Documento Básico SE

Seguridad estructural

SE 1 Resistencia y estabilidad
SE 2 Aptitud al servicio

Abril 2009

Introducción

I Objeto

Este Documento Básico (DB) tiene por objeto establecer reglas y procedimientos que permitan cumplir las exigencias básicas de seguridad estructural. La correcta aplicación del conjunto del DB supone que se satisface el requisito básico "Seguridad estructural".

Tanto el objetivo del requisito básico "Seguridad estructural", como las exigencias básicas se establecen en el artículo 10 de la Parte I de este CTE y son los siguientes:

Artículo 10. Exigencias básicas de seguridad estructural (SE)

1. El objetivo del requisito básico "Seguridad estructural" consiste en asegurar que el *edificio* tiene un *comportamiento estructural adecuado* frente a las *acciones e influencias previsibles* a las que pueda estar sometido durante su *construcción* y *uso previsto*.
2. Para satisfacer este objetivo, los *edificios* se proyectarán, fabricarán, construirán y mantendrán de forma que cumplan con una fiabilidad adecuada las exigencias básicas que se establecen en los apartados siguientes.
3. Los Documentos Básicos "DB-SE Seguridad Estructural", "DB-SE-AE Acciones en la Edificación", "DB-SE-C Cimientos", "DB-SE-A Acero", "DB-SE-F Fábrica" y "DB-SE-M Madera", especifican parámetros objetivos y procedimientos cuyo cumplimiento asegura la satisfacción de las exigencias básicas y la superación de los niveles mínimos de calidad propios del requisito básico de seguridad estructural.

10.1. Exigencia básica SE 1: Resistencia y estabilidad

La resistencia y la estabilidad serán las adecuadas para que no se generen *riesgos* indebidos, de forma que se mantenga la resistencia y la estabilidad frente a las *acciones e influencias previsibles* durante las fases de *construcción* y *usos previstos* de los *edificios*, y que un evento extraordinario no produzca consecuencias desproporcionadas respecto a la causa original y se facilite el *mantenimiento previsto.*

10.2. Exigencia básica SE 2: Aptitud al servicio

La aptitud al servicio será conforme con el *uso previsto* del *edificio*, de forma que no se produzcan *deformaciones inadmisibles*, se limite a un nivel aceptable la probabilidad de un *comportamiento dinámico inadmisible* y no se produzcan *degradaciones* o anomalías *inadmisibles*.

II Ámbito de aplicación

El ámbito de aplicación de este DB es el que se establece con carácter general para el conjunto del CTE en su artículo 2 (Parte I).

III Criterios generales de aplicación

Pueden utilizarse otras soluciones diferentes a las contenidas en este DB, en cuyo caso deberá seguirse el procedimiento establecido en el artículo 5 de la parte I de este CTE y deberá documentarse en el proyecto el cumplimiento de las exigencias básicas.

Cuando se cita una disposición reglamentaria en este DB debe entenderse que se hace referencia a la versión vigente en el momento que se aplica el mismo. Cuando se cita una norma UNE, UNE-EN o UNE-EN ISO debe entenderse que se hace referencia a la versión que se indica, aun cuando exista una versión posterior, excepto cuando se trate de normas UNE correspondientes a normas EN o EN ISO cuya referencia haya sido publicada en el Diario Oficial de la Unión Europea en el marco de la aplicación de la Directiva 89/106/CEE sobre productos de construcción, en cuyo caso la cita debe relacionarse con la versión de dicha referencia.

IV Condiciones particulares para el cumplimiento del DB-SE

La aplicación de los procedimientos de este DB se llevará a cabo de acuerdo con las condiciones particulares que en el mismo se establecen y con las condiciones generales para el cumplimiento del CTE, las condiciones del proyecto, las condiciones en la ejecución de las obras y las condiciones del edificio que figuran en los artículos 5, 6, 7 y 8 respectivamente de la parte I del CTE.

V Terminología

Los términos que figuran en letra cursiva y, a efectos de aplicación de este CTE, deben utilizarse conforme al significado y a las condiciones que se establece para cada uno de ellos. Las definiciones figuran en letra capital, no son exclusivas de este CTE y se incluyen en el mismo con el fin de aportar una mayor comodidad en su lectura y aplicación.

Otros términos y definiciones generales utilizados en el conjunto del CTE pueden consultarse en el Anejo III de la Parte I.

Índice

1 Generalidades

1.1 Ámbito de aplicación y consideraciones previas
1.2 Prescripciones aplicables conjuntamente con DB-SE

2 Documentación

2.1 Documentación del proyecto
2.2 Documentación final de la obra
2.3 Instrucciones de uso y plan de mantenimiento

3 Análisis estructural y dimensionado

3.1 Generalidades
3.2 Estados límite
3.3 Variables básicas
3.4 Modelos para el análisis estructural
3.5 Verificaciones

4 Verificaciones basadas en coeficientes parciales

4.1 Generalidades
4.2 Capacidad portante
4.3 Aptitud al servicio
4.4 Efectos del tiempo

5 Verificaciones basadas en métodos experimentales

5.1 Generalidades
5.2 Planteamiento experimental
5.3 Evaluación de los resultados

Anejo A Terminología

Anejo B Notaciones

B.1 Notaciones

Anejo C Principios de los métodos probabilistas explícito e implícito

C.1 Objetivos y campo de aplicación
C.2 Incertidumbres asociadas con las variables básicas
C.3 Criterios para el fallo estructural
C.4 Niveles de fiabilidad
C.5 Determinación de probabilidades de fallo
C.6 Métodos basados en la determinación de los valores de cálculo
C.7 El formato de los coeficientes parciales

Anejo D Evaluación estructural de edificios existentes

D.1 Generalidades
D.2 Criterios básicos para la evaluación
D.3 Recopilación de información
D.4 Análisis estructural
D.5 Verificación
D.6 Evaluación cualitativa

D.7 Resultados de la evaluación
D.8 Medidas

1 Generalidades

1.1 Ámbito de aplicación y consideraciones previas

1 Este DB establece los principios y los requisitos relativos a la resistencia mecánica y la estabilidad del edificio, así como la aptitud al servicio, incluyendo su durabilidad. Describe las bases y los principios para el cálculo de las mismas. La ejecución, la utilización, la inspección y el mantenimiento se tratan en la medida en la que afectan a la elaboración del proyecto.

2 Los preceptos del DB-SE son aplicables a todos los tipos de edificios, incluso a los de carácter provisional.

3 Se denomina capacidad portante a la aptitud de un edificio para asegurar, con la fiabilidad requerida, la estabilidad del conjunto y la resistencia necesaria, durante un tiempo determinado, denominado periodo de servicio. La aptitud de asegurar el funcionamiento de la obra, el confort de los usuarios y de mantener el aspecto visual, se denomina aptitud al servicio.

4 A falta de indicaciones específicas, como periodo de servicio se adoptará 50 años

1.2 Prescripciones aplicables conjuntamente con DB-SE

1 El DB-SE constituye la base para los Documentos Básicos siguientes y se utilizará conjuntamente con ellos:

- DB-SE-AE Acciones en la edificación
- DB-SE-C Cimientos
- DB-SE-A Acero
- DB-SE-F Fábrica
- DB-SE-M Madera
- DB-SI Seguridad en caso de incendio

2 Deberán tenerse en cuenta, además, las especificaciones de la normativa siguiente:

- NCSE Norma de construcción sismorresistente: parte general y edificación
- EHE Instrucción de hormigón estructural
- EFHE Instrucción para el proyecto y la ejecución de forjados unidireccionales de hormigón estructural realizados con elementos prefabricados

2 Documentación

2.1 Documentación del proyecto

1 En relación con la seguridad estructural, el contenido del proyecto de edificación será el descrito en el Anejo I del CTE e incluirá la información que se indica en los siguientes apartados. Esta documentación se completará con la específica que se detalle, en su caso, en cada uno de los restantes DB relativos a la seguridad estructural que se utilicen conjuntamente con éste.

2 Cuando el director de obra autorice modificaciones a lo proyectado, lo hará constar expresamente en el Libro de Órdenes, sin perjuicio de aportar documentos gráficos anejos a la orden, que en su día se añadirán, como proceda, por adenda o sustitución, a la documentación final de obra realizada. Para evitar confusiones, se indicará claramente en los documentos del proyecto original que resulten afectados por el cambio, que se deben entender sustituidos por los aportados, y en éstos, los del proyecto que quedan anulados.

2.1.1 Memoria

1 En la memoria del proyecto se incluirá el programa de necesidades, en el que se describirán aquellas características del edificio y del uso previsto que condicionan las exigencias de seguridad estructural, tanto en lo relativo a la capacidad portante como a la aptitud al servicio; las bases de cálculo y la declaración de cumplimiento de los DB o justificación documental del cumplimiento de las exigencias básicas de seguridad, si se adoptan soluciones alternativas que se aparten total o parcialmente de los DB.

2 En las bases de cálculo y en su caso, en el anejo de cálculo se incluirán los siguientes datos:

a) el periodo de servicio previsto, si difiere de 50 años;

b) las simplificaciones efectuadas sobre el edificio para transformarlo en uno o varios modelos de cálculo, que se describirán detalladamente, indicando el tipo estructural adoptado para el conjunto y sus partes, las características de las secciones, tipo de conexiones y condiciones de sustentación;

c) las características mecánicas consideradas para los materiales estructurales y para el terreno que lo sustenta, o en su caso actúa sobre el edificio;

d) la geometría global (especificando las dimensiones a ejes de referencia) y cualquier elemento que pueda afectar al comportamiento o a la durabilidad de la estructura;

e) las exigencias relativas a la capacidad portante y a la aptitud al servicio, incluida la durabilidad, si difieren de las establecidas en este documento;

f) las acciones consideradas, las combinaciones efectuadas y los coeficientes de seguridad utilizados;

g) de cada tipo de elemento estructural, la modalidad de análisis efectuado y los métodos de cálculo empleados; y

h) en su caso, la modalidad de control de calidad previsto.

Si el proyecto se desarrolla en dos fases (proyecto básico y proyecto de ejecución), en el proyecto básico se incluirá, al menos, la información indicada en los puntos a) y d), así como las acciones de aplicación al caso, los materiales previstos y los coeficientes de seguridad aplicables.

3 Los cálculos realizados con ordenador se completarán identificando los programas informáticos utilizados en cada una de las partes que han dado lugar a un tratamiento diferenciado, indicando el objeto y el campo de aplicación del programa y explicando con precisión, la representación de los datos introducidos y el tipo de los resultados generados por el programa.

2.1.2 Planos

1 Los planos del proyecto correspondientes a la estructura deben ser suficientemente precisos para la exacta realización de la obra, a cuyos efectos se podrán deducir también de ellos los planos auxiliares de obra o de taller, en su caso, y las mediciones que han servido de base para las valoraciones pertinentes.

2 Los planos contendrán los detalles necesarios para que el constructor, bajo las instrucciones del director de obra, pueda ejecutar la construcción, y en particular, los detalles de uniones y nudos en-

tre elementos estructurales y entre éstos y el resto de los de la obra, las características de los materiales, la modalidad de control de calidad previsto, si procede, y los coeficientes de seguridad adoptados en el cálculo.

3 Si el proyecto se desarrolla en dos fases (proyecto básico y proyecto de ejecución), los planos del proyecto básico deben ser lo suficientemente precisos para la definición del tipo estructural previsto y el establecimiento de las reservas geométricas para la realización de la estructura.

2.1.3 Pliego de condiciones

1 En el pliego de condiciones del proyecto se incluirán las prescripciones técnicas particulares exigibles a los productos, equipos y sistemas y a la ejecución de cada unidad de obra.

2 Incluirá las condiciones en la ejecución de las obras definiendo, en su caso, la modalidad de control de calidad, el control de recepción en obra de productos, equipos y sistemas, el control de ejecución de la obra y el control de la obra terminada, estableciendo la documentación exigible, los distintivos de calidad o evaluaciones técnicas de la idoneidad admitidos para su aceptación y, en su caso, los ensayos a realizar, los criterios de aceptación y rechazo, y las acciones a adoptar en cada caso. Asimismo, se establecerá el plazo de garantía de cada componente.

3 Si para una misma obra se prevén distintos tipos de un mismo producto, se detallarán separadamente cada uno de ellos, indicándose las zonas en que habrán de ser empleados.

4 En el pliego se exigirá, cuando sea oportuno o cuando esté reglamentado, la colocación en el lugar de la obra que especifique, de una placa con el valor máximo de la sobrecarga admisible para el uso de esa zona del edificio.

2.2 Documentación final de la obra

1 La documentación final de obra incluirá los planos completos de todos los elementos y partes de la obra, que reflejen con precisión la obra realmente construida, así como la documentación acreditativa de que es conforme con el CTE.

2 Asimismo, incluirá la documentación acreditativa de que se han cumplido las especificaciones de control de calidad especificadas en el proyecto, en las instrucciones de la dirección facultativa y en el CTE.

2.3 Instrucciones de uso y plan de mantenimiento

1 En las instrucciones de uso se recogerá toda la información necesaria para que el uso del edificio sea conforme a las hipótesis adoptadas en las bases de cálculo.

2 De toda la información acumulada sobre una obra, las instrucciones de uso incluirán aquellas que resulten de interés para la propiedad y para los usuarios, que como mínimo será:

a) las acciones permanentes;

b) las sobrecargas de uso;

c) las deformaciones admitidas, incluidas las del terreno, en su caso;

d) las condiciones particulares de utilización, como el respeto a las señales de limitación de sobrecarga, o el mantenimiento de las marcas o bolardos que definen zonas con requisitos especiales al respecto;

e) en su caso, las medidas adoptadas para reducir los riesgos de tipo estructural.

3 El plan de mantenimiento, en lo correspondiente a los elementos estructurales, se establecerá en concordancia con las bases de cálculo y con cualquier información adquirida durante la ejecución de la obra que pudiera ser de interés, e identificará:

a) el tipo de los trabajos de mantenimiento a llevar a cabo;

b) lista de los puntos que requieran un mantenimiento particular;

c) el alcance, la realización y la periodicidad de los trabajos de conservación;

d) un programa de revisiones.

