



Anejo 18

Bases de cálculo



Contenido

1	GENERALIDADES.....	699
1.1	ALCANCE.....	699
1.2	NORMATIVA DE REFERENCIA	699
1.3	HIPÓTESIS DE TRABAJO.....	699
1.4	TÉRMINOS Y DEFINICIONES.....	699
1.4.1	<i>Términos de uso común en los anejos del Código Estructural</i>	<i>699</i>
1.4.2	<i>Términos específicos relativos al proyecto en general</i>	<i>700</i>
1.4.3	<i>Términos relativos a acciones.....</i>	<i>702</i>
1.4.4	<i>Términos relativos a las propiedades de materiales y productos.....</i>	<i>703</i>
1.4.5	<i>Términos relativos a datos geométricos.....</i>	<i>703</i>
1.4.6	<i>Términos relativos al análisis estructural</i>	<i>704</i>
1.5	NOTACIÓN	705
2	REQUISITOS	708
2.1	REQUISITOS BÁSICOS	708
2.2	GESTIÓN DE LA FIABILIDAD	709
2.3	VIDA ÚTIL.....	710
2.4	DURABILIDAD.....	710
2.5	GESTIÓN DE LA CALIDAD	711
3	PRINCIPIOS DE CÁLCULO DE LOS ESTADOS LÍMITE.....	711
3.1	GENERALIDADES	711
3.2	SITUACIONES DE PROYECTO.....	712
3.3	ESTADOS LÍMITE ÚLTIMOS.....	712
3.4	ESTADOS LÍMITE DE SERVICIO.....	712
3.5	CÁLCULO DE LOS ESTADOS LÍMITE.....	713
4	VARIABLES BÁSICAS.....	714
4.1	ACCIONES Y CONDICIONES AMBIENTALES	714
4.1.1	<i>Clasificación de las acciones</i>	<i>714</i>
4.1.2	<i>Valores característicos de las acciones.....</i>	<i>714</i>
4.1.3	<i>Otros valores representativos de las acciones variables</i>	<i>715</i>
4.1.4	<i>Representación de las acciones de fatiga.....</i>	<i>716</i>
4.1.5	<i>Representación de las acciones dinámicas.....</i>	<i>716</i>
4.1.6	<i>Acciones geotécnicas.....</i>	<i>716</i>
4.1.7	<i>Condiciones ambientales.....</i>	<i>717</i>
4.2	PROPIEDADES DE MATERIALES Y PRODUCTOS	717
4.3	DATOS GEOMÉTRICOS.....	718
5	ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y CÁLCULO ASISTIDO CON ENSAYOS	718
5.1	ANÁLISIS ESTRUCTURAL.....	718
5.1.1	<i>Modelización estructural</i>	<i>718</i>
5.1.2	<i>Acciones estáticas.....</i>	<i>718</i>
5.1.3	<i>Acciones dinámicas.....</i>	<i>719</i>
5.1.4	<i>Análisis estructural en caso de fuego</i>	<i>719</i>
5.2	CÁLCULO ASISTIDO CON ENSAYOS.....	720
6	COMPROBACIÓN POR EL MÉTODO DE LOS COEFICIENTES PARCIALES	720
6.1	GENERALIDADES	720
6.2	LIMITACIONES	721
6.3	VALORES DE CÁLCULO.....	721



6.3.1	Valores de cálculo de las acciones.....	721
6.3.2	Valores de cálculo de los efectos de las acciones.....	721
6.3.3	Valores de cálculo de las propiedades de materiales o productos.....	722
6.3.4	Valores de cálculo de los datos geométricos.....	723
6.3.5	Resistencia de cálculo.....	723
6.4	ESTADOS LÍMITE ÚLTIMOS.....	724
6.4.1	Generalidades.....	724
6.4.2	Comprobación del equilibrio estático y de la resistencia.....	725
6.4.3	Combinación de acciones (excepto para comprobaciones a fatiga).....	725
6.4.3.1	General.....	725
6.4.3.2	Combinación de acciones para situaciones de proyecto permanentes o transitorias (combinaciones fundamentales).....	726
6.4.3.3	Combinación de acciones para situaciones de proyecto accidentales.....	726
6.4.3.4	Combinación de acciones para situaciones de proyecto frente al sismo.....	727
6.4.4	Coefficientes parciales de seguridad para acciones y combinaciones de acciones.....	727
6.4.5	Coefficientes parciales para materiales y productos.....	727
6.5	ESTADOS LÍMITE DE SERVICIO.....	727
6.5.1	Comprobaciones.....	727
6.5.2	Criterios de servicio.....	727
6.5.3	Combinación de acciones.....	728
6.5.4	Coefficientes parciales para los materiales.....	728
APÉNDICE A.1 APLICACIÓN A EDIFICACIÓN.....		729
APÉNDICE A.2 APLICACIÓN EN PUENTES.....		729
APÉNDICE B RECOMENDACIONES PARA LA GESTIÓN DE LA FIABILIDAD ESTRUCTURAL EN TRABAJOS DE CONSTRUCCIÓN		730
B.1	ALCANCE Y CAMPO DE APLICACIÓN.....	730
B.2	NOTACIÓN.....	730
B.3	NIVEL DE FIABILIDAD.....	730
B.3.1	Clases de consecuencias.....	730
B.3.2	Diferenciación mediante valores de β	731
B.3.3	Diferenciación mediante medidas relativas a los coeficientes parciales.....	732
B.4	NIVELES DE SUPERVISIÓN DEL PROYECTO.....	732
B.5	INSPECCIÓN DURANTE LA EJECUCIÓN.....	733
B.6	COEFICIENTES PARCIALES DE SEGURIDAD PARA LAS PROPIEDADES DE RESISTENCIA.....	734
APÉNDICE C RECOMENDACIONES PARA EL CÁLCULO CON COEFICIENTES PARCIALES Y ANÁLISIS DE LA FIABILIDAD		735
C.1	ALCANCE Y CAMPO DE APLICACIÓN.....	735
C.2	NOTACIÓN.....	735
C.3	INTRODUCCIÓN.....	736
C.4	RESUMEN DE LOS MÉTODOS DE FIABILIDAD.....	736
C.5	ÍNDICE DE FIABILIDAD B.....	737
C.6	VALORES OBJETIVO DEL ÍNDICE DE FIABILIDAD B.....	738
C.7	ENFOQUE PARA LA CALIBRACIÓN DE LOS VALORES DE CÁLCULO.....	739
C.8	FORMATOS DE COMPROBACIÓN DE LA FIABILIDAD.....	741
C.9	COEFICIENTES PARCIALES.....	741
C.10	COEFICIENTES Ψ_0	742
APÉNDICE D RECOMENDACIONES PARA EL CÁLCULO ASISTIDO POR ENSAYOS.....		744
D.1	ALCANCE Y CAMPO DE APLICACIÓN.....	744
D.2	NOTACIÓN.....	744
D.3	TIPOS DE ENSAYOS.....	745
D.4	PLANIFICACIÓN DE LOS ENSAYOS.....	746
D.5	OBTENCIÓN DE LOS VALORES DE CÁLCULO.....	748
D.6	PRINCIPIOS GENERALES PARA LAS EVALUACIONES ESTADÍSTICAS.....	749
D.7	DETERMINACIÓN ESTADÍSTICA DE UNA PROPIEDAD.....	749



D.7.1	Generalidades.....	749
D.7.2	Evaluación mediante el valor característico.....	750
D.7.3	Evaluación directa del valor de cálculo para las comprobaciones en Estado Límite Último	751
D.8	DETERMINACIÓN ESTADÍSTICA DE MODELOS DE RESISTENCIA.....	751
D.8.1	Generalidades.....	751
D.8.2	Procedimiento de evaluación estándar (Método (a)).....	752
D.8.2.1	Generalidades.....	752
D.8.2.2	Procedimiento estándar	752
D.8.2.2.1	Paso 1: Desarrollar un modelo de cálculo	752
D.8.2.2.2	Paso 2: Comparar los valores experimentales y teóricos.....	753
D.8.2.2.3	Paso 3: Estimar el valor medio del factor de corrección b.....	753
D.8.2.2.4	Paso 4: Estimar el coeficiente de variación de los errores	753
D.8.2.2.5	Paso 5: Analizar la compatibilidad.....	754
D.8.2.2.6	Paso 6: Determinar los coeficientes de variación VX_i de las variables básicas	754
D.8.2.2.7	Paso 7: Determinar el valor característico r_k de la resistencia.....	754
D.8.3	Procedimiento de evaluación estándar (Método (b)).....	756
D.8.4	Uso de información previa adicional	756



1 Generalidades

1.1 Alcance

(1) Este anejo establece los principios y requisitos de seguridad, aptitud al servicio y durabilidad de las estructuras, describe las bases para su cálculo y comprobación y da directrices sobre aspectos relacionados con la fiabilidad estructural.

(2) Este anejo está concebido para ser utilizado junto con el resto del Código Estructural (articulado y anejos) para el diseño estructural de edificios y obras de ingeniería civil, incluyendo la resistencia al fuego, la ejecución y las estructuras provisionales.

NOTA: Para el cálculo de obras especiales (por ejemplo, instalaciones nucleares, presas, etc.) pueden ser necesarias disposiciones distintas a las recogidas en los anejos de este Código.

(4) Este anejo es de aplicación a la evaluación estructural de construcciones existentes, con vistas a proyectar reparaciones, modificaciones o a estudiar su cambio de uso.

1.2 Normativa de referencia

Las normas citadas en este anejo deben utilizarse en la versión indicada en el Anejo 1 del Código Estructural.

