad, por lo general con representación probabilista cercana del 95% - superior e inferior, respectivamente, como se muestra en la Figura 2.2. Aquí, en lugar de limitarse a tomar los valores medios o más probables, se reconocen las incertidumbres de la demanda y la capacidad.

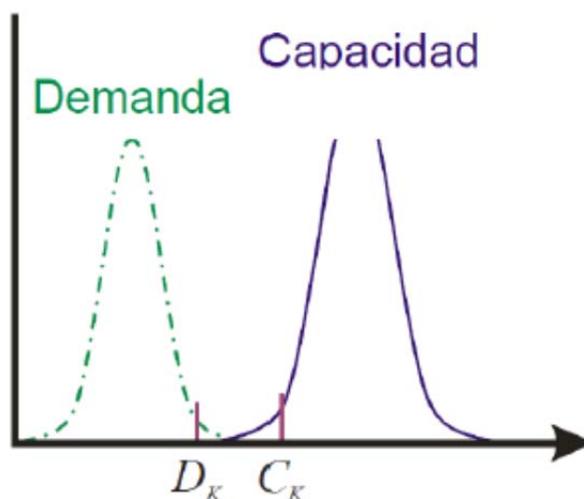


Fig. 2.2. Ilustración de la demanda característica (D_K) y la capacidad característica (C_K) que se utilizan en el enfoque de los coeficientes parciales de seguridad.

Si las distribuciones de la demanda y la capacidad son distribuciones normales:

$$D_K = \mu_K + 1,645 \sigma_K \quad \text{y} \quad C_K = \mu_K - 1,645 \sigma_K \quad (2.2)$$

Donde el 1,645 es el factor correspondiente al 95% del área bajo la curva de distribución normal.

Ahora, en lugar de usar un solo coeficiente de seguridad, en este enfoque, se utiliza un número de coeficientes de seguridad parciales. Estos coeficientes parciales de seguridad están determinados por expertos y Códigos donde han de considerarse todas las fuentes de incertidumbre asociadas a la estructura y a las consecuencias de sus fallos.

La D_K , demanda característica o sollicitación característica, se multiplica por una serie de coeficientes parciales de seguridad (generalmente $>1,0$), para tener en cuenta la incertidumbre en la estimación de la carga. Por ejemplo, una estructura puede estar sujeta a una carga de nieve, pero el espesor de la capa y el peso de ésta, puede ser difícil de predecir en la etapa de diseño, por lo que un margen de seguridad se debe introducir a través de un coeficiente parcial de seguridad. Similares coeficientes parciales de seguridad existen para las incertidumbres de capacidades o resistencia (normalmente $<1,0$). Por ejemplo, si se limita el control de calidad durante la construcción, entonces los elementos estructurales pueden tener una resistencia inferior a lo previsto por el diseñador. La división de la resistencia o capacidad característica por un coeficiente parcial de seguridad $> 1,0$ permitirá estimar la incertidumbre asociada a este efecto.

Para garantizar la seguridad el método exige que:

$$C_K / (\gamma_{m1} \gamma_{m2} \dots) \geq DK (\gamma_{f1} \gamma_{f2} \dots) \quad (2.3)$$

Donde, γ_m y γ_f son los coeficientes parciales de seguridad para las capacidades y demandas respectivamente. Si esta desigualdad no se cumple entonces la capacidad característica C_K de diseño debe ser aumentada. Esto se conoce como el enfoque semi-probabilístico y es la base de muchos códigos de diseño.

2.5.- El enfoque probabilista de la seguridad estructural

El enfoque probabilista de la seguridad estructural supone que todos los aspectos de la incertidumbre sobre la demanda y la capacidad se pueden evaluar de forma explícita. En el caso más simple D y C se pueden modelar como dos variables aleatorias representadas por distribuciones de probabilidad: $f_D(D)$ y $f_C(C)$. La función de estado límite G, dada por la ecuación $G=C-D$, determina una probabilidad de fallo, $P_f(G)$, que se puede expresar como:

$$P_f(G) = P(G \leq 0) = P(C - D \leq 0) \quad (2.4)$$

Una estructura o elemento estructural falla cuando la demanda excede la capacidad (o la sollicitación es superior a su resistencia). Si la capacidad de una estructura C es igual a un valor específico c, la estructura falla cuando $D \geq c$. Sin embargo, D es también una variable aleatoria, por lo tanto la probabilidad de fallo se puede expresar como la suma de todas las posibles intersecciones de dos sucesos: $(C = c)$ y $(D \geq c)$

$$P_f = \sum P[(C = c) \cap (D \geq c)] = \sum P(D \geq C / C = c) P(C = c) \quad (2.5)$$

Si C y D son variables aleatorias continuas, la suma se sustituye por la integración. La probabilidad

$$P(D \geq C / C = c) = 1 - P(D < C / C = c) = 1 - F_D(c) \quad (2.6)$$

En el límite

$$P(C = c) = f_c(c)dc \quad (2.7)$$

$$P_f = \int_{-\infty}^{\infty} [1 - F_D(c)] f_c dc = 1 - \int_{-\infty}^{\infty} F_D(c) f_c(c) dc \quad (2.8)$$

De manera similar también se puede demostrar que la probabilidad de fallo puede expresarse como:

$$P_f = \int_{-\infty}^{\infty} [F_C(d)] f_D(d) dd \quad (2.9)$$

Generalmente, la capacidad C puede ser una función de las propiedades de los materiales y las dimensiones estructurales, mientras que la demanda D, es función de las cargas aplicadas, la densidad de los materiales y también las dimensiones estructurales, y cada uno de estos parámetros puede ser una variable aleatoria en sí misma. Podemos considerar que el vector, $X = \{X_1, X_2, \dots\}$ representa todas las variables aleatorias que afectan a C y D; dichas variables aleatorias se llaman las variables aleatorias básicas para este problema.

La función de densidad de probabilidad conjunta del vector X de las variables aleatorias básicas, se puede denotar como $f_X(x)$. La probabilidad de fallo puede entonces expresarse como:

$$P_f = P[G(X) \leq 0] = \int_{G(X) \leq 0} \dots \dots \int f_X(x) dx \quad (2.10)$$

Observe que la capacidad C y la demanda D no aparecen ya en la formulación de P_f , en general, que pueden estar implícitas en X. Si las variables aleatorias básicas son estadísticamente independientes entonces su función de densidad de probabilidad conjunta se puede encontrar como:

$$f_X(x) = \prod_i f_{X_i}(x_i) = f_{x_1}(x_1) f_{x_2}(x_2) f_{x_3}(x_3) \dots \dots \dots \quad (2.11)$$

Donde, $f_{X_i}(x_i)$ es la FDP (función de densidad de probabilidad) marginal de la variable aleatoria básica i-ésima. La integral multidimensional sobre el dominio de fallo $G(X \leq 0)$. La ecuación (2.10) no es fácil de poder resolver analíticamente, con algunas excepciones que veremos. En general, la integral se evalúa numéricamente utilizando la simulación de Monte Carlo o métodos aproximados especialmente desarrollados.

Un caso particular, en el que la probabilidad de fallo se puede evaluar con facilidad, es aquel que C y D pueden ser tratados como variables aleatorias normales independientes. La función límite $G = C - D$ es también, una variable aleatoria normal con la siguiente media y la varianza.

$$\mu_G = \mu_C - \mu_D \quad \text{y} \quad \sigma_G^2 = \sigma_C^2 + \sigma_D^2 \quad (2.12)$$

Donde μ_C y μ_D son los valores medios y σ_C y σ_D desviaciones estándar de C y D, respectivamente. La probabilidad de fallo expresado por la ecuación. (2.4) se convierte en:

$$P_f = P(G \leq 0) = F_G(0) = \Phi\left(\frac{0 - \mu_G}{\sigma_G}\right) = \Phi\left(-\frac{\mu_G}{\sigma_G}\right) = \Phi(-\beta) \quad (2.13)$$

Donde, $\beta = \mu_G/\sigma_G$ se define como índice de fiabilidad de Cornell y $\Phi(\cdot)$ es el FDA (función de distribución acumulada) de la distribución normal estándar. El índice de fiabilidad también se puede expresar en función de los parámetros estadísticos mediante la ecuación. (2.12)

$$\beta = \frac{\mu_G}{\sigma_G} = \frac{\mu_C - \mu_D}{\sqrt{\sigma_C^2 + \sigma_D^2}} \quad (2.14)$$

El índice de fiabilidad es un parámetro muy importante en la seguridad estructural, muy a menudo se utiliza como una medida de la probabilidad de fallo. Como puede verse a partir de la ecuación. (2.13) existe una relación directa entre β y P_f , se representa en la Tabla 2.2.

$$P_f = \Phi(-\beta)$$

P_f	0.5	0.1	0.05	0.01	1×10^{-3}	1×10^{-4}	1×10^{-5}	1×10^{-6}
β	0	1.28	1.64	2.33	3.09	3.72	4.26	4.75

Tabla 2.2. Relación entre la Probabilidad de fallo y el índice de fiabilidad

Según indica la ecuación (2.14), el índice de fiabilidad de Cornell, β , representa el número de desviaciones estándar, σ_G , que separan el valor medio del origen de coordenadas (ver figura 2.3), lo que proporciona una medida de fiabilidad del sistema

estructural, ya que cuanto más separado esté la media, μ_G , del origen (β mayor), menor será la probabilidad de fallo (zona sombreada en la figura).

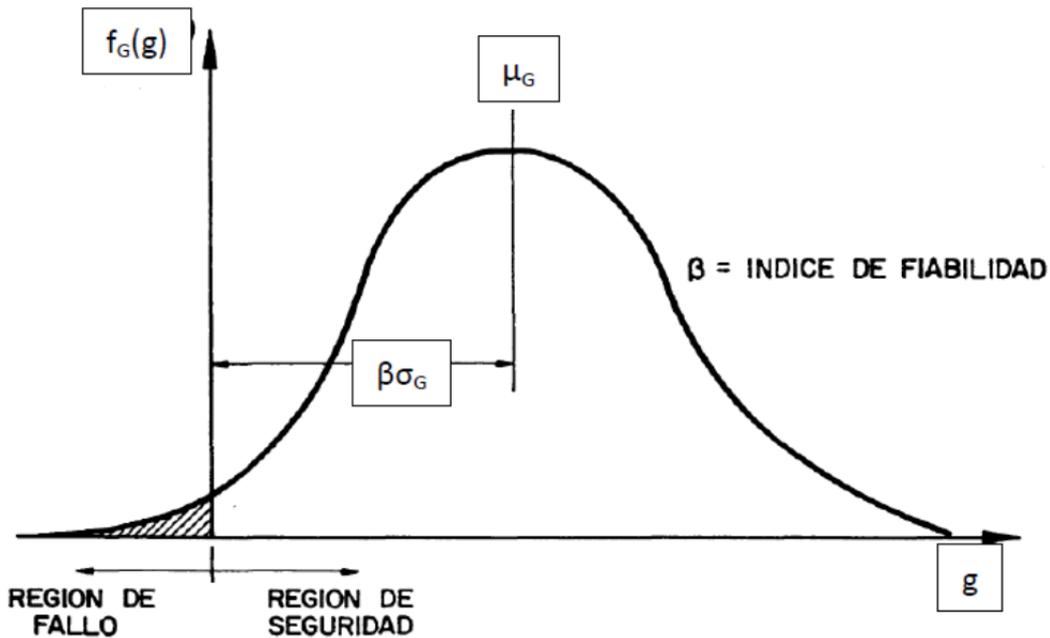


Fig. 2.3 Función de densidad de la función G.

Recordemos que la forma más simple de la función de estado límite se expresa como: $G = C - D$. En la figura 2.4 se pueden ver las regiones seguras y de fallo con la función límite: $G = 0$

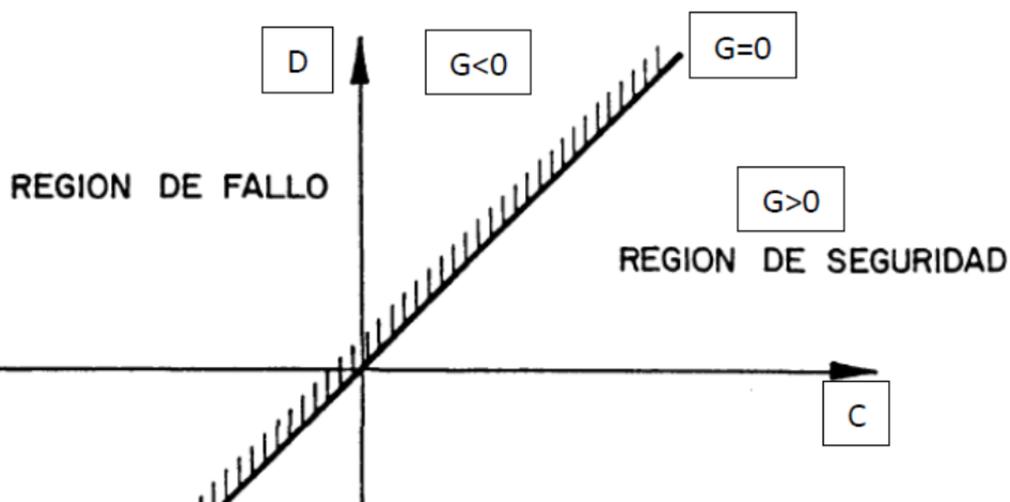


Fig. 2.4 Función de estado límite lineal.

En el enfoque determinista de seguridad de una estructura se proporciona utilizando el coeficiente de seguridad, que es la razón de la capacidad a la demanda (ver la ecuación. (2.1)). No se especifica qué valores de C y D se utilizan. Si C y D están

representados por sus valores medios entonces su relación se conoce como el coeficiente de seguridad central, λ_0 .

$$\lambda_0 = \frac{\mu_C}{\mu_D} \quad (2.15)$$

Cuando C y D son variables aleatorias normales e independientes es fácil establecer una relación entre λ_0 y P_f (o β). De la ecuación. (2.13)

$$P_f = \Phi\left(-\frac{\mu_G}{\sigma_G}\right) = \Phi\left(-\frac{\mu_C - \mu_D}{\sqrt{\sigma_C^2 + \sigma_D^2}}\right) = \Phi\left(-\frac{\mu_C - \mu_D}{\sqrt{CoV^2(C)\mu_C^2 + CoV^2(D)\mu_D^2}}\right) \quad (2.16)$$

Y dividiendo por μ_D

$$P_f = \Phi\left(-\frac{\lambda_0 - 1}{\sqrt{CoV^2(C)\lambda_0^2 + CoV^2(D)}}\right) = \Phi(-\beta) \quad (2.17)$$

De la última ecuación también puede demostrarse que:

$$\lambda_0 = \frac{1 + \beta[CoV^2(C) + CoV^2(D) - \beta^2 CoV^2(C)CoV^2(D)]^{1/2}}{1 - \beta^2 CoV^2(C)} \quad (2.18)$$

La ecuación (2.18) muestra que el coeficiente de seguridad central depende de la variabilidad de la capacidad y la demanda (es decir, $CoV(C)$ y $CoV(D)$), con el fin de garantizar el mismo nivel de seguridad (es decir, los mismos valores objetivos de P_f o β) se han de tomar diferentes valores de λ_0 en función de los coeficientes de variación $CoV(C)$ y $CoV(D)$. Esto supone una importante deficiencia del enfoque determinista.

La ecuación (2.14) del índice de seguridad, se puede extender para un caso más general, cuando la función de estado límite es una función lineal de n variables aleatorias normales independientes, X_i ($i = 1, \dots, n$).

$$G(X) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i X_i \quad (2.19)$$

Donde, a_i ($i = 0, \dots, N$) son constantes. La función de estado límite es entonces también una variable aleatoria normal con media:

$$\mu_G = E[G(X)] = E\left[a_0 + \sum_{i=1}^n a_i X_i\right] = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \mu_{xi} \quad (2.20)$$

Y varianza.

$$\sigma_G^2 = Var[G(X)] = Var\left[a_0 + \sum_{i=1}^n a_i X_i\right] = \sum_{i=1}^n (a_i \sigma_{xi})^2 \quad (2.21)$$

Luego el índice de fiabilidad es entonces igual a:

$$\beta = \frac{\mu_G}{\sigma_G} = \frac{a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \mu_{xi}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i \sigma_{xi})^2}} \quad (2.22)$$

3

LAS ESTRUCTURAS EJECUTADAS

3.- LAS ESTRUCTURAS EJECUTADAS

Comprobar una estructura existente comporta entenderla a fondo. En el ámbito de la Medicina, entender bien el caso del paciente se basa en una bien estudiada historia clínica, en un reconocimiento visual, en la analítica y, finalmente, en la formulación de un diagnóstico que explique la causa de los males. No hay razón alguna para no aplicar un modus operandi similar a las construcciones existentes.

Algunos planteamientos sostienen la idea de que las estructuras no deberían seguir en servicio más allá de un periodo de tiempo definido de manera convencional, con independencia del estado en que se encuentren, atendiendo a criterios de caducidad nominal o de amortización de la infraestructura, debiéndose entonces demoler y reponer. Sin embargo, los principios de la sostenibilidad, perfectamente aplicables a la ingeniería, están abriendo nuevos escenarios y exigiendo nuevas estrategias de decisión, que incluyen la posibilidad de alargar el plazo de vida de las construcciones.

En ese contexto, es preciso reconocer que se ha dedicado poco tiempo al mantenimiento de las construcciones, tanto desde el punto de vista técnico, como desde el económico o el educativo lo que no deja de ser un síntoma de que la sociedad no ha considerado el mantenimiento de las estructuras una tarea tan importante como la del cuidado de aviones o de ferrocarriles de alta velocidad. Por desgracia, algunos accidentes recientes parecen haber propiciado un cambio de tendencia.



Imagen 3.1 Reparación de las estructuras de hormigón

3.1.- Daños estructurales

En los últimos años han proliferado diferentes catálogos de daños para ayudar a los técnicos en la detección de daños en ciertas estructuras. El problema es que la excesiva especialización ha conducido, por desgracia, a una comprensión e interpretación parciales de dichos documentos.

Así, por una parte, los ingenieros estructurales se sienten cómodos cuando dan con fisuras que no siempre son fallos, sino la expresión de un funcionamiento según lo previsible de flexión, cortante, etc., pero se encuentran a disgusto con esa desazón que produce el descubrimiento de que no se sabe y que se está lejos de saber cuando tienen que reconocer fallos debidos a procesos electroquímicos de corrosión de armaduras, descementación de sillares de arenisca o ataques por sulfatos.

Por otra parte, cuando los especialistas en materiales han de inspeccionar una construcción tienden a buscar corrosiones, presiones osmóticas e iones asesinos, aunque sean más evidentes los daños producidos por una sobreexplotación de la estructura por aumento de las cargas o por errores de proyecto y construcción.

Por todo esto puede concluirse que la detección e interpretación de los daños requiere el concurso de técnicos “completos”, técnicos educados para ello.

Es bien sabido que las deformaciones impuestas o coartadas apenas producen efectos estructurales (esfuerzos) en estructuras isostáticas, y que, en teoría, si comportan grandes esfuerzos en las hiperestáticas. El técnico inspector debe tener en cuenta que las consecuencias reales de los efectos de los movimientos impuestos en estructuras hiperestáticas son mucho menores que los que se deducen del convencional.

El técnico puede toparse con estructuras apenas fisuradas, pero con importantes deformaciones diferidas. A pesar de una buena apariencia, estas estructuras ocultan traidoramente su mal y constituyen una trampa peligrosa para el técnico incauto. Proyectadas en los primeros años del hormigón estructural, cuando aún no se había entendido bien la necesidad de disponer armadura comprimida a partir de un cierto valor del momento solicitante (la bien conocida hoy frontera del “momento límite”), estas estructuras pueden dar lugar a roturas frágiles que, por desgracia, no se pueden prevenir con la socorrida panacea de las bandas de fibra de carbono, sencillamente porque no llegarán jamás a entrar en carga.



Imagen 3.2 Refuerzo estructural con bandas de fibra de carbono

Algunos inspectores han mostrado gran preocupación al dar con fisuras de abertura relativamente grande y localizadas en clave y arranques de bóvedas. Tales fisuras no son sino la manifestación de un comportamiento normal de este tipo de estructuras, de fábrica o de hormigón en masa. La explicación de esta carencia formativa hay que buscarla en el hecho de que al técnico de hoy no se le enseña en la Universidad el funcionamiento de bóvedas de ese tipo, vieja tipología que ya no se utiliza y, por tanto, no se enseña.

Vicios ocultos del proyecto o la construcción pueden llevar a situaciones de colapso, hay técnicas que permiten confinar el viejo hormigón mediante encamisados de diferente tipo, pero el ingeniero sensato debe contribuir a delimitar el límite lógico de lo que es razonable reparar, sopesando la importancia de los daños, los costes de reparación y la vida útil residual.

El empleo (indiscriminadamente creciente) de sales fundentes en carreteras puede producir, cuando las sales se disuelven en el agua y esta riega los paramentos de hormigón, importantes daños al hormigón, destruyéndolo hasta el punto de amenazar incluso la estabilidad de los aparatos de apoyo. El problema puede eludirse en gran medida si se disponen sencillos sistemas de evacuación del agua (drenaje) y se lleva a cabo un mantenimiento adecuado.

Los ataques de tipo químico no son tan fáciles de detectar, puesto que síntomas similares pueden tener un origen muy diverso. Así, la retracción plástica que se puede producir poco después de poner en obra el hormigón, los gradientes térmicos que se generan en el proceso de fraguado y primer endurecimiento de la pasta de cemento, o el ataque químico a que da lugar la presencia de aguas selenitosas en elementos de hormigón que se construyeron con cementos inadecuados, producen un patrón de Fisuración (en “mapa” o en “piel de cocodrilo”) muy similar. Por tanto, es esencial que el inspector, in situ, identifique la relación de posibles causas que expliquen lo sucedido, señalando los ensayos y análisis necesarios para rematar el diagnóstico.



Imagen 3.3 Fisuración del hormigón (en “mapa” o en “piel de cocodrilo”)



Imagen 3.4 Corrosión de las armaduras

En los últimos lustros se ha producido un gran avance en el estudio de la **corrosión de las armaduras**. Se dispone ahora de modelos que proporcionan una razonablemente buena estimación de la vida útil. Por medio de estos modelos, el técnico-inspector-reparador está en condiciones de evaluar la vida útil residual y de definir con buen criterio la metodología de reparación y mantenimiento. Esto, que parece una tarea

menor, implica una gran responsabilidad, puesto que una reparación mal concebida o ejecutada puede enmascarar otros males no detectados, lo que trae consigo una reducción de la vida útil y un desprestigio del reparador.

3.2.- Mantenimiento estructural

Una vez aceptado el hecho de que las estructuras experimentan una inexorable degradación, la labor del técnico es definir la mejor estrategia para mantener la seguridad,

la funcionalidad y la durabilidad por encima de unos umbrales mínimos. Debe tenerse en cuenta que, teóricamente, todas las actuaciones deben conducir a un aumento de la vida útil. Sin embargo, una actuación erróneamente concebida o ejecutada puede incluso acelerar los procesos de deterioro.