3 Análisis estructural y dimensionado

3.1 Generalidades

1 La comprobación estructural de un edificio requiere:

a) determinar las situaciones de dimensionado que resulten determinantes;

b) establecer las acciones que deben tenerse en cuenta y los modelos adecuados para la estructura;

c) realizar el análisis estructural, adoptando métodos de cálculo adecuados a cada problema;

d) verificar que, para las situaciones de dimensionado correspondientes, no se sobrepasan los estados límite.

2 En las verificaciones se tendrán en cuenta los efectos del paso del tiempo (acciones químicas, físicas y biológicas; acciones variables repetidas) que pueden incidir en la capacidad portante o en la aptitud al servicio, en concordancia con el periodo de servicio.

3 Las situaciones de dimensionado deben englobar todas las condiciones y circunstancias previsibles durante la ejecución y la utilización de la obra, teniendo en cuenta la diferente probabilidad de cada una. Para cada situación de dimensionado, se determinarán las combinaciones de acciones que deban considerarse.

4 Las situaciones de dimensionado se clasifican en :

a) persistentes, que se refieren a las condiciones normales de uso;

b) transitorias, que se refieren a unas condiciones aplicables durante un tiempo limitado (no se incluyen las acciones accidentales);

c) extraordinarias, que se refieren a unas condiciones excepcionales en las que se puede encontrar, o a las que puede estar expuesto el edificio (acciones accidentales).

3.2 Estados límite

1 Se denominan estados límite aquellas situaciones para las que, de ser superadas, puede considerarse que el edificio no cumple alguna de los requisitos estructurales para las que ha sido concebido.

3.2.1 Estados límite últimos

1 Los estados límite últimos son los que, de ser superados, constituyen un riesgo para las personas, ya sea porque producen una puesta fuera de servicio del edificio o el colapso total o parcial del mismo.

2 Como estados límite últimos deben considerarse los debidos a:

a) pérdida del equilibrio del edificio, o de una parte estructuralmente independiente, considerado como un cuerpo rígido;

b) fallo por deformación excesiva, transformación de la estructura o de parte de ella en un mecanismo, rotura de sus elementos estructurales (incluidos los apoyos y la cimentación) o de sus uniones, o inestabilidad de elementos estructurales incluyendo los originados por efectos dependientes del tiempo (corrosión, fatiga).

3.2.2 Estados límite de servicio

1 Los estados límite de servicio son los que, de ser superados, afectan al confort y al bienestar de los usuarios o de terceras personas, al correcto funcionamiento de del edificio o a la apariencia de la construcción.

2 Los estados límite de servicio pueden ser reversibles e irreversibles. La reversibilidad se refiere a las consecuencias que excedan los límites especificados como admisibles, una vez desaparecidas las acciones que las han producido.

3 Como estados límite de servicio deben considerarse los relativos a:

a) las deformaciones (flechas, asientos o desplomes) que afecten a la apariencia de la obra, al confort de los usuarios, o al funcionamiento de equipos e instalaciones;

b) las vibraciones que causen una falta de confort de las personas, o que afecten a la funcionalidad de la obra;

c) los daños o el deterioro que pueden afectar desfavorablemente a la apariencia, a la durabilidad o a la funcionalidad de la obra.

3.3 Variables básicas

3.3.1 Generalidades

1 El análisis estructural se realiza mediante modelos en los que intervienen las denominadas variables básicas, que representan cantidades físicas que caracterizan las acciones, influencias ambientales, propiedades de materiales y del terreno, datos geométricos, etc. Si la incertidumbre asociada con una variable básica es importante, se considerará como variable aleatoria.

2 Cuando se realice una verificación mediante métodos de análisis de la fiabilidad según el Anejo C puede emplearse directamente la representación probabilista de las variables.

3.3.2 Acciones

3.3.2.1 Clasificación de las acciones

1 Las acciones a considerar en el cálculo se clasifican por su variación en el tiempo en:

a) acciones permanentes (G): Son aquellas que actúan en todo instante sobre el edificio con posición constante. Su magnitud puede ser constante (como el peso propio de los elementos constructivos o las acciones y empujes del terreno) o no (como las acciones reológicas o el pretensado), pero con variación despreciable o tendiendo monótonamente hasta un valor límite.

b) acciones variables (Q): Son aquellas que pueden actuar o no sobre el edificio, como las debidas al uso o las acciones climáticas.

c) acciones accidentales (A): Son aquellas cuya probabilidad de ocurrencia es pequeña pero de gran importancia, como sismo, incendio, impacto o explosión.

Las deformaciones impuestas (asientos, retracción, etc.) se considerarán como acciones permanentes o variables, atendiendo a su variabilidad.

2 Las acciones también se clasifican por:

a) su naturaleza: en directas o indirectas;

b) su variación espacial: en fijas o libres;

c) la respuesta estructural: en estáticas o dinámicas.

3 La magnitud de la acción se describe por diversos valores representativos, dependiendo de las demás acciones que se deban considerar simultáneas con ella, tales como valor característico, de combinación, frecuente y casi permanente.

3.3.2.2 Valor característico

1 El valor característico de una acción, F_k, se define, según el caso, por su valor medio, por un fractil superior o inferior, o por un valor nominal.

2 Como valor característico de las acciones permanentes, G_k, se adopta, normalmente, su valor medio. En los casos en los que la variabilidad de una acción permanente pueda ser importante (con un coeficiente de variación superior entre 0,05 y 0,1, dependiendo de las características de la estructura), o cuando la respuesta estructural sea muy sensible a la variación de de la misma, se considerarán dos valores característicos: un valor característico superior, correspondiente al fractil del 95% y un valor característico inferior, correspondiente al fractil 5%, suponiendo una distribución estadística normal.

3 Para la acción permanente debida al pretensado, P, se podrá definir, en cada instante t, un valor característico superior, $P_{k,sup}(t)$, y un valor característico inferior, $P_{k,inf}(t)$. En algunos casos, el pretensado también se podrá representar por su valor medio, $P_m(t)$.

4 Como valor característico de las acciones variables, Q_k, se adopta, normalmente, alguno de los siguientes valores:

a) un valor superior o inferior con una determinada probabilidad de no ser superado en un periodo de referencia específico;

b) un valor nominal, en los casos en los que se desconozca la correspondiente distribución estadística.

5 En el caso de las acciones climáticas, los valores característicos están basados en una probabilidad anual de ser superado de 0,02, lo que corresponde a un periodo de retorno de 50 años.

6 Las acciones accidentales se representan por un valor nominal. Este valor nominal se asimila, normalmente, al valor de cálculo.

3.3.2.3 Otros valores representativos

1 El valor de combinación de una acción variable representa su intensidad en caso de que, en un determinado periodo de referencia, actúe simultáneamente con otra acción variable, estadísticamente independiente, cuya intensidad sea extrema. En este DB se representa como el valor característico multiplicado por un coeficiente ψ_0.

2 El valor frecuente de una acción variable se determina de manera que sea superado durante el 1% del tiempo de referencia. En este DB se representa como el valor característico multiplicado por un coeficiente ψ_1.

3 El valor casi permanente de una acción variable se determina de manera que sea superado durante el 50% del tiempo de referencia. En este DB se representa como el valor característico multiplicado por un coeficiente ψ_2.

3.3.2.4 Acciones dinámicas

1 Las acciones dinámicas producidas por el viento, un choque o un sismo, se representan a través de fuerzas estáticas equivalentes. Según el caso, los efectos de la aceleración dinámica estarán incluidos implícitamente en los valores característicos de la acción correspondiente, o se introducirán mediante un coeficiente dinámico.

3.3.3 Datos geométricos

1 Los datos geométricos se representan por sus valores característicos, para los cuales en el proyecto se adoptarán los valores nominales deducidos de los planos. En el caso de que se conozca su distribución estadística con suficiente precisión, los datos geométricos podrán representarse por un determinado fractil de dicha distribución.

2 Si las desviaciones en el valor de una dimensión geométrica pueden tener influencia significativa en la fiabilidad estructural, como valor de cálculo debe tomarse el nominal más la desviación prevista.

3.3.4 Materiales

1 Las propiedades de la resistencia de los materiales o de los productos se representan por sus valores característicos.

2 En el caso de que la verificación de algún estado límite resulte sensible a la variabilidad de alguna de las propiedades de un material, se considerarán dos valores característicos, superior e inferior, de esa propiedad, definidos por el fractil 95% o el 5% según que el efecto sea globalmente desfavorable o favorable.

3 Los valores de las propiedades de los materiales o de los productos podrán determinarse experimentalmente a través de ensayos. Cuando sea necesario, se aplicará un factor de conversión con el fin de extrapolar los valores experimentales en valores que representen el comportamiento del material o del producto en la estructura o en el terreno.

4 Las propiedades relativas a la rigidez estructural, se representan por su valor medio. No obstante, dependiendo de la sensibilidad del comportamiento estructural frente a la variabilidad de estas características, será necesario emplear valores superiores o inferiores al valor medio (por ejemplo en el análisis de problemas de inestabilidad). En cualquier caso, se tendrá en cuenta la dependencia de estas propiedades respecto de la duración de la aplicación de las acciones.

5 A falta de prescripciones en otro sentido, las características relativas a la dilatación térmica se representan por su valor medio.

3.4 Modelos para el análisis estructural

1 El análisis estructural se basará en modelos adecuados del edificio que proporcionen una previsión suficientemente precisa de dicho comportamiento, y que permitan tener en cuenta todas las variables significativas y que reflejen adecuadamente los estados límite a considerar.

2 Se podrán establecer varios modelos estructurales, bien complementarios, para representar las diversas partes del edificio, o alternativos, para representar más acertadamente distintos comportamientos o efectos.

3 Se usarán modelos específicos en las zonas singulares de una estructura en las que no sean aplicables las hipótesis clásicas de la teoría de la resistencia de materiales.

4 Las condiciones de borde o sustentación aplicadas a los modelos deberán estar en concordancia con las proyectadas.

5 Se tendrán en cuenta los efectos de los desplazamientos y de las deformaciones en caso de que puedan producir un incremento significativo de los efectos de las acciones.

6 El modelo para la determinación de los efectos de las acciones dinámicas tendrá en cuenta todos los elementos significativos con sus propiedades (masa, rigidez, amortiguamiento, resistencia, etc).

7 El modelo tendrá en cuenta la cimentación y la contribución del terreno en el caso de que la interacción entre terreno y estructura sea significativa.

8 El análisis estructural se puede llevar a cabo exclusivamente mediante modelos teóricos o mediante modelos teóricos complementados con ensayos.

3.5 Verificaciones

1 Para cada verificación, se identificará la disposición de las acciones simultáneas que deban tenerse en cuenta, como deformaciones previas o impuestas, o imperfecciones. Asimismo, deberán considerase las desviaciones probables en las disposiciones o en las direcciones de las acciones.

2 En el marco del método de los estados límite, el cumplimiento de las exigencias estructurales se comprobará utilizando el formato de los coeficientes parciales (véase apartado 4). Alternativamente, las comprobaciones se podrán basar en una aplicación directa de los métodos de análisis de fiabilidad (véase Anejo C).

4 Verificaciones basadas en coeficientes parciales

4.1 Generalidades

1 En la verificación de los estados límite mediante coeficientes parciales, para la determinación del efecto de las acciones, así como de la respuesta estructural, se utilizan los valores de cálculo de las variables, obtenidos a partir de sus valores característicos, u otros valores representativos, multiplicándolos o dividiéndolos por los correspondientes coeficientes parciales para las acciones y la resistencia, respectivamente.

2 Los valores de cálculo no tienen en cuenta la influencia de errores humanos groseros. Estos deben evitarse mediante una dirección de obra, utilización, inspección y mantenimiento adecuados.

4.2 Capacidad portante

4.2.1 Verificaciones

1 Se considera que hay suficiente estabilidad del conjunto del edificio o de una parte independiente del mismo, si para todas las situaciones de dimensionado pertinentes, se cumple la siguiente condición.

$$E_{d,dst} \leq E_{d,stb} \tag{4.1}$$

siendo

$E_{d,dst}$ valor de cálculo del efecto de las acciones desestabilizadoras

$E_{d,stb}$ valor de cálculo del efecto de las acciones estabilizadoras

2 Se considera que hay suficiente resistencia de la estructura portante, de un elemento estructural, sección, punto o de una unión entre elementos, si para todas las situaciones de dimensionado pertinentes, se cumple la siguiente condición.

$$E_d \leq R_d \tag{4.2}$$

siendo

E_d valor de cálculo del efecto de las acciones

R_d valor de cálculo de la resistencia correspondiente

4.2.2 Combinación de acciones

1 El valor de cálculo de los efectos de las acciones correspondiente a una situación persistente o transitoria, se determina mediante combinaciones de acciones a partir de la expresión

$$\sum_{j\geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \tag{4.3}$$

es decir, considerando la actuación simultánea de:

a) todas las acciones permanentes, en valor de cálculo ($\gamma_G \cdot G_k$), incluido el pretensado ($\gamma_P \cdot P$);

b) una acción variable cualquiera, en valor de cálculo ($\gamma_Q \cdot Q_k$), debiendo adoptarse como tal una tras otra sucesivamente en distintos análisis;

c) el resto de las acciones variables, en valor de cálculo de combinación ($\gamma_Q \cdot \psi_0 \cdot Q_k$).

Los valores de los coeficientes de seguridad, γ, se establecen en la tabla 4.1 para cada tipo de acción, atendiendo para comprobaciones de resistencia a si su efecto es desfavorable o favorable, considerada globalmente.

Para comprobaciones de estabilidad, se diferenciará, aun dentro de la misma acción, la parte favorable (la estabilizadora), de la desfavorable (la desestabilizadora).