1.3 Hipótesis de trabajo

(1) Se considerará que un proyecto cumple con los requisitos, siempre y cuando se satisfagan los supuestos dados en este Código Estructural (véase el apartado 2).

(2) Las hipótesis generales de este anejo son:

- que la elección del sistema estructural y del procedimiento de cálculo de la estructura se ha realizado por personal debidamente cualificado y con experiencia;
- que la ejecución se lleva a cabo por personal con las capacidades y experiencia adecuadas;
- se asegura una supervisión y un control de calidad adecuados durante el proyecto y la ejecución de la obra, es decir, en las oficinas de proyecto, en fábrica, en las plantas y en la obra;
- que los materiales y productos de construcción se utilizan según se especifica en este Código Estructural.
- que la estructura se mantendrá de forma adecuada;
- que la estructura se utilizará de acuerdo con las hipótesis de proyecto.

1.4 Términos y definiciones

1.4.1 Términos de uso común en los anejos del Código Estructural

1.4.1.1 Obras de construcción. Todo aquello que sea construido o que sea resultado de operaciones de construcción.

NOTA: El término engloba tanto obras de edificación como de ingeniería civil. Se refiere a la obra completa, incluyendo los elementos estructurales, no estructurales y geotécnicos.

1.4.1.2 Tipo de obra de edificación o de ingeniería civil. Tipo de obra de construcción en la que se designa su finalidad, por ejemplo vivienda, muro de contención, edificio industrial, puente de carretera.

1.4.1.3 Tipo de construcción. Indicación del material estructural principal, por ejemplo, construcción de hormigón armado, de acero, de madera, de fábrica de albañilería, construcción mixta de acero y hormigón.



1.4.1.4 Método de ejecución. Modo en el que se va a llevar a cabo la ejecución de las obras, por ejemplo, ejecutado *in situ*, prefabricada, en voladizo.

1.4.1.5 Material de construcción. Material utilizado en la obra de construcción, por ejemplo hormigón, acero, madera, fábrica de albañilería.

1.4.1.6 Estructura. Combinación organizada de elementos conectados proyectados para soportar cargas y proporcionar la rigidez adecuada.

1.4.1.7 Elemento estructural. Parte de la estructura, físicamente identificable, por ejemplo un pilar, una viga, una losa, un pilote de cimentación.

1.4.1.8 Tipo de estructura. Disposición de elementos estructurales.

NOTA: Tipos de estructuras son, por ejemplo, pórticos, puentes colgantes.

1.4.1.9 Sistema estructural. Elementos portantes de un edificio o una obra de ingeniería civil y la forma en la que estos elementos funcionan juntos.

1.4.1.10 Modelo estructural. Esquematización sistema estructural utilizado para el análisis, el dimensionamiento y la comprobación.

1.4.1.11 Ejecución. Conjunto de actividades realizadas para completar físicamente la obra incluida la recepción, la inspección y la documentación correspondiente.

NOTA: El término incluye el trabajo en la obra; también puede referirse a la fabricación componentes fuera de la obra y su posterior colocación en la obra.

1.4.2 Términos específicos relativos al proyecto en general

1.4.2.1 Criterios de cálculo. Fórmulas cuantitativas que describen las condiciones que se deben cumplir para cada estado límite.

1.4.2.2 Situaciones de proyecto. Conjunto de condiciones físicas que representan las condiciones reales que se producen durante un determinado intervalo de tiempo para las que se debe demostrar, mediante el cálculo, que no se superan los estados límite correspondientes.

1.4.2.3 Situaciones transitorias de proyecto. Situación de proyecto que se da durante un periodo de tiempo mucho más corto que la vida útil de la estructura y que tiene una alta probabilidad de que ocurra.

NOTA: Una situación transitoria de proyecto se refiere a situaciones temporales de la estructura, de uso o exposición, por ejemplo durante la construcción o reparación.

1.4.2.4 Situación persistente de proyecto. Situación de proyecto que se da durante un periodo de tiempo del mismo orden que el de la vida útil de la estructura.

NOTA: En general se refiere a las condiciones normales de uso.

1.4.2.5 Situación accidental de proyecto. Situación de proyecto que implica condiciones excepcionales de la estructura o de su exposición, incluyendo incendio, explosión, impacto o fallo local.

1.4.2.6 Cálculo en caso de incendio. Cálculo de una estructura para satisfacer los requisitos de comportamiento en caso de incendio.

1.4.2.7 Situación sísmica de proyecto. Situación de proyecto que implica condiciones excepcionales de la estructura al estar sometida a efectos sísmicos.

1.4.2.8 Vida útil. Periodo de tiempo durante el cual se supone que una estructura o parte de ella va a ser utilizada para el fin previsto durante el que puedan realizarse operaciones de mantenimiento, sin ser necesarias grandes reparaciones.

1.4.2.9 Peligro potencial. Acontecimiento grave e inusual, por ejemplo una acción o fuerza natural anormal, una resistencia insuficiente, o una desviación excesiva de las dimensiones previstas.



1.4.2.10 Distribución de cargas. Identificación de la posición, magnitud y dirección de una acción libre.

1.4.2.11 Caso de carga. Distribuciones compatibles de cargas, conjuntos de deformaciones e imperfecciones que se considera que actúan simultáneamente con acciones fijas permanentes y variables para una determinada comprobación.

1.4.2.12 Estados límite. Estados más allá de los cuales la estructura deja de satisfacer los criterios de proyecto correspondientes.

1.4.2.13 Estados Límite Últimos. Estados asociados con el colapso o con otras formas similares de fallo estructural.

NOTA: Se corresponden normalmente con la resistencia máxima de la estructura o elemento estructural.

1.4.2.14 Estados Límite de Servicio. Estados que corresponden a condiciones por encima de las cuales no se cumplen los requisitos de aptitud al servicio especificados para una estructura o un elemento estructural.

1.4.2.14.1 Estados Límite de Servicio irreversibles. Estados Límite de Servicio en los que algunas de las consecuencias derivadas de las acciones que exceden los requisitos de aptitud al servicio permanecen tras desaparecer las acciones.

1.4.2.14.2 Estados Límite de Servicio reversibles. Estados Límite de Servicio en los que ninguna de las consecuencias derivadas de las acciones que exceden los requisitos de aptitud al servicio permanece tras desaparecer las acciones.

1.4.2.14.3 Criterios de aptitud al servicio. Criterios de cálculo para un Estado Límite de Servicio.

1.4.2.15 Capacidad portante. Capacidad de un elemento o componente, o de una sección transversal de un elemento o componente de una estructura para soportar acciones sin que se produzca el fallo, por ejemplo, resistencia a flexión, resistencia a pandeo, resistencia a tracción.

1.4.2.16 Resistencia. Propiedad mecánica de un material que indica su capacidad para resistir acciones, expresada normalmente en unidades de tensión.

1.4.2.17 Fiabilidad. Capacidad de una estructura o elemento estructural para cumplir con los requisitos específicos (incluida la vida útil) para los que ha sido proyectada. La fiabilidad se suele expresar en términos de probabilidad.

NOTA: La fiabilidad engloba la seguridad, la aptitud al servicio y la durabilidad de una estructura.

1.4.2.18 Nivel de fiabilidad. Medidas implantadas para la optimización socio-económica de los recursos empleados en las obras de construcción, teniendo en cuenta las consecuencias previstas en caso de fallo y el coste de las obras de construcción.

1.4.2.19 Variable básica. Parte de un conjunto específico de variables que representan las magnitudes físicas que caracterizan a las acciones y a las influencias ambientales, las magnitudes geométricas y las propiedades de los materiales incluyendo las propiedades del suelo.

1.4.2.20 Mantenimiento. Conjunto de actividades llevadas a cabo durante la vida útil de la estructura con el fin de que pueda cumplir con los requisitos de fiabilidad.

NOTA: Las actividades de reparación de la estructura tras un suceso accidental o un sismo quedan normalmente fuera del ámbito del mantenimiento.

1.4.2.21 Reparación. Actividades realizadas para conservar o restablecer la funcionalidad de una estructura que quedan fuera de la definición de mantenimiento.

1.4.2.22 Valor nominal. Valor establecido sin una base estadística, por ejemplo, sobre la experiencia adquirida o sobre consideraciones físicas.



1.4.3 Términos relativos a acciones

1.4.3.1 Acción (F)

- a) Conjunto de fuerzas (cargas) aplicadas a la estructura (acción directa).
- b) Conjunto de deformaciones o aceleraciones impuestas causadas, por ejemplo, por cambios de temperatura, cambios de humedad, asentamientos diferenciales o sismo (acción indirecta).

1.4.3.2 Efecto de una acción (E). Efecto de acciones (o efecto de una acción) sobre elementos estructurales (por ejemplo, esfuerzo, momento, tensión, deformación) o sobre la estructura completa (por ejemplo, deformación, rotación).

1.4.3.3 Acción permanente (G). Acción que previsiblemente va a actuar durante un periodo de referencia dado cuya variación (de magnitud) en el tiempo es despreciable o se produce siempre en el mismo sentido (monótona) hasta alcanzar un determinado valor límite.

1.4.3.4 Acción variable (Q). Acción cuya variación (de magnitud) en el tiempo no es despreciable ni monótona.

1.4.3.5 Acción accidental (A). Acción, normalmente de corta duración, pero de magnitud considerable, que es poco probable que actúe en una estructura determinada durante su vida útil.

NOTA 1: En muchos casos una acción accidental puede tener graves consecuencias si no se adoptan las medidas adecuadas.

NOTA 2: El impacto, la nieve, el viento y las acciones sísmicas pueden ser acciones variables o accidentales dependiendo de la información disponible sobre sus distribuciones estadísticas.