La vida útil t_1 de una estructura es la suma del periodo de iniciación t_0 y del periodo de propagación t_2 , entendido este como el plazo de tiempo que transcurre desde que la estructura queda desprotegida frente al ataque hasta que se alcanza un cierto umbral de daño aceptable. Por desgracia, suele actuarse cuando se ha sobrepasado con creces el umbral aceptable de daño. Además, casi siempre, actuar con carácter preventivo es mucho más barato.

La cuantificación de los periodos de iniciación y de propagación requiere un correcto diagnóstico de los mecanismos de deterioro y una suficiente evaluación de los parámetros relevantes de los modelos disponibles: de nuevo una tarea que exige el concurso de técnicos expertos.

Es de gran interés constatar como algunas sociedades han asumido la necesidad de implantar políticas de mantenimiento hasta hacerlas exponente de una conciencia colectiva. La Instrucción EHE exige la previsión, en el proyecto, de dispositivos que faciliten la inspección y la realización de operaciones de sustitución de elementos de vida útil inferior a la general prevista a la estructura (p.e., aparatos de apoyo, juntas, etc.)

Un nuevo elemento de debate se ha incorporado hace relativamente poco tiempo al planteamiento del "ciclo de vida" de las construcciones: la seguridad del usuario. Ya no se trata solo de controlar las fisuras de torsión o el contenido de cloruros, esto es, de la seguridad y la vida de la propia estructura, sino de algo más próximo al ciudadano y al político: resulta inaceptable, en términos políticos y económicos, que la estructura o su equipamiento puedan resultar peligrosos o inadecuados en caso de accidente previsible. Es una señal que se da solo en las sociedades avanzadas, que dan más valor a la vida y salud humanas.

Desde un punto de vista exclusivamente técnico, el problema es de una complejidad extraordinaria y la forma habitual de resolverlo, hoy por hoy, es por vía empírica, que valide la utilización de sistemas en determinadas hipótesis o circunstancias.

4

EVALUACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS EJECUTADAS

4.- EVALUACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS EJECUTADAS

La evaluación de la resistencia de una estructura existente exige experiencia y un sólido criterio profesional. La evaluación puede iniciarse bajo las siguientes circunstancias:

- Se considera que la calidad de los materiales es deficiente.
- Hay evidencias que indican fallas de construcción.
- La construcción se ha deteriorado.
- Una estructura existente se utilizará para una nueva función.
- Una construcción o una parte de una construcción no parece satisfacer los requisitos de los Códigos de diseño.

El objetivo de la evaluación de una estructura existente, en términos de su desempeño estructural requerido, se podrá especificar sobre la base de los siguientes niveles de desempeño:

- Nivel de desempeño de seguridad, lo que proporciona una seguridad adecuada para los usuarios.
- Nivel de rendimiento continuo, que proporciona el uso continuado de estructuras especiales, tales como hospitales, edificios de comunicación o puentes. Construcciones claves en el caso de un terremoto o de cualquier otro peligro imprevisto.
- Los requisitos especiales del cliente en relación con la protección de la propiedad (pérdida económica o de utilidad). El nivel de esta actuación se basa generalmente en el coste del ciclo de vida.

4.1.- Procedimiento

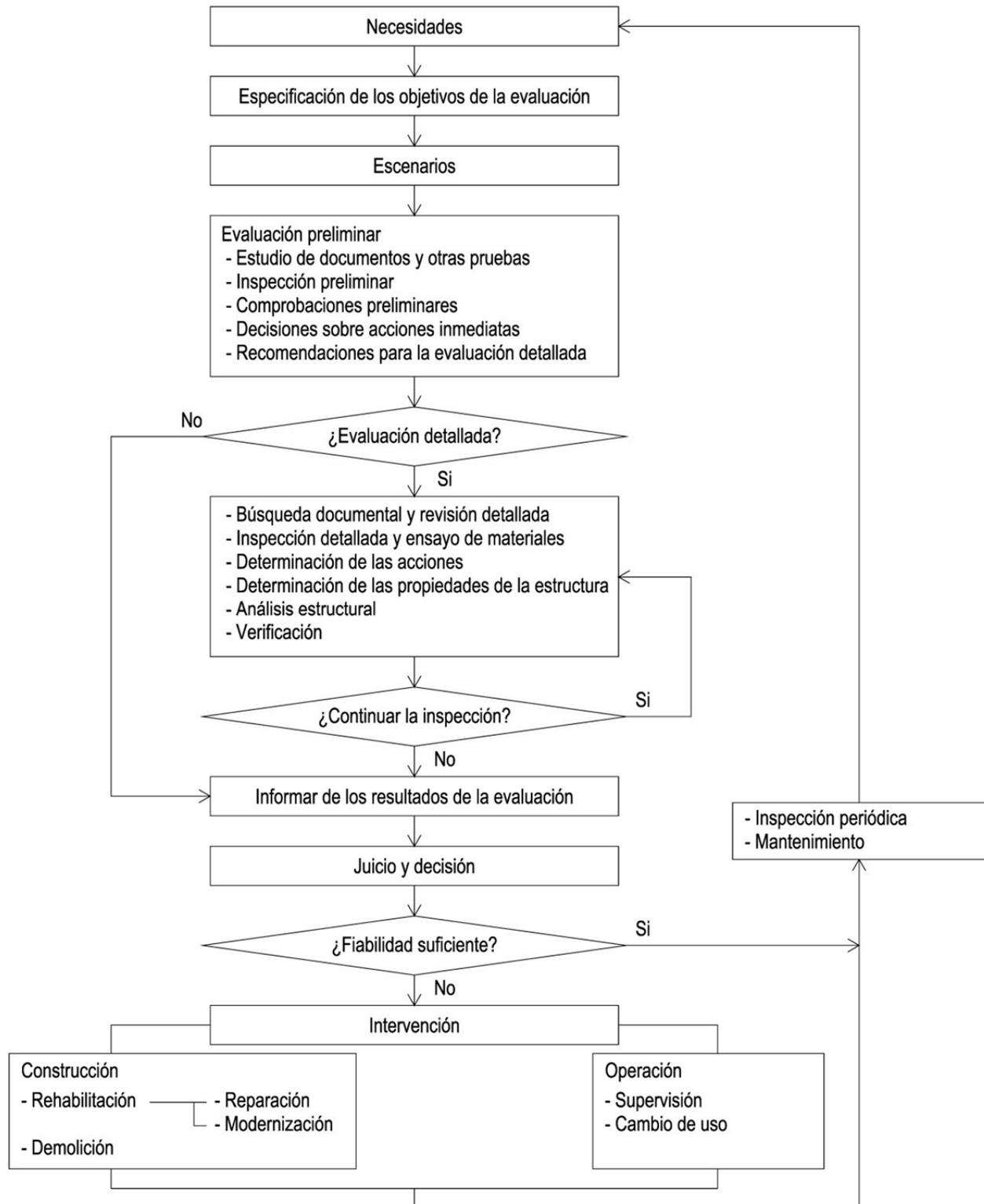
El procedimiento depende de los objetivos de evaluación, y de las circunstancias específicas (por ejemplo, la disponibilidad de los documentos de diseño, la observación de los daños, el uso de la estructura). Es importante realizar una visita al lugar antes de iniciar el procedimiento.

La evaluación se lleva a cabo teniendo en cuenta las condiciones reales de las estructuras (Ver figura 4.1. Diagrama de flujo para la evaluación general de las estructuras existentes) y se compone en general de los siguientes pasos:

- a) Especificación de los objetivos de la evaluación.
- b) Escenarios.
- c) Evaluación preliminar:
 - Estudio de documentos y otras pruebas.
 - Inspección preliminar.
 - Comprobaciones preliminares.
 - Decisiones sobre las acciones inmediatas.
 - Recomendación para la evaluación detallada.
- d) Evaluación detallada:
 - Búsqueda documental y revisión detallada.
 - Inspección detallada y ensayo de materiales.
 - Determinación de las acciones.
 - Determinación de las propiedades de la estructura.
 - Análisis estructural.
 - Verificación.
- e) Resultados de la evaluación:
 - Informe.
 - Diseño conceptual de las intervenciones de construcción.
 - Control del riesgo.
- f) Repetición de la secuencia si fuese necesario.

Este procedimiento se puede aplicar tanto a la evaluación de una estructura específica como a la evaluación de un grupo de estructuras.

Fig. 4.1. Diagrama de flujo para la evaluación general de las estructuras existentes



4.2.- Especificación de los objetivos de la evaluación

Los objetivos de la evaluación de la estructura deberán estar claramente especificados, en términos del uso futuro de la estructura, en un acuerdo entre el cliente, las autoridades pertinentes y la evaluación del técnico. Los requerimientos futuros de la estructura se especifican en el plan de utilización y en el plan de seguridad.

4.3.- Escenarios

Los escenarios relacionados con un cambio en las condiciones o acciones estructurales deben ser especificados en el plan de seguridad con el fin de identificar posibles situaciones críticas para la estructura. Cada escenario se caracteriza por un predominante proceso o acción.

La identificación de los escenarios representa la base para la evaluación y el diseño de las intervenciones que deben adoptarse para garantizar la seguridad estructural y capacidad de servicio.

4.4.- Evaluación preliminar

4.4.1.- Estudio de documentos y otras pruebas

Es necesaria la inspección de los documentos, que contienen información importante, para una evaluación exhaustiva de la estructura existente. Se verificará que los documentos son correctos y, en ese contexto, que son actualizados para incluir información de cualquier intervención previa a la estructura. Otras pruebas, tales como acontecimientos de acciones ambientales o sísmicos significativos, grandes acciones, cambios en las condiciones del suelo, la corrosión o el mal uso de la estructura, deberán ser registradas y documentadas.

4.4.2.- Inspección preliminar

El objetivo de una inspección preliminar es identificar el sistema estructural y posibles daños en la estructura mediante la observación visual con herramientas simples. La información recogida se relaciona con aspectos tales como las superficies características, deformaciones visibles, grietas, desconchados, corrosión, etc. Los resultados de la inspección preliminar se expresan en términos de una clasificación

cualitativa de las condiciones estructurales (por ejemplo: ninguno, leve, moderada, severa, destructiva, desconocido) para detectar posibles daños.

4.4.3.- Controles preliminares

El propósito de las comprobaciones preliminares es identificar las deficiencias críticas relacionadas con la seguridad y la capacidad de servicio de la estructura, con el fin de centrar los recursos en estos aspectos en la evaluación posterior.

Sobre la base de estos resultados, se determina a continuación si es necesaria o no una investigación adicional.

4.4.4.- Decisiones sobre las acciones inmediatas

Cuando las inspecciones o verificaciones preliminares indican claramente que la estructura está en una condición potencialmente peligrosa, es necesario informar al cliente de que se deben tomar acciones inmediatas para reducir el peligro con respecto a la seguridad pública.

Si en las inspecciones existiese incertidumbre, las deficiencias críticas deberán ser evaluadas de inmediato, así como las medidas a adoptar.

4.4.5.- Recomendaciones para la evaluación detallada

Las comprobaciones preliminares pueden mostrar las deficiencias de la estructura, o que la estructura es fiable para su uso durante el resto de su vida útil, en cuyo caso no sería necesaria una evaluación detallada.

En el caso de incertidumbre en las acciones, efectos de las acciones o propiedades de la estructura, debe de ser recomendada una evaluación detallada.

4.5.- Evaluación detallada

4.5.1.- Búsqueda documental y revisión detallada

Los siguientes documentos, en su caso, deberían ser revisados:

- Dibujos, especificaciones, cálculos estructurales, registros de construcción, inspección y registros de mantenimiento, modificaciones realizadas.
- Reglamentos o leyes, códigos de prácticas y normas que se utilizaron para la construcción de la estructura.
- La topografía, las condiciones del subsuelo, el nivel freático.

4.5.2.- Inspección detallada y ensayo de materiales

Los detalles y dimensiones de la estructura así como los valores característicos de las propiedades del material pueden ser obtenidos a partir de los documentos de diseño, siempre y cuando existiesen y que no haya razón para dudar que se correspondan con la realidad.

En el caso de existir cualquier duda en los detalles, en las dimensiones de los componentes o en las propiedades de los materiales se realizará un análisis, que se determinará a partir de una inspección detallada y ensayo de materiales.

Los resultados de la inspección detallada darán un conjunto de valores cuantitativos actualizados para ciertos parámetros relevantes que afectan a las propiedades de la estructura.

4.5.3.- Determinación de las acciones

Las acciones y en particular las acciones ambientales en las estructuras serán determinadas por el análisis de conformidad con la norma ISO 2394, teniendo en cuenta las disposiciones establecidas en el plan de seguridad y plan de utilización.

4.5.4.- Determinación de las propiedades de las estructuras

Los ensayos en la estructura se utilizan para medir sus propiedades y / o para predecir una capacidad de soporte de carga cuando otros enfoques, tales como el análisis o la inspección estructural detallada, no proporcionan por sí solos una indicación clara o fallan en demostrar una adecuada fiabilidad estructural (véase el punto 5.1).

4.5.5.- Análisis estructural

El análisis estructural se realizará utilizando modelos que representen de forma fiable las acciones sobre la estructura, su comportamiento y la resistencia de sus componentes. El modelo de análisis debe reflejar la estado real de la estructura existente.

La estructura será analizada para los estados límite último y los estados límite de servicio, utilizando las variables básicas y teniendo en cuenta los procesos de deterioro pertinentes.

Las siguientes variables básicas, para utilizarlas en el análisis estructural, se determinarán mediante la actualización de la información sobre la condición real de la estructura:

- Las acciones.
- Las propiedades de los materiales y las condiciones geotécnicas.
- Las dimensiones de los componentes estructurales y la geometría del subsuelo.
- Incertidumbres del modelo.

La incertidumbre asociada a la validez y exactitud de los modelos debe de ser considerado durante la evaluación, ya sea mediante la adopción de los coeficientes parciales correspondientes a las verificaciones deterministas o introduciendo variables aleatorias que representan las incertidumbres del modelo en los análisis de fiabilidad.

Se tendrá en cuenta los factores de conversión que reflejan la influencia de la forma y el tamaño del efecto de las muestras, la temperatura, la humedad, duración de carga, etc.

También se considerará el nivel de conocimiento sobre el estado de los componentes. Esto se puede conseguir mediante el ajuste en la capacidad de soporte de carga de los componentes o en las dimensiones de sus secciones transversales, según sea el tipo de estructura.

Cuando se observe un deterioro en la estructura existente, se identificará y se predecirá la evolución futura de la estructura, determinándose sobre una base teórica, investigación experimental, inspección y por la experiencia.

4.5.6.- Verificación

La verificación de una estructura existente debe llevarse a cabo para garantizar un nivel de confianza que represente el nivel requerido del rendimiento estructural. Se podrán utilizar los códigos actuales, como la ISO 2394, ya que durante un período largo en su aplicación han producido una fiabilidad suficiente. Los códigos antiguos, vigentes en el momento de la construcción, deben utilizarse como documentos informativos.

La evaluación de una estructura existente se basa en la verificación de la seguridad estructural. Dicha evaluación de la fiabilidad se hará teniendo en cuenta la vida útil restante de la estructura existente, el período de referencia, y los cambios en la estructura asociados por un cambio de uso.

Las consideraciones sociales y la sostenibilidad económica, da lugar a una mayor diferenciación en la fiabilidad estructural para la evaluación de las estructuras existentes que para el diseño de nuevas estructuras.

Las verificaciones se basan en el concepto de estado límite. Se debe prestar atención tanto al estado límite último como al estado límite de servicio. La verificación puede llevarse a cabo utilizando coeficientes parciales de seguridad o mediante métodos de fiabilidad estructural.

Los coeficientes parciales de seguridad que figuran en los códigos actuales pueden modificarse para tener en cuenta la inspección y ensayo de los resultados (en relación, por ejemplo, a la calidad de mano de obra, a las condiciones de variación de mantenimiento o a la resistencia de los materiales).

Las conclusiones de la evaluación deberán resistir una prueba de verosimilitud. Es decir, las discrepancias entre los resultados del análisis estructural (por ejemplo, seguridad insuficiente) y la condición estructural real (por ejemplo, no hay señales de peligro o fallo) serán explicadas.

El nivel de confianza utilizado para la verificación puede ser tomado como el nivel de fiabilidad que supone la aceptación de criterios definidos en los códigos de diseño probados y aceptados. Los criterios de aceptación deben indicarse junto con las funciones del estado límite y modelos específicos de las variables básicas.

El nivel de confianza también puede establecerse teniendo en cuenta el nivel de rendimiento requerido para la estructura, el período de referencia y las posibles

consecuencias de fallos. Se pueden utilizar, justificándolo, niveles más bajos de fiabilidad para estructuras existentes basados en criterios socioeconómicos.

Las estructuras diseñadas y construidas en base a códigos anteriores, o de acuerdo con las buenas prácticas constructivas, pueden ser consideradas seguras para resistir las acciones, menos las accidentales (incluidos los terremotos), siempre que:

- Una inspección cuidadosa no revelara ninguna evidencia de daño o deterioro.
- Comprobándose que en una revisión del sistema estructural no sufra estrés, incluyendo la inspección de los detalles más importantes.
- La estructura ha demostrado un rendimiento satisfactorio durante un largo período de tiempo, debido a las acciones del uso y de los efectos ambientales.
- El deterioro actual de la estructura fuese el esperado y con los mantenimientos planificados tenga suficiente durabilidad.
- No se han producido cambios en un período largo de tiempo que puedan aumentar significativamente las acciones sobre la estructura o afectan a su durabilidad, y no se prevén tales cambios.

Las acciones accidentales (incluyendo terremotos) se pueden tener en cuenta si, en la información detallada cuantitativa disponible, el rendimiento de dicha estructura fuese satisfactorio.

Así mismo estas estructuras, las diseñadas y construidas en base a códigos anteriores o de acuerdo con las buenas prácticas constructivas, pueden considerarse útil para su uso futuro siempre y cuando:

- Una inspección cuidadosa no revelara ninguna evidencia de daño, deterioro o desplazamiento.
- La estructura ha demostrado un rendimiento satisfactorio durante un largo período de tiempo por los daños, el deterioro, el desplazamiento o vibraciones que se hubieran producido.
- No hubiera cambios en la estructura o en el uso que puedan alterar significativamente las acciones sobre la estructura o parte de ella.
- El deterioro actual de la estructura fuese el esperado y con los mantenimientos planificados tenga suficiente durabilidad.

4.6.- Resultados de la evaluación

Los resultados de la evaluación serán documentados en un informe. Si se demuestra que la seguridad o mantenimiento estructural es inadecuada, los resultados de la evaluación deben ser utilizado para recomendar intervenciones de construcción para la reparación, rehabilitación o mejora de la estructura para llevar a cabo de acuerdo con el objetivo de la evaluación de su vida útil restante (véase el punto 5.2).

Un enfoque alternativo a las intervenciones de construcción, que pueden ser apropiados en algunas circunstancias, es controlar o modificar el riesgo. Como pueden ser restricciones de carga importantes, alterar aspectos de la utilización de la estructura, y la aplicación de algún tipo de monitoreo y control en régimen de servicio.

4.7.- Datos de la evaluación

Los datos para la evaluación deben estar relacionados con:

- Las propiedades del material.
- Las propiedades estructurales.
- Las dimensiones.
- La realidad de la estructura existente.
- Las acciones previas y futuras para la estructura.

Los códigos actuales normalmente se diseñan para realizar estructuras nuevas y por lo tanto no pueden ser apropiados para su uso directamente en la evaluación de las estructuras existentes. Sin embargo, se deben de tener en cuenta para la evaluación de las estructuras existentes. Un análisis refinado, pruebas y un examen del comportamiento real de la estructura pueden ayudar en este sentido.

4.7.1.- Acciones e influencias ambientales

Las acciones se determinarán de acuerdo con los códigos actuales. Se tendrán en cuenta los cambios de las acciones causadas por el cambio de uso o modificación de la estructura existente.

También se tendrán en cuenta las influencias ambientales de naturaleza física, biológica, química o las que pueden tener un efecto sobre las propiedades del material.

Así como los cambios en las influencias ambientales como resultado del cambio de uso o modificación de la estructura existente.

Las acciones e influencias ambientales para las cuales la estructura fue diseñada originalmente se pueden determinar a partir de planos y especificaciones de diseño cuando no existan dudas acerca de su validez. En caso de existir incertidumbre, las influencias ambientales y algunos tipos de acciones deben de ser determinados mediante una inspección.

Puede ser conveniente tener en cuenta las características específicas de una estructura y de sus alrededores que permitan determinar las acciones e influencias ambientales.

4.7.2.- Propiedades de los materiales

Las propiedades de los materiales utilizados en la evaluación serán los reales de la estructura existente, no serán los especificados en la documentación del diseño original de la estructura o en un código o norma. Las propiedades de los materiales se evaluarán teniendo en cuenta el deterioro y las posibles influencias de las acciones (por ejemplo, incendios) durante la historia de la estructura.

Las propiedades del material se podrán determinar a partir de planos y especificaciones de diseño cuando no haya incertidumbre acerca de su validez. En caso de duda, las propiedades de los materiales deben de ser determinados mediante ensayos, utilizándose tanto los no-destructivos como los destructivos. Los ensayos deben de ser planificados para generar datos que son de interés directo para la seguridad y capacidad de servicio de la estructura. Se tendrá en cuenta tanto el uso de la estructura como las influencias ambientales producidas sobre la estructura.

Los métodos de muestreo y ensayo deben estar de acuerdo con las normas internacionales pertinentes. Se evitará tomar muestras y utilizar métodos que puedan poner en peligro la fiabilidad de estructura. La reparación y / o refuerzo de la estructura se llevará a cabo inmediatamente después del muestreo.

Si es posible, las propiedades de los materiales de la estructura se determinarán, estadísticamente, a partir de los resultados de las pruebas.

4.7.3.- Propiedades de la estructura

Si las propiedades de la estructura no se conocen suficientemente o si no es posible establecer las necesarias dimensiones y propiedades de los materiales, puede ser necesario realizar ensayos en la estructura para definir propiedades estructurales. Los ensayos dinámicos se llevarán a cabo si se le exige a la estructura existente propiedades dinámicas y no se dispone de otras fuentes (véase el punto 5.1).

Se deben investigar las influencias que ejercen en el comportamiento estructural las características geotécnicas del subsuelo.

4.7.4.- Dimensiones

En la determinación de las dimensiones de los componentes en una estructura existente, se deben utilizar las dimensiones reales.

Las dimensiones pueden determinarse a partir de los dibujos y las especificaciones de diseño cuando no haya incertidumbre acerca su correspondencia con la realidad. En caso de duda, las dimensiones deben ser determinadas por una inspección y medición.