Los valores de los coeficientes de simultaneidad, ψ, se establecen en la tabla 4.2

2 El valor de cálculo de los efectos de las acciones correspondiente a una situación extraordinaria, se determina mediante combinaciones de acciones a partir de la expresión

$$\sum_{j\geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_p \cdot P + A_d + \gamma_{Q,1} \cdot \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (4.4)$$

es decir, considerando la actuación simultánea de:

a) todas las acciones permanentes, en valor de cálculo ($\gamma_G \cdot G_k$), incluido el pretensado ($\gamma_P \cdot P$);

b) una acción accidental cualquiera, en valor de cálculo (A_d), debiendo analizarse sucesivamente con cada una de ellas.

c) una acción variable, en valor de cálculo frecuente ($\gamma_Q \cdot \psi_1 \cdot Q_k$), debiendo adoptarse como tal, una tras otra sucesivamente en distintos análisis con cada acción accidental considerada.

d) El resto de las acciones variables, en valor de cálculo casi permanente ($\gamma_Q \cdot \psi_2 \cdot Q_k$).

En situación extraordinaria, todos los coeficientes de seguridad (γ_G, γ_P, γ_Q), son iguales a cero si su efecto es favorable, o a la unidad si es desfavorable, en los términos anteriores.

3 En los casos en los que la acción accidental sea la acción sísmica, todas las acciones variables concomitantes se tendrán en cuenta con su valor casi permanente, según la expresión

$$\sum_{j\geq 1} G_{k,j} + P + A_d + \sum_{i>1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (4.5)$$

4.2.3 Comportamiento no lineal

1 En los casos en los que la relación entre las acciones y su efecto no pueda aproximarse de forma lineal, para la determinación de los valores de cálculo de los efectos de las acciones debe realizarse un análisis no lineal, siendo suficiente considerar que:

a) si los efectos globales de las acciones crecen más rápidamente que ellas, los coeficientes parciales se aplican al valor representativo de las acciones, al modo establecido en los apartados anteriores.

b) si los efectos globales de las acciones crecen más lentamente que ellas, los coeficientes parciales se aplican a los efectos de las acciones, determinados a partir de los valores representativos de las mismas.

4.2.4 Valor de cálculo de la resistencia

1 El valor de cálculo de la resistencia de una estructura, elemento, sección punto o unión entre elementos se obtiene de cálculos basados en sus características geométricas a partir de modelos de comportamiento del efecto analizado, y de la resistencia de cálculo, f_d, de los materiales implicados, que en general puede expresarse como cociente entre la resistencia característica, f_k, y el coeficiente de seguridad del material.

2 Por lo que respecta al material o materiales implicados, la resistencia de cálculo puede asimismo expresarse como función del valor medio del factor de conversión de la propiedad implicada, determinada experimentalmente, para tener en cuenta las diferencias entre las condiciones de los ensayos y el comportamiento real, y del coeficiente parcial para dicha propiedad del material.

3 En su formulación más general, la resistencia de cálculo puede expresarse en función de las variables antedichas, y el coeficiente parcial para el modelo de resistencia y las desviaciones geométricas, en el caso de que estas no se tengan en cuenta explícitamente.

Tabla 4.1 Coeficientes parciales de seguridad (γ) para las acciones

Tipo de verificación (1)	Tipo de acción	Situación persistente o transitoria	
		desfavorable	**favorable**
Resistencia	Permanente		
	Peso propio, peso del terreno	1,35	0,80
	Empuje del terreno	1,35	0,70
	Presión del agua	1,20	0,90
	Variable	1,50	0
		desestabilizadora	**estabilizadora**
Estabilidad	Permanente		
	Peso propio, peso del terreno	1,10	0,90
	Empuje del terreno	1,35	0,80
	Presión del agua	1,05	0,95
	Variable	1,50	0

(1) Los coeficientes correspondientes a la verificación de la resistencia del terreno se establecen en el DB-SE-C

Tabla 4.2 Coeficientes de simultaneidad (ψ)

	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Sobrecarga superficial de uso (Categorías según DB-SE-AE)			
• Zonas residenciales (Categoría A)	0,7	0,5	0,3
• Zonas administrativas(Categoría B)	0,7	0,5	0,3
• Zonas destinadas al público (Categoría C)	0,7	0,7	0,6
• Zonas comerciales (Categoría D)	0,7	0,7	0,6
• Zonas de tráfico y de aparcamiento de vehículos ligeros con un peso total inferior a 30 kN (Categoría E)	0,7	0,7	0,6
• Cubiertas transitables (Categoría F)		(1)	
• Cubiertas accesibles únicamente para mantenimiento (Categoría G)	0	0	0
Nieve			
• para altitudes > 1000 m	0,7	0,5	0,2
• para altitudes ≤ 1000 m	0,5	0,2	0
Viento	0,6	0,5	0
Temperatura	0,6	0,5	0
Acciones variables del terreno	0,7	0,7	0,7

(1) En las cubiertas transitables, se adoptarán los valores correspondientes al uso desde el que se accede.

4.3 Aptitud al servicio

4.3.1 Verificaciones

1 Se considera que hay un comportamiento adecuado, en relación con las deformaciones, las vibraciones o el deterioro, si se cumple, para las situaciones de dimensionado pertinentes, que el efecto de las acciones no alcanza el valor límite admisible establecido para dicho efecto.

4.3.2 Combinación de acciones

1 Para cada situación de dimensionado y criterio considerado, los efectos de las acciones se determinarán a partir de la correspondiente combinación de acciones e influencias simultáneas, de acuerdo con los criterios que se establecen a continuación.

2 Los efectos debidos a las acciones de corta duración que pueden resultar irreversibles, se determinan mediante combinaciones de acciones, del tipo denominado característica, a partir de la expresión

$$\sum_{j\geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i>1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \qquad (4.6)$$

Es decir, considerando la actuación simultánea de:

a) todas las acciones permanentes, en valor característico (G_k);

b) una acción variable cualquiera, en valor característico (Q_k), debiendo adoptarse como tal una tras otra sucesivamente en distintos análisis;

c) el resto de las acciones variables, en valor de combinación ($\psi_0 \cdot Q_k$).

3 Los efectos debidos a las acciones de corta duración que pueden resultar reversibles, se determinan mediante combinaciones de acciones, del tipo denominado frecuente, a partir de la expresión

$$\sum_{j\geq 1} G_{k,j} + P + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i>1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \qquad (4.7)$$

siendo

Es decir, considerando la actuación simultánea de:

a) todas las acciones permanentes, en valor característico (G_k);

b) una acción variable cualquiera, en valor frecuente ($\psi_1 Q_k$), debiendo adoptarse como tal una tras otra sucesivamente en distintos análisis;

c) el resto de las acciones variables, en valor casi permanente ($\psi_2 \cdot Q_k$).

4 Los efectos debidos a las acciones de larga duración, se determinan mediante combinaciones de acciones, del tipo denominado casi permanente, a partir de la expresión

$$\sum_{j\geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i\geq 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \qquad (4.8)$$

siendo:

a) todas las acciones permanentes, en valor característico (G_k);

b) todas las acciones variables, en valor casi permanente ($\psi_2 Q_k$).

4.3.3 Deformaciones

4.3.3.1 Flechas

1 Cuando se considere la integridad de los elementos constructivos, se admite que la estructura horizontal de un piso o cubierta es suficientemente rígida si, para cualquiera de sus piezas, ante cualquier combinación de acciones característica, considerando sólo las deformaciones que se producen después de la puesta en obra del elemento, la flecha relativa es menor que:

a) 1/500 en pisos con tabiques frágiles (como los de gran formato, rasillones, o placas) o pavimentos rígidos sin juntas;

b) 1/400 en pisos con tabiques ordinarios o pavimentos rígidos con juntas;

c) 1/300 en el resto de los casos.

2 Cuando se considere el confort de los usuarios, se admite que la estructura horizontal de un piso o cubierta es suficientemente rígida si, para cualquiera de sus piezas, ante cualquier combinación de acciones característica, considerando solamente las acciones de corta duración, la flecha relativa, es menor que 1/350.

3 Cuando se considere la apariencia de la obra, se admite que la estructura horizontal de un piso o cubierta es suficientemente rígida si, para cualquiera de sus piezas, ante cualquier combinación de acciones casi permanente, la flecha relativa es menor que 1/300.

4 Las condiciones anteriores deben verificarse entre dos puntos cualesquiera de la planta, tomando como luz el doble de la distancia entre ellos. En general, será suficiente realizar dicha comprobación en dos direcciones ortogonales.

5 En los casos en los que los elementos dañables (por ejemplo tabiques, pavimentos) reaccionan de manera sensible frente a las deformaciones (flechas o desplazamientos horizontales) de la estructura portante, además de la limitación de las deformaciones se adoptarán medidas constructivas apropiadas para evitar daños. Estas medidas resultan particularmente indicadas si dichos elementos tienen un comportamiento frágil.

4.3.3.2 Desplazamientos horizontales

1 Cuando se considere la integridad de los elementos constructivos, susceptibles de ser dañados por desplazamientos horizontales, tales como tabiques o fachadas rígidas, se admite que la estructura global tiene suficiente rigidez lateral, si ante cualquier combinación de acciones característica, el desplome (véase figura 4.1) es menor de:

a) desplome total: 1/500 de la altura total del edificio;

b) desplome local: 1/250 de la altura de la planta, en cualquiera de ellas.

2 Cuando se considere la apariencia de la obra, se admite que la estructura global tiene suficiente rigidez lateral, si ante cualquier combinación de acciones casi permanente, el desplome relativo (véase figura 4.1) es menor que 1/250.

3 En general es suficiente que dichas condiciones se satisfagan en dos direcciones sensiblemente ortogonales en planta.

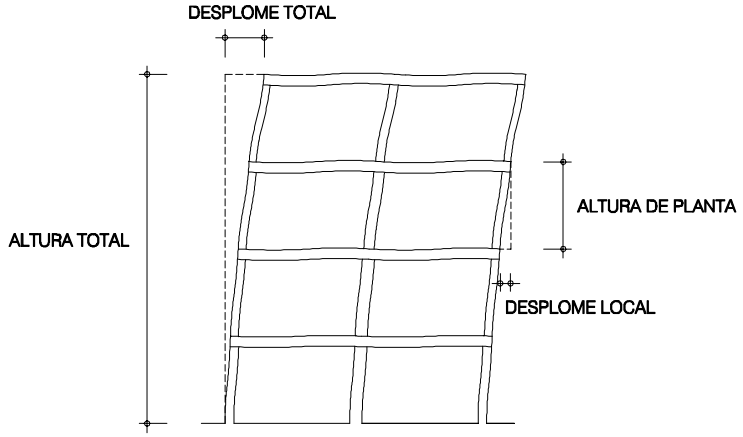

Figura 4.1 Desplomes

4.3.4 Vibraciones

1 Un edificio se comporta adecuadamente ante vibraciones debidas a acciones dinámicas, si la frecuencia de la acción dinámica (frecuencia de excitación) se aparta suficientemente de sus frecuencias propias.

2 En el cálculo de la frecuencia propia se tendrán en cuenta las posibles contribuciones de los cerramientos, separaciones, tabiquerías, revestimientos, solados y otros elementos constructivos, así como la influencia de la variación del módulo de elasticidad y, en el caso de los elementos de hormigón, la de la fisuración.

3 Si las vibraciones pueden producir el colapso de la estructura portante (por ejemplo debido a fenómenos de resonancia, o a la pérdida de la resistencia por fatiga) se tendrá en cuenta en la verificación de la capacidad portante, tal como se establece en el DB respectivo.

4 Se admite que una planta de piso susceptible de sufrir vibraciones por efecto rítmico de las personas, es suficientemente rígida, si la frecuencia propia es mayor de:

a) 8 Hz, en gimnasios y polideportivos;

b) 7Hz en salas de fiesta y locales de pública concurrencia sin asientos fijos;

c) 3,4 Hz en locales de espectáculos con asientos fijos.

4.4 Efectos del tiempo

4.4.1 Durabilidad

1 Debe asegurarse que la influencia de acciones químicas, físicas o biológicas a las que está sometido el edificio no compromete su capacidad portante. Para ello, se tendrán en cuenta las acciones de este tipo que puedan actuar simultáneamente con las acciones de tipo mecánico, mediante un método implícito o explicito.

2 En el método implícito los riesgos inherentes a las acciones químicas, físicas o biológicas se tienen en cuenta mediante medidas preventivas, distintas al análisis estructural, relacionadas con las características de los materiales, los detalles constructivos, los sistemas de protección o los efectos de las acciones en condiciones de servicio. Estas medidas dependen de las características e importancia del edificio, de sus condiciones de exposición y de los materiales de construcción empleados. En estructuras normales de edificación, la aplicación del este método resulta suficiente. En los documentos básicos de seguridad estructural de los diferentes materiales y en la Instrucción de hormigón estructural EHE se establecen las medidas específicas correspondientes.

3 En el método explícito, las acciones químicas, físicas o biológicas se incluyen de forma explícita en la verificación de los estados límite últimos y de Servicio. Para ello, dichas acciones se representarán mediante modelos adecuados que permitan describir sus efectos en el comportamiento estructural. Estos modelos dependen de las características y de los materiales de la estructura, así como de su exposición.

4.4.2 Fatiga

4.4.2.1 Principios

1 En general, en edificios no resulta necesario comprobar el estado límite de fatiga, salvo por lo que respecta a los elementos estructurales internos de los equipos de elevación.

2 La comprobación a fatiga de otros elementos sometidos a acciones variables repetidas procedentes de maquinarias, oleaje, cargas de tráfico y vibraciones producidas por el viento, se hará de acuerdo con los valores y modelos que se establecen de cada acción en el documento respectivo que la regula.

4.4.3 Efectos reológicos

1 Los documentos básicos correspondientes a los diferentes materiales incluyen, en su caso, la información necesaria para tener en cuenta la variación en el tiempo de los efectos reológicos.