1.4.3.6 Acción sísmica (A_E). Acción que surge como consecuencia de movimientos sísmicos del terreno.

1.4.3.7 Acción geotécnica. Acción transmitida a la estructura por el terreno, los rellenos o las aguas subterráneas.

1.4.3.8 Acción fija. Acción que tiene una distribución y posición fijas sobre la estructura o el elemento estructural; su magnitud y dirección están determinadas inequívocamente para toda la estructura o elemento estructural si ambas, magnitud y dirección, lo están para un punto determinado de la mencionada estructura o elemento estructural.

1.4.3.9 Acción libre. Acción que puede tener varias distribuciones espaciales sobre la estructura.

1.4.3.10 Acción aislada. Acción que puede considerarse como estadísticamente independiente, en el tiempo y en el espacio, con respecto a cualquier otra acción que actúe sobre la estructura.

1.4.3.11 Acción estática. Acción que no causa una aceleración significativa de la estructura o de los elementos estructurales.

1.4.3.12 Acción dinámica. Acción que causa una aceleración significativa de la estructura o de los elementos estructurales.

1.4.3.13 Acción cuasi-estática. Acción dinámica representada por una acción estática equivalente en un modelo estático.

1.4.3.14 Valor característico de una acción (F_k). Principal valor representativo de una acción.

NOTA: En la medida en la que un valor característico pueda ser establecido mediante bases estadísticas, se le hará corresponder con una probabilidad de no ser excedido por el lado desfavorable durante un "periodo de referencia" que tenga en cuenta la vida útil de la estructura y la duración de la situación de proyecto.

1.4.3.15 Periodo de referencia. Periodo de tiempo que se utiliza como base para la evaluación estadística de acciones variables y, eventualmente, para acciones accidentales.



1.4.3.16 Valor de combinación de una acción variable ($\Psi_0 Q_k$). Valor escogido —en la medida que pueda determinarse sobre bases estadísticas— de manera que la probabilidad de que se superen los efectos causados por la combinación sea aproximadamente la misma que para el valor característico de una acción individual. Puede expresarse como una parte del valor característico utilizando el factor $\Psi_0 \leq 1$.

1.4.3.17 Valor frecuente de una acción variable ($\Psi_1 Q_k$). Valor determinado —en la medida que pueda determinarse sobre bases estadísticas— de manera que el tiempo total, dentro del periodo de referencia, durante el que dicho valor es superado es solo una pequeña parte de dicho periodo de referencia; o la frecuencia con la que se exceda está limitada a un valor dado. Puede expresarse como una parte del valor característico utilizando un factor $\Psi_1 \leq 1$.

NOTA: En el caso del valor frecuente de las acciones de tráfico con componentes múltiples, véanse los grupos de cargas de la reglamentación específica vigente.

1.4.3.18 Valor cuasi-permanente de una acción variable ($\Psi_2 Q_k$). Valor establecido de manera que el tiempo total durante el que va a ser excedido es una parte importante del periodo de referencia. Puede expresarse como una parte del valor característico utilizando un factor $\Psi_2 \leq 1$.

1.4.3.19 Valor de concomitancia de una acción variable (ΨQ_k). Valor de una acción variable que acompaña a la acción principal en una combinación.

NOTA: El valor de concomitancia de una acción variable puede ser el valor de combinación, el valor frecuente o el valor cuasi-permanente.

1.4.3.20 Valor representativo de una acción (F_{rep}). Valor utilizado para la verificación de un estado límite. Un valor representativo puede ser un valor característico (F_k) o un valor concomitante (ΨF_k).

1.4.3.21 Valor de cálculo de una acción (F_d). Valor obtenido al multiplicar el valor representativo por el coeficiente parcial (γ_f).

NOTA: El producto del valor representativo por el coeficiente parcial $\gamma_F = \gamma_{sd} \gamma_f$ se puede llamar también valor de cálculo de la acción (véase el apartado 6.3.2).

1.4.3.22 Combinación de acciones. Conjunto de valores de cálculo empleado para la verificación de la fiabilidad estructural de un estado límite bajo la acción simultánea de varias acciones.

1.4.4 Términos relativos a las propiedades de materiales y productos

1.4.4.1 Valor característico (X_k o R_k). Valor de una propiedad de un material o producto que tiene una determinada probabilidad de no ser alcanzado en una hipotética serie ilimitada de ensayos. Este valor corresponde, normalmente, a un cuantil especificado de la distribución estadística supuesta para esa propiedad del material o producto. En algunos casos, se utiliza un valor nominal como valor característico.

1.4.4.2 Valor de cálculo de una propiedad de un material o producto (X_d o R_d). Valor obtenido al dividir el valor característico por un coeficiente parcial γ_m o γ_M , o, en circunstancias especiales, por determinación directa.

1.4.4.3 Valor nominal de una propiedad de un material o producto (X_{nom} o R_{nom}). Valor utilizado normalmente como valor característico.

1.4.5 Términos relativos a datos geométricos

1.4.5.1 Valor característico de una propiedad geométrica (a_k). Valor que se corresponde normalmente con las dimensiones especificadas en el proyecto. En algunos casos, este valor puede corresponder a determinados cuantiles de la distribución estadística.

1.4.5.2 Valor de cálculo de una propiedad geométrica (a_d). Normalmente, un valor nominal. En algunos casos, este valor puede corresponder a determinados cuantiles de la distribución estadística.



NOTA: El valor de cálculo de una propiedad geométrica es, generalmente, igual al valor característico. El tratamiento puede, sin embargo, ser diferente en aquellos casos en los que el estado límite considerado sea muy sensible al valor de dicha propiedad geométrica, por ejemplo, cuando se esté considerando el efecto de las imperfecciones geométricas en el pandeo. En tales casos, el valor de cálculo se establecerá normalmente como un valor determinado directamente, por ejemplo, en una norma. Este valor puede también establecerse sobre una base estadística con un valor que se corresponda a un cuantil más apropiado (por ejemplo, un valor más raro) que el aplicado al valor característico.

1.4.6 Términos relativos al análisis estructural

NOTA: Las definiciones recogidas en este apartado no tienen por qué estar relacionadas necesariamente con términos utilizados en este anejo, pero se incluyen aquí con el fin de armonizar los términos relativos al análisis estructural recogidos en el Código Estructural.

1.4.6.1 Análisis estructural. Procedimiento o algoritmo para la determinación de los efectos de las acciones en cada punto de la estructura.

NOTA: El análisis estructural puede tener que hacerse en tres niveles utilizando distintos modelos: análisis global, análisis de elementos y análisis local.

1.4.6.2 Análisis global. Determinación, en una estructura, de un conjunto coherente de esfuerzos, momentos, o tensiones, que están en equilibrio con un determinado conjunto de acciones actuantes sobre la estructura, y que dependen de las propiedades geométricas, de las propiedades de la estructura y de las propiedades de los materiales.

1.4.6.3 Análisis elástico lineal de primer orden sin redistribución. Análisis elástico estructural basado en leyes lineales de tensión-deformación o momento-curvatura y realizado sobre la geometría inicial.

1.4.6.4 Análisis elástico lineal de primer orden con redistribución. Análisis elástico lineal en el que el cálculo estructural modifica los momentos y fuerzas internas de forma consecuente con las acciones exteriores dadas y sin un cálculo más explícito de la capacidad de giro.

1.4.6.5 Análisis elástico lineal de segundo orden. Análisis elástico lineal en el que los momentos y fuerzas internas se modifican para el cálculo estructural, en coherencia con las acciones externas dadas y sin cálculo explícito de la capacidad de rotación.

1.4.6.6 Análisis elástico no lineal de primer orden. Análisis estructural, realizado sobre la geometría inicial, que tiene en cuenta las propiedades de deformación no lineal de los materiales.

NOTA: El análisis no lineal de primer orden puede ser elástico con las hipótesis adecuadas, elástico-perfectamente plástico (véanse los apartados 1.4.6.8 y 1.4.6.9), elasto-plástico (véase el apartado 1.4.6.10) o rígido-plástico (véase el apartado 1.4.6.11).

1.4.6.7 Análisis no lineal de segundo orden. Análisis estructural, realizado sobre la geometría de la estructura deformada, que tiene en cuenta las propiedades de deformación no lineal de los materiales.

NOTA: En análisis no lineal de segundo orden puede ser elástico-perfectamente plástico o elasto-plástico.

1.4.6.8 Análisis elástico-perfectamente plástico de primer orden. Análisis estructural, realizado sobre la geometría inicial, basado en la relación momento-curvatura, que consta de una parte elástica lineal seguida de una parte plástica sin endurecimiento.

1.4.6.9 Análisis elástico-perfectamente plástico de segundo orden. Análisis estructural, realizado sobre la geometría de la estructura desplazada (o deformada), basado en la relación momento-curvatura, que consta de una parte elástica lineal seguida de una parte plástica sin endurecimiento.

1.4.6.10 Análisis elasto-plástico. Análisis estructural que utiliza las relaciones tensión-deformación o momento-curvatura que constan de una parte elástica lineal seguida de una parte plástica con o sin endurecimiento.



NOTA: Normalmente, se realiza sobre la geometría inicial de la estructura, pero se puede realizar también sobre la estructura desplazada (o deformada).

1.4.6.11 Análisis rígido-plástico. Análisis, realizado sobre la geometría inicial de la estructura, que utiliza teoremas de análisis límite para evaluar directamente la carga última.

NOTA: La ley de momento-curvatura se supone sin deformación elástica ni endurecimiento.