4.8.- Informe de la evaluación

La evaluación de la estructura existente se lleva a cabo mediante una serie de fases de trabajo, realizándose generalmente un informe al final de cada fase.

Después de una cuidadosa evaluación de la fiabilidad estructural se establecerán unas conclusiones claras con respecto al objetivo de la evaluación, al costo de las intervenciones, a la seguridad pública, a la preservación de la estructura y al coste del ciclo de vida.

Si se verifica que la estructura existente posee una fiabilidad suficiente, no se requerirá ninguna acción adicional. Si por el contrario la evaluación concluye que la fiabilidad de la estructura es insuficiente, se propondrán intervenciones apropiadas, incluyendo la reparación, la rehabilitación, el control y mantenimiento de los componentes críticos, mejoras (véase el punto 5.2), y demolición, estimándose el costo y riesgo de cada una de estas.

Las conclusiones se presentarán a la propiedad, recomendándole las posibles intervenciones que hubiera que hacer en la estructura. Hay que señalar que la toma de la

decisión final sobre las intervenciones, con base a criterios de ingeniería, con las recomendaciones del informe y teniendo en cuenta toda la información disponible, se hace por el cliente en colaboración o en consulta con la autoridad pertinente. Si hubiese condiciones inseguras tendríamos que tomar precauciones inmediatas.

Independientemente de los resultados de la evaluación, se presentará al cliente un plan de inspección y mantenimiento durante la vida útil restante de la estructura y un plan de utilización. También se recomendará la fecha para la próxima evaluación.

Toda la información obtenida en la evaluación se documentará en un informe para el cliente, incluyendo el objetivo de la evaluación, el nombre del técnico (o empresa), la descripción de la estructura, los métodos y los resultados de la evaluación, así como recomendaciones de medidas pertinentes, si fuesen necesarias.

Un cambio de uso importante en la estructura después de realizada la evaluación invalidaría las recomendaciones que se proponen en el informe.

5

ACTUALIZACIÓN DEL ESTADO DE LA ESTRUCTURA

5.- ACTUALIZACIÓN DEL ESTADO DE LA ESTRUCTURA

Un análisis de una estructura existente tiene por objeto actualizar los conocimientos acerca del estado de la estructura con respecto a una serie de aspectos. A menudo, la primera impresión se basa en una inspección cualitativa, donde la descripción de los posibles daños se realiza con términos como "ninguno", "menor", "moderado", "grave", "destruictiva", "desconocido". Estas observaciones se realizan de una manera puramente intuitiva por los expertos. Un mejor juicio sobre la estructura se realiza mediante las inspecciones cuantitativas que caracterizan las propiedades actuales de los componentes estructurales. En todas las inspecciones técnicas se debe disponer de información sobre la probabilidad de detectar daños, si están presentes, y sobre la precisión de los resultados.

Las pruebas de carga es un tipo especial de inspección cuantitativa, utilizada para comprobar si un componente estructural es apto para su uso. Además pueden ayudar en la evaluación la investigación de acciones, que dependerán del tipo de comportamiento:

- Para las acciones permanentes, tales como el peso de la propia estructura, se deben de medir dimensiones y densidades.
- Para las estructuras al exterior, se puede comprobar el clima local.
- Para las acciones del viento sobre las estructuras de forma especial, los coeficientes de forma se pueden medir en un túnel de viento.

Hay que tener cuidado con las acciones de los códigos pues representan el valor máximo en, por ejemplo, 50 valores del año, pudiendo medirlos directamente.

5.1.- Los ensayos

Muchos tipos de ensayos de campo son útiles para evaluar las propiedades estáticas y dinámicas de la estructura existente, por ejemplo:

- Una prueba de carga horizontal.
- Una prueba de vibración forzada de la estructura completa.
- Una prueba carga vertical.
- Una prueba de vibración forzada de algún componente de la estructura.
- Una medición de micro-temblor horizontal o vertical de la estructura.

Las pruebas de carga en la estructura completa son costosas y requieren mucho tiempo. Sin embargo, puede haber estructuras que la única manera de evaluar sus propiedades sea llevar a cabo dichas pruebas de campo.

Los ensayos a las estructuras se pueden llevar a cabo, como una parte de la evaluación, siempre y cuando exista una razón satisfactoria, tales como:

- a) La prueba es útil para proporcionar evidencias adicionales, incluyendo casos como:
 - Deterioro de los componentes estructurales.
 - Cuando hay un cambio de uso.
 - O cuando la construcción no se ha llevado a cabo de acuerdo con los planos de diseño o especificaciones.
- b) Cuando los cálculos no se pueden completar con confianza, las pruebas de carga y pruebas de vibración pueden proporcionar una mejor comprensión del comportamiento real de la estructura, que no se puede obtener de otra manera.
- c) Que los componentes estructurales, que forman parte de la estructura, se comporten de manera diferente a los esperados durante la fase de diseño.

Estos ensayos deben de tener unos objetivos claros, por ejemplo:

- a) Para predecir directamente la resistencia última o establecer propiedades de servicio de partes estructurales.
- b) Para obtener propiedades específicas del material.
- c) Para examinar el comportamiento de la estructura existente o de los componentes estructurales.
- d) Determinar los parámetros del sistema utilizados para la verificación del análisis.
- e) Evaluar la capacidad de soporte de carga de la estructura mediante una prueba de carga.

Para la realización de los ensayos tendrán que cumplirse las siguientes condiciones:

- a) El ensayo se llevará a cabo de tal manera que se evite el colapso repentino e incontrolable durante la prueba.
- b) Se considerará el reparto de la carga entre los componentes estructurales.

- c) Es importante en la prueba de carga y en las pruebas de vibración que la estructura quede expuesta y accesible para una inspección visual antes, durante y después de la prueba.
- d) Se debe de considerar la influencia de los cambios de temperatura en la instrumentación.

Antes de la ejecución de los ensayos, se debe de realizar una planificación, donde deben estar claramente establecidos:

- El objetivo de la prueba.
- Las especificaciones necesarias para la selección de las muestras a ensayo.
- La ejecución de las pruebas.
- Y la evaluación de la prueba.

Especificaremos toda la información necesaria para la realización del ensayo, por ejemplo, las propiedades requeridas, la influencia de ciertos parámetros que variaron durante la prueba, el intervalo de validez, etc.

Es esencial presentar una descripción de todas las propiedades y circunstancias que puedan influir en el comportamiento del estado límite:

- Parámetros geométricos y sus tolerancias.
- Propiedades del material.
- Efectos de escala.
- Influencias ambientales.

Los ensayos se realizarán sobre las muestras representativas de la estructura a analizar, especificando en particular: las dimensiones, los procedimientos de muestreo y los sistemas de retención.

Antes de la ejecución de las pruebas, debe estar hecha una lista de todas las propiedades pertinentes de cada prueba, (por ejemplo, historial de tiempo de desplazamientos, velocidades, aceleraciones, tensiones, fuerzas y presiones, frecuencia requerida y la precisión de las medidas de control). Del mismo modo debe hacerse, una planificación de los puntos, métodos y registros de la observación. Dependiendo del tipo de prueba, es recomendable tener algunas mediciones disponibles de forma simultánea durante la prueba.

La medición de las propiedades obtenidas en los ensayos debe compararse con las predichas por los modelos analíticos. Cuando exista una gran desviación se investigará y explicará la razón de ello, incluyendo si es necesario ensayos adicionales.

La evaluación de los resultados del ensayo debe ser sobre la base de métodos estadísticos. En principio, la prueba debe dar lugar a una distribución estadística de las variables desconocidas preseleccionadas, incluyendo las incertidumbres estadísticas.

Cuando los resultados de la prueba se evalúan como válidos, su extrapolación puede ser aplicada para cubrir otras partes de la estructura, aunque esto requiere información adicional (por ejemplo, a partir de las experiencias de ensayos anteriores o estudios analíticos).

5.2.- Las intervenciones

Las intervenciones para actualizar una estructura pueden llevarse a cabo por diversas razones, como por ejemplo:

- El fortalecimiento de elementos estructurales o de toda la estructura, para mejorar el rendimiento del estado límite último.
- La mejora de algún aspecto al respeto del servicio elemental o general.
- Compensar los efectos del deterioro estructural actual.
- Medidas preventivas para evitar o reducir al mínimo el deterioro estructural.

Existe una gran variedad de intervenciones a la hora de mejorar una estructura, pudiendo utilizarse, en un esquema individual, una combinación de estos para lograr diferentes objetivos. Algunos enfoques genéricos son los siguientes:

- Modificación de la capacidad estructural de algún elemento o de toda la estructura, por ejemplo:
 - Aumento del tamaño de la sección de la pieza estructural.
 - Incorporación de armadura suplementaria.
 - Introducción de una placa pretensada.
- Introducción de elementos estructurales, por ejemplo:
 - Disposición de un marco estructural complementario para reducir la proporción de las acciones en curso o futuras realizadas por la estructura existente.

- Introducción de cables atirantados alterando la trayectoria de la carga.
- Modificación de las condiciones o métodos de apoyo, por ejemplo:
 - Rigidización de las articulaciones para proporcionar continuidad estructural.
 - Introducción de articulaciones.
- Aplicación de recubrimientos, membranas u otros tipos de barrera para modificar las influencias ambientales locales, por ejemplo:
 - Por medio de sobre-revestimiento, aislamiento u otra forma de cubrición para minimizar el deterioro y así mejorar la durabilidad.

Los objetivos y las restricciones de las intervenciones deben estar claramente identificados con el fin de determinar la metodología más apropiada, así como de disponer de la información suficiente para llevar a cabo con confianza, la actualización de la estructura.

Generalmente se evalúa el desempeño estructural del estado límite último. Sin embargo, es conveniente considerar el rendimiento del estado límite de servicio, así como la integridad estructural, los efectos del fuego, durabilidad, comportamiento dependiente del tiempo y las medidas necesarias para garantizar que las adiciones o modificaciones a la estructura actúan eficazmente con los elementos estructurales existentes.

La elección de un método de mejora dependerá de las circunstancias específicas relativas a los el uso de la estructura. El diseño de la intervención propuesta generalmente es un proceso iterativo, esperándose que sea respetuoso con el medio ambiente y acorde con la forma de la estructura existente. Además de las cuestiones técnicas, también es necesario evaluar las diferentes opciones de mejora sobre la base de un coste-beneficio, teniendo en cuenta la vida laboral restante esperada de la estructura.

El rendimiento de una estructura existente con un deterioro apreciable puede diferir significativamente de la estructura original, por ejemplo la reducción de la ductilidad, alterando el fallo del estado límite último.

Las modificaciones estructurales pueden cambiar la ruta por la cual las acciones son transferidas a través de la estructura. Debido a esto es necesario evaluar todos los elementos estructurales que forman parte de la ruta hasta los cimientos.

El tipo de intervención depende de la función estructural que tengan los distintos elementos estructurales, se emplean diferentes enfoques para los elementos que actúan a compresión, a tensión o a flexión.

La planificación del proceso de actualización, incluyendo los soportes temporales, debe de llevarse a cabo en cooperación con todas las partes para asegurar la estabilidad y la integridad de la estructura durante todas las fases de la construcción. Las desviaciones del proceso planificado deben ser evaluadas por el diseñador de la actualización para asegurar que la estabilidad y la integridad de la estructura se mantienen en todo momento. El diseñador de las obras tratará de anticiparse a los cambios significativos que potencialmente pueden influir en la estabilidad de la estructura y se llevarán a cabo las medidas oportunas. Las desviaciones en la secuencia de trabajo deben ser evaluados cuidadosamente para evaluar cualquier implicación estructural que puedan tener.

También puede ser necesario aplicar algún tipo de monitorización estructural para ayudar al control y gestión de los trabajos de acondicionamiento. Un sistema de control especial puede ser necesario cuando se realicen trabajos estructurales complejos y complicados.

5.3.- Actualización de las propiedades

Se pueden distinguir dos métodos para actualizar las propiedades de la estructura, teniendo en cuenta el resultado de la investigación:

1. La actualización directa de la probabilidad de fallo estructural.
2. La actualización de la probabilidad de distribución de las variables aleatorias.

El segundo método se puede utilizar para actualizar valores de diseño basados en el formato de coeficientes parciales de seguridad y para comparar directamente con los valores límite (grietas, desplazamientos).

Los resultados de la evaluación de una determinada parte de la estructura, se deben de tener en cuenta, pues estos pueden estar presentes en otra parte de la misma o incluso en partes de otras estructuras similares. Por ejemplo, la detección de fisuras o corrosión en uno de los componentes de la estructura hace que sea más probable la presencia de estos defectos en otros componentes.

La actualización directa de la probabilidad de fallo estructural puede llevarse a cabo utilizando la relación básica de la teoría de la probabilidad, dada por la ecuación:

$$P\{F|I\} = \frac{P\{F \cap I\}}{P\{I\}} \quad (5.1)$$

Dónde:

F - Designa un fallo estructural local o global

I - Designa la información de inspección, por ejemplo "la grieta por fatiga en el nudo B es menor que el límite de detección"

\cap - indica la intersección de dos eventos;

$|$ - indica "condicionada a"

El denominador $P\{I\}$ en la ecuación (5.1) es una constante de normalización, a partir de la siguiente ecuación:

$$P\{F|I\} + P\{S|I\} = 1,0 \quad (5.2)$$

Dónde S significa "no fallo" o "supervivencia".

El procedimiento para la actualización de la probabilidad de distribución de las variables aleatorias se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$f_x(x|I) = C P\{I|x\} f_x(x) \quad (5.3)$$

Dónde:

x - es una variable de base o parámetro estadístico.

I - es un resultado de la inspección.

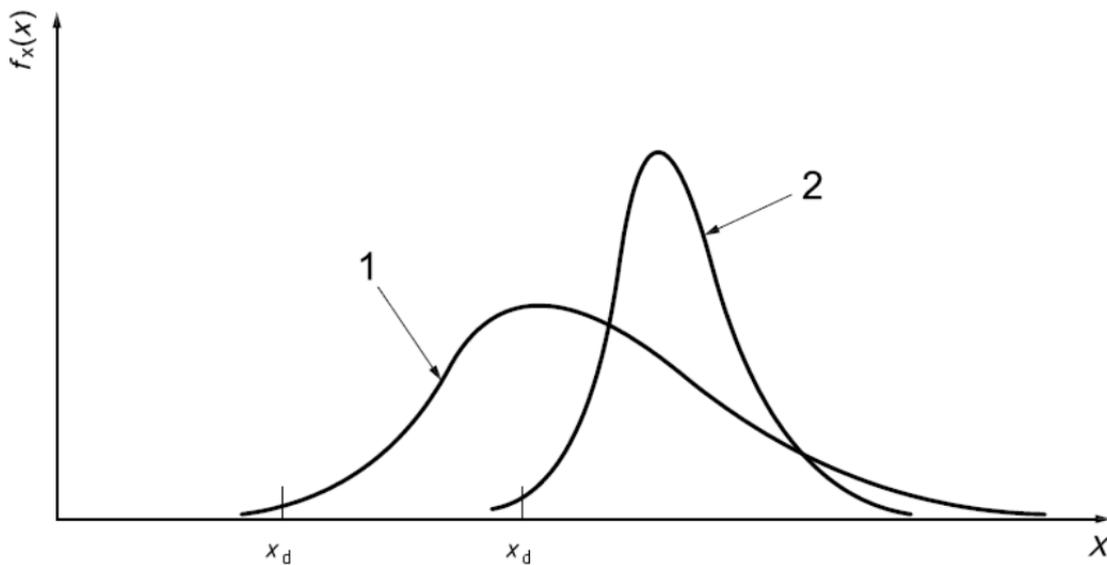
$f_x(x)$ - es la densidad de probabilidad de incógnita antes de actualizar.

C - es una constante de normalización.

$f_X(x/I)$ - es la densidad de probabilidad de incógnita después de actualizar la información I .

$P\{I/x\}$ - es la probabilidad de encontrar la información I para el valor dado x de X .

Un ejemplo de la ecuación (5.3) se presenta en la Figura 5.1. Hay que tener en cuenta que, en general, el valor de cálculo de la distribución actualizada puede ser menor que el valor de diseño de la distribución inicial.



1 - distribución inicial

2 - distribución actualizada

Fig. 5.1 - Función de densidad de probabilidad original y actualizada para una inspección de la variable X

Una vez que se han encontrado distribuciones actualizadas de las variables básicas de la estructura, se puede calcular la probabilidad de error actualizada $P\{F/I\}$ mediante la realización de un análisis probabilístico. Un procedimiento más práctico consiste en determinar los valores de diseño actualizados para cada variable aleatoria. Para un parámetro de resistencia X , el valor de diseño se puede obtener de la ecuación (5.4) de una variable aleatoria normal y de la Ecuación (5.5) para un variable aleatoria lognormal (ISO 2394):

$$x_d = \mu(1 - \alpha\beta V) \tag{5.4}$$

$$x_d = \mu \exp(-\alpha\beta \sigma - 0,5 \sigma^2) \tag{5.5}$$

Dónde:

x_d - se actualiza el valor de diseño para X.

μ - es valor medio actualizado.

α - es el coeficiente de influencia probabilística.

β - es el índice de fiabilidad de destino.

V - es el coeficiente actualizado de variación.

σ^2 - es igual a $\ln(1 + V^2)$.

El valor del índice de fiabilidad de destino β se define según la siguiente ecuación:

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f) \tag{5.6}$$

Dónde:

$\Phi(\cdot)$ - Es la función de distribución de probabilidad normal estándar

P_f - Es la probabilidad de fallo correspondiente a un período de referencia especificado.

P_f	0.5	0.1	0.05	0.01	1×10^{-3}	1×10^{-4}	1×10^{-5}	1×10^{-6}
β	0	1.28	1.64	2.33	3.09	3.72	4.26	4.75

Tabla 5.1. Relación entre la Probabilidad de fallo y el índice de fiabilidad

La vida útil restante, determinada en la evaluación de la estructura existente, se considera como un periodo de referencia para la capacidad de servicio de dicha estructura, mientras que la vida útil de cálculo, es considerada como período de referencia para las nuevas estructuras.

Para los estados límite últimos, puede ser razonable, un período de referencia más corto. Los índices para la fiabilidad de destino pueden ser elegidos de acuerdo con los códigos actuales (ISO 2394: 1998, E.4). Los valores dados en la siguiente tabla están destinados para la evaluación de las estructuras existentes.

Estados límite	Índice de fiabilidad de destino β	Período de referencia
Servicio		
Reversible	0,0	Vida útil restante
Irreversible	1,5	Vida útil restante
Fatiga		
Registrable	2,3	Vida útil restante
No registrable	3,1	Vida útil restante
Últimos		
Consecuencias del fallo muy bajas	2,3	L_S años ^a
Consecuencias del fallo bajas	3,1	L_S años ^a
Consecuencias del fallo medias	3,8	L_S años ^a
Consecuencias del fallo altas	4,3	L_S años ^a

^a - L_S es un período mínimo estándar para la seguridad (por ejemplo, 50 años).

Tabla 5.2. Niveles de fiabilidad de destino

Los valores de α pueden ser iguales a los utilizados comúnmente para las nuevas estructuras (0,7 para el parámetro de carga; 0,8 para el parámetro de resistencia; y 0,3 para las variables no dominantes) en conformidad con la norma ISO 2394, representados en la siguiente tabla:

X_i	α_i
Parámetro de resistencia dominante	0,8
Otros parámetros de resistencia	$0,4 \times 0,8 = 0,32$
Parámetro de carga dominante	- 0,7
Otros parámetros de carga	$-0,4 \times 0,7 = -0,28$

Tabla 5.3- Valores estandarizados de α (norma ISO 2394)

Como procedimiento alternativo, también se puede determinar primero un valor característico, x_k , utilizando la ecuación (5.7) para una variable aleatoria normal y la ecuación (5.8) para una variable aleatoria lognormal, y calcular el valor de diseño mediante la aplicación de los coeficientes parciales correspondientes γ_m como se indica en la Ecuación (5.9)

$$x_k = \mu(1 - kV) \tag{5.7}$$

$$x_k = \mu \exp(-k\sigma - 0,5 \sigma^2) \tag{5.8}$$

$$x_d = \frac{x_k}{\gamma_m} \quad (5.9)$$

Para el valor de k se utiliza normalmente 1,64. Puede ser útil considerar ambos métodos y usar el resultado más conservador.

Después de la actualización de los valores de diseño, se puede comprobar la fiabilidad estructural utilizando el procedimiento estándar para las estructuras nuevas. Se debe verificar que, basándose en los materiales de diseño y propiedades geométricas, no se alcanza ningún estado límite cuando las acciones de diseño se aplican a la estructura.

5.4.- Evaluación de la fiabilidad dependiente del tiempo

Al evaluar la fiabilidad y la vida útil restante de las estructuras existentes, debe tenerse en cuenta el efecto de las variaciones en el tiempo de trabajo, tanto en la resistencia, debido a, por ejemplo, el deterioro, como a las características de la carga.

- Cuando sólo es la carga la que varía en el tiempo, el método descrito en la norma ISO 2394 se puede utilizar de referencia para la evaluación.
- Si es la resistencia la que varía en el tiempo por problemas de deterioro y la carga se mantiene estable en el tiempo, la evaluación de la fiabilidad se puede realizar teniendo en cuenta las características de resistencia correspondiente al final de la vida útil de la estructura.
- Cuando tanto las características de resistencia y la características de la carga varían con el tiempo, la evaluación requiere una consideración especial como se describe a continuación.

Cuando la resistencia se deteriora lentamente y las características de la carga son variantes en el tiempo, la evaluación de la fiabilidad, en principio, se puede tratar como un proceso de un vector aleatorio no homogéneo. La figura 5.2 ilustra esquemáticamente el proceso. A pesar de la simplicidad de concepto, se necesitan considerables simplificaciones en las aplicaciones más prácticas.