5 Verificaciones basadas en métodos experimentales

5.1 Generalidades

1 Las verificaciones relativas a la seguridad estructural mediante ensayos están basadas en el establecimiento experimental de parámetros que definan bien la respuesta de una determinada estructura, de un elemento estructural o de una unión, o bien las acciones e influencias que actúen sobre ellos.

2 No se consideraran como parte de este procedimiento experimental los ensayos de recepción de materiales o de su control de calidad, así como los ensayos del terreno para la redacción de informes geotécnicos.

5.2 Planteamiento experimental

1 Debe definirse de forma inequívoca el estado límite que debe verificarse y determinarse las zonas o los puntos críticos desde el punto de vista del comportamiento de la estructura o del elemento considerado.

2 Las probetas o muestras a ensayar se fabricarán empleando los materiales previstos en obra, aplicando la misma técnica y, en la medida de lo posible, con las mismas dimensiones que los elementos correspondientes. El muestreo se efectuará de manera aleatoria. Además, las probetas deberán reproducir adecuadamente las condiciones de apoyo y de puesta en carga de los elementos.

3 Deben minimizarse, en la medida de lo posible, las diferencias entre las condiciones en las cuales se realicen los ensayos y las condiciones del elemento estructural real. Cuando estas diferencias tengan una incidencia significativa, se tendrán en cuenta en la evaluación e interpretación de los resultados introduciendo unos factores de conversión que se establecerán mediante análisis experimental o teórico, o sobre la base de la experiencia. Estos factores están asociados con incertidumbres que dependen de cada caso

4 En los métodos empleados para deducir los valores de cálculo a partir de los resultados experimentales se tendrá en cuenta el número reducido de ensayos. En ausencia de un análisis más detallado, la evaluación directa de los resultados se realizará según las indicaciones del apartado 5.5. Para la evaluación de los resultados podrán emplearse otros métodos, siempre y cuando resulten consistentes con el formato de verificación establecido. En caso de que existan conocimientos previos (por ejemplo modelos de cálculo, ensayos previos), éstos se podrán tener en cuenta en la evaluación de los resultados.

5 Si los resultados experimentales se usan en un análisis probabilista, los datos obtenidos pueden emplearse para la actualización de los parámetros estadísticos correspondientes.

6 Las conclusiones derivadas de una campaña experimental determinada sólo tienen validez para las condiciones particulares de los ensayos, caracterizadas por el dispositivo experimental elegido, los materiales de construcción y la técnica de fabricación empleados.

7 En la evaluación e interpretación de los resultados se introducirán factores de conversión que tengan en cuenta las diferencias entre las condiciones del ensayo y las condiciones en obra que sean relevantes, como el efecto de escala, la duración de la aplicación de la carga, las condiciones de apoyo de las probetas o los efectos ambientales que puedan incidir en las propiedades de los materiales.

5.3 Evaluación de los resultados

5.3.1 Generalidades

1 La determinación del valor de cálculo de la resistencia de un elemento estructural o de un material mediante ensayos se basa en que la resistencia de la probeta empleada se representa a través de una única variable y en que el tipo de rotura contemplado es determinante en todos los ensayos.

2 El valor de cálculo de la resistencia, R_d, se determinará según la siguiente expresión:

$$R_d = \frac{R_{k,est}}{\gamma_M} \cdot \frac{m_\eta}{\gamma_{Rd}} \qquad (5.1)$$

siendo

$R_{k,est}$ estimación del valor característico de la resistencia, R_k, determinada a partir de los resultados experimentales según la expresión (5.2) ó (5.3);

γ_M coeficiente parcial para la resistencia del material, se adoptará el valor que, según los documentos básicos correspondientes, se emplee para el material y el mecanismo de rotura considerados;

m_η valor medio del factor de conversión;

γ_{Rd} coeficiente de incertidumbre para el modelo de resistencia.

3 En aquellos casos en los que se estime que la diferencia entre los ensayos y los casos reales es demasiado grande, será necesario un estudio más detallado para el establecimiento del valor del coeficiente γ_M.

4 El coeficiente de incertidumbre para el modelo de resistencia, γ_{Rd}, tiene en cuenta el carácter aleatorio del factor de conversión, η, con respecto a las diferencias desconocidas entre las condiciones del ensayo y las condiciones en obra. Los valores de m_η y γ_{Rd} se definirán en cada caso, teniendo en cuenta los objetivos de los ensayos, el estado límite considerado, el mecanismo de rotura, la información disponible sobre la fabricación de las probetas y los elementos reales, así como las condiciones de la obra. Los valores adoptados para el coeficiente de incertidumbre γ_{Rd} no serán inferiores a la unidad.

5.3.2 Estimación de la resistencia característica

1 En ausencia de información previa o de otros datos más precisos, se adoptará como valor característico el fractil del 5%, suponiendo una distribución normal:

$$R_{k,est} = m_R - k_\sigma \cdot \sigma_R \qquad (5.2)$$

siendo

m_R valor medio de la muestra

σ_R desviación típica de la muestra, se estimará a partir de los resultados experimentales

k_σ coeficiente que depende del tamaño de la muestra (número de ensayos, n), según tabla 5.1

2 Cuando exista información previa relativa a la desviación típica de la distribución, σ_R, ésta se considerará conocida a priori. En estos casos, suponiendo una distribución normal, el valor característico de la resistencia correspondiente a un fractil del 5% se estimará a partir de la relación:

$$R_{k,est} = m_R - k_\sigma \cdot \sigma_R \qquad (5.3)$$

siendo

m_R valor medio de la muestra

σ_R desviación típica de la distribución

k_σ coeficiente que depende del tamaño de la muestra (número de ensayos, n), según tabla 5.1

Tabla 5.1. Valores del coeficiente k_σ para un fractil de 5%

	Número de ensayos, n								
Desviación típica	3	4	6	8	10	20	30	100	infinito
desconocida	3,15	2,68	2,34	2,19	2,10	1,93	1,87	1,76	1,64
previamente conocida	2,03	1,98	1,92	1,88	1,86	1,79	1,77	1,71	1,64

Anejo A Terminología

1 Los términos que aquí figuran se utilizan en este DB-SE así como en los otros documentos básicos de seguridad estructural, conforme al significado y a las condiciones que se establecen. En el Anejo III de la Parte I pueden consultarse otros términos y definiciones generales utilizados en el conjunto del CTE. El resto de los DB de índole estructural contienen las definiciones de otros términos técnicos específicos.

Acción accidental: acción con una pequeña probabilidad de ocurrencia, generalmente de corta duración y con efectos importantes.

Acción fija: Acción que tiene una distribución fija sobre el edificio y cuya magnitud y dirección están determinadas de forma inequívoca para el conjunto de la obra.

Acción libre: Acción que puede tener cualquier punto de aplicación, sin límites dados.

Acción permanente: Acción cuya variación en magnitud con el tiempo es despreciable, o cuya variación es monótona hasta que se alcance un determinado valor límite.

Acción variable: Acción cuya variación en el tiempo no es monótona ni despreciable respecto al valor medio.

Acciones:

a) Fuerza aplicada sobre el edificio (acción directa).

b) Deformación impuesta o aceleración causada por, ejemplo, por cambios de temperatura, variaciones de humedad, asientos diferenciales o terremotos (acción indirecta).

Análisis estructural: Procedimiento o algoritmo para determinar los efectos de las acciones.

Combinación de acciones: Conjunto de acciones utilizadas para la comprobación de los requisitos estructurales.

Efectos de las acciones: El efecto de las acciones en elementos estructurales, por ejemplo, esfuerzos, momentos, tensiones, deformaciones, o en toda la estructura, como por ejemplo, rotación, desviación.

Elemento estructural: Parte físicamente distinguible de una estructura, como por ejemplo, una viga, una losa, un pilote.

Estado límite: Estado más allá del que no se satisfacen los requisitos estructurales.

Estado límite de servicio: Estado más allá del que no se satisfacen los requisitos de servicio establecidos.

Estado límite último: Estado asociado al colapso o a otra forma similar de fallo estructural.

Estructura: Conjunto de elementos, conectados entre ellos, cuya misión consiste en resistir las acciones previsibles y en proporcionar rigidez.

Flecha relativa: Descenso máximo de vano respecto al extremo de la pieza que lo tenga menor, dividida por la luz del tramo. En el caso de voladizos se considerara como luz el doble del vuelo.

Modelo estructural: Idealización del sistema estructural utilizada para el análisis, cálculo y verificación.

Riesgo: Medida del alcance del peligro que representa un evento no deseado para las personas. Un riesgo se expresa en términos de la probabilidad vinculada a las consecuencias de dicho evento.

Situación extraordinaria: Situación que incluye unas condiciones excepcionales para el edificio.

Situación persistente: Situación que es relevante durante un periodo de tiempo similar al periodo de servicio del edificio.

Sistema estructural: Elementos resistentes de la construcción y forma en la que se considera que trabajan.

Valor característico: Es el principal valor representativo de una variable.

Valor de cálculo: Valor obtenido de multiplicar el valor representativo por el coeficiente parcial de seguridad.

Anejo B Notaciones

B.1 Notaciones

1 Mayúsculas latinas

A_d	Valor de cálculo de una acción accidental
G_d	Valor de cálculo de una acción permanente
G_k	Valor característico de una acción permanente
Q_d	Valor de cálculo de una acción variable
Q_k	Valor característico de una acción variable simple
R_d	Valor de cálculo de la resistencia
R_k	Valor característico de la resistencia

2 Minúsculas griegas

γ_M	Coeficiente parcial para la resistencia de un material
γ_G	Coeficiente parcial para una acción permanente
γ_Q	Coeficiente parcial para una acción variable
ψ_0	Coeficiente para el valor de combinación de una acción variable
ψ_1	Coeficiente para el valor frecuente de una acción variable
ψ_2	Coeficiente para el valor casi permanente de una acción variable

Anejo C Principios de los métodos probabilistas explícito e implícito

C.1 Objetivos y campo de aplicación

1 El contenido de este Anejo tiene carácter informativo y sus objetivos son:

a) la recopilación de las bases en que se fundamentan los capítulos 3, 4 y 5 de DB-SE;

b) la introducción de algunas recomendaciones relativas a la aplicación de los métodos probabilistas explícitos.

2 En principio, los métodos probabilistas explícitos se pueden emplear para la verificación de cualquier problema que se pueda describir a través de relaciones matemáticas, y siempre que sea posible identificar el conjunto de los correspondientes eventos aleatorios.

3 Las principales aplicaciones de los métodos probabilistas explícitos se pueden dividir en dos grupos:

a) la calibración de modelos probabilistas implícitos (por ejemplo la calibración de los coeficientes parciales);

b) la aplicación directa para la adopción de decisiones relacionadas con las prestaciones de las estructuras (por ejemplo para el dimensionado de estructuras nuevas en los casos en los que los métodos implícitos resulten inadecuados, o para la evaluación estructural de edificios existentes).

4 El contenido de este Anejo es aplicable para las verificaciones relativas a la capacidad portante (estados límite últimos). También es aplicable para la verificación de la aptitud al servicio en los casos irreversibles. En general, las reglas y el contenido de este Anejo no son aplicables a estados límite de servicio reversibles.

C.2 Incertidumbres asociadas con las variables básicas

C.2.1 Fuentes de incertidumbres

1 Se pueden distinguir tres tipos de incertidumbres asociadas con las variables básicas:

a) la variabilidad aleatoria inherente al modelo;

b) las incertidumbres debidas a la falta de conocimientos;

c) las incertidumbres estadísticas.

A su vez, cada uno de estos tipos de incertidumbres se puede subdividir.

2 La variabilidad aleatoria inherente se puede dividir en incertidumbres de dos categorías, según estén o no afectadas por actividades humanas.

Muchos parámetros relativos a las acciones pertenecen a la segunda categoría, por ejemplo la velocidad del viento o la carga de nieve sobre el terreno. También existen parámetros de resistencia correspondientes a esta segunda categoría, por ejemplo los parámetros de resistencia de un terreno.

Ejemplos correspondientes al primer tipo de incertidumbres son la resistencia de los materiales constructivos (por ejemplo hormigón o acero) o las dimensiones de elementos estructurales. Estas incertidumbres se pueden reducir mediante métodos de fabricación o de producción más avanzados, o a través de métodos de control adecuados.

3 Las incertidumbres debidas a la falta de conocimientos se pueden subdividir en dos categorías, las relativas a las incertidumbres de los modelos, y las que dependen de la evolución futura de ciertos parámetros.

Las incertidumbres de los modelos, que se pueden referir tanto a los modelos de las acciones y de sus efectos como a los modelos de resistencia, se pueden reducir a través de la mejora de los conocimientos mediante ensayos o investigaciones teóricas.

A la segunda categoría pertenecen, por ejemplo, las incertidumbres sobre la evolución futura de las sobrecargas. Las posibilidades de reducción de estas incertidumbres son más reducidas.

4 Las incertidumbres estadísticas están asociadas con la evaluación estadística de los resultados de ensayos, mediciones u otras observaciones, y pueden ser debidas a:

a) la falta de identificación y de distinción entre diferentes poblaciones estadísticas;

b) un número limitado de resultados que conduce a incertidumbres en la obtención de los parámetros estadísticos (por ejemplo del valor medio o de la desviación típica);

c) la no consideración de las variaciones sistemáticas de las variables analizadas (por ejemplo de parámetros climáticos);

d) una extrapolación excesiva de la información estadística;

e) la no consideración de posibles correlaciones;

f) el empleo de distribuciones estadísticas para la descripción de incertidumbres cuyo origen sólo en parte es estadístico.

Normalmente, las incertidumbres estadísticas se pueden reducir a través de un mayor número de ensayos u observaciones.

C.2.2 Obtención de datos básicos

1 Los valores numéricos de los parámetros que caractericen un modelo y sus incertidumbres se pueden obtener por las siguientes vías:

a) mediciones u observaciones;

b) análisis;

c) adopción de decisiones.