1.5 Notación

A los efectos de este anejo, son de aplicación los siguientes símbolos.

Letras latinas mayúsculas

A	Acción accidental
A_d	Valor de cálculo de una acción accidental
A_{Ed}	Valor de cálculo de una acción sísmica $A_{Ed} = \gamma_I A_{Ek}$
A_{Ek}	Valor característico de una acción sísmica
C_d	Valor nominal, o función, de ciertas propiedades de cálculo de los materiales
E	Efecto de las acciones
E_d	Valor de cálculo del efecto de las acciones
$E_{d,dst}$	Valor de cálculo del efecto de las acciones desestabilizadoras
$E_{d,stb}$	Valor de cálculo del efecto de las acciones estabilizadoras
F	Acción
F_d	Valor de cálculo de una acción
F_k	Valor característico de una acción
F_{rep}	Valor representativo de una acción
F_W	Fuerza del viento (símbolo general)
F_{wk}	Valor característico de la fuerza del viento
F_W^*	Fuerza del viento compatible con el tráfico rodado
F_W^{**}	Fuerza del viento compatible con el tráfico ferroviario
G	Acción permanente
G_d	Valor de cálculo de una acción permanente
$G_{d,inf}$	Valor inferior de cálculo de una acción permanente
$G_{d,sup}$	Valor superior de cálculo de una acción permanente
G_k	Valor característico de una acción permanente
$G_{k,j}$	Valor característico de una acción permanente j
$G_{kj,sup}$	Valor característico superior de una acción permanente j
$G_{kj,inf}$	Valor característico inferior de una acción permanente j
G_{set}	Acción permanente debida a los asientos diferenciales
P	Valor representativo correspondiente a la fuerza de pretensado (véanse los Anejos 19 a 21 del Código Estructural)



P_d	Valor de cálculo de la fuerza de pretensado
P_k	Valor característico de la fuerza de pretensado
P_m	Valor medio de la fuerza de pretensado
Q	Acción variable
Q_d	Valor de cálculo de una acción variable
Q_k	Valor característico de una sola acción variable
$Q_{k,l}$	Valor característico de la acción variable predominante l
$Q_{k,i}$	Valor característico de la acción variable concomitante i
Q_{Sn}	Valor característico de la acción de nieve
R	Resistencia
R_d	Valor de cálculo de la resistencia
R_k	Valor característico de la resistencia
X	Propiedad de un material
X_d	Valor de cálculo de una propiedad de un material
X_k	Valor característico de una propiedad de un material

Letras latinas minúsculas

a_d	Valores de cálculo de los datos geométricos
a_k	Valores característicos de los datos geométricos
a_{nom}	Valor nominal de los datos geométricos
d_{set}	Diferencia de asientos de una cimentación, o parte de la misma, respecto al nivel de referencia
u	Desplazamiento horizontal de una estructura o elemento estructural
w	Flecha vertical de un elemento estructural

Letras griegas mayúsculas

Δa	Cambio realizado a los datos geométricos nominales por necesidades concretas de proyecto, por ejemplo, valoración de los efectos debidos a imperfecciones
Δd_{set}	Incertidumbre vinculada a la evaluación del asiento de una cimentación, o parte de la misma

Letras griegas minúsculas

γ	Coficiente parcial (de seguridad o servicio)
γ_{bt}	Valor pico máximo de la aceleración de un tablero de puente para una vía de balasto
γ_{df}	Valor pico máximo de la aceleración de un tablero para una vía de fijación directa



γ_{Gset}	Coeficiente parcial para las acciones permanentes debidas a asientos, incluyendo las incertidumbres del modelo
γ_f	Coeficiente parcial de las acciones, que tiene en cuenta posibles desviaciones desfavorables de los valores de la acción respecto a los valores representativos
γ_F	Coeficiente parcial de las acciones, que tiene también en cuenta las incertidumbres del modelo y las variaciones dimensionales
γ_g	Coeficiente parcial de las acciones permanentes, que tiene en cuenta posibles desviaciones desfavorables de los valores de la acción respecto a los valores representativos
γ_G	Coeficiente parcial de las acciones permanentes, que tiene también en cuenta las incertidumbres del modelo y las variaciones dimensionales
$\gamma_{G,j}$	Coeficiente parcial para la acción permanente j
$\gamma_{Gj,sup}$	Coeficiente parcial para la acción permanente j para la determinación del valor superior de cálculo
$\gamma_{Gj,inf}$	Coeficiente parcial de seguridad para la acción permanente j para la determinación del valor inferior de cálculo
γ_I	Coeficiente de mayoración
γ_m	Coeficiente parcial de la propiedad de un material
γ_M	Coeficiente parcial de la propiedad de un material, que tiene también en cuenta las incertidumbres del modelo y las variaciones dimensionales
γ_P	Coeficiente parcial de las acciones de pretensado (véanse los Anejos 19 a 21 de este Código)
γ_q	Coeficiente parcial de las acciones variables, que tiene en cuenta posibles desviaciones desfavorables de los valores de la acción respecto a los valores representativos
γ_Q	Coeficiente parcial de las acciones variables, que tiene también en cuenta las incertidumbres del modelo y las variaciones dimensionales
$\gamma_{Q,i}$	Coeficiente parcial de la acción variable i
γ_{Rd}	Coeficiente parcial asociado a la incertidumbre del modelo de resistencia
γ_{Sd}	Coeficiente parcial asociado a la incertidumbre del modelo de la acción y/o su efecto
η	Factor de conversión
ξ	Coeficiente de reducción
Ψ_0	Coeficiente de combinación del valor de una acción variable
Ψ_1	Coeficiente para el valor frecuente de una acción variable
Ψ_2	Coeficiente para el valor cuasi-permanente de una acción variable



2 Requisitos

2.1 Requisitos básicos

(1) Una estructura debe ser proyectada y ejecutada de manera que, durante su vida útil, con unos niveles apropiados de fiabilidad y de forma económica,

- soporte todas las acciones e influencias susceptibles de actuar durante su ejecución y su uso, y
- se cumplan los requisitos de aptitud al servicio especificados para la estructura o el elemento estructural.

NOTA: Véanse también los apartados 1.4, 2.1(7) y 2.4(1).

(2) Una estructura debe proyectarse y calcularse para tener:

- una resistencia estructural,
- una aptitud al servicio, y
- una durabilidad

adecuadas.

(3) En caso de incendio, la resistencia estructural debe ser la adecuada para el periodo de tiempo requerido.

NOTA: Véase también la reglamentación específica vigente.

(4) Una estructura debe proyectarse y ejecutarse de manera que frente a sucesos como:

- explosiones,
- impactos, y
- las consecuencias de errores humanos, no sufra daños desproporcionados con respecto a la causa original.

NOTA 1: Los sucesos a tener en cuenta en el proyecto serán aquellos que se hayan acordado con el cliente y la autoridad competente.

(5) Deberán evitarse o limitarse los daños potenciales mediante la elección apropiada de una o varias de las siguientes medidas:

- prevenir, eliminar o reducir los riesgos a los que pueda estar sometida la estructura;
- escoger una forma estructural menos vulnerable a los riesgos considerados;
- elegir una forma y diseño estructural que pueda soportar adecuadamente la eliminación accidental de un elemento de la estructura, de una parte limitada de la misma, o la aparición de un daño localizado de tamaño aceptable;
- evitar, siempre que sea posible, sistemas estructurales que puedan colapsar sin previo aviso;
- haciendo solidarios entre sí los elementos estructurales.

(6) Estos requisitos básicos deberán cumplirse mediante:

- la elección de los materiales apropiados,
- adoptando un diseño y disposiciones constructivas adecuados, y
- especificando los procedimientos de control para el proyecto, la fabricación, la ejecución y el uso correspondientes al proyecto concreto.



(7) Las disposiciones del apartado 2 deben entenderse sobre la base de que el proyecto se ha realizado con las aptitudes y el cuidado apropiados, apoyados en el conocimiento y las buenas prácticas disponibles en el momento en el que se ha realizado el proyecto de la estructura.

2.2 Gestión de la fiabilidad

(1) La fiabilidad requerida para las estructuras objeto de este anejo debe alcanzarse:

- a) mediante un proyecto conforme con el Código Estructural, y
- b) mediante
 - una ejecución adecuada y
 - una gestión de la calidad.

NOTA: Véanse el apartado 2.2(5) y Apéndice B.

(2) Pueden adoptarse distintos niveles de fiabilidad:

- para la resistencia estructural,
- para la aptitud al servicio.

(3) La elección de los niveles de fiabilidad de una estructura debe tener en cuenta los factores adecuados, como:

- la posible causa y/o modo de alcanzar un estado límite,
- las posibles consecuencias de un fallo en términos de riesgo de pérdida de vidas humanas, daños personales, potenciales pérdidas económicas,
- la aversión pública al fallo,
- los costes y procedimientos necesarios para reducir el riesgo de fallo.

(4) Los niveles de fiabilidad a aplicar a una determinada estructura podrán especificarse por una de las siguientes formas:

- mediante la clasificación de la estructura en su conjunto,
- mediante la clasificación de sus componentes.

NOTA: Véase también el Apéndice B.