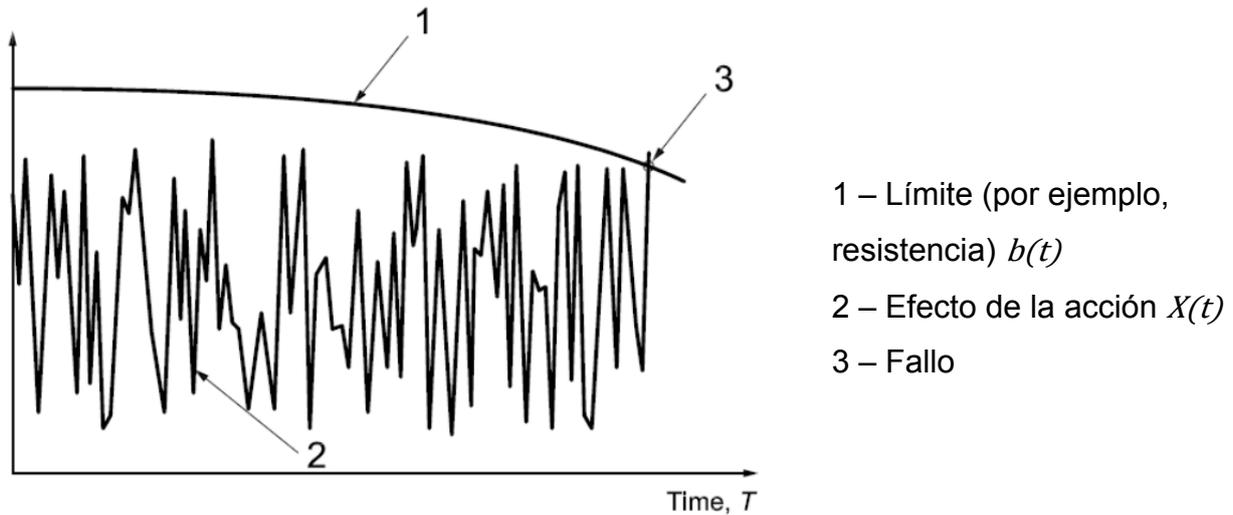


Fig. 5.2 - Ilustración de una situación cuando las características de resistencia varían lentamente con el tiempo

Cuando el límite $b(t)$ es suficientemente alto, se puede suponer que el proceso de cruce del límite es un proceso de Poisson con intensidad, ν_x . La función de distribución de probabilidad del tiempo hasta el primer cruce del límite, $F_T(t)$, puede ser así estimada por la siguiente ecuación:

$$F_T(t) = 1 - \exp \left\{ - \int_0^t \nu_x [t, b(\tau)] d\tau \right\} \quad (5.10)$$

Donde $\nu_x [t, b(\tau)]$ es la velocidad con la que el proceso de carga, $X(t)$, está por encima del límite variable en el tiempo, $b(t)$, en el momento t .

La función del límite $b(t)$ es a menudo una función de resistencia, R , por ejemplo, en el crecimiento de una grieta en los que la resistencia residual es una función de las propiedades del material en tiempo-variante. En este caso, $b(\tau)$ se puede escribir como $b(\tau, R)$. Además las características estadísticas del proceso de carga $X(t)$ pueden depender de otros procesos, por lo general varían más lentamente o en secuencias fijas, Q . Este es, por ejemplo, el caso al considerar la carga inducida por las olas, donde la fuerza de la onda depende de la secuencia que describe las características del estado del mar. Introduciendo ambos R y Q y aplicando una aproximación, la ecuación (5.10) se puede reordenar y aproximar a la siguiente ecuación:

$$F_T(t) = 1 - E_R \left(\exp \left\langle - \int_0^t E_Q \{ v_x [\tau, b(\tau, R), Q] \} d\tau \right\rangle \right) \quad (5.11)$$

En la que $E_R (\bullet)$ y $E_Q (\bullet)$ son la expectativa de \bullet en términos de R y Q , respectivamente. Para la evaluación de la ecuación (5.11) existe software comercial de fácil disposición.

Cuando la función de riesgo, $h(t)$, define la probabilidad condicional de fallo que se produce en el intervalo $(t, t + dt)$, dado que la estructura ha sobrevivido hasta t , la función de distribución de probabilidad del tiempo hasta el fallo puede expresarse por la ecuación siguiente:

$$F_T(t) = 1 - \exp \left[- \int_0^t h(\tau) d\tau \right] \quad (5.12)$$

Cuando la resistencia se modela como una función del tiempo como $R(t)=Rg(t)$, donde $g(t)$ es la función de degradación que define la fracción de la resistencia inicial, R , manteniéndose en el tiempo, t , y la aparición de la carga se modela por el proceso de Poisson con tasa media de ocurrencia, λ , entonces la probabilidad de fallo dentro del intervalo de tiempo $(0, t)$ se puede expresar como se indica en la siguiente ecuación:

$$F_T(t) = 1 - E_R \left(\exp \left\langle - \lambda_t \left\{ 1 - \frac{1}{t} \int_0^t F_S [R g(\tau)] d\tau \right\} \right\rangle \right) \quad (5.13)$$

Donde:

$F_S(s)$ es la función de distribución de probabilidad de la intensidad de carga, S .

En la figura 5.3 se ilustra esquemáticamente el proceso de carga y la degradación de la resistencia. En esta figura, $f_R(r)$ y $f_S(s)$ son las densidades de probabilidad de R y S , respectivamente, $\mu_R(t)$ y μ_S son los valores medios de $R(t)$ y S , respectivamente. Este enfoque puede abordar el deterioro debido a la corrosión, al ataque por sulfatos en las estructuras de hormigón y a efectos ambientales similares.

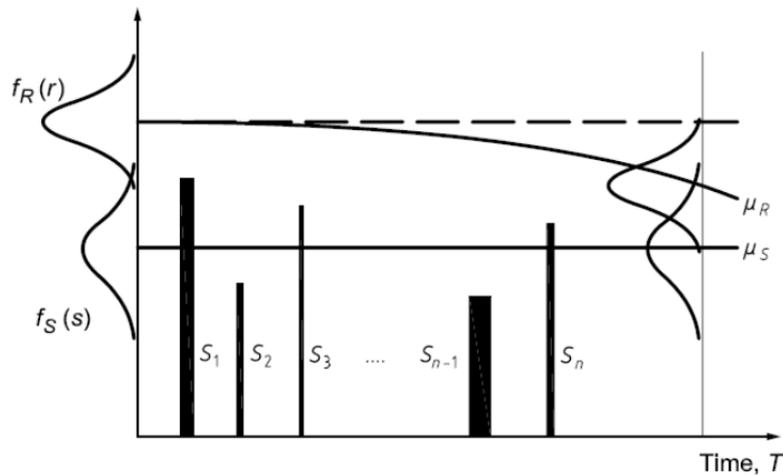
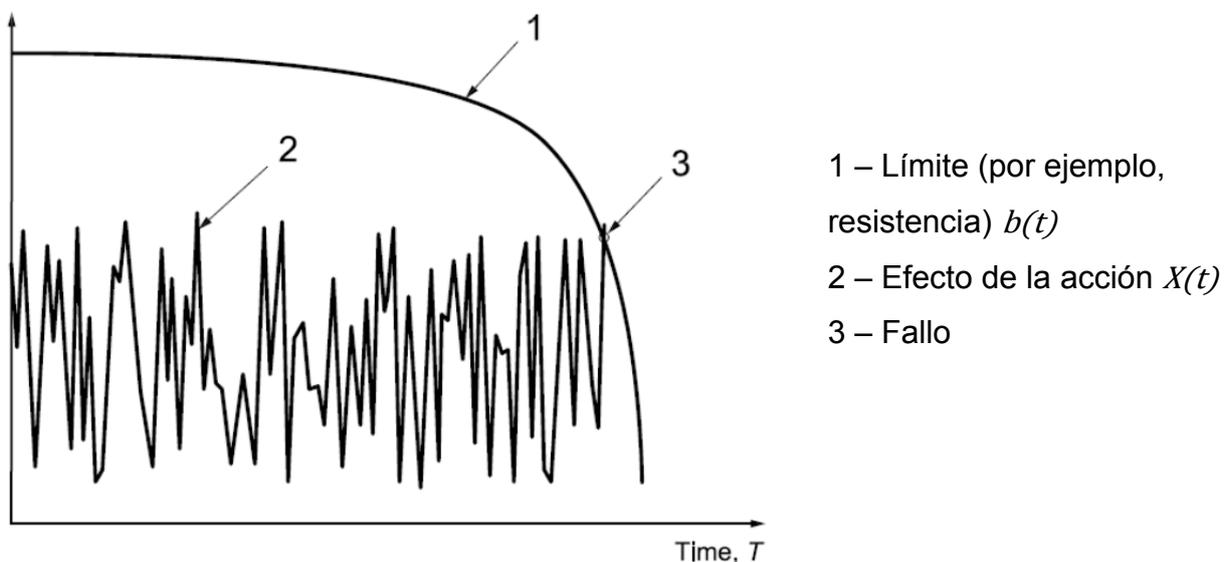


Fig. 5.3 - Representación esquemática del proceso de carga y la degradación de la resistencia

Cuando las características de resistencia se deterioran rápidamente, puede ser suficientemente exacto, la aproximación del problema dependiente del tiempo, por un problema independiente del tiempo, en el que la intensidad de carga está representado por su máximo valor y las características de resistencia está representada por su valor más bajo durante el período de referencia.

Por ejemplo, la probabilidad de fallo debido al crecimiento de grietas en el intervalo $(0, t)$, se evalúa con suficiente precisión mediante el uso del valor más bajo de resistencia y el valor máximo de carga durante el período de referencia. Esta situación se ilustra esquemáticamente en la siguiente figura:

Fig. 5.4 - Ilustración de una situación cuando las características de resistencia varían rápidamente con el tiempo



6

MÉTODO BAYESIANO

6.- MÉTODO BAYESIANO

Los métodos bayesianos, son una interpretación diferente del concepto de probabilidad, constituyen una alternativa a la estadística tradicional centrada en el contraste de hipótesis, denominada por contraposición estadística frecuentista, y están siendo actualmente motivo de debate. En esencia se diferencian en que incorporan información externa al estudio para con ella y los propios datos observados estimar una distribución de probabilidad para la magnitud -efecto- que se está investigando.

El teorema es muy importante ya que proporciona una herramienta para la actualización de probabilidades de sucesos basados en nuevas observaciones. Es ampliamente utilizado en la evaluación de la fiabilidad de las estructuras existentes.



Imagen 6.1. **Thomas Bayes** (Londres, Inglaterra, 1702 - Tunbridge Wells, 1761)

Se denomina método bayesiano por basarse originalmente en el teorema de Bayes, publicación póstuma de Thomas Bayes en 1763, que en esencia nos permite, si conocemos la probabilidad de que ocurra un suceso, modificar su valor cuando disponemos de nueva información.

En la metodología estadística clásica -frecuentista- se calcula la probabilidad de observar un resultado suponiendo que la realidad sea de una manera determinada (hipótesis nula), sin embargo en la práctica necesitamos los conocimientos para tomar

decisiones, y lo que realmente nos interesa es conocer la probabilidad de que las cosas sean de una manera determinada dados los datos (condicionado a...) que hemos observado. Esta es la diferencia que radica en el enfoque bayesiano.

En el análisis estadístico clásico para evaluar por ejemplo la resistencia del hormigón en una obra ejecutada se utiliza exclusivamente la información obtenida en el estudio, ensayo o experimento. Por el contrario en la metodología bayesiana es fundamental el concepto de probabilidad a priori (o prior, equivalente al conocimiento que tenemos de la estructura). El análisis comienza resumiendo cuantitativamente la información previa existente y externa al estudio, cuyo origen puede ser diverso, desde nuestra propia experiencia a la opinión de expertos.

6.1.- Conceptos básicos de la estadística

Las acciones, las propiedades mecánicas y geométricas se describen generalmente mediante variables aleatorias (principalmente por las variables continuas). Una variable aleatoria X , (por ejemplo, la resistencia del hormigón), puede tomar cualquier valor de un conjunto especificado de valores, con una probabilidad conocida o estimada. Como regla general, sólo un limitado número de observaciones, lo que constituye una muestra aleatoria $x_1, x_2, x_3, \dots, X_n$ de tamaño n tomada de una población, está disponible para una variable X . La población es un término estadístico general que se utiliza para la totalidad de las unidades de que se trate, por ejemplo, para todo el hormigón producido en condiciones especificadas dentro de un cierto período de tiempo. El objetivo de los métodos estadísticos es tomar decisiones relativas a las propiedades de la población utilizando la información de una o más muestras aleatorias.

Una **característica de la muestra** es una cantidad usada para describir las propiedades básicas de una muestra. Las tres características básicas que se utilizan con mayor frecuencia son:

- **La media** m representa la medida básica de la tendencia central;
- **La varianza** s^2 que describe la medida básica de la dispersión; y
- **El coeficiente de asimetría** ω dando la medida básica de la asimetría.

La media de la muestra m (una estimación de la media de la población) se define como la suma de todos los n valores de x_i entre los n valores, es decir:

$$m = \frac{\sum x_i}{n} \quad (6.1)$$

La varianza de la muestra s^2 (una estimación de la varianza de la población), se define como:

$$s^2 = \frac{\sum (x_i - m)^2}{n - 1} \quad (6.2)$$

La desviación estándar s es la raíz cuadrada positiva de la varianza s^2 .

El coeficiente de asimetría de la muestra ω (una estimación de la asimetría de la población) se define como:

$$\omega = \frac{[n \sum (x_i - m)^3 / (n - 1) / (n - 2)]}{s^3} \quad (6.3)$$

Si la muestra tiene valores más distantes a la derecha que a la izquierda de la media, se dice que la distribución es sesgada a la derecha o tiene una asimetría positiva. Si pasa lo contrario, es decir, que la muestra tiene valores más distantes a la izquierda que a la derecha de la media, se dice que está sesgado hacia la izquierda o tiene una asimetría negativa.

Otra característica importante que describe la dispersión relativa de una muestra es **el coeficiente de variación** v , definido como la relación entre la desviación estándar s y la media m .

$$v = \frac{s}{m} \quad (6.4)$$

El coeficiente de variación v se puede usar eficazmente sólo si la media m difiere de cero. Cuando la media es mucho menor que la desviación estándar, entonces la desviación estándar en lugar del coeficiente de variación debe ser considerada como una medida de dispersión. El coeficiente de variación v se utiliza a menudo como una medida de calidad de la producción; para la resistencia del hormigón se puede esperar dentro de un rango amplio de 0,05 hasta 0,20, para el acero estructural de 0,07 a 0,10.

6.2.- Estimación de percentiles

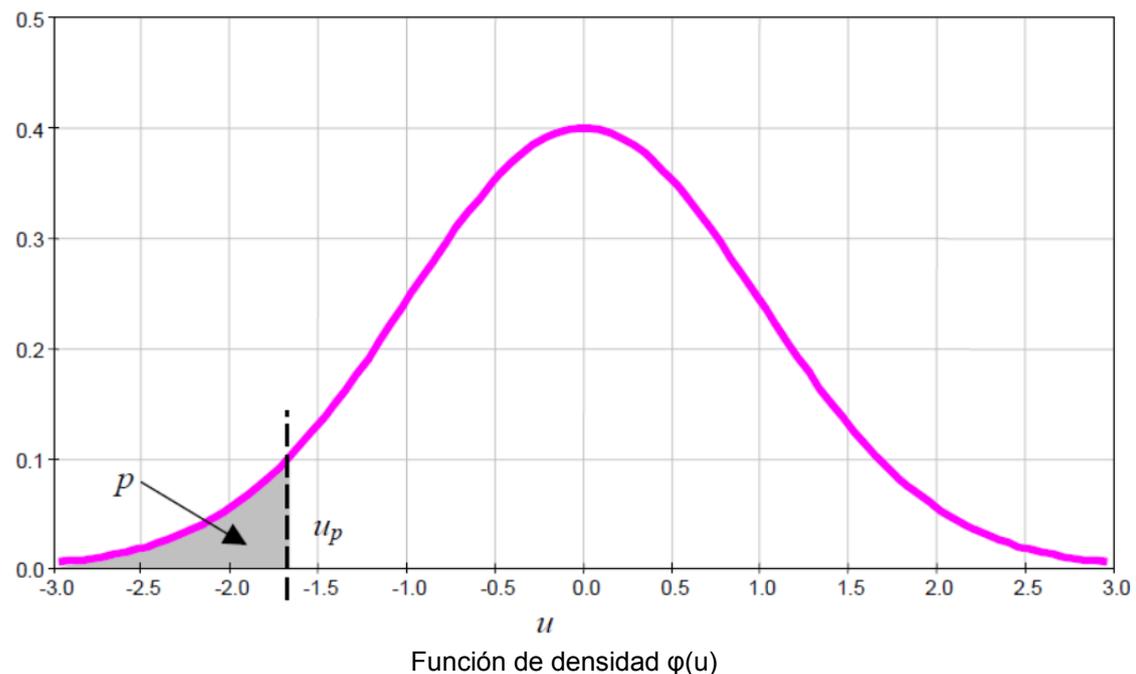
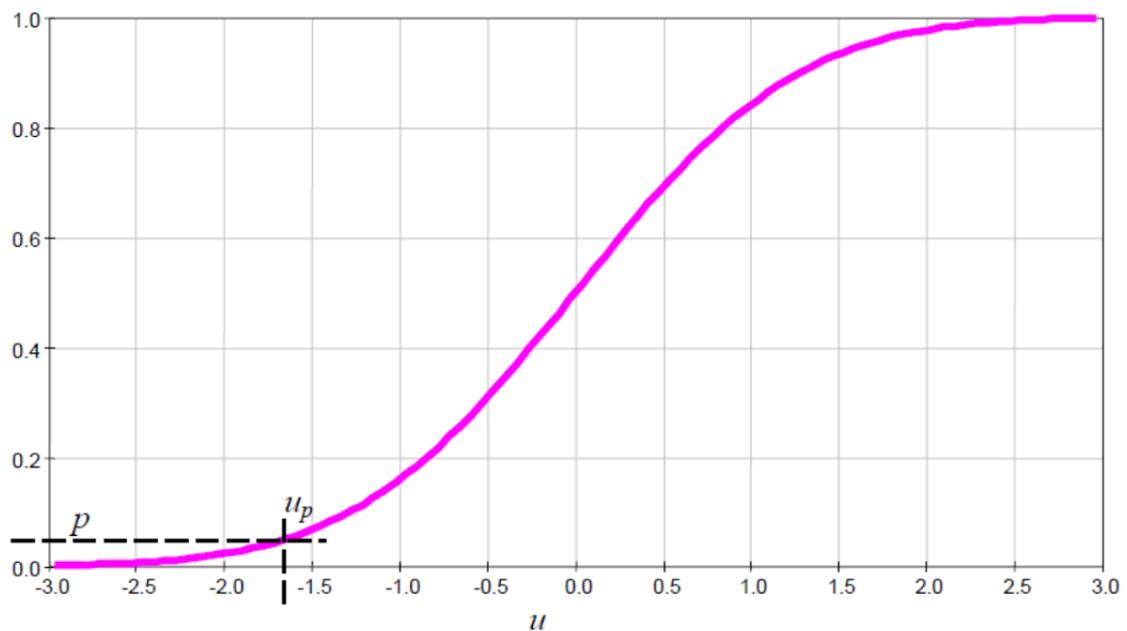
Una de las palabras clave más importantes de la teoría de la fiabilidad estructural es el término **percentil** de una variable aleatoria X (o de su distribución de probabilidad), también llamado **fractil** o **cuantil**.

Recordemos la definición del percentil. Para una probabilidad p , el p -percentil x_p denota un valor tal de la variable aleatoria X , tiene una ocurrencia inferior o igual a x_p con la probabilidad p . Si $\Phi(x)$ es una función de distribución de la variable aleatoria X , el valor de $\Phi(x_p)$ de la función de distribución $\Phi(x)$ en el punto x_p es igual a la probabilidad p .

$$P(X \leq x_p) = \Phi(x_p) = p \quad (6.5)$$

La misma definición se aplica también para las variables aleatorias estandarizadas T , en la ecuación (6.5) X es sustituido por U y x_p por u_p . Los percentiles estandarizados u_p de las variables aleatorias U normalmente están disponibles en tablas. La figura 6.1 ilustra la definición del percentil descrito por la ecuación (6.5) para una variable aleatoria estandarizada U ; muestra la función de distribución $\Phi(u)$ y la función de densidad $\phi(u)$, la probabilidad p (aproximadamente igual a 0,05) y el percentil u_p para una distribución normal estandarizada U .

Figura 6.1. Definición del percentil para una variable aleatoria estandarizada U



En general, el percentil x_p original de la variable aleatoria X puede calcularse utilizando las tablas disponibles para u_p de las variables aleatorias normalizadas U con un tipo correspondiente de distribución. El percentil x_p puede ser determinado a partir del percentil u_p con la siguiente relación:

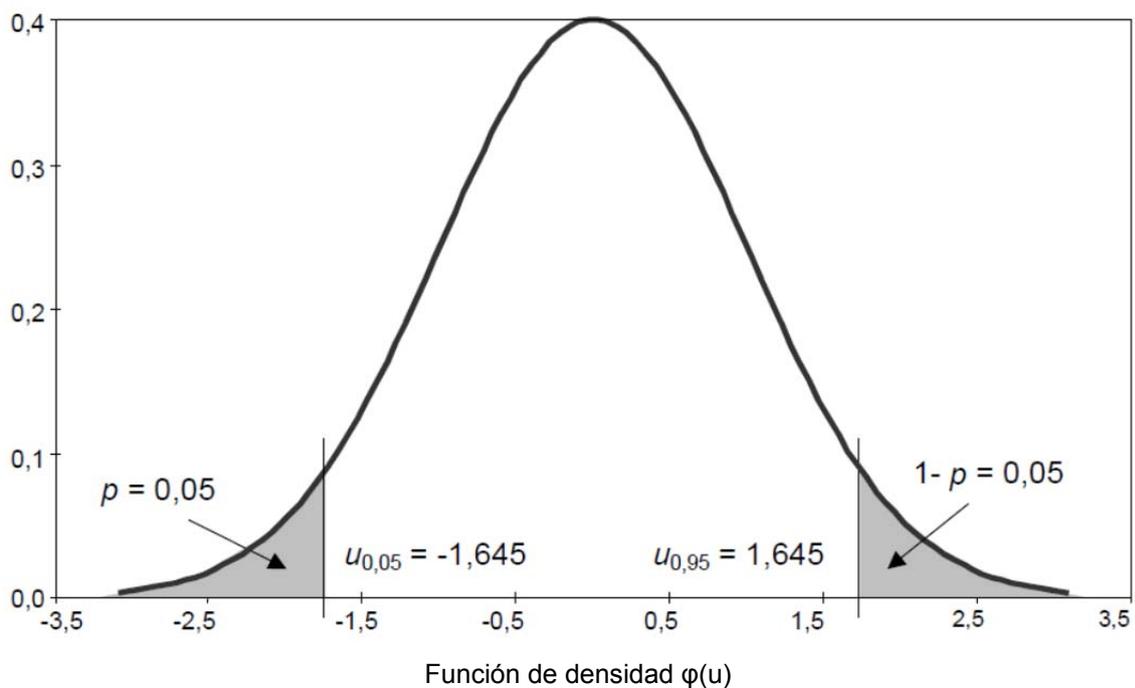
$$x_p = \mu + u_p \sigma = \mu(1 + u_p V) \quad (6.6)$$

Dónde μ denota la media, σ la desviación estándar y V el coeficiente de variación de la variable observada X .

Si la probabilidad $p < 0,5$, entonces el valor x_p se llama **percentil inferior**, y si la probabilidad $p > 0,5$ se llama **percentil superior**. La figura 6.2 muestra el percentil inferior y superior u_p de una variable aleatoria estandarizada U con una distribución normal para las probabilidades $p=0,05$ y $0,95$, y se denota como $u_{0,05}$ y $u_{0,95}$.