Con frecuencia, los valores numéricos de los parámetros se obtienen combinando datos obtenidos por diferentes vías. La resistencia a tracción del hormigón se puede determinar a partir de la medición de su resistencia a compresión y un análisis mediante una función de conversión; la sobrecarga de un puente grúa se establece mediante decisión y las fuerzas dinámicas adicionales se pueden determinar mediante análisis; las sobrecargas en edificios se pueden determinar mediante observación en combinación con una hipótesis sobre la evolución futura.

2 Las variables básicas que tengan en cuenta las incertidumbres se caracterizarán mediante parámetros tales como el valor medio, la desviación típica, las correlaciones con otras variables y el tipo de distribución estadística. En los casos en los que los valores numéricos de estos parámetros se determinen de acuerdo con C.2.2(1a) o C.2.2(1b), el procedimiento incluirá un análisis estadístico de los datos y los resultados se representarán en términos estadísticos.

Si por el contrario los valores numéricos de los parámetros de las variables básicas se determinan de acuerdo con C.2.2(1c) no es posible, normalmente, una representación directa en términos estadísticos. No obstante, a efectos de la aplicación de los métodos probabilistas, también a estas variables se les deben asignar parámetros estadísticos.

3 Las incertidumbres debidas a errores tales como los errores de medición o los efectos de escala, se evitarán mediante la adopción de medidas adecuadas como por ejemplo una gestión eficaz de la calidad del proceso de obtención de los datos básicos.

C.2.3 Selección de distribuciones estadísticas

1 En muchos casos, el número reducido de datos disponibles no permite determinar de manera inequívoca una función de distribución estadística. Por este motivo, se seleccionará una distribución que tenga unas características apropiadas en relación con la variable básica considerada, teniendo en cuenta el posible sesgo.

2 Para las acciones permanentes se puede adoptar una distribución normal, siempre y cuando la posibilidad de que se produzcan valores negativos no resulte contradictoria con otras hipótesis y no pueda ser la causa de resultados erróneos. En caso contrario, resultará más conveniente adoptar una distribución del tipo logarítmica normal, Weibull, Gamma, o de valores extremos.

Para las acciones variables, resulta más conveniente adoptar una distribución del tipo logarítmica normal, Weibull, Gamma, o de valores extremos, particularmente si la distribución debe representar un valor máximo en un determinado periodo de tiempo.

3 Para las propiedades de los materiales y para las dimensiones, suele ser adecuada una distribución del tipo normal o logarítmica normal. Si, debido a motivos físicos u otras circunstancias, no se pueden producir valores negativos, resulta preferible una distribución logarítmica normal.

C.3 Criterios para el fallo estructural

C.3.1 Estados límite últimos

1 Se supone que el criterio de fallo de una estructura o de un elemento estructural se rige según una función g($\underline{X}$) de las variables básicas X, de manera que:

a) Para el estado deseado

$$g(\underline{X}) > 0 \quad \text{(C.1a)}$$

b) Para el estado límite

$$g(\underline{X}) = 0 \quad \text{(C.1b)}$$

c) Para el estado no deseado

$$g(\underline{X}) < 0 \quad \text{(C.1c)}$$

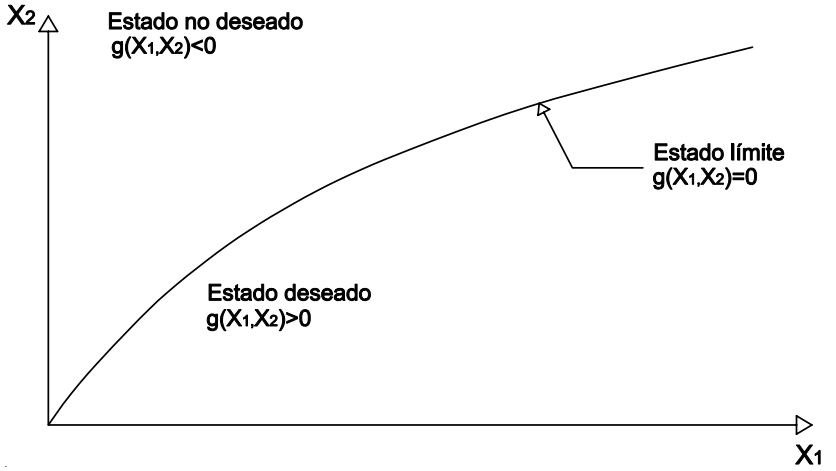

Figura C.1 Representación de la función g(X) para el caso con dos variables básicas X1 y X2; X= (X1, X2)

2 Las variables básicas X pueden depender del tiempo (por ejemplo las acciones ambientales extremas pueden variar con el tiempo, los materiales constitutivos pueden estar afectados por mecanismos de deterioro en función del tiempo, la resistencia puede disminuir con el tiempo debido a procesos de fatiga).

En general, algunas de las variables de X se deben representar mediante procesos estocásticos. En particular, la variabilidad con el tiempo significa que los máximos y mínimos de las variables de X no se producen al mismo tiempo.

La dependencia del tiempo implica que la probabilidad de fallo está asociada con un periodo de referencia elegido, t_0.

3 El fallo de una estructura o de un elemento estructural se asocia con su transición de un estado deseado a un estado no deseado. Para la mayoría de los estados límite últimos, la probabilidad de fallo se puede representar a través de la relación:

$$P_f = [g(\underline{X}) < 0] \quad \text{(C.2)}$$

La probabilidad de que no exista fallo de una estructura o de un elemento estructural (probabilidad de supervivencia, P_s, o fiabilidad) es el complemento de la probabilidad de fallo:

$$P_s = 1 - P_f \quad \text{(C.3)}$$

4 Si se analiza la fiabilidad de un elemento estructural o de una sección transversal con respecto a un determinado mecanismo de fallo y una determinada combinación de acciones e influencias, la función g(X) se puede describir, normalmente, a través de una expresión única derivada del comportamiento mecánico. En estos casos, el análisis se puede considerar como un análisis de un elemento (en este contexto, elemento se emplea desde el punto de vista probabilista de la palabra).

5 En los casos en los que se contemple más de un mecanismo de fallo para un elemento estructural, o si se estudian simultáneamente varios elementos estructurales, la función g(X) puede considerarse como una función compuesta por varias funciones $g_1(X)$, $g_2(X)$... .

Un análisis que tenga en cuenta simultáneamente varias condiciones $g_i(X) < 0$ se denomina análisis de un sistema. La definición de la función g(X) depende fuertemente de las características del sistema (sistemas en los que el fallo de una sección conduce al fallo total; sistemas redundantes; sistemas con un comportamiento combinado).

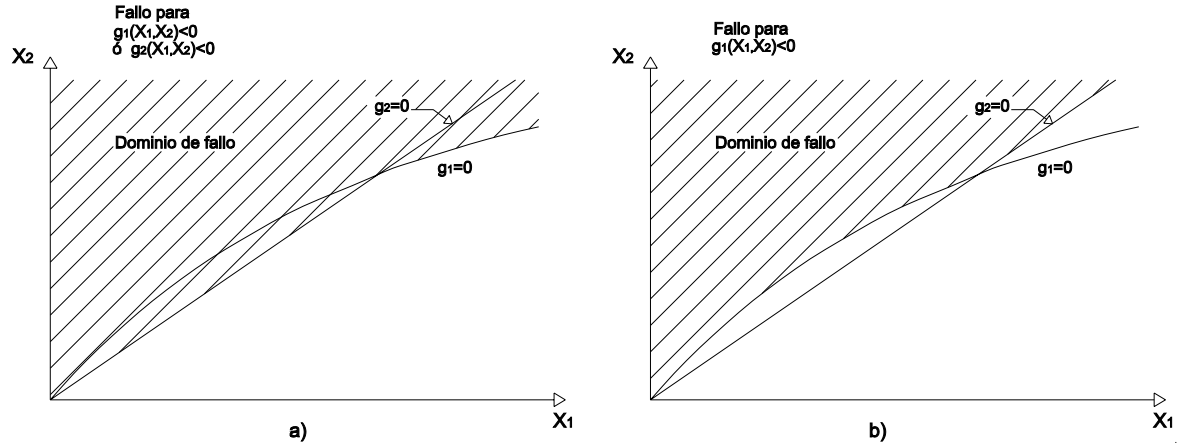

Figura C.2 Dominios de fallo para un ejemplo con dos funciones g1(X1, X2) y g2(X1, X2) con dos variables básicas X1 y X2. a) Fallo del sistema producido por el de una sección; b) Fallo de un sistema redundante

6 En una aplicación directa de los métodos probabilistas explícitos se debe demostrar que en el periodo de referencia, t_0, la probabilidad de fallo de la estructura o del elemento estructural, P_f, no supera la probabilidad de fallo admisible, $P_{f,0}$

$$P_f \leq P_{f,0} \tag{C.4}$$

C.3.2 Estados límite de servicio

1 Para algunos estados límite de servicio, la transición de un estado deseado a un estado no deseado corresponde a un límite que puede estar acotado al estar asociado con una realidad mecánica. Para otros estados límite de servicio, sin embargo, esta transición se produce en condiciones poco acotadas y difusas. En estos casos, la transición está relacionada con una disminución más o menos rápida del grado de la aptitud al servicio.

2 En términos generales, se puede definir un grado de la aptitud al servicio, μ, en función de un parámetro relacionado con el comportamiento en servicio, λ (por ejemplo la deformación de una viga, la intensidad de las vibraciones de un forjado)

$$0 \leq \mu(\lambda) \leq 1 \tag{C.5}$$

Para el parámetro λ se pueden establecer dos límites

a) λ_1: la obra se puede usar sin restricciones

b) λ_2: la obra no se puede usar.

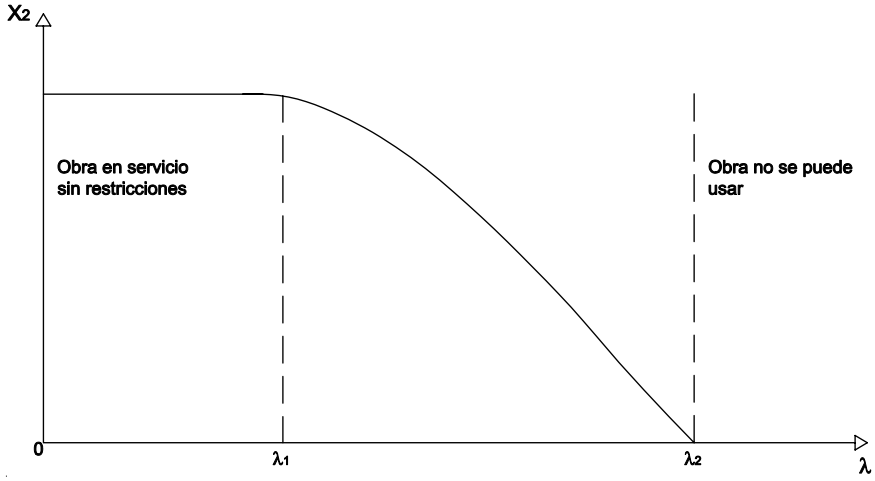

Figura C.3 Grado de la aptitud al servicio, μ, en función del parámetro de servicio, λ

3 En algunos casos, a efectos de una optimización económica, el grado de la aptitud al servicio se puede expresar en términos económicos.

C.4 Niveles de fiabilidad

C.4.1 Seguridad de las personas

1 La fiabilidad estructural está relacionada, en primer lugar, con la posibilidad de que se produzcan daños personales (muertos, heridos) como consecuencia de un colapso.

Se puede determinar un valor máximo aceptable para la probabilidad de fallo a partir de una comparación con los riesgos mortales asociados con otras actividades de la vida diaria (por ejemplo viajar en coche). A estos efectos, se debe distinguir entre los riesgos mortales desde el punto de vista de las personas como individuos (riesgo mortal individual) y desde el punto de vista de la sociedad (riesgo colectivo para las personas).

2 Para el riesgo mortal individual asociado con el colapso de las estructuras se podría asumir un valor admisible que esté aproximadamente dos órdenes de magnitud por debajo del valor total del riesgo mortal individual asociado con accidentes en general.

La probabilidad de fallo admisible para una estructura depende de la probabilidad condicional de que una persona muera dado el colapso de esta estructura, y del riesgo mortal individual admisible asociado a los edificios

$$P(f \mid \text{año}) \cdot P(d \mid f) \leq r_{i,adm} \qquad \text{(C.6)}$$

siendo

$P(f \mid \text{año})$ probabilidad de fallo de la estructura para un periodo de referencia de un año

$P(d \mid f)$ probabilidad de que un usuario del edificio, presente en el momento del colapso, encuentre la muerte, dado el colapso del edificio (probabilidad condicional)

$r_{i,adm}$ riesgo mortal individual admisible, asociado con el comportamiento estructural, expresado en términos de [(número de muertos) / (10^6 · año)].

3 El requisito (C.6) se refiere a un periodo de un año y se debería considerar como un valor medio sobre un determinado periodo de referencia (por ejemplo el periodo de servicio previsto o, alternativamente, un periodo del orden de 10 a 20 años). En términos generales, serían aceptables desviaciones de este valor medio anual. Sin embargo, sólo se podrían aceptar valores superiores, para un periodo de tiempo mucho más breve que el periodo de referencia.

4 Desde el punto de vista social, se deben evitar accidentes (frecuentes) con un gran número de muertos. A estos efectos, se deberá cumplir la condición

$$P(f \mid \text{año}) \leq A \cdot N^{-\alpha} \qquad \text{(C.7)}$$

siendo

$P(f \mid \text{año})$ probabilidad de fallo de la estructura para un periodo de referencia de un año

N número supuesto de muertos

A constante (por ejemplo A = 0,01 a 0,1)

α constante (por ejemplo α = 1 a 2)

5 Se puede admitir una probabilidad de fallo estructural que supere el valor más restrictivo de los deducidos de las condiciones (C.6) y (C.7) si se adoptan medidas de protección específicas (por ejemplo un plan de evacuación en caso de emergencia), con el fin de cumplir con los requisitos relativos a el riesgo mortal individual y el riesgo colectivo para las personas.