(5) La fiabilidad requerida en materia de resistencia estructural y aptitud al servicio, puede alcanzarse mediante combinaciones adecuadas de las siguientes medidas:

- a) medidas de prevención y protección (por ejemplo, implantación de barreras de seguridad, medidas activas y pasivas de protección contra incendio, protección frente a la corrosión como la pintura o la protección catódica),
- b) medidas relativas a los cálculos de proyecto:
 - valores representativos de las acciones,
 - la elección de coeficientes parciales,
- c) medidas relativas a la gestión de la calidad,
- d) medidas destinadas a la reducción de errores en el proyecto y la ejecución de la estructura, y de errores humanos groseros;
- e) otras medidas relacionadas con el proyecto:
 - los requisitos básicos,
 - el grado de robustez (integridad estructural),

- la durabilidad, incluida la determinación de la vida útil,
- el alcance y la calidad de los estudios previos de los suelos y las posibles influencias del medio ambiente,
- la precisión de los modelos mecánicos utilizados,
- los detalles constructivos,

f) ejecución eficiente, de acuerdo con lo establecido en el Código Estructural,

g) inspección y mantenimiento adecuados según los procedimientos especificados en los documentos del proyecto.

(6) En las circunstancias adecuadas, las medidas para prevenir las causas potenciales de fallo y/o para reducir sus consecuencias pueden intercambiarse, hasta cierto punto, siempre que se mantengan los niveles de fiabilidad requeridos.

2.3 Vida útil

(1) Deberá especificarse la vida útil.

NOTA: Las categorías recogidas, a título indicativo, en la tabla 2.1 pueden emplearse también para determinar los comportamientos que dependan del tiempo (por ejemplo, cálculos relativos a la fatiga). Véase también el Apéndice A.

Tabla 2.1 Vida útil nominal

Categoría de vida útil	Vida útil nominal (años)	Ejemplos
1	10	Estructuras temporales ⁽¹⁾
2	10 a 25	Partes reemplazables de la estructura, por ejemplo vigas carril, aparatos de apoyo
3	15 a 30	Estructuras agrícolas y similares
4	50	Estructuras de edificación y otras estructuras comunes
5	100	Estructuras de edificios monumentales, puentes y otras estructuras de ingeniería civil
(1) Las estructuras o partes de estructuras que pueden desmontarse con vistas a ser reutilizadas no deben considerarse como temporales.		

2.4 Durabilidad

Los criterios de durabilidad de las estructuras se recogen en los Capítulos 9 (para las estructuras de hormigón), 19 (para las estructuras de acero) y 29 (para las estructuras mixtas) de este Código Estructural.

(1) La estructura debe diseñarse de forma que su deterioro durante su vida útil no empeore el comportamiento de la estructura más de lo previsto, teniendo en cuenta el ambiente en el que se encuentra y el nivel de mantenimiento previsto.

(2) Con el fin de asegurar una durabilidad adecuada de la estructura, deben tenerse en cuenta los siguientes factores:



- el uso previsto y previsible de la estructura,
- los criterios de cálculo requeridos,
- las condiciones ambientales esperadas,
- la composición, propiedades y prestaciones de los materiales y productos,
- las propiedades del suelo,
- la elección del sistema estructural,
- la forma de los elementos y los detalles constructivos de la estructura,
- la calidad de la mano de obra y el nivel de control,
- las medidas de protección específicas,
- el mantenimiento previsto durante la vida útil.

NOTA: Los Anejos 19 a 32 de este Código especifican las medidas apropiadas para reducir el deterioro.

(3) Las condiciones ambientales deben identificarse en la fase de proyecto de forma que se pueda evaluar su importancia desde el punto de vista de la durabilidad y se puedan adoptar las medidas adecuadas para la protección de los materiales utilizados en la estructura.

2.5 Gestión de la calidad

(1) Con el fin de obtener una estructura que se corresponda con los requisitos y las hipótesis realizadas en el cálculo, se deberán implantar unas medidas de gestión de la calidad adecuadas. Estas medidas incluyen:

- la definición de los requisitos de fiabilidad,
- medidas de organización y
- controles en las fases de proyecto, ejecución, uso y mantenimiento.

NOTA: La norma UNE-EN ISO 9001:2000 es una base adecuada para las medidas de gestión de calidad, cuando proceda.

3 Principios de cálculo de los estados límite

3.1 Generalidades

(1) Se debe distinguir entre los Estados Límite Últimos y los Estados Límite de Servicio.

NOTA: En algunos casos, pueden ser necesarias comprobaciones adicionales, por ejemplo, para garantizar la seguridad del tráfico.

(2) La comprobación de una de las dos categorías de estados límite puede omitirse siempre que se disponga de la información suficiente para probar que se cumplen los requisitos correspondientes a la otra.

(3) Los estados límite deben asociarse a situaciones de proyecto, véase el apartado 3.2.

(4) Las situaciones de proyecto deben clasificarse como persistentes, transitorias o accidentales, véase el apartado 3.2.

(5) La comprobación de los estados límite relacionados con efectos que dependen del tiempo (por ejemplo, fatiga) debe asociarse con la vida útil de la construcción.

NOTA: La mayoría de los efectos que dependen del tiempo son acumulativos.



3.2 Situaciones de proyecto

(1) Las situaciones de proyecto a considerar deben seleccionarse teniendo en cuenta las circunstancias bajo las cuales la estructura debe cumplir su función.

(2) Las situaciones de proyecto deberán clasificarse de la siguiente manera:

- situaciones de proyecto persistentes, que se refieren a las condiciones de uso normal,
- situaciones de proyecto transitorias, que se refieren a condiciones temporales aplicables a la estructura, por ejemplo, durante su ejecución o reparación,
- situaciones de proyecto accidentales, que se refieren a condiciones excepcionales aplicables a la estructura o a su exposición, por ejemplo, al fuego, impacto o a las consecuencias de un fallo localizado,
- situaciones de proyecto sísmicas, que se refieren a las condiciones aplicables a la estructura cuando esté sometida a efectos sísmicos.

NOTA: La información sobre situaciones específicas de proyecto dentro de cada una de estas clases se recoge en los Anejos 19 a 32 de este Código o en la reglamentación específica vigente.

(3) Las situaciones de proyecto seleccionadas deben ser lo suficientemente severas y variadas como para englobar todas las condiciones que se puedan prever razonablemente que vayan a presentarse durante la ejecución y uso de la estructura.

3.3 Estados Límite Últimos

(1) Deben clasificarse como Estados Límite Últimos aquellos que se refieran a:

- la seguridad de las personas y/o
- la seguridad de la estructura.

(2) En algunos casos, deben clasificarse como Estados Límite Últimos los estados límite concernientes a la protección de los contenidos de la estructura.

(3) Los estados previos al colapso estructural que, por simplicidad, se consideran en lugar del propio colapso, deben tratarse como Estados Límite Últimos.

(4) Deben comprobarse los Estados Límite Últimos cada vez que se produzca:

- la pérdida del equilibrio de la totalidad o parte de la estructura considerada como un sólido rígido,
- un fallo por deformación excesiva, por la transformación en mecanismo de la totalidad o parte de la estructura, por una rotura, por una pérdida de estabilidad de la totalidad o parte de la estructura, incluidos soportes y cimientos,
- un fallo por fatiga o por otros efectos que dependan del tiempo.

NOTA: Los distintos conjuntos de coeficientes parciales se asocian con los diferentes Estados Límite Últimos, véase el apartado 6.4.1.

3.4 Estados Límite de Servicio

(1) Deben clasificarse como Estados Límites de Servicio aquellos que se refieran a:

- el funcionamiento de la estructura o de los elementos estructurales sometidos a un uso normal,
- el confort de las personas,
- la apariencia de las construcciones.



NOTA 1: En el contexto de aptitud al servicio, el término “apariencia” se refiere a criterios como una deformación elevada o una fisuración generalizada, más que a aspectos estéticos.

(2) Debe distinguirse entre Estados Límite de Servicio reversibles e irreversibles.

(3) La comprobación de los Estados Límite de Servicio debe basarse en criterios relativos a los siguientes aspectos:

a) deformaciones que afecten a

- la apariencia,
- el confort de los usuarios, o
- el funcionamiento de la estructura (incluyendo el de máquinas o servicios),

o que causen daños en los acabados o en elementos no estructurales,

b) vibraciones

- que causen molestias a las personas, o
- que limiten la efectividad funcional de la estructura,

c) daño susceptible de afectar negativamente a:

- la apariencia,
- la durabilidad, o
- la funcionalidad de la estructura.

NOTA: En los Anejos 19 a 32 de este Código, o en la reglamentación específica vigente, se dan disposiciones adicionales relativas a los criterios de servicio.

3.5 Cálculo de los estados límite

(1) El cálculo de los estados límite debe basarse en la utilización de modelos estructurales y de cargas para los estados límite correspondientes.

(2) Debe comprobarse que no se supera ningún estado límite cuando en estos modelos se utilizan los correspondientes valores de cálculo para:

- las acciones,
- las propiedades de los materiales, o
- las propiedades de los productos, y
- los datos geométricos.

(3) Las comprobaciones deben realizarse para todas las situaciones de proyecto y todas las hipótesis de carga correspondientes.

(4) Deben satisfacerse los requisitos del apartado 3.5(1) mediante el método de los coeficientes parciales descrito en el apartado 6.

(5) Como alternativa, puede utilizarse un cálculo basado directamente en métodos probabilísticos.

NOTA 2: Como base de los métodos probabilísticos, véase el Apéndice C.

(6) Deben tenerse en cuenta las situaciones de proyecto seleccionadas e identificarse las situaciones críticas de carga.

(7) Para una comprobación concreta, deben seleccionarse hipótesis de carga identificándose combinaciones de cargas compatibles, conjuntos de deformaciones e imperfecciones que deben considerarse simultáneamente con acciones variables fijas y acciones permanentes.



(8) Deben tenerse en cuenta las posibles desviaciones con respecto a las direcciones o posiciones previstas de las acciones.