El percentil correspondiente a la probabilidad $p=0,05$, se suele aplicar para una evaluación del valor característico de las propiedades del material (por ejemplo: resistencia del hormigón, límite elástico del acero...).

Figura 6.2. Percentil inferior y superior u_p de una variable aleatoria estandarizada U con una distribución normal



En la tabla 6.1 podemos observar los valores del percentil inferior de u_p de una variable aleatoria estandarizada U con una distribución normal de probabilidades p . Teniendo en cuenta la simetría de la distribución normal, los valores del percentil superior de u_p se pueden evaluar a partir de dicha tabla sustituyendo p por $1-p$ y cambiando el signo de los valores de u_p (de negativo a positivo). Las tablas detalladas se pueden encontrar en la Norma Internacional ISO 12491.

Tabla 6.1. Valores del percentil inferior de u_p de una variable aleatoria estandarizada U con una distribución normal

p	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	0,001	0,010	0,050	0,100	0,200	0,500
u_p	-5,199	-4,753	-4,265	-3,719	-3,091	-2,327	-1,645	-1,282	-0,841	0,000

Para una variable aleatoria estandarizada con una distribución lognormal el valor de u_p de la variable aleatoria estandarizada U depende de la asimetría ω . Los valores u_p para asimetrías ω y probabilidades p son las siguientes:

Tabla 6.2. Valores del percentil u_p de una variable aleatoria estandarizada U con distribución lognormal

ω	Probabilidad p												
	10^{-4}	10^{-3}	0,01	0,05	0,10	0,20	0,50	0,80	0,90	0,95	0,99	$1-10^{-3}$	$1-10^{-4}$
-2,0	-9,52	-6,24	-3,52	-1,89	-1,24	-0,61	0,24	0,77	0,97	1,89	1,28	1,42	1,49
-1,5	-7,97	-5,51	-3,31	-1,89	-1,29	-0,68	0,20	0,81	1,04	1,21	1,45	1,65	1,77
-1,0	-6,40	-4,70	-3,03	-1,85	-1,32	-0,74	0,15	0,84	1,13	1,34	1,68	1,99	2,19
-0,5	-4,94	-3,86	-2,70	-1,77	-1,32	-0,80	0,08	0,85	1,21	1,49	1,98	2,46	2,81
0,0	-3,72	-3,09	-2,33	-1,65	-1,28	-0,84	0,00	0,84	1,28	1,65	2,33	3,09	3,72
0,5	-2,81	-2,46	-1,98	-1,49	-1,21	-0,85	-0,08	0,80	1,32	1,77	2,70	3,86	4,94
1,0	-2,19	-1,99	-1,68	-1,34	-1,13	-0,84	-0,15	0,74	1,32	1,85	3,03	4,70	6,40
1,5	-1,77	-1,65	-1,45	-1,21	-1,04	-0,81	-0,20	0,68	1,29	1,89	3,31	5,51	7,97
2,0	-1,49	-1,42	-1,28	-1,89	-0,97	-0,77	-0,24	0,61	1,24	1,89	3,52	6,24	9,52

En el caso de una distribución lognormal con límite inferior a cero, es posible calcular el percentil mediante el valor del percentil de una variable aleatoria estandarizada con distribución normal utilizando la relación:

$$x_p = \frac{\mu}{\sqrt{1+V^2}} \exp(u_{norm,p} \sqrt{\ln(1+V^2)}) \quad (6.7)$$

Donde $u_{norm,p}$ es el percentil de una variable aleatoria estandarizada con distribución normal, μ es la media y V el coeficiente de variación de la variable X . Una aproximación que a menudo se aplica de la ecuación (6.7) es la siguiente:

$$x_p \cong \mu \exp(u_{norm,p} \times V) \quad (6.8)$$

Cuya exactitud es completamente satisfactoria para un coeficiente de variación $V < 0,2$, pero también es de uso común para un mayor coeficiente de variación V .

6.3.- Estimación de percentiles mediante el método Bayesiano

Como ya hemos comentado al comienzo de este capítulo cuando disponemos de información previa para una variable aleatoria es posible utilizar el llamado método Bayesiano, que se puede decir, que sigue la idea de la actualización de las probabilidades de una variable aleatoria.

Supongamos que de una muestra de tamaño n calculamos la media m , la desviación estándar s y los grados de libertad v que serán iguales a $n-1$. Además a través de nuestra experiencia conocemos una media m' y una desviación estándar s' , todo evaluado a partir de una muestra desconocida (de un tamaño n' y grados de libertad v'). Sin embargo, para que se puedan combinar, tanto las muestras como los datos conocidos, deben de provenir de una misma población teniendo la misma media μ y desviación estándar σ . Esto podría ser simple si se conocieran los valores individuales de la información previa, pero no suele ser el caso, aun así es posible utilizar el método Bayesiano.

Los parámetros de la muestra combinada se calculan mediante las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} n'' &= n + n' \\ v'' &= v + v' - 1 \quad \text{si } n' \geq 1 \\ v'' &= v + v' \quad \text{si } n' = 0 \\ m'' &= (m n + m' n') / n'' \\ s''^2 &= (v s^2 + v' s'^2 + n m^2 + n' m'^2 - n'' m''^2) / v'' \end{aligned} \quad (6.9)$$

El tamaño de la muestra desconocida n' y los grados de libertad v' , pueden evaluarse utilizando las relaciones de los coeficientes de variación de la media $V(\mu)$ y de variación de la desviación estándar $V(\sigma)$ respectivamente (los parámetros μ y σ son considerados como variables aleatorias en la metodología de Bayes).

$$\begin{aligned} n' &= \left[\frac{s'}{m' V(\mu)} \right]^2 \\ v' &= \frac{1}{2 V(\sigma)^2} \end{aligned} \quad (6.10)$$

Las variables desconocidas n' y v' pueden evaluarse de forma independiente (por lo general $v' \neq n' - 1$), van a depender de nuestra experiencia previa al estimar **la variación de la media μ y la variación de la desviación estándar σ de la población.**

El siguiente paso del procedimiento es aplicar el método Bayesiano de predicción de la estimación percentil $x_{p, Bayes}$ mediante la siguiente ecuación, suponiendo que no se conoce la desviación estándar σ de la población.

$$x_{p, Bayes} = m'' + t''_p s'' \sqrt{1 + 1/n''} \quad (6.11)$$

Dónde: $t''_p = t''_p(\omega, p, v'')$ es el coeficiente de una **distribución t de Student**, que tiene una asimetría apropiada ω con v'' grados de libertad, cuantificado en las siguientes tablas:

Tabla 6.3. Coeficiente - t''_p de una t-distribución normal ($\omega=0$) con v'' grados de libertad

v''	1-p					v''	1-p				
	0,90	0,95	0,975	0,99	0,995		0,90	0,95	0,975	0,99	0,995
3	1,64	2,35	3,18	4,54	5,84	12	1,36	1,78	2,18	2,68	3,06
4	1,53	2,13	2,78	3,75	4,60	14	1,35	1,76	2,14	2,62	2,98
5	1,48	2,02	2,57	3,37	4,03	16	1,34	1,75	2,12	2,58	2,92
6	1,44	1,94	2,45	3,14	3,71	18	1,33	1,73	2,10	2,55	2,88
7	1,42	1,89	2,36	3,00	3,50	20	1,32	1,72	2,09	2,53	2,85
8	1,40	1,86	2,31	2,90	3,36	25	1,32	1,71	2,06	2,49	2,79
9	1,38	1,83	2,26	2,82	3,25	30	1,31	1,70	2,04	2,46	2,75
10	1,37	1,81	2,23	2,76	3,17	∞	1,28	1,64	1,96	2,33	2,58

Tabla 6.4. Coeficiente - t_p^* de una t-distribución lognormal para $p=0,05$, con asimetría ω y v^* grados de libertad

Asimetría	Coeficiente - t_p^* para v^* grados de libertad								
	3	4	5	6	8	10	20	30	∞
$\omega = -1,00$	2,65	2,40	2,27	2,19	2,19	2,04	1,94	1,91	1,85
$\omega = 0,00$	2,35	2,13	2,02	1,94	1,86	1,81	1,72	1,70	1,64
$\omega = 1,00$	1,92	1,74	1,64	1,59	1,52	1,48	1,41	1,38	1,34

Si aplicamos el método de Bayes para una evaluación de la resistencia de un material, la incidencia que tiene la evaluación del valor de la variación de la desviación estándar $V(\sigma)$ es relativamente pequeño, no así en las variables v^* y v' evaluadas de acuerdo con las ecuaciones (6.9) y (6.10) que es relativamente alto. Esto puede conducir a una disminución del valor del coeficiente t_p^* y aumentar la estimación del percentil x_p según la ecuación (6.11). Por otro lado, la evaluación del valor de la variación de la media $V(\mu)$, es por lo general muy buena, por lo que no afectará de manera significativa a los valores resultantes n^* y m^* .

Si no disponemos de ninguna información previa a través de nuestra experiencia, entonces $n^*=v^*=0$ y las características m^* , n^* , s^* , v^* serán iguales a las características de la muestra m , n , s , v . De esta manera la ecuación (6.11) se reduce al denominado “**método de predicción de estimación de percentiles**” dado como:

$$x_{p,pred} = m + t_p s \sqrt{1 + 1/n} \quad (6.12)$$

Donde t_p denota nuevamente el percentil de una t-distribución (Tabla 6.3) con v grados de libertad. Por otra parte, si la desviación estándar σ se conoce (a partir de experiencias pasadas), entonces $v=\infty$ y s se sustituye por σ .

Ejemplo

Para evaluar la resistencia característica de un hormigón $f_{ck}=x_p$, para una probabilidad $p=0,05$, se realiza una muestra de tamaño $n=5$ mediciones de la resistencia del hormigón, teniendo por media $m=29,2 \text{ N/mm}^2$ y una desviación estándar de $s=4,6 \text{ N/mm}^2$. A través de nuestra experiencia disponemos de la siguiente información $m^*=30,1$

N/mm^2 , $V(\mu)=0,50$, $s'=4,4 N/mm^2$, $V(\sigma)=0,28$, que la población tiene una distribución normal y que no es posible conocer su desviación estándar σ .

Se deduce de la ecuación (6.10) que:

$$n' = \left[\frac{s'}{m' V(\mu)} \right]^2 = \left[\frac{4,4}{30,1 \cdot 0,50} \right]^2 = 0,085 < 1$$

$$v' = \frac{1}{2 V(\sigma)^2} = \frac{1}{2 \cdot 0,28^2} = 6,38 \approx 6$$

Además de estos valores $n'=0$ y $v'=6$. Debido a que $v=n-1$ entonces $v=5-1$; $v=4$, se deduce de la ecuación (6.9):

$$n'' = n + n' = 5 + 0 = 5$$

$$v'' = v + v' - 1 \quad \text{si} \quad n' \geq 1$$

$$v'' = v + v' \quad \text{si} \quad n' = 0$$

$$v'' = v + v' = 4 + 6 = 10$$

$$m'' = (m n + m' n') / n'' = (29,2 \cdot 5 + 30,1 \cdot 0) / 5 = 29,2 N/mm^2$$

$$s''^2 = (v s^2 + v' s'^2 + n m^2 + n' m'^2 - n'' m''^2) / v''$$

$$s'' = \sqrt{(v s^2 + v' s'^2 + n m^2 + n' m'^2 - n'' m''^2) / v''}$$

$$s'' = \sqrt{(4 \cdot 4,6^2 + 6 \cdot 4,4^2 + 5 \cdot 29,2^2 + 0 \cdot 30,1^2 - 5 \cdot 29,2^2) / 10}$$

$$s'' = 4,5 N/mm^2$$

A partir de la ecuación (6.11) la estimación del percentil sigue como:

$$x_{p, Bayes} = m'' + t''_p s'' \sqrt{1 + 1/n''}$$

$$x_{p, Bayes} = 29,2 - 1,81 \cdot 4,5 \sqrt{1 + 1/5}$$

$$x_{p, Bayes} = 20,3 N/mm^2$$

Donde el valor $t''_p=1,81$ se da en la tabla 6.3 para $1-p=0,95$ y $v''=10$.

Si no disponemos de información previa, entonces $n'=v'=0$ y las características m'' , n'' , s'' , v'' serán iguales a la características de la muestra m , n , s , v . Entonces el valor predictivo de X_p se deduce de la ecuación (6.12):

$$x_{p,pred} = m + t_p s \sqrt{1 + 1/n}$$

$$x_{p,pred} = 29,2 - 2,13 \cdot 4,6 \sqrt{1 + 1/5}$$

$$x_{p,pred} = \mathbf{18,8 N/mm^2}$$

Y si la población tiene una distribución lognormal con asimetría $\omega=1$, entonces se deduce a partir de la ecuación (6.11) teniendo en cuenta el valor $t''_p=1,48$ dada en la tabla 6.4 que:

$$x_{p,Bayes} = m'' + t''_p s'' \sqrt{1 + 1/n''}$$

$$x_{p,Bayes} = 29,2 - 1,48 \cdot 4,5 \sqrt{1 + 1/5}$$

$$x_{p,Bayes} = \mathbf{21,9 N/mm^2}$$

Después de los resultados obtenidos podemos apreciar que la estimación del percentil con probabilidad $p = 0,05$ de la resistencia característica del hormigón, evaluada a partir de una muestra, se obtienen distintos valores dependiendo de si se dispone o no de información previa y de la exactitud de dicha información.

En los siguientes puntos se comprobará que fiabilidad tiene la estimación de la resistencia característica del hormigón de una obra ejecutada, calculada mediante la metodología Bayesiana.

7

ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA CARACTERÍSTICA DEL HORMIGÓN MEDIANTE LA REALIZACIÓN DE ENSAYOS

7.- ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA CARACTERÍSTICA DEL HORMIGÓN MEDIANTE LA REALIZACIÓN DE ENSAYOS

Tras el estudio y análisis de la parte teórica que ha abarcado hasta el presente capítulo, llega el momento de desarrollar la parte práctica. Este capítulo y el siguiente se han estructurado para realizar los cálculos, por un lado en el presente capítulo se realizará la estimación de la resistencia característica del hormigón de una estructura ejecutada mediante la realización de ensayos de probetas obtenidas de dicha estructura, y en el siguiente capítulo se desarrollará la misma estimación pero utilizando el método Bayesiano.

El objetivo de estos dos capítulos es determinar cuánto de fiable es la estimación de la resistencia característica del hormigón utilizando el método Bayesiano, y cómo y en qué medida influye la información previa, aportada de nuestra experiencia, en dicho método.

7.1.- Ensayos

Se pretende estimar la resistencia característica de un hormigón de una obra ejecutada. Para estimar dicha resistencia se extraen 20 testigos, obteniéndose mediante ensayos, las siguientes mediciones de resistencias a compresión:

Número de ensayo	Valor de la Resistencia (N/mm ²)	Resistencia Ordenada (N/mm ²)	Número de ensayo	Valor de la Resistencia (N/mm ²)	Resistencia Ordenada (N/mm ²)
1	35,80	24,40	11	27,80	33,30
2	32,20	25,60	12	33,50	33,50
3	25,60	27,80	13	35,90	33,60
4	39,20	27,90	14	39,70	34,00
5	27,90	28,50	15	28,50	35,80
6	33,30	30,10	16	31,30	35,90
7	32,80	31,30	17	31,70	36,80
8	24,40	31,70	18	34,00	37,10
9	33,60	32,20	19	36,80	39,20
10	37,10	32,80	20	30,10	39,70

Tabla 7.1. Resultados de las resistencias del hormigón de los ensayos a compresión

7.2.- Histograma

Para obtener una "primera vista" general, o panorama, de la distribución de la muestra, representaremos un histograma de los resultados obtenidos en los ensayos, que es de gran interés para el observador. La construcción de un histograma requiere el establecimiento de los intervalos o ancho de las barras, que representan la frecuencia.

El ancho del intervalo juega un papel importante para la resolución de la representación de las observaciones. Sin embargo, no existen pautas generales relativas a la elección de la anchura de intervalo. En la mayoría de aplicaciones, el objetivo es identificar un intervalo con una resolución suficiente. En Cornell (1971) se sugiere subdividir el intervalo entre el valor máximo y mínimo en E intervalos, E está dado por:

$$E = 1 + 3,3 \log(n) \quad (7.1)$$

Dónde: n es el número de datos del conjunto.

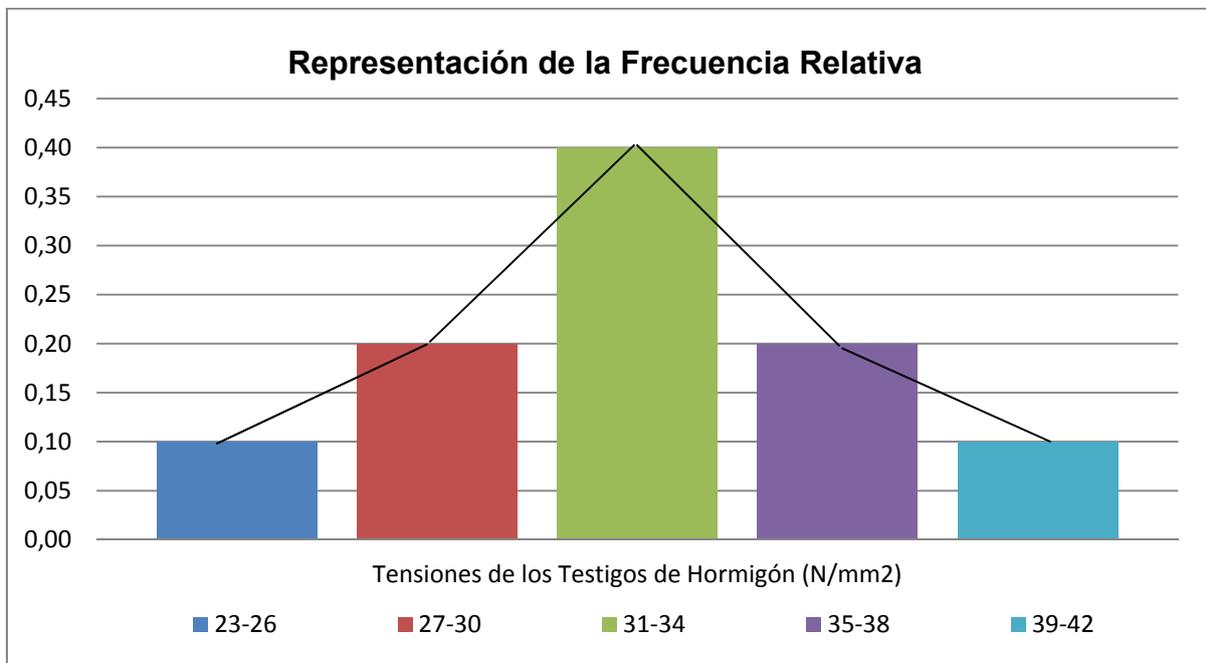
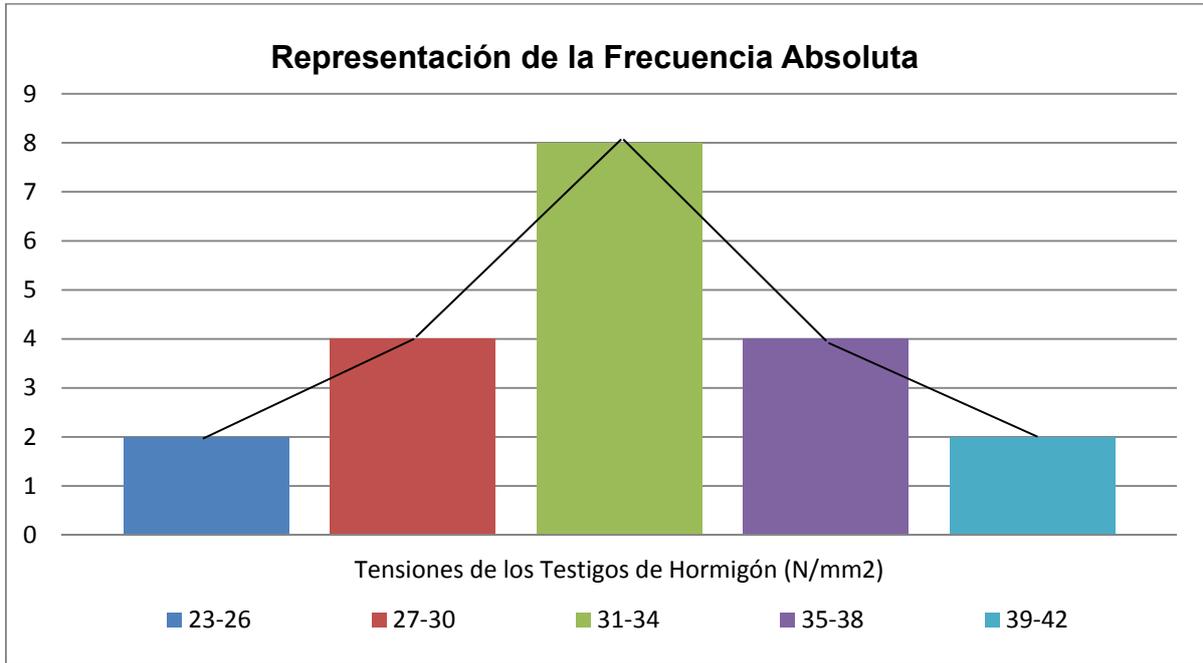
Para las observaciones de la resistencia a compresión del hormigón, aplicando la ecuación (7.1), da un valor de:

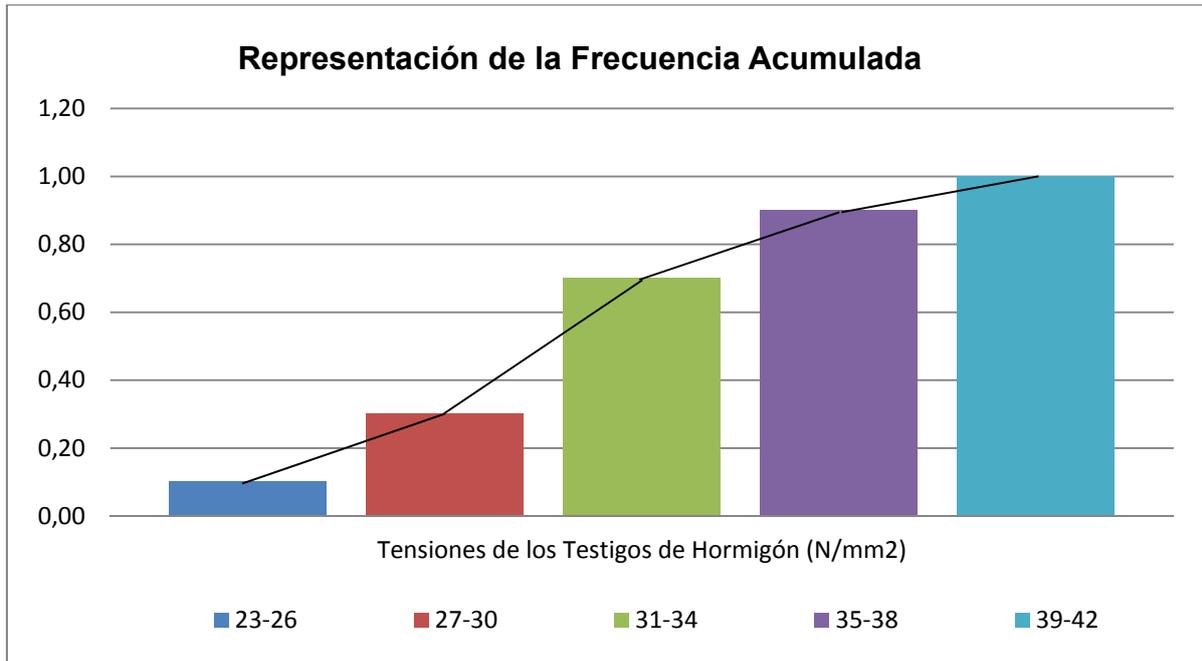
$$E = 1 + 3,3 \log(n) = 1 + 3,3 \log 20 = 5.29 \approx 5$$

$E = 5.29$ y redondeando, 5 intervalos se pueden utilizar para este conjunto de datos. Los datos se dan en la siguiente tabla:

Intervalo (N/mm ²)	Punto medio (N/mm ²)	Frecuencia Absoluta	Frecuencia Relativa	Frecuencia Acumulada
23-26	24,50	2	0,10	0,10
27-30	28,50	4	0,20	0,30
31-34	32,50	8	0,40	0,70
35-38	36,50	4	0,20	0,90
39-42	40,50	2	0,10	1,00
$\Sigma=20$ (n)			$\Sigma=1$	

Tabla 7.2. Intervalos y Frecuencias de los Testigos de hormigón





7.3.- Estimación de la resistencia característica del hormigón

La resistencia característica del hormigón es el valor estadístico que garantiza que el 95% del hormigón presente en el edificio estudiado, posee una resistencia mayor o igual a dicho valor.