C.4.2 Optimización económica

1 Desde el punto de vista económico, el nivel de fiabilidad requerido se puede determinar estableciendo un equilibrio entre las consecuencias de un fallo estructural de un edificio y el coste de las medidas de protección y de seguridad.

2 El objetivo de una optimización económica consiste en minimizar el coste total acumulado durante el periodo de servicio previsto. Formalmente, el coste total se puede representar mediante la relación

$$C_{tot} = C_b + C_m + \Sigma(P_f \cdot C_f) \qquad \text{(C.8)}$$

siendo

C_{tot} coste total

C_b coste del proyecto y de la ejecución

C_m coste previsto para la inspección, al mantenimiento y la demolición

C_f coste del fallo

P_f probabilidad de fallo

La suma $\Sigma(P_f \cdot C_f)$ se debe establecer para todas las situaciones de riesgo independientes y todos los posibles mecanismos de fallo.

Esta representación del coste total tiene un alto grado de simplificación y se debe detallar más a efectos de su aplicación práctica.

3 En los casos en los que el fallo (colapso) estructural pueda afectar a las personas (caso normal), además de los criterios económicos, la estructura deberá cumplir con los requisitos relacionados con la fiabilidad mínima. En estos casos, la optimización condicional se puede llevar a cabo para la relación (C.8), siempre y cuando se cumpla con los requisitos deducidos de (C.6) y (C.7).

4 En algunos casos, el coste del riesgo ($\Sigma(P_f \cdot C_f)$) puede estar cubierto por un seguro.

C.4.3 Valores numéricos

1 Los valores numéricos relativos a la fiabilidad de una estructura se expresan a menudo en términos del índice de fiabilidad, β, relacionado con la probabilidad de fallo, P_f, a través de

$$\beta = - \Phi^{-1}(P_f) \qquad (C.9)$$

La tabla C.1 contiene valores numéricos para la relación entre el índice de fiabilidad, β, y la probabilidad de fallo, P_f.

Tabla C.1 Relación entre el índice de fiabilidad, b, y la probabilidad de fallo, P_f

P_f	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}
β	1,3	2,3	3,1	3,7	4,2	4,7	5,2

2 Los valores numéricos de la probabilidad de fallo (y de los correspondientes índices de fiabilidad) a los que hacen referencia los principios de C.3 y que se pueden determinar según los métodos mencionados en C.5, representan valores nominales y no describen la frecuencia real de fallos estructurales. Las diferencias sustanciales entre la probabilidad de fallo nominal y la frecuencia real de fallos estructurales se debe por un lado a que en realidad los fallos son debidos, en muchos casos, a errores humanos y, por otro lado, a las simplificaciones introducidas a través de los modelos.

Debido a que las probabilidades de fallo se deben interpretar como valores nominales, las probabilidades de fallo admisibles deben basarse en los resultados de una calibración. El empleo de valores de este tipo para caracterizar la fiabilidad requerida de una estructura está relacionado con un conjunto coherente y específico de modelos probabilistas y de modelos estructurales. No es admisible el empleo de valores calibrados para la probabilidad de fallo admisible (o para el índice de fiabilidad requerido) en combinación con otros modelos, ya que conduce a resultados distorsionados en cuanto al nivel de fiabilidad.

3 La tabla C.2 representa valores calibrados para el índice de fiabilidad requerido, referidos a todo el periodo de servicio de la estructura, en función de las consecuencias de un fallo estructural y del coste relativo de un incremento de la fiabilidad.

Tabla C.2 Valores nominales, referidos a todo el periodo de servicio, para el índice de fiabilidad requerido

Coste relativo para incrementar la fiabilidad	**Consecuencias de un fallo estructural**			
	despreciables	**pequeñas**	**moderadas**	**grandes**
elevado	0	1,5	2,3	3,1
moderado	1,3	2,3	3,1	3,8
bajo	2,3	3,1	3,8	4,3

Los valores de la tabla C.2 se han deducido aplicando los métodos de los valores de cálculo (C.6), adoptando las siguientes hipótesis para las funciones de distribución de los modelos probabilistas:

a) modelos de resistencia lognormal o Weibull

b) acciones permanentes normal

c) acciones variables Gumbel.

4 Los valores recomendados para el índice de fiabilidad requerido, referidos a todo el periodo de servicio de la estructura, son:

a) para estados límite de servicio

reversibles $\beta = 0$

irreversibles $\beta = 1,5$

b) para fatiga $\beta = 2,3$ a $3,1$ (en función de las posibilidades de inspección)

c) para estados límite últimos $\beta = 3,1; 3,8; 4,3$

El empleo de estos valores a efecto de un análisis probabilista explícito requiere necesariamente la adopción de las mismas hipótesis en las que se basan los valores nominales de la tabla C.2.

C.5 Determinación de probabilidades de fallo

C.5.1 Problemática general

1 En términos generales, la determinación de la probabilidad de fallo requiere establecer la probabilidad

$$P_f = P\left\{\cup \cap g_{ij}\left(\underline{X}, t\right) < 0 \text{ para } t \in [0, T]\right\} \quad (C.10)$$

siendo

g_{ij} funciones de fallo (Funciones Límite) en el espacio de las variables básicas

i número del modo de fallo

j número del elemento.

$g_{i1} \le 0$, $g_{i2} \le 0$, etc. especifica una secuencia de fallo estructural para un determinado modo de fallo, i.

2 La dependencia del tiempo puede estar relacionada con las acciones e influencias, o con la resistencia (por ejemplo debido a un mecanismo de deterioro).

3 Algunas de las variables X pueden ser funciones del tiempo y de coordenadas espaciales.

C.5.2 Problemas invariables en el tiempo

1 En los casos en los que todas las variables X puedan considerarse invariables en el tiempo, la probabilidad de fallo, P_f, se determina a partir de la relación

$$P_f = \int_{DF} f_{\underline{x}}\left(\underline{x}\right) d\underline{x} \quad (C.11)$$

siendo

$f_{\underline{x}}\left(\underline{x}\right)$ función de densidad de probabilidad conjunta de las variables aleatorias básicas X (no procesos aleatorios)

DF dominio de fallo

En general, los dominios de fallo quedan definidos por las intersecciones y uniones de los dominios caracterizados por:

$$g_{ij}\left(\underline{X}\right) \le 0 \quad (C.12)$$

2 Los valores numéricos de la probabilidad de fallo se pueden determinar mediante:

a) métodos analíticos exactos;

b) métodos de integración numérica;

c) métodos analíticos aproximados (FORM: First Order Reliability Method; FOSM: First Order Second Moment Method; SORM: Second Order Reliability Method);

d) métodos de simulación.

En algunos casos se puede emplear una combinación de los diferentes métodos.

C.5.3 Transformación de problemas variables en problemas invariables en el tiempo

1 Se pueden distinguir dos tipos de problemas variables en el tiempo:

a) fallos debidos a una sobrecarga;

b) fallos por acumulación de daños (por ejemplo fatiga, corrosión).

La dependencia del tiempo se debe a la variabilidad en el tiempo de las acciones e influencias y/o de la resistencia (mecanismos de deterioro).

En general, las acciones, influencias o resistencias que sean variables en el tiempo, se deben representar a través de procesos estocásticos.

2 En el caso de un fallo debido a una sobrecarga, el proceso puede ser sustituido por una distribución probabilista representando la incertidumbre para el periodo de tiempo para el que se debe determinar la probabilidad de fallo.

A estos efectos, el valor medio se podrá adoptar como el valor máximo esperado en el periodo de referencia. Para la incertidumbre aleatoria se podrá adoptar la correspondiente al valor máximo esperado.

3 La función empleada para describir un fallo por fatiga se podrá expresar, por ejemplo, en los términos de las curvas SN y de la regla de Palmaren-Miner. De esta manera, y si se refiere a un determinado periodo de tiempo, la función es invariable en el tiempo.

C.6 Métodos basados en la determinación de los valores de cálculo

C.6.1 Generalidades

1 El estado límite considerado podrá establecerse mediante un modelo de cálculo en términos de una o varias funciónes g(...) de un conjunto de variables X_1, X_2, ... X_n relativas a las acciones, las características de los materiales, etc. En este caso, la condición de ausencia del fallo de la estructura asociado con el estado límite considerado, se podrá expresar en la forma

$$g(X_1, X_2, ..., X_n) \geq 0 \qquad \text{(C.13)}$$

2 A efectos de la verificación del estado límite considerado, la condición (C.13) se podrá expresar en términos de los valores de cálculo de las variables

$$g(x_{1d}, x_{2d}, ..., x_{nd}) \geq 0 \qquad \text{(C.14)}$$

x_{1d}, x_{2d}, ..., x_{nd} valores de cálculo de las variables X_1, X_2, ..., X_n (según C.6.2).

C.6.2 Valores de cálculo según el método FORM

1 El valor de cálculo x_{id} de la variable X_i depende de:

a) los parámetros de la variable X_i;

b) el tipo de distribución probabilista supuesta;

c) el índice de fiabilidad, β, requerido para el estado límite y la situación de dimensionado considerados;

d) un factor α_i que describe la sensibilidad de la probabilidad de fallo, asociada con el estado límite y la situación de dimensionado considerados, con respecto a la variación de X_i.

2 Para una distribución arbitraria $F(x_i)$, los valores de cálculo se definen por

$$F(x_{id}) = \Phi(-\alpha_i \beta) \qquad \text{(C.15)}$$

Para variables X_i con una distribución normal, se obtiene

$$x_{id} = \mu_i (1 - \alpha_i \cdot \beta \cdot V_i) \qquad \text{(C.16)}$$

siendo

μ_i valor medio de la variable X_i

V_i coeficiente de variación de la variable X_i.

Para variables X_i con una distribución lognormal, se obtiene

$$x_{id} = \xi_i e^{(-\alpha_i \cdot \beta \cdot v_i)} \qquad \text{(C.17)}$$

donde

$$\xi_i = \frac{\mu_i}{\sqrt{1 + V_i^2}}$$

$$\nu_i = \sqrt{\ln\left(1 + V_i^2\right)}$$

Para valores pequeños de V_i, por ejemplo $V_i \leq 0{,}25$, se puede suponer:

$$\xi_i \approx \mu_i$$

$$\nu_i \approx V_i$$

C.6.3 Factores de sensibilidad según el método FORM

1 Si las variables aleatorias son estadísticamente independientes, los factores de sensibilidad, α_i, que se deben emplear en un análisis mediante el método FORM, tienen las siguientes propiedades:

$$-1 \leq \alpha_i \leq 1 \qquad \text{(C.18)}$$

$$\sum \alpha_i^2 = 1 \qquad \text{(C.19)}$$

2 En principio, los valores de α_i se deben determinar a partir de un análisis, mediante el método FORM, de un conjunto representativo de obras. Este procedimiento requiere unos cálculos iterativos laboriosos, por lo que no se presta para aplicaciones prácticas. Por este motivo, la tabla C.3 contiene un conjunto de valores normalizados para α_i, basados en la experiencia.

Tabla C.3 Valores normalizados para los factores de sensibilidad αi

	Variable X_i	**Factor de sensibilidad α_i**
Resistencia	Variable dominante de resistencia	0,8
	Otras variables de resistencia	0,4 · 0,8 = 0,32
Acciones / influencias	Acción / influencia dominante	- 0,7
	Otras variables relativas a acciones / influencias	- 0,4 · 0,7 = -0,28

Debido a la adopción de unas hipótesis conservadoras, los valores indicados en la tabla C.3 no cumplen la condición (C.19). Con el fin de limitar los errores cometidos al aplicar estos valores, se debe cumplir la siguiente condición:

$$0{,}16 < \frac{\sigma_{E1}}{\sigma_{R1}} < 6{,}6 \qquad \text{(C.20)}$$

siendo

σ_{E1} desviación típica de la variable correspondiente a la acción / influencia dominante

σ_{R1} desviación típica de la variable dominante de resistencia.

3 Al efectuar un análisis estructural, no es posible saber de antemano cuál de las variables se debe considerar como dominante. A estos efectos, se deberá efectuar el análisis adoptándo como dominante cada una de las variables, con el fin de deducir según cual de ellas se rige el problema.

C.7 El formato de los coeficientes parciales

C.7.1 Coeficientes parciales basados en valores de cálculo

1 Los métodos probabilistas implícitos que se utilizan normalmente en la práctica a efectos del dimensionado de las estructuras, no emplean directamente valores de cálculo para las variables, x_d. Las variables aleatorias se introducen mediante sus valores representativos (según 3), que se emplean con un conjunto de coeficientes parciales para las acciones e influencias y para la resistencia (según 4).

2 En la mayoría de los casos, la condición que debe cumplirse puede expresarse en los siguientes términos

$$g(x_d) = R_d - E_d \geq 0 \qquad \text{(C.21)}$$

siendo

E_d valor de cálculo de los efectos de las acciones / influencias

R_d valor de cálculo de la resistencia correspondiente.

3 Los valores de cálculo de los efectos de las acciones / influencias y de la resistencia, respectivamente, se pueden expresar a través de

$$E_d = E(\underline{F}_d, \underline{a}_d, \underline{\theta}_d, ...) \qquad \text{(C.22)}$$

$$R_d = R(\underline{f}_d, \underline{a}_d, \underline{\theta}_d, ...) \qquad \text{(C.23)}$$

siendo

F_d valores de cálculo de las acciones / influencias

a_d valores de cálculo de las dimensiones geométricas

θ_d valores de cálculo de los coeficientes de incertidumbre de los modelos

f_d valores de cálculo de las propiedades de los materiales.