(9) Los modelos estructurales y de cargas pueden ser o modelos físicos, o modelos matemáticos.

4 Variables básicas

4.1 Acciones y condiciones ambientales

4.1.1 Clasificación de las acciones

(1) Las acciones deben clasificarse según su variación en el tiempo como sigue:

- acciones permanentes (G), por ejemplo peso propio de las estructuras, equipamientos y capas de rodadura, y acciones indirectas provocadas por retracción y asentamientos diferenciales,
- acciones variables (Q), por ejemplo cargas impuestas en las plantas de los edificios, vigas y cubiertas, acción del viento o carga de nieve,
- acciones accidentales (A), por ejemplo explosiones o impacto de vehículos.

NOTA: Las acciones indirectas causadas por deformaciones impuestas pueden ser permanentes o variables.

(2) Ciertas acciones, como las acciones sísmicas o las cargas de nieve, pueden considerarse acciones accidentales y/o variables, dependiendo de su lugar de aplicación, véanse los Anejos 19 a 32 de este Código o la reglamentación específica vigente.

(3) Las acciones producidas por el agua pueden considerarse como acciones permanentes y/o variables en función de la variación de su magnitud en el tiempo.

(4) Las acciones también deben clasificarse:

- por su origen, como directas o indirectas,
- por su variación en el espacio, como fijas o libres, o
- por su naturaleza y/o respuesta estructural, como estáticas o dinámicas.

(5) Se debe describir la acción mediante un modelo, en el que su magnitud se represente, en la mayoría de los casos, mediante un escalar que puede tener múltiples valores representativos.

NOTA: Para algunas acciones y comprobaciones, puede ser necesaria una representación más compleja de las magnitudes de ciertas acciones.

4.1.2 Valores característicos de las acciones

(1) El valor característico F_k de una acción es su principal valor representativo y debe especificarse:

- como un valor medio, un valor superior o inferior, o un valor nominal (que no se refiere a una distribución estadística conocida),
- en los documentos del proyecto, siempre que sean compatibles y consistentes con los métodos dados en la reglamentación específica vigente.

(2) El valor característico de una acción permanente debe evaluarse de la siguiente forma:

- si la variabilidad de G puede considerarse pequeña, se puede emplear un único valor G_k ,
- si la variabilidad de G no puede considerarse pequeña, deberán utilizarse dos valores: un valor superior $G_{k,sup}$ y un valor inferior $G_{k,inf}$.



(3) La variabilidad de G puede despreciarse si G no varía significativamente durante la vida útil de la estructura y su coeficiente de variación es pequeño. En estos casos, G_k debería tomarse igual al valor medio.

NOTA: Este coeficiente de variación puede estar en el intervalo de 0,05 a 0,10 dependiendo del tipo de estructura.

(4) En los casos en los que la estructura sea muy sensible a las variaciones de G (por ejemplo ciertos tipos de estructuras de hormigón pretensado), se deberán usar dos valores, incluso si el coeficiente de variación es muy pequeño. En estos casos $G_{k,inf}$ es el cuantil asociado a una probabilidad del 5% y $G_{k,sup}$ es el cuantil asociado a una probabilidad del 95% de una distribución estadística de G , que puede suponerse Gaussiana.

(5) El peso propio de la estructura puede representarse mediante un único valor característico y calcularse en base a las dimensiones nominales y los pesos unitarios medios.

NOTA: Para los asientos de las cimentaciones, véase la reglamentación específica vigente.

(6) El pretensado (P) debe clasificarse como una acción permanente producida por fuerzas controladas y/o deformaciones controladas impuestas a la estructura. Los tipos de pretensado deben distinguirse entre sí como corresponda (por ejemplo pretensado mediante tendones, pretensado por deformaciones impuestas en los apoyos).

NOTA: Los valores característicos del pretensado, en un momento determinado t , pueden ser un valor superior $P_{k,sup}(t)$ y un valor inferior $P_{k,inf}(t)$. Para Estados Límite Últimos, se puede usar un valor medio $P_m(t)$. En los Anejos 19 a 32 del Código Estructural, o la reglamentación específica vigente, se da información detallada al respecto.

(7) Para acciones variables, el valor característico (Q_k) debe corresponderse con:

- un valor superior con una determinada probabilidad de no ser superado o un valor inferior con una determinada probabilidad de ser alcanzado, durante un periodo específico de referencia, o,
- un valor nominal, que puede especificarse en aquellos casos en los que no exista una distribución estadística conocida.

NOTA 1: Se dan valores en la reglamentación específica vigente.

NOTA 2: El valor característico de las acciones climáticas se basa en una probabilidad de 0,02 de superar su parte variable con el tiempo durante un periodo de referencia de un año. Esto equivale a un periodo de retorno medio de 50 años para la parte variable con el tiempo. Sin embargo, en algunos casos el carácter de la acción y/o la situación de proyecto seleccionada pueden hacer que sea más adecuado otro cuantil y/o periodo de retorno.

(8) Para acciones accidentales el valor de cálculo A_d debe especificarse para cada proyecto.

NOTA: Véase también la reglamentación específica vigente.

(9) Para acciones sísmicas el valor de cálculo A_{Ed} debe evaluarse a partir del valor característico A_{Ek} o especificarse para cada proyecto.

NOTA: Véase también la reglamentación específica vigente.

(10) Para acciones con componentes múltiples la acción característica debe representarse mediante grupos de valores cada uno de los cuales se considerará por separado en los cálculos.

4.1.3 Otros valores representativos de las acciones variables

(1) Otros valores representativos de las acciones variables pueden ser los siguientes:

- (a) el valor de combinación, representado como un producto $\Psi_0 Q_k$, utilizado en la comprobación de los Estados Límite Últimos y de los Estados Límite de Servicio irreversibles (véanse el apartado 6 y Apéndice C),



- (b) el valor frecuente, representado como un producto $\Psi_1 Q_k$, empleado en la comprobación de los Estados Límite Últimos que incluyan acciones accidentales o para la comprobación de Estados Límite de Servicio reversibles.

NOTA 1: Para edificios, por ejemplo, se toma el valor frecuente como aquel que es excedido durante un tiempo que es el 0,01 del periodo de referencia; para cargas de tráfico rodado en puentes, el valor frecuente se evalúa en base a un periodo de retorno de una semana.

NOTA 2: El valor infrecuente, representado por el producto $\psi_{1,infq} Q_k$, se puede emplear solo para la comprobación de algunos Estados Límite de Servicio, específicamente para puentes de hormigón. El valor infrecuente, que se define solo para cargas de tráfico rodado (véase la reglamentación específica vigente) se basa en un periodo de retorno de un año.

NOTA 3: Véase la reglamentación específica vigente para el valor frecuente de las acciones de tráfico de componentes múltiples (multicomponentes).

- (c) el valor cuasi-permanente, representado como un producto $\Psi_2 Q_k$, empleado en la comprobación de Estados Límite Últimos que incluyan acciones accidentales y para la comprobación de Estados Límite de Servicio reversibles. Los valores cuasi-permanentes se utilizan también para el cálculo de efectos a largo plazo.

NOTA: Para cargas en plantas de edificios, se suele tomar el valor cuasi-permanente, de forma que la proporción en la que es superado es la mitad del periodo de referencia. El valor cuasi-permanente puede determinarse también como el valor medio de un determinado periodo de tiempo. En el caso de la acción del viento o de cargas de tráfico rodado este valor se toma, normalmente, como cero.

4.1.4 Representación de las acciones de fatiga

(1) Los modelos para acciones de fatiga serán aquellos que hayan sido establecidos en la reglamentación específica vigente a partir de la evaluación de la respuesta estructural frente a variaciones de carga actuantes sobre estructuras comunes (por ejemplo para puentes de uno o varios vanos, para viento en estructuras altas y esbeltas).

(2) Para estructuras que estén fuera del campo de aplicación de los modelos establecidos en la reglamentación específica vigente, las acciones de fatiga deben definirse a partir de la evaluación de mediciones o estudios equivalentes del espectro de acciones previstas.

NOTA: Para considerar los efectos propios de los materiales (por ejemplo, considerar la influencia de la tensión media o de efectos no lineales), véase los Anejos 19 a 32 del Código Estructural.

4.1.5 Representación de las acciones dinámicas

(1) Los modelos de carga definidos por valores característicos y los modelos de carga de fatiga definidos en la reglamentación específica vigente, pueden incluir los efectos de las aceleraciones producidas por las acciones bien implícitamente o bien explícitamente, aplicando coeficientes de mayoración dinámicos.

NOTA: Las limitaciones para el uso de estos modelos se describen en la reglamentación específica vigente.

(2) Cuando las acciones dinámicas ocasionen una aceleración significativa de la estructura, debe realizarse un análisis dinámico del sistema. Véase el apartado 5.1.3(6).

4.1.6 Acciones geotécnicas

(1) Las acciones geotécnicas deben evaluarse de acuerdo con la reglamentación específica vigente, o en su defecto con los documentos técnicos específicos que el autor del proyecto considere más adecuados.



4.1.7 Condiciones ambientales

(1) Las condiciones ambientales que puedan afectar a la durabilidad de la estructura deben tenerse en cuenta en la elección de los materiales estructurales, sus especificaciones, la concepción estructural del conjunto y en los detalles.

NOTA: Los Anejos 19 a 32 o la reglamentación específica vigente especifican las medidas apropiadas.

(2) Deben tenerse en cuenta los efectos de las condiciones ambientales y, cuando sea posible, describirlos cuantitativamente.

4.2 Propiedades de materiales y productos

(1) Las propiedades de los materiales (incluso suelo y roca) o los productos deben representarse mediante valores característicos (véase el apartado 1.4.4.1).