Para dicha estimación construiremos una gráfica de percentiles. El percentil (Q_i) correspondiente a un dato (X_i), en el conjunto de datos ordenados viene dado por:

$$Q_i = \frac{i}{n + 1} \quad (7.2)$$

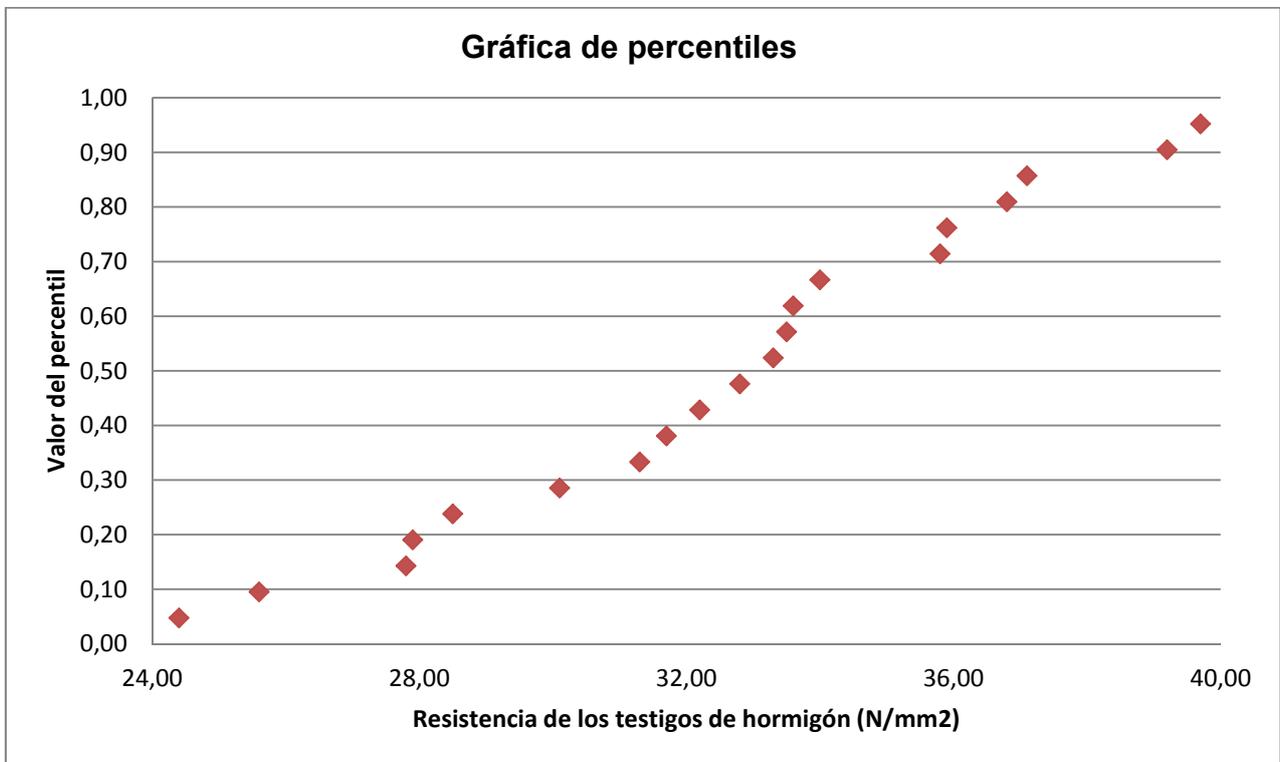
En la siguiente tabla se calculan los correspondientes percentiles para todos los datos de las observaciones ordenadas ascendentemente. Por ejemplo el primer dato representa el percentil:

$$Q_1 = \frac{1}{20 + 1} = 0,048$$

Y de la misma forma se construyen los demás percentiles.

Observaciones Ordenadas de forma ascendente	Resistencia Ordenada (N/mm ²)	Percentil (Qi)	Observaciones Ordenadas de forma ascendente	Resistencia Ordenada (N/mm ²)	Percentil (Qi)
1	24,40	0,048	11	33,30	0,524
2	25,60	0,095	12	33,50	0,571
3	27,80	0,143	13	33,60	0,619
4	27,90	0,190	14	34,00	0,667
5	28,50	0,238	15	35,80	0,714
6	30,10	0,286	16	35,90	0,762
7	31,30	0,333	17	36,80	0,810
8	31,70	0,381	18	37,10	0,857
9	32,20	0,429	19	39,20	0,905
10	32,80	0,476	20	39,70	0,952

Tabla 7.3. Valores de los percentiles para los datos de las resistencias de los testigos de hormigón



Para la evaluación de un determinado percentil, que no corresponda a una observación dada, debe hacerse una interpolación. Esto se puede realizar mediante el siguiente cálculo, para localizar el percentil (Q_j), se determina el valor:

$$J = n \cdot Q_j + Q_j \quad (7.3)$$

- Si J es un número entero, el valor de la observación X_J , es el percentil buscado.
- Si J no es un número entero, tendrá una parte entera, K y una parte decimal, p .
El valor del percentil buscado (Q_j), se obtiene interpolando, según la expresión:

$$Q_j = (1 - p) \cdot X_K + p \cdot X_{K+1} \quad (7.4)$$

Para la resistencia característica del hormigón estamos buscando el percentil $Q_{0,05}$, con lo cual lo calcularemos utilizando las expresiones 7.3 y 7.4:

$$J = n \cdot Q_j + Q_j = 20 \cdot 0,05 + 0,05 = 1,05$$

La parte entera, $K=1$, la parte decimal, $p=0,05$.

$$Q_j = (1 - p) \cdot X_K + p \cdot X_{K+1}$$

$$Q_{0,05} = (1 - p) \cdot X_1 + p \cdot X_2$$

$$Q_{0,05} = (1 - 0,05) \cdot 24,40 + 0,05 \cdot 25,60$$

$$Q_{0,05} = 23,18 + 1,28 = \mathbf{24,46 \text{ N/mm}^2}$$

Por tanto el valor de la resistencia característica del hormigón mediante la realización de ensayos es de $24,46 \text{ N/mm}^2$.

$$\mathbf{F_{ck} = 24,46 \text{ N/mm}^2}$$

8

ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA CARACTERÍSTICA DEL HORMIGÓN MEDIANTE EL MÉTODO BAYESIANO

8.- ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA CARACTERÍSTICA DEL HORMIGÓN MEDIANTE EL MÉTODO BAYESIANO

Una vez realizado la estimación de la resistencia característica del hormigón a través del ensayo de 20 testigos, en este capítulo se determinará la fiabilidad en la aplicación del método Bayesiano, explicándose una metodología para obtener la información previa a través de nuestra experiencia y en qué medida afecta esa información en la aplicación de dicho método.

Para realizar esta estimación se utilizarán los mismos resultados obtenidos de los ensayos a compresión de los testigos de hormigón, indicados en la siguiente tabla:

Número de ensayo	Valor de la Resistencia (N/mm ²)	Número de ensayo	Valor de la Resistencia (N/mm ²)
1	35,80	11	27,80
2	32,20	12	33,50
3	25,60	13	35,90
4	39,20	14	39,70
5	27,90	15	28,50
6	33,30	16	31,30
7	32,80	17	31,70
8	24,40	18	34,00
9	33,60	19	36,80
10	37,10	20	30,10

Tabla 8.1. Resultados de las resistencias del hormigón de los ensayos a compresión

8.1.- Información previa

Como ya se ha comentado en varias ocasiones a lo largo del presente trabajo, para utilizar el método Bayesiano tenemos que disponer de información previa. Esta información la obtenemos de nuestra propia experiencia, la cual la iremos acumulando a lo largo de nuestra vida profesional.

Lo que haremos para la realización de este caso práctico será crearnos nuestra experiencia para obtener la información previa. Para ello vamos a suponer que nuestra

experiencia está basada en la realización de diez estudios de la resistencia característica del hormigón en estructuras ejecutadas.

Para la realización de estos diez estudios se elegirán aleatoriamente cuatro resistencias del hormigón de la tabla de ensayos, calculándose la media y la desviación estándar de cada uno de estos diez estudios, para posteriormente obtener la media (m') y la variación de la media ($V(\mu)$) de las medias y la media (s') y la variación de la desviación estándar ($V(\sigma)$) de las desviaciones estándar, que no es más, que la información previa buscada.

8.1.1.- Estudio número 1

En la siguiente tabla se muestran los cuatro ensayos elegidos aleatoriamente de la resistencia a compresión realizados a los testigos de hormigón, que se utilizarán para el cálculo en este estudio.

Número de ensayo	Valor de la Resistencia (N/mm ²)
1	32,80
2	28,50
3	32,20
4	36,80

Cálculo de **la media** y de **la desviación estándar**:

La media m_1 se calcula a partir de la ecuación (6.1):

$$m_1 = \frac{\sum x_i}{n} = \frac{130,30}{4} = 32,58 \text{ N/mm}^2$$

Y **la desviación estándar s_1** según la ecuación (6.2) es:

$$s_1 = \sqrt{\frac{\sum (x_i - m)^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{34,65}{3}} = 3,40 \text{ N/mm}^2$$

8.1.2.- Estudio número 2

En la siguiente tabla se muestran los cuatro ensayos elegidos aleatoriamente de la resistencia a compresión realizados a los testigos de hormigón, que se utilizarán para el cálculo en este estudio.

Número de ensayo	Valor de la Resistencia (N/mm ²)
1	35,80
2	37,10
3	34,00
4	33,50

Cálculo de la **media** y de la **desviación estándar**:

La **media** m_2 se calcula a partir de la ecuación (6.1):

$$m_2 = \frac{\sum x_i}{n} = \frac{140,40}{4} = 35,10 \text{ N/mm}^2$$

Y la **desviación estándar** s_2 según la ecuación (6.2) es:

$$s_2 = \sqrt{\frac{\sum (x_i - m)^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{8,26}{3}} = 1,66 \text{ N/mm}^2$$

8.1.3.- Estudio número 3

En la siguiente tabla se muestran los cuatro ensayos elegidos aleatoriamente de la resistencia a compresión realizados a los testigos de hormigón, que se utilizarán para el cálculo en este estudio.

Número de ensayo	Valor de la Resistencia (N/mm ²)
1	39,20
2	24,40
3	39,70
4	34,00

Cálculo de la **media** y de la **desviación estándar**:

La **media** m_3 se calcula a partir de la ecuación (6.1):

$$m_3 = \frac{\sum x_i}{n} = \frac{137,30}{4} = \mathbf{34,33 \text{ N/mm}^2}$$

Y la **desviación estándar** s_3 según la ecuación (6.2) es:

$$s_3 = \sqrt{\frac{\sum (x_i - m)^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{157,27}{3}} = \mathbf{7,10 \text{ N/mm}^2}$$

8.1.4.- Estudio número 4

En la siguiente tabla se muestran los cuatro ensayos elegidos aleatoriamente de la resistencia a compresión realizados a los testigos de hormigón, que se utilizarán para el cálculo en este estudio.

Número de ensayo	Valor de la Resistencia (N/mm ²)
1	32,20
2	32,80
3	37,10
4	30,10

Cálculo de la **media** y de la **desviación estándar**:

La **media** m_4 se calcula a partir de la ecuación (6.1):

$$m_4 = \frac{\sum x_i}{n} = \frac{132,20}{4} = \mathbf{33,05 \text{ N/mm}^2}$$

Y la **desviación estándar** s_4 según la ecuación (6.2) es:

$$s_4 = \sqrt{\frac{\sum (x_i - m)^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{25,89}{3}} = \mathbf{2,94 \text{ N/mm}^2}$$

8.1.5.- Estudio número 5

En la siguiente tabla se muestran los cuatro ensayos elegidos aleatoriamente de la resistencia a compresión realizados a los testigos de hormigón, que se utilizarán para el cálculo en este estudio.

Número de ensayo	Valor de la Resistencia (N/mm ²)
1	25,60
2	24,40
3	33,60
4	31,30

Cálculo de la **media** y de la **desviación estándar**:

La **media** m_5 se calcula a partir de la ecuación (6.1):

$$m_5 = \frac{\sum x_i}{n} = \frac{114,90}{4} = \mathbf{28,73 \text{ N/mm}^2}$$

Y la **desviación estándar** s_5 según la ecuación (6.2) es:

$$s_5 = \sqrt{\frac{\sum (x_i - m)^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{58,87}{3}} = \mathbf{4,43 \text{ N/mm}^2}$$

8.1.6.- Estudio número 6

En la siguiente tabla se muestran los cuatro ensayos elegidos aleatoriamente de la resistencia a compresión realizados a los testigos de hormigón, que se utilizarán para el cálculo en este estudio.

Número de ensayo	Valor de la Resistencia (N/mm ²)
1	39,20
2	32,80
3	35,90
4	36,80

Cálculo de **la media** y de **la desviación estándar**:

La media m_6 se calcula a partir de la ecuación (6.1):

$$m_6 = \frac{\sum x_i}{n} = \frac{144,70}{4} = \mathbf{36,18 \text{ N/mm}^2}$$

Y **la desviación estándar s_6** según la ecuación (6.2) es:

$$s_6 = \sqrt{\frac{\sum (x_i - m)^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{21,01}{3}} = \mathbf{2,65 \text{ N/mm}^2}$$

8.1.7.- Estudio número 7

En la siguiente tabla se muestran los cuatro ensayos elegidos aleatoriamente de la resistencia a compresión realizados a los testigos de hormigón, que se utilizarán para el cálculo en este estudio.

Número de ensayo	Valor de la Resistencia (N/mm ²)
1	33,50
2	28,50
3	31,30
4	34,00

Cálculo de **la media** y de **la desviación estándar**:

La media m_7 se calcula a partir de la ecuación (6.1):

$$m_7 = \frac{\sum x_i}{n} = \frac{127,30}{4} = \mathbf{31,83 \text{ N/mm}^2}$$

Y **la desviación estándar s_7** según la ecuación (6.2) es:

$$s_7 = \sqrt{\frac{\sum (x_i - m)^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{18,87}{3}} = \mathbf{2,51 \text{ N/mm}^2}$$

8.1.8.- Estudio número 8

En la siguiente tabla se muestran los cuatro ensayos elegidos aleatoriamente de la resistencia a compresión realizados a los testigos de hormigón, que se utilizarán para el cálculo en este estudio.

Número de ensayo	Valor de la Resistencia (N/mm ²)
1	25,60
2	37,10
3	27,80
4	31,70

Cálculo de la **media** y de la **desviación estándar**:

La **media** m_8 se calcula a partir de la ecuación (6.1):

$$m_8 = \frac{\sum x_i}{n} = \frac{122,20}{4} = 30,55 \text{ N/mm}^2$$

Y la **desviación estándar** s_8 según la ecuación (6.2) es:

$$s_8 = \sqrt{\frac{\sum (x_i - m)^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{76,29}{3}} = 5,04 \text{ N/mm}^2$$

8.1.9.- Estudio número 9

En la siguiente tabla se muestran los cuatro ensayos elegidos aleatoriamente de la resistencia a compresión realizados a los testigos de hormigón, que se utilizarán para el cálculo en este estudio.

Número de ensayo	Valor de la Resistencia (N/mm ²)
1	35,80
2	33,30
3	24,40
4	37,10

Cálculo de **la media** y de **la desviación estándar**:

La media m_9 se calcula a partir de la ecuación (6.1):

$$m_9 = \frac{\sum x_i}{n} = \frac{130,60}{4} = 32,65 \text{ N/mm}^2$$

Y **la desviación estándar s_9** según la ecuación (6.2) es:

$$s_9 = \sqrt{\frac{\sum (x_i - m)^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{98,21}{3}} = 5,72 \text{ N/mm}^2$$

8.1.10.- Estudio número 10

En la siguiente tabla se muestran los cuatro ensayos elegidos aleatoriamente de la resistencia a compresión realizados a los testigos de hormigón, que se utilizarán para el cálculo en este estudio.

Número de ensayo	Valor de la Resistencia (N/mm ²)
1	37,10
2	33,50
3	35,90
4	28,50

Cálculo de **la media** y de **la desviación estándar**:

La media m_{10} se calcula a partir de la ecuación (6.1):

$$m_{10} = \frac{\sum x_i}{n} = \frac{135,00}{4} = 33,75 \text{ N/mm}^2$$

Y **la desviación estándar s_{10}** según la ecuación (6.2) es:

$$s_{10} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - m)^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{43,47}{3}} = 3,81 \text{ N/mm}^2$$

8.1.11.- Cálculo de la Información Previa

Para obtener la información previa de nuestra experiencia basada en la realización de diez estudios, calcularemos la media y la desviación estándar de las medias y la media y la desviación estándar de las desviaciones estándar de los diez estudios realizados, para posteriormente calcular la variación de la media y la variación de la desviación estándar.

En la siguiente tabla se muestran los resultados de las medias y de las desviaciones estándar obtenidos en los puntos anteriores.

Estudio	Media (N/mm ²)	Desviación Estándar (N/mm ²)
1	32,58	3,40
2	35,10	1,66
3	34,33	7,10
4	33,05	2,94
5	28,73	4,43
6	36,18	2,65
7	31,83	2,51
8	30,55	5,04
9	32,65	5,72
10	33,75	3,81

Cálculo de **la media**, de **la desviación estándar** y de **la variación de la media de las medias**:

La media m_m se calcula a partir de la ecuación (6.1):

$$m_m = \frac{\sum x_i}{n} = \frac{328,73}{10} = 32,87 \text{ N/mm}^2$$

La desviación estándar s_m según la ecuación (6.2) es:

$$s_m = \sqrt{\frac{\sum (x_i - m)^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{42,61}{9}} = 2,18 \text{ N/mm}^2$$

Y la **variación de la media $V(\mu)$** a partir de la ecuación (6.4) será:

$$V(\mu) = \frac{s_m}{m_m} = \frac{2,18}{32,87} = \mathbf{0,07}$$

Ahora calcularemos **la media, la desviación estándar y la variación de la desviación estándar de las desviaciones estándar:**

La media m_s se calcula a partir de la ecuación (6.1):

$$m_s = \frac{\sum x_i}{n} = \frac{39,25}{10} = \mathbf{3,93 \text{ N/mm}^2}$$

La desviación estándar s_s según la ecuación (6.2) es:

$$s_s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - m)^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{24,86}{9}} = \mathbf{1,66 \text{ N/mm}^2}$$

Y la **variación de la desviación estándar $V(\sigma)$** a partir de la ecuación (6.4) será:

$$V(\sigma) = \frac{s_s}{m_s} = \frac{1,66}{3,93} = \mathbf{0,42}$$

Por lo tanto la información previa disponible para la realización de este caso práctico será la siguiente:

- Media: **$m'=32,87 \text{ N/mm}^2$**
- Desviación estándar: **$s'=3,93 \text{ N/mm}^2$**
- La población tiene una distribución normal, no es posible conocer su desviación estándar σ y tiene:
 - Una variación de la media: **$V(\mu)=0,07$**
 - Una variación de la desviación estándar: **$V(\sigma)=0,42$**

Una vez obtenida la información previa, en los siguientes puntos se estimará la resistencia característica del hormigón con la realización de cuatro ensayos mediante el método Bayesiano, comparándola con la obtenida mediante el método de predicción de estimación de percentiles, la cual no utiliza información previa para su cálculo.

Se realizarán también cambios en la información previa, para comprobar de qué manera influyen estos en la estimación de la resistencia característica del hormigón.

8.2.- Estimación de la resistencia característica del hormigón

En esta primera estimación se utilizará la información previa calculada:

- Media: $m' = 32,87 \text{ N/mm}^2$
- Variación de la media: $V(\mu) = 0,07$
- Desviación estándar: $s' = 3,93 \text{ N/mm}^2$
- Variación de la desviación estándar: $V(\sigma) = 0,42$

En la siguiente tabla se muestran los cuatro ensayos de la resistencia a compresión realizados a los testigos de hormigón, que se utilizarán para el cálculo en este punto.

Número de ensayo	Valor de la Resistencia (N/mm ²)
1	35,80
2	33,30
3	24,40
4	31,30

Cálculo de **la media, la desviación estándar y los grados de libertad** de la muestra realizada.