4 Los valores de cálculo de las diferentes variables se determinan a partir de las siguientes relaciones

a) Valor de cálculo de una acción / influencia

$$F_d = \gamma_f \cdot F_k \qquad \text{(C.24a)}$$

$$F_d = \gamma_f \cdot \psi_0 \cdot F_k \qquad \text{(C.24b)}$$

siendo

F_k valor característico de una acción / influencia

γ_f coeficiente parcial para la misma acción / influencia

ψ_0 coeficiente para el valor de combinación de una acción variable.

b) Valor de cálculo de una propiedad de un material

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_m} \qquad \text{(C.25)}$$

siendo

f_k valor característico de una propiedad de un material

γ_m coeficiente parcial para la misma propiedad del material

c) Valor de cálculo de una dimensión geométrica

$$a_d = a_{nom} \pm \Delta a \qquad \text{(C.26)}$$

siendo

a_{nom} valor nominal de la dimensión

Δa desviación de la dimensión de su valor nominal

d) Valor de cálculo del coeficiente de incertidumbre de un modelo

Normalmente, los valores de cálculo de los coeficientes de incertidumbre de los modelos se introducen en los cálculos a través de los coeficientes parciales, respectivamente para el modelo de los efectos de las acciones, γ_{Ed}, y para el modelo de resistencia, γ_{Rd}:

$$E_d = \gamma_{Ed} \cdot E(\gamma_f \cdot F_k, \gamma_f \cdot \psi_0 \cdot F_k, a_{nom} \pm \Delta a, ...) \qquad \text{(C.27)}$$

$$R_d = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot R\left(\frac{f_k}{\gamma_m}, a_{nom} \pm \Delta a, ...\right) \qquad \text{(C.28)}$$

5 Los coeficientes parciales se podrán deducir a partir de los valores de cálculo de las variables, determinados por ejemplo según C.6, de acuerdo con las relaciones:

$$\gamma_f = \frac{F_d}{F_k} \tag{C.29}$$

$$\gamma_m = \frac{f_k}{f_d} \tag{C.30}$$

6 Desde un punto de vista práctico, el formato anterior para la determinación de los valores de cálculo de los efectos de las acciones y de la resistencia conduce a cálculos laboriosos. Por este motivo se podrán adoptar las siguientes simplificaciones:

a) para los efectos de las acciones y de las influencias

$$E_d = E\left(\gamma_F \cdot F_k, a_{nom}\right) \tag{C.31}$$

b) para la resistencia

$$R_d = R\left(\frac{f_k}{\gamma_M}, a_{nom}\right) \text{ o alternativamente} \tag{C.32a}$$

$$R_d = \frac{1}{\gamma_R} \cdot R\left(f_k, a_{nom}\right) \tag{C.32b}$$

En estos casos, los coeficientes parciales γ_F y γ_M o γ_R deberán calibrarse de modo que (C.31) y (C.32) conduzcan a los mismos resultados que las ecuaciones originales.

C.7.2 Coeficientes parciales calibrados

1 Partiendo de un formato arbitrario de coeficientes parciales, el objetivo de la calibración consiste en la deducción de coeficientes parciales de modo que la fiabilidad estructural resultante se desvíe lo menos posible de la fiabilidad requerida y predefinida.

2 El proceso de calibración consta de los siguientes pasos:

a) Definición de un formato de coeficientes parciales

$$g\left(\frac{f_{k1}}{\gamma_{m1}}, \frac{f_{k2}}{\gamma_{m2}}, ..., \gamma_{f1} \cdot F_{k1}, \gamma_{f2} \cdot F_{k2}, ...\right) \geq 0 \tag{C.33}$$

siendo

f_{ki} valor característico de una propiedad (por ejemplo la resistencia) del material i

γ_{mi} coeficiente parcial para la misma propiedad del material i

F_{kj} valor característico (representativo) de la acción j

γ_{fj} coeficiente parcial para la acción j

b) Selección de un conjunto de n elementos estructurales representativos que cubran adecuadamente el campo de aplicación de los modelos a calibrar en cuanto a:

- los tipos de acciones;
- las dimensiones de las estructuras;
- los materiales constitutivos;
- los estados límite considerados.

c) Dimensionado de los n elementos estructurales representativos, aplicando un conjunto de coeficientes parciales (γ_{m1}, γ_{m2}, ..., γ_{f1}, γ_{f2}, ...). A cada uno de los elementos así dimensionados le corresponderá un nivel de fiabilidad, expresado por ejemplo en términos de índice β que se desviará más o menos de la fiabilidad requerida y predefinida, β_t.

d) La desviación entre el nivel de fiabilidad de los n elementos y la fiabilidad requerida se podrá expresar en los siguientes términos

$$D = \sum_{k=1}^{n} \left[\beta_k\left(\gamma_{mi}, \gamma_{fj}\right) - \beta_t\right]^2 \tag{C.34}$$

siendo

β_t valor requerido del índice de fiabilidad

β_k índice de fiabilidad correspondiente al elemento k, dimensionado con los coeficientes parciales (γ_{m1}, γ_{m2}, ..., γ_{f1}, γ_{f2}, ...).

e) Selección del conjunto de coeficientes parciales que conduzca al valor mínimo de D.

f) Alternativamente, el nivel de fiabilidad se podrá expresar en términos de la probabilidad de fallo.

3 En los casos en los que los n elementos estructurales tengan importancias relativas desiguales, D se podrá determinar introduciendo unos factores de importancia. Los valores que excedan el valor admisible de la probabilidad de fallo deberían penalizarse más que los valores que se queden por debajo de la probabilidad de fallo admisible.

Anejo D Evaluación estructural de edificios existentes

D.1 Generalidades

D.1.1 Ámbito de aplicación

1 Este Anejo define las bases y los procedimientos para la evaluación estructural de edificios existentes, en concordancia con los principios del análisis de la seguridad estructural. Si bien los conceptos básicos para el análisis de la seguridad estructural de un edificio están establecidos en el Anejo C, en la evaluación estructural de edificios existentes puede existir un mayor grado de diferenciación de la seguridad que para el dimensionado estructural de edificios de nueva construcción, debido a consideraciones de tipo económico, social o medioambiental.

2 Los criterios generales establecidos en este Anejo son aplicables para la evaluación estructural de cualquier tipo de edificio existente, si se cumple alguna de las siguientes condiciones:

a) se ha concebido, dimensionado y construido de acuerdo con las reglas en vigor en el momento de su realización;

b) se ha construido de acuerdo con la buena práctica, la experiencia histórica y la práctica profesional aceptada.

3 La evaluación de la seguridad estructural en caso de incendio está fuera del alcance de este anejo. No obstante, la evaluación de la seguridad estructural tras un incendio puede realizarse de acuerdo con las reglas aquí incluidas.

D.1.2 Consideraciones previas

1 No es adecuada la utilización directa de las normas y reglas establecidas en este CTE en la evaluación estructural de edificios existentes, construidos en base a reglas anteriores a las actuales para los edificios de nueva construcción, por los siguientes motivos:

c) toda evaluación debe realizarse teniendo en cuenta las características y las condiciones reales del edificio (lo que normalmente no está contemplado en las normas de dimensionado que incorporan la incertidumbre asociada al proceso);

d) las normas actuales suelen estar basadas en exigencias diferentes y generalmente más estrictas que las vigentes en el momento en que se proyectó el edificio, por lo cual, muchos edificios existentes se clasificarían como no fiables si se evaluaran según las normas actuales;

e) se puede considerar, en muchos casos, un período de servicio reducido, lo que se traduce también en una reducción de las exigencias;

f) se pueden emplear modelos de análisis más afinados (a través inspecciones, ensayos, mediciones in situ o consideraciones teóricas), lo que puede aportar beneficios adicionales.

D.2 Criterios básicos para la evaluación

D.2.1 Procedimiento

1 La evaluación estructural de un edificio existente se realizará, normalmente, mediante una verificación cuantitativa de su capacidad portante y, en su caso, de su aptitud al servicio, teniendo en cuenta los procesos de deterioro posibles. Para ello, puede adoptarse un procedimiento de evaluación por fases que tenga en cuenta las condiciones actuales del edificio, definiendo cada una de las fases en función de las circunstancias y condiciones específicas de la misma tales como la disponibilidad del proyecto original, la observación de daños estructurales, el uso del edificio, etc,.. y de los objetivos de la evaluación (D.2.3). En cada una de las fases se incrementa la precisión de las hipótesis para la evaluación, así como el grado de detalle de los métodos de análisis respecto de la fase anterior.

2 En edificios en los que no resulte posible o sea poco fiable una verificación cuantitativa, o cuando el edificio haya demostrado un comportamiento satisfactorio en el pasado, podrá realizarse una evaluación cualitativa de la capacidad portante y de la aptitud al servicio de acuerdo con los criterios enumerados en D.6.

3 El proceso de evaluación se considera finalizado cuando en alguna de las fases se alcanza una conclusión inequívoca sobre la seguridad estructural del edificio o sobre las medidas a adoptar. En

los casos en los que no resulte posible verificar una capacidad portante o una aptitud al servicio adecuada, el informe final debe contener también las recomendaciones necesarias sobre las medidas a adoptar.

D.2.2 Fases de la evaluación

1 Con carácter general pueden establecerse tres fases:

1ª Fase: Evaluación preliminar, que incluye en general:
- la recopilación y estudio de la documentación disponible y, en su caso, el levantamiento de planos;
- una inspección preliminar;
- la elaboración de las bases para la evaluación;
- la verificación preliminar de la capacidad portante y de la aptitud al servicio de los elementos estructurales principales.

2ª Fase: Evaluación detallada, que incluye en general:
- la determinación del estado del edificio mediante una inspección detallada, incluida la cuantificación de posibles daños;
- la actualización de la geometría y de los planos del edificio;
- la actualización de las características de los materiales;
- la actualización de las acciones;
- la actualización de las bases para la evaluación;
- el análisis estructural;
- la verificación de la capacidad portante y de la aptitud al servicio.

3ª Fase: Evaluación avanzada, con métodos de análisis de la seguridad, que incluye en general:
- la determinación de las situaciones de dimensionado determinantes;
- la adquisición, en su caso, de más datos sobre las características de la estructura o de los materiales, o sobre las acciones;
- la determinación de los modelos probabilistas de las variables;
- el análisis estructural;
- la verificación con métodos de seguridad.

D.2.3 Especificación de los objetivos

1 Antes del inicio de la evaluación deben establecerse claramente los objetivos de la misma, en términos de las prestaciones futuras del edificio, definidas éstas a partir de las siguientes exigencias:

a) el nivel de seguridad en relación con la resistencia y la estabilidad estructural;

b) la garantía de continuidad del funcionamiento en edificios de especial importancia, tales como hospitales, centros de comunicación o similares;

c) las exigencias específicas de la propiedad en relación con la protección de los bienes (protección frente a pérdidas económicas) o con la aptitud al servicio. El nivel de estas exigencias se basa normalmente en requisitos funcionales específicos y en criterios de optimización.

D.3 Recopilación de información

D.3.1 Determinación del estado actual

1 Previamente a la evaluación de un edificio existente se determinará el estado actual del mismo, recabando toda la información relativa a:

a) Las acciones de todo tipo, directas o indirectas (influencias) con los siguientes criterios:
- El peso propio de los elementos podrá comprobarse en obra, adaptándose en consecuencia, los valores adoptados inicialmente, de acuerdo con la información previa;
- Las sobrecargas de uso dependerán del uso futuro de la obra, pudiendo adoptarse, a efectos de la evaluación modelos específicos adaptados al caso estudiado (normalmente menos conservadores que los modelos correspondientes según el CTE). En estos casos, se adoptarán disposiciones adicionales con el fin de asegurar que no se sobrepasen los valores extremos establecidos;

- Las acciones climáticas a tener en cuenta pueden determinarse a partir de mediciones directas efectuadas en estaciones meteorológicas representativas para la obra objeto de la evaluación estructural, durante un periodo de tiempo adecuado. En este caso, en la determinación de estas acciones se tendrá en cuenta que sus efectos extremos no se pueden deducir directamente de los valores medidos. En el ajuste de los valores extremos se podrá tener en cuenta el periodo de servicio restante;
- Se tendrán en cuenta las influencias ambientales de origen físico, químico o biológico que puedan afectar a las características de los materiales o a la resistencia de los elementos estructurales, así como los posibles cambios en las mismas que puedan producirse como consecuencia de una intervención. En los casos en los que existan incertidumbres, se determinarán mediante inspecciones, ensayos o mediciones.

b) Las dimensiones de la obra, recopilando los datos de la misma y de los elementos estructurales, cuando la información disponible carezca de ellos, cuando se hayan realizado modificaciones y no exista documentación fiable al respecto, o cuando se observen discrepancias entre la información disponible y la situación real.

c) Características de los materiales empleados. Cuando las características de los materiales no se puedan deducir de manera fiable a partir de la información disponible, se determinarán mediante ensayos no destructivos o destructivos a partir de muestreos estadísticamente representativos, que tengan en cuenta el uso del edificio, así como las influencias ambientales.

d) El sistema estático y el comportamiento estructural, con los siguientes criterios:
   - se comprobarán en obra las condiciones de todo tipo que resulten determinantes para el comportamiento estructural, como las condiciones de apoyo, empotramientos, libertad de movimiento de apoyos y juntas o la capacidad de deformación.
   - cuando se determine experimentalmente el comportamiento estructural (estático o dinámico) de un edificio, en la evaluación e interpretación de los resultados se tendrá en cuenta que los ensayos se realizan con cargas de servicio, mientras que la capacidad portante se debe evaluar para estados más avanzados de carga.

e) los daños y anomalías existentes: deformaciones, desplazamientos, corrosión, fatiga y envejecimiento en general.

D.3.2 Evaluación de los ensayos y representación de los resultados

1 Cuando el número de resultados sea reducido, la aplicación de los métodos clásicos de la estadística puede conducir a valores conservadores, debido a la influencia de los errores de estimación. En estos casos, si se dispone de información previa, ésta podría combinarse con los resultados obtenidos, para mejorar la información.

2 La representación de los resultados obtenidos en la evaluación de los ensayos o de las mediciones dependerá del método de análisis empleado, semi-probabilista o probabilista.