(2) Deben tenerse en cuenta valores característicos superiores e inferiores de la propiedad de un material cuando su variabilidad influya en la comprobación de un estado límite.

(3) A menos que se indique lo contrario en los Anejos 19 a 32 o la reglamentación específica vigente:

- cuando el valor inferior de una propiedad de un material o de un producto sea desfavorable, el valor característico debe definirse como el del cuantil del 5%,
- cuando el valor superior de una propiedad de un material o de un producto sea desfavorable, el valor característico debe definirse como el del cuantil del 95%.

(4) Los valores de las propiedades de los materiales deben determinarse mediante ensayos normalizados realizados en condiciones específicas. Se aplicará un factor de conversión cuando sea necesario convertir los resultados de los ensayos a valores que pueda considerarse que representan el comportamiento del material o producto en la estructura o en el terreno.

NOTA: Véanse el Apéndice D y los Anejos 19 a 32 de este Código o la reglamentación específica vigente.

(5) Cuando no se disponga de suficientes datos estadísticos para establecer los valores característicos de una propiedad de un material o de un producto, se podrán tomar como tales los valores nominales, o se podrá establecer directamente los valores de cálculo de la propiedad. Cuando se establezcan directamente los valores de cálculo superior e inferior de una propiedad de un material o de un producto (por ejemplo, factores de fricción, coeficiente de amortiguamiento), deberán elegirse de manera que los valores más desfavorables influyan sobre la probabilidad de ocurrencia del estado límite considerado en una medida similar a otros valores de cálculo.

(6) Cuando sea necesaria la estimación del valor superior de la resistencia del material (por ejemplo, para medidas de cálculo de capacidad o para la resistencia a tracción del hormigón con el fin de calcular los efectos de acciones indirectas) deberá tenerse en cuenta un valor característico superior de la resistencia.

(7) Las reducciones de la resistencia del material o producto a considerar, como resultado de los efectos de acciones repetidas, se dan en los Anejos 19 a 32 de este Código o la reglamentación específica vigente y pueden llevar a una reducción de la resistencia estructural con el tiempo debido a la fatiga.

(8) Los parámetros de rigidez estructural (por ejemplo, módulo de elasticidad, coeficiente de fluencia) y los coeficientes de dilatación térmica deben representarse por un valor medio. Deben utilizarse valores diferentes para tener en cuenta la duración de la carga.

NOTA: En algunos casos (por ejemplo, en caso de inestabilidad), puede ser necesario tener en cuenta un valor inferior o superior al medio para el módulo de elasticidad.

(9) Los materiales y los productos de construcción que se incorporen con carácter permanente a las estructuras (hormigón, acero estructural, cemento, áridos, acero corrugado, armaduras elaboradas,



sistemas de pretensado, elementos prefabricados, etc.) deberán presentar las características suficientes para que la estructura cumpla las exigencias de este Código, para lo que deberá comprobarse su conformidad de acuerdo con los criterios generales establecidos en el Capítulo 5, así como con los específicos establecidos para cada tipo de estructura en los Capítulos 12, 13, 14, 22, 23, 24, 32, 33 y 34, de este Código.

(10) Si se necesitase un coeficiente parcial para los materiales o los productos, debe utilizarse un valor del lado de la seguridad, salvo que exista una información estadística adecuada para evaluar la fiabilidad del valor seleccionado.

NOTA: Cuando sea necesario, deberá tenerse en cuenta el carácter no corriente en la utilización de los materiales o productos empleados.

4.3 Datos geométricos

(1) Los datos geométricos deben representarse por sus valores característicos o (por ejemplo, en caso de imperfecciones) directamente por sus valores de cálculo.

(2) Las dimensiones especificadas en el cálculo pueden tomarse como valores característicos.

(3) Cuando su distribución estadística sea suficientemente conocida, se podrán utilizar los valores de los parámetros geométricos que correspondan al cuantil prescrito de la distribución estadística.

(4) Las imperfecciones que deben tenerse en cuenta en el cálculo de los elementos estructurales se indican en los Anejos 19 a 32 de este Código o en la reglamentación específica vigente.

(5) Las tolerancias de las partes ensambladas de materiales diferentes deben ser compatibles entre sí.

5 Análisis estructural y cálculo asistido con ensayos

5.1 Análisis estructural

5.1.1 Modelización estructural

(1) El cálculo debe realizarse utilizando los modelos estructurales adecuados que incluyan las variables correspondientes.

(2) Los modelos estructurales elegidos deben ser los adecuados para predecir el comportamiento estructural con un nivel aceptable de precisión, y adecuados también para los estados límite considerados.

(3) Los modelos estructurales empleados deben basarse en teorías y prácticas consolidadas y, si fuera necesario, verificados experimentalmente.

5.1.2 Acciones estáticas

(1) La modelización de acciones estáticas debe basarse en una correcta elección de las relaciones fuerza-deformación de los elementos y sus conexiones, y entre los elementos y el terreno.

(2) Las condiciones de contorno aplicadas al modelo deben representar las supuestas para la estructura.

(3) Los efectos de los desplazamientos y las deformaciones deben tenerse en cuenta en el contexto de la comprobación del Estado Límite Último si se traducen en un incremento considerable del efecto de las acciones.

NOTA: En los Anejos 19 a 32 de este Código, o en la reglamentación específica vigente, se dan métodos particulares para tener en cuenta los efectos de las deformaciones.



(4) Las acciones indirectas deben introducirse en el análisis de la siguiente manera:

- en análisis elástico lineal, directamente o como fuerzas equivalentes (utilizando las relaciones adecuadas entre módulos de elasticidad, según corresponda),
- en análisis no lineal, directamente como deformaciones impuestas.

5.1.3 Acciones dinámicas

(1) El modelo estructural a utilizar para la determinación de los efectos de las acciones debe establecerse considerando todos los elementos estructurales implicados, sus pesos, resistencias, rigideces y características de amortiguamiento, y todos los elementos no estructurales que correspondan con sus propiedades.

(2) Las condiciones de contorno aplicadas al modelo deben representar las supuestas para la estructura.

(3) Cuando sea posible considerar las acciones dinámicas como cuasi-estáticas, las partes dinámicas podrán considerarse incluyéndolas dentro de los valores estáticos, o mediante la aplicación de coeficientes de amplificación dinámica equivalentes a las acciones estáticas.

NOTA: Para algunos coeficientes de amplificación dinámica equivalentes, las frecuencias naturales están determinadas.

(4) En el caso de la interacción suelo-estructura, la contribución del suelo puede modelizarse mediante muelles y amortiguadores equivalentes.

(5) En algunos casos (por ejemplo, para las vibraciones inducidas por el viento o para las acciones sísmicas) se pueden definir las acciones mediante un análisis modal basado en un comportamiento del material y un comportamiento geométrico lineales. Para estructuras con una geometría, rigidez y distribución de masas regulares, en las que solo sea aplicable el modo fundamental, el análisis modal explícito podrá sustituirse por un análisis con acciones estáticas equivalentes.

(6) Dependiendo del caso, las acciones dinámicas podrán también expresarse en función del tiempo o en el dominio de frecuencias, determinándose la respuesta estructural mediante los métodos apropiados.

(7) Cuando las acciones dinámicas produzcan vibraciones de una magnitud o frecuencia que puedan exceder los requisitos en servicio, se debe realizar la comprobación del Estado Límite de Servicio.

NOTA: En el Apéndice A y en los Anejos 19 a 32 de este Código se dan directrices para la evaluación de estos límites.

5.1.4 Análisis estructural en caso de fuego

(1) El análisis estructural frente a incendio deberá basarse en escenarios de cálculo frente a incendio (véase la reglamentación específica vigente) y debe considerar los modelos de evolución de la temperatura en la estructura, así como los modelos de comportamiento mecánico de la estructura a temperaturas elevadas.

(2) Debe verificarse el comportamiento de la estructura expuesta al fuego mediante un análisis global, un análisis de subconjuntos o un análisis de elementos, o bien mediante el uso de datos tabulados o resultados de ensayos.

(3) El comportamiento de la estructura expuesta al fuego debe evaluarse teniendo en cuenta la exposición:

- a un fuego nominal, o
- a un fuego modelizado,

así como las acciones concomitantes.



NOTA: Véase también la reglamentación específica vigente.

(4) Debe evaluarse el comportamiento de la estructura a temperaturas elevadas de acuerdo con los Anejos 19 a 32 de este Código Estructural o la reglamentación específica vigente, que proporcionan modelos térmicos y estructurales para el análisis.

(5) En función del material específico y del método de evaluación:

- los modelos térmicos pueden basarse en la hipótesis de una temperatura uniforme o no uniforme en las secciones transversales y a lo largo de los elementos,
- los modelos estructurales pueden limitarse a un análisis de elementos individuales o tener en cuenta la interacción entre elementos expuestos al fuego.

(6) Los modelos de comportamiento mecánico de los elementos estructurales a temperaturas elevadas deberían ser no lineales.

NOTA: Véanse también los Anejos 19 a 32 de este Código Estructural o la reglamentación específica vigente.

5.2 Cálculo asistido con ensayos

(1) El proyecto puede basarse en una combinación de ensayos y cálculos.

NOTA: Los ensayos pueden realizarse, por ejemplo, en las siguientes circunstancias:

- si no se dispone de modelos de cálculo adecuados,
- si se van a utilizar un gran número de componentes similares,
- para confirmar, mediante ensayos de control, las hipótesis formuladas en el dimensionamiento.

Véase el Apéndice D.