La media m de la muestra se calcula a partir de la ecuación (6.1):

$$m = \frac{\sum x_i}{n} = \frac{124,80}{4}$$

$$m = 31,20 \text{ N/mm}^2$$

La **desviación estándar s** de la muestra según la ecuación (6.2) es:

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x_i - m)^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{71,82}{3}}$$

$$s = 4,89 \text{ N/mm}^2$$

Y los **grados de libertad v** de la muestra son iguales a $n-1$:

$$v = n - 1 = 4 - 1$$

$$v = 3$$

8.2.1.- Estimación mediante el método Bayesiano

El **tamaño de la muestra desconocida n'** y los **grados de libertad v'** , se evalúan utilizando la ecuación (6.10):

$$n' = \left[\frac{s'}{m' V(\mu)} \right]^2 = \left[\frac{3,93}{32,87 \cdot 0,07} \right]^2 = 3,25$$

$$n' = 3$$

$$v' = \frac{1}{2 V(\sigma)^2} = \frac{1}{2 \cdot 0,42^2} = 2,79$$

$$v' = 3$$

Los **parámetros de la muestra combinada** se calculan mediante las relaciones siguientes (6.9):

$$n'' = n + n' = 4 + 3$$

$$n'' = 7$$

$$v'' = v + v' - 1 \quad \text{si} \quad n' \geq 1$$

$$v'' = v + v' \quad \text{si} \quad n' = 0$$

$$v'' = v + v' - 1 = 3 + 3 - 1$$

$$v'' = 5$$

$$m'' = (m n + m' n') / n'' = (31,20 \cdot 4 + 32,87 \cdot 3) / 7$$

$$m'' = 31,92 \text{ N/mm}^2$$

$$s''^2 = (v s^2 + v' s'^2 + n m^2 - n'' m''^2) / v''$$

$$s'' = \sqrt{(v s^2 + v' s'^2 + n m^2 + n' m'^2 - n'' m''^2) / v''}$$

$$s'' = \sqrt{(3 \cdot 4,89^2 + 3 \cdot 3,93^2 + 4 \cdot 31,20^2 + 3 \cdot 32,87^2 - 7 \cdot 31,92^2) / 5}$$

$$s'' = 4,96 \text{ N/mm}^2$$

Aplicamos el método Bayesiano de predicción de la estimación percentil mediante la ecuación (6.11), utilizando la tabla (6.3) para obtener el valor de t''_p para $1-p=0,95$ y $v''=5$.

$$F_{ck, Bayes} = m'' + t''_p s'' \sqrt{1 + 1/n''}$$

$$F_{ck, Bayes} = 31,92 - 2,02 \cdot 4,96 \sqrt{1 + 1/7}$$

$$F_{ck, Bayes} = 21,24 \text{ N/mm}^2$$

La estimación de la **resistencia característica del hormigón** aplicando el **método Bayesiano** es de **21,24 N/mm²**.

8.2.2.- Estimación mediante el método de predicción de percentiles

Si no disponemos de información previa, entonces $n'=v'=0$ y las características m'' , n'' , s'' , v'' serán iguales a la características de la muestra m , n , s , v . Entonces el valor

predictivo de $f_{ck,pred}$ se deduce de la ecuación (6.12), donde el valor de t_p se obtiene de la tabla (6.3) para $1-p=0,95$ y $v=3$:

$$f_{ck,pred} = m + t_p s \sqrt{1 + 1/n}$$

$$f_{ck,pred} = 31,20 - 2,35 \cdot 4,89 \sqrt{1 + 1/4}$$

$$f_{ck,pred} = \mathbf{18,33 \text{ N/mm}^2}$$

La estimación de la **resistencia característica del hormigón** aplicando el **método de predicción de estimación de percentiles** es de **18,33 N/mm²**.

A la vista de los resultados obtenidos podemos observar que cuando tenemos una información previa muy buena, la estimación de la resistencia característica del hormigón mediante el método Bayesiano nos la mejora, pues recordemos que la resistencia característica, calculada con la realización de 20 ensayos, es de 24,46 N/mm².

Pero ¿qué pasaría si la información previa no es tan buena? ¿cómo influiría en la estimación de la resistencia?, lo estudiaremos en los siguientes apartados.

8.3.- Influencia de la información previa en el método Bayesiano

En este apartado estudiaremos que influencia tiene en el resultado del método Bayesiano, cada uno de los componentes de la información previa: la media, la variación de la media, la desviación estándar y la variación de la desviación estándar.

8.3.1.- Media grande y variación de la media pequeña

Vamos a empezar valorando la influencia que tiene estimar una media más grande a la media de los ensayos realizados, con una variación de dicha media baja, es decir, que tenemos la certeza de que esa media es buena.

Para esto utilizaremos la siguiente información previa:

- Media: $m' = 50,00 \text{ N/mm}^2$
- Variación de la media: $V(\mu) = 0,07$
- Desviación estándar: $s' = 3,93 \text{ N/mm}^2$
- Variación de la desviación estándar: $V(\sigma) = 0,42$

La media, la desviación estándar y los grados de libertad de la muestra realizada, ya lo tenemos calculado en el punto anterior, son los siguientes:

- La media $m = 31,20 \text{ N/mm}^2$.
- La desviación estándar $s = 4,89 \text{ N/mm}^2$
- Y los grados de libertad $v = 3$

Evaluamos ahora el tamaño de la muestra desconocida n' y los grados de libertad v' , utilizando la ecuación (6.10):

$$n' = \left[\frac{s'}{m' V(\mu)} \right]^2 = \left[\frac{3,93}{50,00 \cdot 0,07} \right]^2 = 1,41$$

$$n' = 1$$

$$v' = \frac{1}{2 V(\sigma)^2} = \frac{1}{2 \cdot 0,42^2} = 2,79$$

$$v' = 3$$

Los parámetros de la muestra combinada se calculan mediante las relaciones siguientes (6.9):

$$n'' = n + n' = 4 + 1$$

$$n'' = 5$$

$$v'' = v + v' - 1 \quad \text{si} \quad n' \geq 1$$

$$v'' = v + v' - 1 = 3 + 3 - 1$$

$$v'' = v + v' \quad \text{si} \quad n' = 0$$

$$v'' = 5$$

$$m'' = (m n + m' n') / n'' = (31,20 \cdot 4 + 50,00 \cdot 1) / 5$$

$$m'' = 34,96 \text{ N/mm}^2$$

$$s''^2 = (v s^2 + v' s'^2 + n m^2 - n'' m''^2) / v''$$

$$s'' = \sqrt{(v s^2 + v' s'^2 + n m^2 + n' m'^2 - n'' m''^2) / v''}$$

$$s'' = \sqrt{(3 \cdot 4,89^2 + 3 \cdot 3,93^2 + 4 \cdot 31,20^2 + 1 \cdot 50,00^2 - 5 \cdot 34,96^2) / 5}$$

$$s'' = 8,95 \text{ N/mm}^2$$

Aplicamos el método Bayesiano de predicción de la estimación percentil mediante la ecuación (6.11), utilizando la tabla (6.3) para obtener el valor de t''_p para $1-p=0,95$ y $v''=5$.

$$F_{ck, Bayes} = m'' + t''_p s'' \sqrt{1 + 1/n''}$$

$$F_{ck, Bayes} = 34,96 - 2,02 \cdot 8,95 \sqrt{1 + 1/5}$$

$$F_{ck, Bayes} = 15,20 \text{ N/mm}^2$$

Podemos observar que cuando tenemos una media mucho más alta que a la obtenida en los ensayos realizados, con la certeza de que esa media es buena, pues tenemos una variación de la media baja, penaliza bastante la estimación de la resistencia característica del hormigón, pues pasamos de estimar una resistencia de **21,24 N/mm²** a una de **15,20 N/mm²**.

8.3.2.- Media grande y variación de la media grande

Pero ¿y si no tenemos la certeza de que esa media es buena? Comprobaremos ahora que ocurre cuando la media es mucho más grande que la obtenida en los ensayos realizados, pero esta vez no tendremos la certeza de que esa media sea buena, por lo que la estimaremos con una variación de la media grande.

Utilizaremos la siguiente información previa:

- Media: $m' = 50,00 \text{ N/mm}^2$
- Variación de la media: $V(\mu) = 0,50$

- Desviación estándar: $s' = 3,93 \text{ N/mm}^2$
- Variación de la desviación estándar: $V(\sigma) = 0,42$

La media, la desviación estándar y los grados de libertad de la muestra realizada, ya están calculadas en los puntos anteriores:

- La media $m = 31,20 \text{ N/mm}^2$.
- La desviación estándar $s = 4,89 \text{ N/mm}^2$
- Y los grados de libertad $v = 3$

Evaluamos el tamaño de la muestra desconocida n' y los grados de libertad v' , utilizando la ecuación (6.10):

$$n' = \left[\frac{s'}{m' V(\mu)} \right]^2 = \left[\frac{3,93}{50,00 \cdot 0,50} \right]^2 = 0,02$$

$$n' = 0$$

$$v' = \frac{1}{2 V(\sigma)^2} = \frac{1}{2 \cdot 0,42^2} = 2,79$$

$$v' = 3$$

Los parámetros de la muestra combinada se calculan mediante las relaciones siguientes (6.9):

$$n'' = n + n' = 4 + 0$$

$$n'' = 4$$

$$v'' = v + v' - 1 \quad \text{si} \quad n' \geq 1$$

$$v'' = v + v' \quad \text{si} \quad n' = 0$$

$$v'' = v + v' = 3 + 3$$

$$v'' = 6$$

$$m'' = (m n + m' n') / n'' = (31,20 \cdot 4 + 50,00 \cdot 0) / 4$$

$$m'' = 31,20 \text{ N/mm}^2$$

$$s''^2 = (v s^2 + v' s'^2 + n m^2 - n'' m''^2) / v''$$

$$s'' = \sqrt{(v s^2 + v' s'^2 + n m^2 + n' m'^2 - n'' m''^2) / v''}$$

$$s'' = \sqrt{(3 \cdot 4,89^2 + 3 \cdot 3,93^2 + 4 \cdot 31,20^2 + 0 \cdot 50,00^2 - 4 \cdot 31,20^2) / 6}$$

$$s'' = 4,44 \text{ N/mm}^2$$

Aplicamos el método Bayesiano de predicción de la estimación percentil mediante la ecuación (6.11), utilizando la tabla (6.3) para obtener el valor de t''_p para $1-p=0,95$ y $v''=6$.

$$F_{ck, Bayes} = m'' + t''_p s'' \sqrt{1 + 1/n''}$$

$$F_{ck, Bayes} = 31,20 - 1,94 \cdot 4,44 \sqrt{1 + 1/4}$$

$$F_{ck, Bayes} = 21,56 \text{ N/mm}^2$$

Cuando tenemos una media mucho más grande que a la obtenida en los ensayos realizados, y no tenemos la certeza de que esa media sea buena, la estimación de la resistencia característica del hormigón es bastante buena, pues pasamos de estimar una resistencia de **15,20 N/mm²** a una de **21,56 N/mm²**.

Y si la comparamos con la resistencia característica obtenida con la información previa buena, observamos que la estimación sigue siendo buena, pues pasamos de estimar una resistencia de **21,24 N/mm²** a una de **21,56 N/mm²**.

Estos resultados se pueden explicar pues el método Bayesiano, cuando no tiene la certeza de que la media de la información previa sea precisa, toma más importancia la media de la muestra y puesto que la media de la información previa es alta, incrementa la estimación de la resistencia.

8.3.3.- Media pequeña y variación de la media pequeña

Ahora haremos las comprobaciones cuando la media es mucho más pequeña que la obtenida en los ensayos realizados, primero con la certeza de que esa media es buena y después sin tener esa certeza.

Primero utilizaremos la siguiente información previa:

- Media: $m' = 10,00 \text{ N/mm}^2$
- Variación de la media: $V(\mu) = 0,07$
- Desviación estándar: $s' = 3,93 \text{ N/mm}^2$
- Variación de la desviación estándar: $V(\sigma) = 0,42$

La media, la desviación estándar y los grados de libertad de la muestra realizada, ya están calculadas en los puntos anteriores:

- La media $m = 31,20 \text{ N/mm}^2$.
- La desviación estándar $s = 4,89 \text{ N/mm}^2$
- Y los grados de libertad $v = 3$

Evaluamos el tamaño de la muestra desconocida n' y los grados de libertad v' , utilizando la ecuación (6.10):

$$n' = \left[\frac{s'}{m' V(\mu)} \right]^2 = \left[\frac{3,93}{10,00 \cdot 0,07} \right]^2 = 31,44$$

$$n' = 31$$

$$v' = \frac{1}{2 V(\sigma)^2} = \frac{1}{2 \cdot 0,42^2} = 2,79$$

$$v' = 3$$

Los **parámetros de la muestra combinada** se calculan mediante las relaciones siguientes (6.9):

$$n'' = n + n' = 4 + 31$$

$$n'' = 35$$

$$v'' = v + v' - 1 \quad \text{si} \quad n' \geq 1$$

$$v'' = v + v' - 1 = 3 + 3 - 1$$

$$v'' = v + v' \quad \text{si} \quad n' = 0$$

$$v'' = 5$$

$$m'' = (m n + m' n') / n'' = (31,20 \cdot 4 + 10,00 \cdot 31) / 35$$

$$m'' = 12,42 \text{ N/mm}^2$$

$$s''^2 = (v s^2 + v' s'^2 + n m^2 - n'' m''^2) / v''$$

$$s'' = \sqrt{(v s^2 + v' s'^2 + n m^2 + n' m'^2 - n'' m''^2) / v''}$$

$$s'' = \sqrt{(3 \cdot 4,89^2 + 3 \cdot 3,93^2 + 4 \cdot 31,20^2 + 31 \cdot 10,00^2 - 35 \cdot 12,42^2) / 5}$$

$$s'' = 18,50 \text{ N/mm}^2$$

Aplicamos el método Bayesiano de predicción de la estimación percentil mediante la ecuación (6.11), utilizando la tabla (6.3) para obtener el valor de t''_p para $1-p=0,95$ y $v''=5$.

$$F_{ck,Bayes} = m'' + t''_p s'' \sqrt{1 + 1/n''}$$

$$F_{ck,Bayes} = 12,42 - 2,02 \cdot 18,50 \sqrt{1 + 1/35}$$

$$F_{ck,Bayes} = -25,37 \text{ N/mm}^2$$

Como podemos observar el resultado es irreal, pues nos da una resistencia negativa. La interpretación de este resultado es pensar que la muestra está mal realizada, pues tenemos mucha certeza de que la resistencia media es de 10,00 N/mm² y la resistencia media de las muestras nos está dando mucho mayor 31,20 N/mm².

8.3.4.- Media pequeña y variación de la media grande

Ahora haremos la misma estimación pero sin tener la certeza de que la media de la información previa sea buena, para lo cual la estimación se hará con una variación de la media grande.

Utilizaremos la siguiente información previa:

- Media: $m' = 10,00 \text{ N/mm}^2$
- Variación de la media: $V(\mu) = 0,50$
- Desviación estándar: $s' = 3,93 \text{ N/mm}^2$
- Variación de la desviación estándar: $V(\sigma) = 0,42$

La media, la desviación estándar y los grados de libertad de la muestra realizada, ya están calculadas en los puntos anteriores:

- La media $m = 31,20 \text{ N/mm}^2$.
- La desviación estándar $s = 4,89 \text{ N/mm}^2$
- Y los grados de libertad $v = 3$

Evaluamos el tamaño de la muestra desconocida n' y los grados de libertad v' , utilizando la ecuación (6.10):

$$n' = \left[\frac{s'}{m' V(\mu)} \right]^2 = \left[\frac{3,93}{10,00 \cdot 0,50} \right]^2 = 0,62$$

$$n' = 0$$

$$v' = \frac{1}{2 V(\sigma)^2} = \frac{1}{2 \cdot 0,42^2} = 2,79$$

$$v' = 3$$

Los **parámetros de la muestra combinada** se calculan mediante las relaciones siguientes (6.9):

$$n'' = n + n' = 4 + 0$$

$$n'' = 4$$

$$v'' = v + v' - 1 \quad \text{si } n' \geq 1$$

$$v'' = v + v' = 3 + 3$$

$$v'' = v + v' \quad \text{si } n' = 0$$

$$v'' = 6$$

$$m'' = (m n + m' n') / n'' = (31,20 \cdot 4 + 10,00 \cdot 0) / 4$$

$$m'' = 31,20 \text{ N/mm}^2$$

$$s''^2 = (v s^2 + v' s'^2 + n m^2 - n'' m''^2) / v''$$

$$s'' = \sqrt{(v s^2 + v' s'^2 + n m^2 + n' m'^2 - n'' m''^2) / v''}$$

$$s'' = \sqrt{(3 \cdot 4,89^2 + 3 \cdot 3,93^2 + 4 \cdot 31,20^2 + 0 \cdot 10,00^2 - 4 \cdot 31,20^2) / 6}$$

$$s'' = 4,44 \text{ N/mm}^2$$

Aplicamos el método Bayesiano de predicción de la estimación percentil mediante la ecuación (6.11), utilizando la tabla (6.3) para obtener el valor de t''_p para $1-p=0,95$ y $v''=6$.

$$F_{ck, Bayes} = m'' + t''_p s'' \sqrt{1 + 1/n''}$$

$$F_{ck, Bayes} = 31,20 - 1,94 \cdot 4,44 \sqrt{1 + 1/4}$$

$$F_{ck, Bayes} = 21,56 \text{ N/mm}^2$$

Apreciamos, con los resultados obtenidos, que cuando no tenemos la certeza de que la media de la información previa sea precisa, los mejores resultados los tenemos aplicando una variación de la media grande, para darle de esta manera más importancia a la media obtenida de los ensayos realizados y así obtener una resistencia característica más precisa.

8.3.5.- Desviación estándar grande y variación de la desviación estándar pequeña

En este apartado valoraremos la influencia que tiene estimar una desviación estándar más grande que a la obtenida en los ensayos realizados a los testigos, con una variación de dicha desviación estándar pequeña.

Para lo cual utilizaremos la siguiente información previa:

- Media: $m' = 32,87 \text{ N/mm}^2$
- Variación de la media: $V(\mu) = 0,07$
- Desviación estándar: $s' = 10,00 \text{ N/mm}^2$
- Variación de la desviación estándar: $V(\sigma) = 0,10$

La media, la desviación estándar y los grados de libertad de la muestra realizada, ya los tenemos calculamos en el apartado anterior:

- La media $m = 31,20 \text{ N/mm}^2$.
- La desviación estándar $s = 4,89 \text{ N/mm}^2$
- Y los grados de libertad $v = 3$

Evaluamos ahora el tamaño de la muestra desconocida n' y los grados de libertad v' , utilizando la ecuación (6.10):

$$n' = \left[\frac{s'}{m' V(\mu)} \right]^2 = \left[\frac{10,00}{32,87 \cdot 0,07} \right]^2 = 21,12$$

$$n' = 21$$

$$v' = \frac{1}{2 V(\sigma)^2} = \frac{1}{2 \cdot 0,10^2} = 50,00$$

$$v' = 50$$

Los **parámetros de la muestra combinada** se calculan mediante las relaciones siguientes (6.9):

$$n'' = n + n' = 4 + 21$$

$$n'' = 25$$

$$v'' = v + v' - 1 \quad \text{si} \quad n' \geq 1$$

$$v'' = v + v' \quad \text{si} \quad n' = 0$$

$$v'' = v + v' - 1 = 3 + 50 - 1$$

$$v'' = 52$$

$$m'' = (m n + m' n') / n'' = (31,20 \cdot 4 + 32,87 \cdot 21) / 25$$

$$m'' = 32,60 \text{ N/mm}^2$$

$$s''^2 = (v s^2 + v' s'^2 + n m^2 - n'' m''^2) / v''$$

$$s'' = \sqrt{(v s^2 + v' s'^2 + n m^2 + n' m'^2 - n'' m''^2) / v''}$$

$$s'' = \sqrt{(3 \cdot 4,89^2 + 50 \cdot 10,00^2 + 4 \cdot 31,20^2 + 21 \cdot 32,87^2 - 25 \cdot 32,60^2) / 52}$$

$$s'' = 9,89 \text{ N/mm}^2$$

Aplicamos el método Bayesiano de predicción de la estimación percentil mediante la ecuación (6.11), utilizando la tabla (6.3) para obtener el valor de t''_p para $1-p=0,95$ y $v''=52$.

$$F_{ck, Bayes} = m'' + t''_p s'' \sqrt{1 + 1/n''}$$

$$F_{ck, Bayes} = 32,60 - 1,64 \cdot 9,89 \sqrt{1 + 1/25}$$

$$F_{ck, Bayes} = 15,72 \text{ N/mm}^2$$

8.3.6.- Desviación estándar grande y variación de la desviación estándar grande

Comprobaremos ahora que ocurre si estimamos una variación de la desviación estándar grande.

Para esto utilizaremos la siguiente información previa:

- Media: $m' = 32,87 \text{ N/mm}^2$
- Variación de la media: $V(\mu) = 0,07$
- Desviación estándar: $s' = 10,00 \text{ N/mm}^2$
- Variación de la desviación estándar: $V(\sigma) = 0,50$

La media, la desviación estándar y los grados de libertad de la muestra realizada, ya los tenemos calculamos:

- La media $m = 31,20 \text{ N/mm}^2$.
- La desviación estándar $s = 4,89 \text{ N/mm}^2$
- Y los grados de libertad $v = 3$

Evaluamos ahora el tamaño de la muestra desconocida n' y los grados de libertad v' , utilizando la ecuación (6.10):

$$n' = \left[\frac{s'}{m' V(\mu)} \right]^2 = \left[\frac{10,00}{32,87 \cdot 0,07} \right]^2 = 21,12$$

$$n' = 21$$

$$v' = \frac{1}{2 V(\sigma)^2} = \frac{1}{2 \cdot 0,50^2} = 2,00$$

$$v' = 2$$

Los parámetros de la muestra combinada se calculan mediante las relaciones siguientes (6.9):

$$n'' = n + n' = 4 + 21$$

$$n'' = 25$$

$$v'' = v + v' - 1 \quad \text{si} \quad n' \geq 1$$

$$v'' = v + v' - 1 = 3 + 2 - 1$$

$$v'' = v + v' \quad \text{si} \quad n' = 0$$

$$v'' = 4$$

$$m'' = (m n + m' n') / n'' = (31,20 \cdot 4 + 32,87 \cdot 21) / 25$$

$$m'' = 32,60 \text{ N/mm}^2$$

$$s''^2 = (v s^2 + v' s'^2 + n m^2 - n'' m''^2) / v''$$

$$s'' = \sqrt{(v s^2 + v' s'^2 + n m^2 + n' m'^2 - n'' m''^2) / v''}$$

$$s'' = \sqrt{(3 \cdot 4,89^2 + 2 \cdot 10,00^2 + 4 \cdot 31,20^2 + 21 \cdot 32,87^2 - 25 \cdot 32,60^2) / 4}$$

$$s'' = 8,38 \text{ N/mm}^2$$

Aplicamos el método Bayesiano de predicción de la estimación percentil mediante la ecuación (6.11), utilizando la tabla (6.3) para obtener el valor de t''_p para $1-p=0,95$ y $v''=4$.

$$F_{ck, Bayes} = m'' + t''_p s'' \sqrt{1 + 1/n''}$$

$$F_{ck, Bayes} = 32,60 - 2,13 \cdot 8,38 \sqrt{1 + 1/25}$$

$$F_{ck, Bayes} = 14,37 \text{ N/mm}^2$$

Observamos que si estimamos una desviación estándar grande en la información previa, no influye en gran medida el valor de la variación de la desviación estándar, pues

en ambos casos los resultados son muy parejos, obteniendo una resistencia característica del hormigón pequeña, con respecto a la muestra realizada, al calcularla con una desviación estándar grande.