3 Cuando se realice un análisis semi-probabilista, el objetivo de la evaluación de los ensayos o de las mediciones será la determinación del valor representativo de la variable correspondiente. La definición del valor representativo depende de la variable contemplada, y debe ser consistente con la definición del coeficiente parcial correspondiente. Salvo que exista información en sentido contrario, la definición del valor representativo de una variable se corresponderá con lo indicado en 3.3.

4 Cuando se realice un análisis probabilista, las variables que intervienen en una verificación se representarán mediante las correspondientes funciones de densidad de probabilidad. En muchos casos, estas funciones pueden ser caracterizadas a través de sus principales parámetros (valor medio, desviación típica, tipo de distribución). A falta de un análisis más detallado, a las variable se les asignará el mismo tipo de distribución que se haya tenido en cuenta en la calibración de los modelos para las acciones y para la resistencia estructural de edificios de nueva construcción (Anejo C). .

D.3.3 Bases de cálculo

1 Se deben revisar y, según el caso, se adaptar o completar las situaciones de dimensionado que se hayan considerado en el proyecto original, teniendo en cuenta los daños y anomalías observados, así como la incidencia que estos puedan tener sobre los posibles mecanismos de fallo. Cuando no se disponga de las bases de cálculo del proyecto original, se establecerán las situaciones de dimensionado a efectos de la evaluación.

2 Las situaciones de dimensionado, así como las medidas previstas para alcanzar las exigencias relativas a la capacidad portante y a la aptitud al servicio deber reflejarse en las bases de cálculo actualizadas.

D.3.4 Control de riesgos: inspección y planificación de medidas

1 Podrán considerarse aceptables ciertos riesgos, bien por la baja frecuencia de ocurrencia de las situaciones que estén en su origen, o bien porque las consecuencias en caso de ocurrencia de una de estas situaciones resulten suficientemente pequeñas. La aceptación de estos riesgos requiere la adopción de medidas adicionales de inspección y de control (observación, inspecciones periódicas, mediciones de control, monitorización), cuyo objetivo consistirá en la detección de los posibles daños o anomalías en un estado temprano, para poder adoptar las medidas adecuadas que mitiguen los riesgos antes de que se pueda producir un evento no deseado. Los riesgos aceptados se reflejarán en la memoria.

2 El alcance y la intensidad de las medidas de inspección y de control, así como las medidas para la reducción de las consecuencias de los riesgos aceptados se determinarán en función de las características y de la importancia de la obra, así como en función del tipo y de las características de dichos riesgos.

D.4 Análisis estructural

1 Para el análisis estructural de un edificio existente deben emplearse modelos que reflejen adecuadamente el estado actual del edificio y tengan en cuenta los procesos de deterioro que puedan resultar importantes. Las incertidumbres asociadas con los modelos se tendrán en cuenta mediante coeficientes parciales adecuados en análisis semiprobabilistas y mediante la introducción de una variable del modelo en análisis probabilistas.

2 La influencia de los efectos de escala o de forma, de la duración de la aplicación de una carga, de la temperatura o de la humedad se tendrán en cuenta mediante coeficientes de conversión.

3 En el análisis se tendrá en cuenta el nivel de incertidumbre relativo a las condiciones y al estado de los elementos. A estos efectos, se podrá ajustar la dispersión asumida, entre otros, para la capacidad portante de los elementos, o para las dimensiones de sus secciones transversales.

4 Si se observa el deterioro estructural de un edificio existente, deben identificarse los mecanismos de deterioro y determinarse modelos de deterioro que permitan predecir el comportamiento futuro del mismo.

D.5 Verificación

D.5.1 Generalidades

1 Las exigencias relativas a la capacidad portante y a la aptitud al servicio dependerán del periodo de servicio restante que se estime. Las verificaciones de la capacidad portante y de la aptitud al servicio se efectuarán sobre la base de las situaciones de dimensionado actualizadas.

2 La evaluación de la capacidad portante de un edificio existente se efectuará teniendo en cuenta su capacidad de deformación así como su modo de fallo previsible. En particular, se determinará si es posible una redistribución de los esfuerzos y si a un inminente fallo le precederían deformaciones importantes.

3 En los casos en los que, durante el periodo de servicio restante, puedan producirse situaciones extraordinarias, éstas se tendrán en cuenta en la verificación de la capacidad portante.

4 Si durante el periodo de servicio restante actúan sobre el edificio cargas variables repetidas o si se pueden producir vibraciones por resonancia, se realizará una verificación de la seguridad frente a la fatiga.

D.5.2 Verificación de la capacidad portante

D.5.2.1 Evaluación preliminar

1 La verificación de la capacidad portante para el periodo de servicio restante se realizará a partir de los valores representativos actualizados de las acciones y de la información actualizada sobre la estructura, adoptando los coeficientes parciales de seguridad para las acciones y para la resistencia de acuerdo con lo establecido en el apartado 4.2 y en los documentos básicos de seguridad estructural de los diferentes materiales.

D.5.2.2 Evaluación detallada

1 La verificación de la capacidad portante para el periodo de servicio restante se realizará a partir de los valores representativos actualizados de las acciones y de la información actualizada sobre la estructura, adoptando coeficientes parciales de seguridad particularizados para las acciones y para la resistencia. Para la determinación de dichos coeficientes particularizados se tendrá en cuenta la influencia de los cambios –debidos a la adquisición de información– en las incertidumbres asociadas con las variables.

2 Los coeficientes parciales particularizados se calibrarán para que sean consistentes con el nivel requerido de seguridad estructural. Normalmente serán menos conservadores que los coeficientes correspondientes incluidos en los los documentos básicos correspondientes para el dimensionado en edificios de nueva construcción.

D.5.2.3 Evaluación avanzada con métodos probabilistas

1 La seguridad estructural de un edificio podrá cuantificarse en términos de su fiabilidad, que tendrá en cuenta las incertidumbres asociadas con las distintas variables básicas. Dicha fiabilidad se representa a través de una probabilidad de fallo.

2 En el estado actual de los conocimientos no es posible definir un valor único para la probabilidad de fallo admisible. Se considera que un edificio correctamente dimensionado y construido según un conjunto consistente de reglas para la determinación de la resistencia y de las acciones, correspondientes al estado de la práctica en un determinado momento, es fiable en este momento y en el marco de dichas reglas.

3 La evaluación estructural de un edificio existente con métodos probabilistas, requerirá los siguientes pasos:

a) dimensionado estricto de la estructura que quiere evaluarse según un conjunto consistente de normas de acciones y de resistencia que estén en vigor;

b) determinación de la probabilidad de fallo de la estructura dimensionada en a), considerando para las variables básicas los parámetros que están implícitos en las especificaciones de las normas empleadas. La probabilidad de fallo así obtenida es la probabilidad de fallo admisible según las normas empleadas;

c) determinación de la probabilidad de fallo de la estructura que quiere evaluarse, utilizando los parámetros actualizados de las variables que intervienen en los cálculos.

4 La estructura evaluada tiene una seguridad estructural adecuada si la probabilidad de fallo de la estructura evaluada es menor o igual a la probabilidad de fallo admisible.

D.5.3 Verificación de la aptitud al servicio

1 Una estructura o un elemento estructural tiene un comportamiento adecuado para el periodo de servicio restante en relación con un determinado criterio, si para las situaciones de dimensionado consideradas se cumple que el efecto de las acciones no alcanza el valor límite establecido para dicho efecto. La verificación se realizará a partir de los valores representativos actualizados de las acciones y de la información actualizada sobre la estructura.

2 Los efectos de las acciones se determinarán de acuerdo con los objetivos de la evaluación establecidos, teniendo en cuenta los valores representativos actualizados de las acciones y de todas las influencias pertinentes, así como la información actualizada de la estructura. En ausencia de acuerdos específicos, estos efectos se determinarán según el apartado 4.3.

3 Los valores límite para los distintos efectos de las acciones deben estar en concordancia con el objetivo de cada verificación y se determinarán para cada caso. En ausencia de acuerdos específicos, se adoptarán como valores límite los valores nominales según 4.3.

4 La verificación de la aptitud al servicio se podrá realizar mediante métodos probabilistas, utilizando los parámetros actualizados de las variables que intervienen en los cálculos.

D.6 Evaluación cualitativa

D.6.1 Capacidad portante

1 Puede suponerse que un edificio que haya sido dimensionado y construido de acuerdo con las reglas de normas antiguas, tendrá una capacidad portante adecuada, si se cumplen las siguientes condiciones:

a) el edificio se ha utilizado durante un periodo de tiempo suficientemente largo sin que se hayan producido daños o anomalías (desplazamientos, deformaciones, fisuras, corrosión, etc.);

b) una inspección detallada no revele ningún indicio de daños o deterioro;

c) la revisión del sistema constructivo permita asegurar una transmisión adecuada de las fuerzas, especialmente a través de los detalles críticos;

d) teniendo en cuenta el deterioro previsible así como el programa de mantenimiento previsto se puede anticipar una durabilidad adecuada;

e) durante un periodo de tiempo suficientemente largo no se han producido cambios que pudieran haber incrementado las acciones sobre el edificio o haber afectado su durabilidad;

f) durante el periodo de servicio restante no se prevean cambios que pudieran incrementar las acciones sobre el edificio o afectar su durabilidad de manera significativa.

2 Una evaluación cualitativa de la capacidad portante de un edificio existente puede ser insuficiente para situaciones de dimensionado extraordinarias.

3 El comportamiento de un edificio cuya capacidad portante haya sido evaluada cualitativamente se controlará periódicamente durante el periodo de servicio restante. Para ello se emplearan los medios que se estimen necesarios, dependiendo de las características de la estructura, así como de las acciones e influencias que actúen sobre ella y de su estado.

D.6.2 Aptitud al servicio

1 Un edificio que haya sido dimensionado y construido de acuerdo con las reglas de normas antiguas podrá considerarse apto para el servicio, si se cumplen las siguientes condiciones:

a) el edificio se ha comportado satisfactoriamente durante un periodo de tiempo suficientemente largo sin que se han producido daños o anomalías, y sin que se han producido deformaciones o vibraciones excesivas;

b) una inspección detallada, no revela ningún indicio de daños o deterioro, ni de deformaciones, desplazamientos o vibraciones excesivas;

c) durante el periodo de servicio restante no se prevean cambios que puedan alterar significativamente las acciones sobre el edificio o afectar su durabilidad;

d) teniendo en cuenta el deterioro previsible así como el programa de mantenimiento previsto se pueda anticipar una adecuada durabilidad.

D.7 Resultados de la evaluación

1 Los resultados de la evaluación se documentarán en un informe que incluirá los trabajos efectuados, que traten al menos los siguientes aspectos:

a) objetivos de la evaluación;

b) descripción del edificio y de sus elementos estructurales; síntomas y lesiones;

c) recopilación de información y adquisición de datos:

d) documentación recopilada y analizada;

e) objetivos y planificación;

f) realización de inspecciones, catas y ensayos;

g) resultados;

h) análisis;

i) verificación;

j) diagnóstico;

k) opciones de intervención;

l) recomendaciones.

2 Cuando se demuestre una seguridad estructural adecuada, el edificio se podrá seguir usando en las condiciones establecidas. En estos casos, se definirá un programa de inspección y de mantenimiento en concordancia con las características y la importancia de la obra.

3 Cuando no pueda demostrarse una seguridad estructural adecuada, los resultados de la evaluación se podrán utilizar para la elaboración de las recomendaciones oportunas sobre las medidas a adoptar. Según el caso, estas medidas podrán ser técnico-administrativas o constructivas. En algunos

casos, las conclusiones de una evaluación preliminar pueden aconsejar la adopción de medidas preventivas de aseguramiento estructural del edificio (D.8).

4 Las medidas a adoptar para asegurar, restablecer o mantener la seguridad estructural de un edificio deben ser planificadas adecuadamente.

D.8 Medidas

D.8.1 Medidas de aseguramiento estructural

1 En el momento en el que la evaluación realizada así lo aconseje, especialmente en los casos en los que no se pueda demostrar una seguridad adecuada, se adoptarán medidas de aseguramiento estructural del edificio, tales como la restricción del uso del mismo, el apeo provisional de elementos estructurales, la puesta fuera de servicio y cierre de la obra o la evacuación de las zonas que pudieran estar afectadas por un posible derrumbe, según corresponda. El objetivo de las medidas de aseguramiento será primordialmente la protección inmediata de las personas o del medio ambiente.

D.8.2 Medidas técnico-administrativas

1 En función de los resultados obtenidos en una evaluación y para controlar, modificar o atenuar los riesgos de origen estructural, puede resultar adecuada la adopción de medidas técnico – administrativas como el control (permanente o periódico) del comportamiento estructural o de las condiciones de utilización, la limitación en la utilización del edificio, la instalación de dispositivos automáticos de aviso o de control activo, la puesta a punto de medidas de emergencia o la introducción de esquemas de evacuación. Dichas medidas se establecerán para cada caso, teniendo en cuenta la importancia de la obra, el riesgo para las personas o para el medio ambiente, el modo de rotura previsible (dúctil o frágil), las posibilidades de control y limitación de los daños, las distintas alternativas técnicamente viables y el costo absoluto o relativo al incremento de seguridad.

D.8.3 Medidas constructivas.

1 Según los resultados de la evaluación, puede resultar necesaria la adopción de medidas constructivas que incrementen la seguridad estructural de forma que se cumplan las exigencias acordes con los objetivos establecidos para el periodo de servicio futuro, tales como el incremento o reducción de la resistencia de elementos o de secciones, de la rigidez o de la masa, el incremento de la capacidad de deformación, la instalación de amortiguadores o el cambio del sistema estático.

2 Los elementos de refuerzo de una estructura se dimensionarán según las especificaciones para el dimensionado estructural de edificios de nueva construcción. Alternativamente, las verificaciones relativas a los elementos de refuerzo se podrán basar en una aplicación directa de los métodos de análisis de la seguridad.