8.3.7.- Desviación estándar pequeña y variación de la desviación estándar pequeña

Comprobaremos ahora que ocurre si estimamos la resistencia con una desviación estándar más pequeña que a la obtenida en los ensayos realizados a los testigos, con una variación de dicha desviación estándar pequeña, para lo cual utilizaremos la siguiente información previa:

- Media: $m' = 32,87 \text{ N/mm}^2$
- Variación de la media: $V(\mu) = 0,07$
- Desviación estándar: $s' = 0,50 \text{ N/mm}^2$
- Variación de la desviación estándar: $V(\sigma) = 0,10$

La media, la desviación estándar y los grados de libertad de la muestra realizada, ya los tenemos calculamos:

- La media $m = 31,20 \text{ N/mm}^2$.
- La desviación estándar $s = 4,89 \text{ N/mm}^2$
- Y los grados de libertad $v = 3$

Evaluamos ahora el tamaño de la muestra desconocida n' y los grados de libertad v' , utilizando la ecuación (6.10):

$$n' = \left[\frac{s'}{m' V(\mu)} \right]^2 = \left[\frac{0,50}{32,87 \cdot 0,07} \right]^2 = 0,05$$

$$n' = 0$$

$$v' = \frac{1}{2 V(\sigma)^2} = \frac{1}{2 \cdot 0,10^2} = 50,00$$

$$v' = 50$$

Los **parámetros de la muestra combinada** se calculan mediante las relaciones siguientes (6.9):

$$n'' = n + n' = 4 + 0$$

$$n'' = 4$$

$$v'' = v + v' - 1 \quad \text{si } n' \geq 1$$

$$v'' = v + v' = 3 + 50$$

$$v'' = v + v' \quad \text{si } n' = 0$$

$$v'' = 53$$

$$m'' = (m n + m' n') / n'' = (31,20 \cdot 4 + 32,87 \cdot 0) / 4$$

$$m'' = 31,20 \text{ N/mm}^2$$

$$s''^2 = (v s^2 + v' s'^2 + n m^2 - n'' m''^2) / v''$$

$$s'' = \sqrt{(v s^2 + v' s'^2 + n m^2 + n' m'^2 - n'' m''^2) / v''}$$

$$s'' = \sqrt{(3 \cdot 4,89^2 + 50 \cdot 0,50^2 + 4 \cdot 31,20^2 + 0 \cdot 32,87^2 - 4 \cdot 31,20^2) / 53}$$

$$s'' = 1,26 \text{ N/mm}^2$$

Aplicamos el método Bayesiano de predicción de la estimación percentil mediante la ecuación (6.11), utilizando la tabla (6.3) para obtener el valor de t''_p para $1-p=0,95$ y $v''=53$.

$$F_{ck, Bayes} = m'' + t''_p s'' \sqrt{1 + 1/n''}$$

$$F_{ck, Bayes} = 31,20 - 1,64 \cdot 1,26 \sqrt{1 + 1/4}$$

$$F_{ck, Bayes} = 28,84 \text{ N/mm}^2$$

8.3.8.- Desviación estándar pequeña y variación de la desviación estándar grande

A continuación estimaremos una variación de la desviación estándar grande. Para esto utilizaremos la siguiente información previa:

- Media: $m' = 32,87 \text{ N/mm}^2$
- Variación de la media: $V(\mu) = 0,07$
- Desviación estándar: $s' = 0,50 \text{ N/mm}^2$
- Variación de la desviación estándar: $V(\sigma) = 0,50$

La media, la desviación estándar y los grados de libertad de la muestra realizada, ya los tenemos calculamos:

- La media $m = 31,20 \text{ N/mm}^2$.
- La desviación estándar $s = 4,89 \text{ N/mm}^2$
- Y los grados de libertad $v = 3$

Evaluamos ahora el tamaño de la muestra desconocida n' y los grados de libertad v' , utilizando la ecuación (6.10):

$$n' = \left[\frac{s'}{m' V(\mu)} \right]^2 = \left[\frac{0,50}{32,87 \cdot 0,07} \right]^2 = 0,05$$

$$n' = 0$$

$$v' = \frac{1}{2 V(\sigma)^2} = \frac{1}{2 \cdot 0,50^2} = 2,00$$

$$v' = 2$$

Los parámetros de la muestra combinada se calculan mediante las relaciones siguientes (6.9):

$$n'' = n + n' = 4 + 0$$

$$n'' = 4$$

$$v'' = v + v' - 1 \quad \text{si} \quad n' \geq 1$$

$$v'' = v + v' \quad \text{si} \quad n' = 0$$

$$v'' = v + v' = 3 + 2$$

$$v'' = 5$$

$$m'' = (m n + m' n') / n'' = (31,20 \cdot 4 + 32,87 \cdot 0) / 4$$

$$m'' = 31,20 \text{ N/mm}^2$$

$$s''^2 = (v s^2 + v' s'^2 + n m^2 - n'' m''^2) / v''$$

$$s'' = \sqrt{(v s^2 + v' s'^2 + n m^2 + n' m'^2 - n'' m''^2) / v''}$$

$$s'' = \sqrt{(3 \cdot 4,89^2 + 2 \cdot 0,50^2 + 4 \cdot 31,20^2 + 0 \cdot 32,87^2 - 4 \cdot 31,20^2) / 5}$$

$$s'' = 3,80 \text{ N/mm}^2$$

Aplicamos el método Bayesiano de predicción de la estimación percentil mediante la ecuación (6.11), utilizando la tabla (6.3) para obtener el valor de t''_p para $1-p=0,95$ y $v''=5$.

$$F_{ck,Bayes} = m'' + t''_p s'' \sqrt{1 + 1/n''}$$

$$F_{ck,Bayes} = 31,20 - 2,02 \cdot 3,80 \sqrt{1 + 1/4}$$

$$F_{ck,Bayes} = 22,63 \text{ N/mm}^2$$

Podemos comprobar por los resultados que cuando estimamos una desviación estándar pequeña en la información previa, si que influye en gran medida el valor de la variación de la desviación estándar, obteniendo una resistencia característica del hormigón más grande cuando la variación de la desviación estándar es pequeña.

9

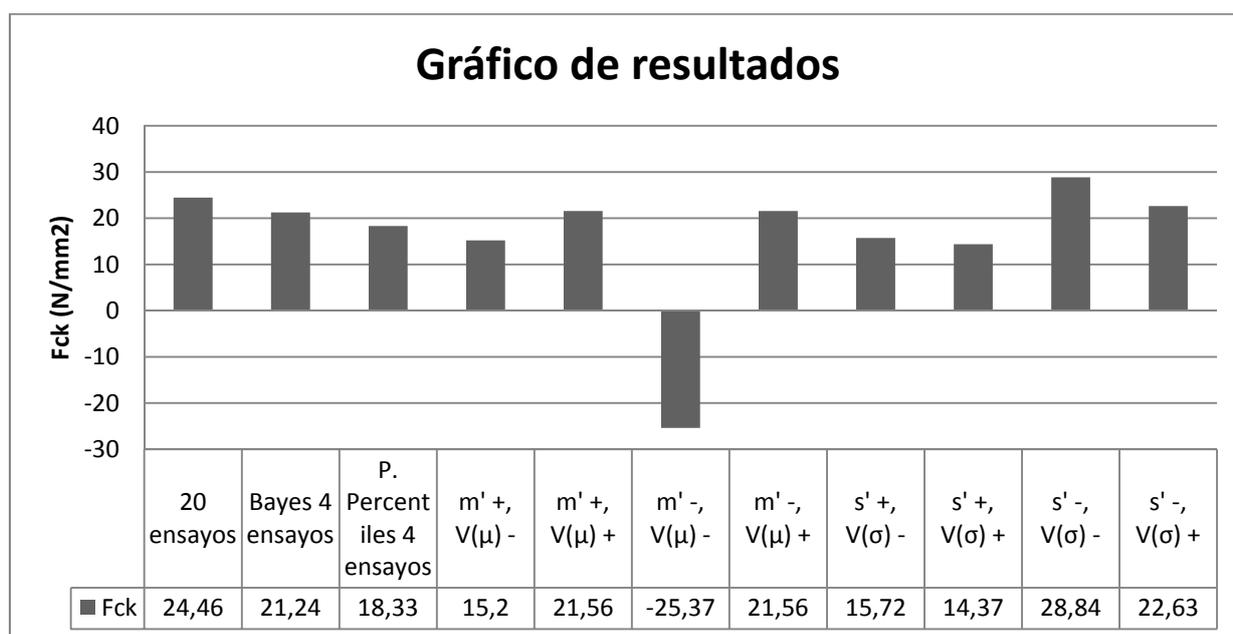
CONCLUSIONES

9.- CONCLUSIONES

Para comentar las conclusiones a las que se ha llegado tras el estudio del presente trabajo, presentamos una tabla resumen de los resultados obtenidos:

Estimación	Información Previa	F_{ck} (N/mm ²)
Realización de 20 ensayos	----	24,46
Método Bayesiano Información previa calculada (4 ensayos)	$m' = 32,87 \text{ N/mm}^2$ $V(\mu) = 0,07$ $s' = 3,93 \text{ N/mm}^2$ $V(\sigma) = 0,42$	21,24
Método Predicción de Percentiles (4 ensayos)	----	18,33
Variación en la información previa Media grande y variación de la media pequeña	$m' = 50,00 \text{ N/mm}^2$ $V(\mu) = 0,07$ $s' = 3,93 \text{ N/mm}^2$ $V(\sigma) = 0,42$	15,20
Variación en la información previa Media grande y variación de la media grande	$m' = 50,00 \text{ N/mm}^2$ $V(\mu) = 0,50$ $s' = 3,93 \text{ N/mm}^2$ $V(\sigma) = 0,42$	21,56
Variación en la información previa Media pequeña y variación de la media pequeña	$m' = 10,00 \text{ N/mm}^2$ $V(\mu) = 0,07$ $s' = 3,93 \text{ N/mm}^2$ $V(\sigma) = 0,42$	-25,37
Variación en la información previa Media pequeña y variación de la media grande	$m' = 10,00 \text{ N/mm}^2$ $V(\mu) = 0,50$ $s' = 3,93 \text{ N/mm}^2$ $V(\sigma) = 0,42$	21,56
Variación en la información previa Desviación estándar grande y variación de la desviación estándar pequeña	$m' = 32,87 \text{ N/mm}^2$ $V(\mu) = 0,07$ $s' = 10,00 \text{ N/mm}^2$ $V(\sigma) = 0,10$	15,72
Variación en la información previa Desviación estándar grande y variación de la desviación estándar grande	$m' = 32,87 \text{ N/mm}^2$ $V(\mu) = 0,07$ $s' = 10,00 \text{ N/mm}^2$ $V(\sigma) = 0,50$	14,37

Variación en la información previa Desviación estándar pequeña y variación de la desviación estándar pequeña	$m' = 32,87 \text{ N/mm}^2$ $V(\mu) = 0,07$ $s' = 0,50 \text{ N/mm}^2$ $V(\sigma) = 0,10$	28,84
Variación en la información previa Desviación estándar pequeña y variación de la desviación estándar grande	$m' = 32,87 \text{ N/mm}^2$ $V(\mu) = 0,07$ $s' = 0,50 \text{ N/mm}^2$ $V(\sigma) = 0,50$	22,63



El caso práctico estudiado se ha realizado con sólo 20 ensayos por lo que, los resultados obtenidos no son muy fiables, pero lo que se ha pretendido con la realización de este trabajo es estudiar un método a seguir en la aplicación de la metodología Bayesiana para la estimación de un percentil, y conseguir de esta manera un mejor resultado de dicha estimación, que en nuestro caso ha sido la resistencia característica del hormigón de una estructura ejecutada, pero podría aplicarse a cualquier otra estimación.

El estudio del método Bayesiano se ha centrado en la información previa, pues es aquí donde hay más subjetividad en la aplicación de dicho método, ya que depende de nuestra experiencia, es por esto que haciendo variaciones en la información previa sabemos cómo influye dicho cambio en el resultado de la estimación.

La obtención de una buena información previa es clave para mejorar la estimación, y si, depende de nuestra experiencia, pero esta experiencia se puede mejorar, que en nuestro caso pasaría por un estudio de información de la resistencia del hormigón realizada a una gran variedad y cantidad de estructuras ejecutadas, obteniendo de esta manera una información previa muy fiable y consecuentemente una buena estimación de la resistencia característica del hormigón.

Como resumen podemos comentar que:

- El Método Bayesiano mejora la estimación del percentil buscado, y mejorar no siempre significa mayor resistencia, significa mayor certeza en el resultado de la estimación realizada.
- Con una variación de la media grande, no se tiene en cuenta, para la estimación, la media de la información previa.
- Si esa variación de la media es pequeña habrá que cerciorarse de que la media de la información previa sea precisa, pues sí que tiene mucha influencia en el resultado estimado.
- Una desviación estándar grande, penaliza bastante el resultado de la estimación, no influyendo en gran medida su variación.
- Si la desviación estándar es pequeña mejora el resultado de la estimación pero habrá que tener cuidado con la variación de dicha estimación pues tiene importancia en el resultado obtenido.

Como conclusión final podemos decir que la Metodología Bayesiana es un buen método para la estimación de percentiles, prestando especial cuidado en la información previa utilizada, la estimación puede ser mucho más precisa que sin tener en cuenta dicha información previa.

Es precisamente esta información previa el punto débil de esta metodología, por donde suelen atacar este método quienes están en contra, ya que esta información previa es muy subjetiva al depender de nuestra experiencia, pero no tendría que ser así pues esta información puede ser estudiada y tabulada para la utilización de todos los técnicos. Esto sería una muy buena línea de estudio para un posterior trabajo.

Por todo lo expresado se considera que el Método Bayesiano tendría que ser el método considerado por el Código Técnico de la Edificación para la estimación de percentiles, y en especial para la resistencia característica del hormigón en estructuras ejecutadas.

10

BIBLIOGRAFÍA

10.- BIBLIOGRAFÍA

MOSQUERA REY, E. *Probabilismo explícito en la corrosión de armaduras en las estructuras de hormigón sometidas al ambiente marino de la costa gallega.* (Tesis doctoral). A Coruña: Universidad da Coruña. 2011.

MOSQUERA REY, E. PRESEDO QUINDIMIL, M. *Principios de la Ingeniería del Riesgo y Fiabilidad Estructural.* (4503014) Máster Universitario en Tecnologías de la Edificación Sostenible, (UDC). 2013.

MOSQUERA REY, E. PRESEDO QUINDIMIL, M. *Métodos de Cálculo Estructural y Metodología Probabilista.* (4503015) Máster Universitario en Tecnologías de la Edificación Sostenible, (UDC). 2013.

MOSQUERA REY, E. *Revisión de la validez del coeficiente de seguridad, propuesto por EHE-08, para la estimación de la vida útil de cálculo en estructuras de edificación sometidas a la acción de cloruros.* 2015. Informes de la Construcción, 67(538): e082, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.13.27>.

MOSQUERA REY, E. *Los métodos de cálculo y las variables básicas..... Una historia inacabada.* Conferencia (2012-11-03): III Proyecto estructural con aplicaciones Cype. ETSA (UDC). 2012.

FERNÁNDEZ PÉREZ, DAVID. *Análisis de pilares de hormigón en edificación mediante metodología probabilista.* Trabajo fin de grado. Director: Dr. Emilio Mosquera Rey. Universidade da Coruña. Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica. Departamento de Tecnología de la Construcción. Junio 2014.

CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN (CTE). *Documento Básico SE. Seguridad estructural.* Abril 2009.

MINISTERIO DE FOMENTO. *EHE-08. Instrucción de Hormigón Estructural.* Centro de Publicaciones. Secretaría General Técnica. Ministerio de Fomento. 4ª Edición 2010. NIPO: 161-10-105-6

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 2394:1988. General principles on reliability for structures.* 1988.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 12491:1997. Statistical methods for quality control of building materials and components.* First edition: 1997-05-01.

BRITISH STANDARD. *BS EN 1990:2002. Eurocode - Basis of structural design.* 2002. ICS 91.010.30.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZACION. *ISO 13822:2010. Bases for design of structures - Assessment of existing structures.* Second edition: 2010-08-01.

IMPLEMENTATION OF EUROCODES - RELIABILITY BACKGROUNDS. *Guide to the basis of structural reliability and risk engineering related to Eurocodes, supplemented by practical examples.* 2005. Leonardo Da Vinci Pilot Project CZ/02/B/F/PP-134007.

SOLANA ORTEGA, ALBERTO. SOLANA, VICENTE. *Inferencia plausible y fiabilidad estructural lógica.* Instituto de Física Fundamental, CSIC, Serrano 123, Madrid 28006.

GÓMEZ LERA, M^a DEL SAGRARIO. ALARCÓN ALVAREZ, ENRIQUE. *Introducción a la fiabilidad estructural y algunas aplicaciones.* Instituto de ciencias de la construcción Eduardo Torroja. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Departamento de Mecánica Estructural y Construcciones Industriales. Madrid, abril 1992.

TANNER, PETER. LARA SARACHE, CARLOS. *Simplones y conservadores. Modelos semiprobabilistas para la evaluación de estructuras existentes de hormigón.* III Congreso de ache de puentes y estructuras. Las estructuras del siglo XXI. Sostenibilidad, innovación y retos del futuro.

REVUELTA CRESPO, D., GUTIÉRREZ JIMÉNEZ, J.P. *Estimación de la resistencia a compresión del hormigón mediante el muestreo, extracción y rotura de probetas testigo.* Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc). Consejo Superior de Investigaciones. Científicas (CSIC). Madrid.

11

INFOGRAFÍAS

11.- INFOGRAFÍAS

IMÁGENES

Imagen 3.1. *Reparación de las estructuras de hormigón*. Fuente: <http://www.interempresas.net/Construccion/Articulos/37070-Estructuras-de-hormigon.html>. Pág.: 37.

Imagen 3.2. *Refuerzo estructural con bandas de fibra de carbono*. Fuente: <http://www.arqhys.com/arquitectura/ejecucion-refuerzo-estructural.html>. Pág.: 39.

Imagen 3.3. *Fisuración del hormigón (en “mapa” o en “piel de cocodrilo”)*. Fuente: <http://www.hormigonelaborado.com/default.asp?IDSEC=62&IDCONTPRI=621>. Pág.: 40.

Imagen 3.4. *Corrosión de las armaduras*. Fuente: <http://sirve.cl/en/archivos/proyectos/repair-consultancy-for-central-coliseum-national-stadium/2-corrosion-armaduras-en-vigas-2>. Pág.: 40.

Imagen 6.1. *Thomas Bayes (Londres, Inglaterra, 1702 - Tunbridge Wells, 1761)*. Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Thomas_Bayes. Pág.: 77.

FIGURAS

Figura 2.1. *Diagrama esquemático que ilustra el enfoque determinista de seguridad estructural*. Fuente: Guía práctica para la evaluación de la fiabilidad estructural. Pág.: 27.

Figura 2.2. *Ilustración de la demanda característica (D_k) y la capacidad característica (C_k) que se utilizan en el enfoque de los coeficientes parciales de seguridad*. Fuente: Guía práctica para la evaluación de la fiabilidad estructural. Pág.: 27.

Figura 2.3. *Función de densidad de la función G*. Fuente: Guide to the basis of structural reliability and risk engineering related to Eurocodes, supplemented by practical examples. Pág.: 32.

Figura 2.4. *Función de estado límite lineal*. Fuente: Guide to the basis of structural reliability and risk engineering related to Eurocodes, supplemented by practical examples. Pág.: 32.

Figura 4.1. *Diagrama de flujo para la evaluación general de las estructuras existentes*. Fuente: ISO 13822:2010. Bases for design of structures - Assessment of existing structures. Pág.: 47.

Figura 5.1. *Función de densidad de probabilidad original y actualizada para una inspección de la variable X.* Fuente: ISO 13822:2010. Bases for design of structures - Assessment of existing structures. Pág.: 68.

Figura 5.2. *Ilustración de una situación cuando las características de resistencia varían lentamente con el tiempo.* Fuente: ISO 2394:1998. General principles on reliability of structures. Pág.: 72.

Figura 5.3. *Representación esquemática del proceso de carga y la degradación de la resistencia.* Fuente: ISO 2394:1998. General principles on reliability of structures. Pág.: 74.

Figura 5.4. *Ilustración de una situación cuando las características de resistencia varían rápidamente con el tiempo.* Fuente: ISO 2394:1998. General principles on reliability of structures. Pág.: 74.

Figura 6.1. *Definición del percentil para una variable aleatoria estandarizada U.* Fuente: Implementation of Eurocodes - Reliability backgrounds. Pág.: 80.

Figura 6.2. *Percentil inferior y superior up de una variable aleatoria estandarizada U con una distribución normal.* Fuente: Implementation of Eurocodes - Reliability backgrounds. Pág.: 81.

TABLAS

Tabla 2.1. *Riesgos asumidos socialmente según actividades humanas.* Fuente: Gómez, M. S. y Alarcón, E.; 1992. Pág.: 19.

Tabla 2.2 y tabla 5.1. *Relación entre la Probabilidad de fallo y el índice de fiabilidad.* Fuente: ISO 2394:1998. General principles on reliability of structures. Pág.: 31 y 69.

Tabla 5.2. *Niveles de fiabilidad de destino.* Fuente: ISO 2394:1998. General principles on reliability of structures. Pág.: 70.

Tabla 5.3. *Valores estandarizados de α (norma ISO 2394).* Fuente: ISO 2394:1998. General principles on reliability of structures. Pág.: 70.

Tabla 6.1. *Valores del percentil inferior de up de una variable aleatoria estandarizada U con una distribución normal.* Fuente: Implementation of Eurocodes - Reliability backgrounds. Pág.: 82.

Tabla 6.2. *Valores del percentil up de una variable aleatoria estandarizada U con distribución lognormal.* Fuente: Implementation of Eurocodes - Reliability backgrounds. Pág.: 82.

Tabla 6.3. *Coeficiente - t^p de una t-distribución normal ($\omega=0$) con v^o grados de libertad.* Fuente: Implementation of Eurocodes - Reliability backgrounds. Pág.: 84.

Tabla 6.4. *Coeficiente - t^p de una t-distribución lognormal para $p=0,05$, con asimetría ω y v^o grados de libertad.* Fuente: Implementation of Eurocodes - Reliability backgrounds. Pág.: 85.

Tabla 7.1. *Resultados de las resistencias del hormigón de los ensayos a compresión.* Fuente: Estudio de Mosquera Rey, Emilio. Pág.: 91.

Nota: Las demás tablas y gráficas incluidas en este trabajo son de fuente propia para una ayuda a la interpretación y análisis de resultados.