(2) El proyecto asistido mediante resultados de ensayos debe alcanzar el nivel de fiabilidad requerido para la situación de proyecto correspondiente. Debe tenerse en cuenta la incertidumbre estadística debida a un reducido número limitado de resultados de ensayo.

(3) Se utilizarán coeficientes parciales (incluso aquellos que cubran las incertidumbres del modelo) comparables con los empleados en los Anejos 19 a 32 de este Código Estructural o en la reglamentación específica vigente.

6 Comprobación por el método de los coeficientes parciales

6.1 Generalidades

(1) Cuando se utilice el método de los coeficientes parciales, debe comprobarse que, para todas las situaciones de proyecto que corresponda, no se sobrepasa ningún estado límite cuando en los modelos de cálculo se introducen los valores de cálculo de las acciones o los efectos de las acciones y las resistencias.

(2) Para las situaciones de proyecto seleccionadas y los estados límite correspondientes, las acciones para los estados críticos de carga deben combinarse como se detalla en este apartado. Las acciones que no puedan actuar simultáneamente, por ejemplo, debido a causas físicas, no deberán considerarse conjuntamente en la misma combinación.

(3) Los valores de cálculo deben obtenerse utilizando:

- los valores característicos, u
- otros valores representativos,



en combinación con coeficientes parciales y otros coeficientes, de acuerdo a lo que se indica en este apartado y en los Anejos 19 a 32 de este Código Estructural o en la reglamentación específica vigente.

(4) Los valores de cálculo podrán determinarse directamente cuando sea necesario ponerse del lado de la seguridad.

(5) Los valores de cálculo determinados directamente a partir de bases estadísticas deben corresponderse, al menos, con el mismo nivel de fiabilidad que conlleva la aplicación de los coeficientes parciales definidos en esta norma para los distintos estados límite.

6.2 Limitaciones

(1) La utilización de este anejo se limita a la comprobación en Estado Límite Último y de Servicio de estructuras sometidas a cargas estáticas, incluyendo aquellos casos en los que los efectos dinámicos se evalúan usando cargas cuasi-estáticas equivalentes y coeficientes de amplificación dinámica, por ejemplo, por las acciones del viento o de las cargas de tráfico. Para análisis no lineal y para fatiga, se aplicarán las reglas específicas dadas en los Anejos 19 a 32 de este Código Estructural o en la reglamentación específica vigente.

6.3 Valores de cálculo

6.3.1 Valores de cálculo de las acciones

(1) El valor de cálculo F_d de una acción F puede expresarse en términos generales como:

$$F_d = \gamma_f F_{rep} \quad (6.1a)$$

con:

$$F_{rep} = \Psi F_k \quad (6.1b)$$

donde:

F_k es el valor característico de la acción

F_{rep} es el valor representativo de la acción

γ_f es el coeficiente parcial de seguridad para la acción, que tiene en cuenta la posibilidad de desviaciones desfavorables del valor de la acción respecto al valor representativo

Ψ puede ser 1,00 o Ψ_0 , Ψ_1 o Ψ_2 .

(2) Para acciones sísmicas, el valor de cálculo A_{Ed} , debe determinarse teniendo en cuenta el comportamiento estructural y otros criterios de acuerdo con la reglamentación técnica específica.

6.3.2 Valores de cálculo de los efectos de las acciones

(1) Para una situación de carga específica, los valores de cálculo de los efectos de las acciones (E_d) pueden expresarse en términos generales como:

$$E_d = \gamma_{sd} E\{\gamma_{f,i} F_{rep,i}; a_d\} \quad i \geq 1 \quad (6.2)$$

donde:

ad es el valor de cálculo de los datos geométricos (véase el apartado 6.3.4)

γ_{sd} es el coeficiente parcial de seguridad que tiene en cuenta las incertidumbres:

- en la modelización de los efectos de las acciones,
- en algunos casos, en la modelización de acciones.



NOTA: En el caso más general, los efectos de las acciones dependen de las propiedades de los materiales.

(2) En la mayoría de los casos, se puede hacer la siguiente simplificación:

$$E_d = E\{\gamma_{F,i} F_{rep,i}; a_d\} \quad i \geq 1 \quad (6.2a)$$

con:

$$\gamma_{F,i} = \gamma_{sd} \cdot \gamma_{f,i} \quad (6.2b)$$

NOTA: Cuando proceda, por ejemplo, en el caso de acciones geotécnicas, pueden aplicarse coeficientes parciales $\gamma_{F,i}$ a los efectos de cada una de las acciones individuales, o bien un único coeficiente parcial adecuado γ_F , al efecto de la combinación de las acciones con sus correspondientes coeficientes parciales.

(3) Cuando se tenga que distinguir entre efectos favorables y desfavorables de las acciones permanentes, se utilizarán dos coeficientes parciales distintos ($\gamma_{G,inf}$ y $\gamma_{G,sup}$).

(4) Para un análisis no lineal (es decir, cuando la relación entre las acciones y sus efectos sea no lineal), en el que exista una única acción predominante se pueden aplicar las siguientes reglas simplificadas:

- Cuando el efecto de la acción aumente más que la acción, el coeficiente parcial γ_F se aplicará al valor representativo de la acción.
- Cuando el efecto de la acción aumente menos que la acción, el coeficiente parcial γ_F se aplicará al efecto del valor representativo de la acción.

NOTA: A excepción de las estructuras de cuerdas, de cables y de membranas, la mayoría de las estructuras o elementos estructurales pertenecen a la categoría a).

(5) En aquellos casos en los que se detallen métodos más precisos en los Anejos 19 a 32 de este Código Estructural o en la reglamentación específica vigente correspondiente (por ejemplo, para estructuras pretensadas), se utilizarán estos preferentemente, antes que los indicados en el apartado 6.3.2(4).

6.3.3 Valores de cálculo de las propiedades de materiales o productos

(1) El valor de cálculo X_d de la propiedad de un material o producto puede expresarse en términos generales como:

$$X_d = \eta \frac{X_k}{\gamma_m} \quad (6.3)$$

donde:

X_k es el valor característico de la propiedad del material o producto (véase el apartado 4.2(3))

η es el valor medio del factor de conversión teniendo en cuenta,

- los efectos de volumen y escala,
- los efectos de la humedad y la temperatura, y
- cualquier otro parámetro que corresponda

γ_m es el coeficiente parcial para la propiedad del material o producto que tiene en cuenta:

- la posibilidad de una desviación desfavorable de la propiedad del material o producto respecto a su valor característico,
- la parte aleatoria del factor de conversión η .

(2) Alternativamente, en los casos adecuados, el factor de conversión η puede tenerse en cuenta:

- implícitamente dentro del propio valor característico, o
- utilizando γ_M en vez de γ_m (véase la expresión (6.6b)).

NOTA: El valor de cálculo puede establecerse mediante:

- relaciones empíricas con propiedades físicas medidas, o
- con la composición química, o
- de la experiencia previa, o
- a partir de valores dados en las normas europeas u otros documentos apropiados.

6.3.4 Valores de cálculo de los datos geométricos

(1) Los valores de cálculo de los datos geométricos, como pueden ser las dimensiones de los elementos que se utilizan para la evaluación de los efectos de las acciones y/o resistencias, pueden representarse mediante valores nominales:

$$a_d = a_{nom} \quad (6.4)$$

(2) Cuando los efectos de las desviaciones en los datos geométricos (por ejemplo, imprecisión en la aplicación de la carga o en la posición de los apoyos) sean significativos para la fiabilidad de la estructura (por ejemplo por efectos de segundo orden) los valores de cálculo de los datos geométricos deben definirse por:

$$a_d = a_{nom} \pm \Delta a \quad (6.5)$$

donde:

Δa tiene en cuenta:

- la posibilidad de desviaciones desfavorables respecto a los valores característicos o nominales,
- el efecto acumulativo de la acción simultánea de varias desviaciones geométricas.

NOTA 1: a_d también puede representar imperfecciones geométricas cuando $a_{nom} = 0$ (es decir, $\Delta a \neq 0$).

NOTA 2: Cuando corresponda, los Anejos 19 a 32 de este Código Estructural o la reglamentación específica vigente establecerán disposiciones adicionales.

(3) Los efectos de otras desviaciones deben quedar cubiertos mediante la aplicación de coeficientes parciales:

- sobre las acciones (γ_F), y/o
- sobre las resistencias (γ_M).

NOTA: Las tolerancias se definen en las normas correspondientes en cumplimiento de lo recogido en los Anejos 19 a 32 de este Código Estructural o en la reglamentación específica vigente.

6.3.5 Resistencia de cálculo

(1) La resistencia de cálculo R_d puede expresarse de la siguiente manera:

$$R_d = \frac{1}{\gamma_{Rd}} R\{X_{d,i}; a_d\} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} R\left\{\eta_i \frac{X_{k,i}}{\gamma_{m,i}}; a_d\right\} \quad i \geq 1 \quad (6.6)$$

donde:



γ_{Rd} es el coeficiente parcial que contempla la incertidumbre en el modelo de resistencia, además de las desviaciones geométricas si estas no han sido modelizadas explícitamente (véase el apartado 6.3.4(2))

$X_{d,i}$ es el valor de cálculo de la propiedad i del material.

(2) Se pueden hacer las siguientes simplificaciones de la expresión (6.6):

$$R_d = R \left\{ \eta_i \frac{X_{k,i}}{\gamma_{M,i}}; a_d \right\} \quad i \geq 1 \quad (6.6a)$$

donde:

$$\gamma_{M,i} = \gamma_{Rd} \cdot \gamma_{m,i} \quad (6.6b)$$

NOTA: η_i puede incorporarse en $\gamma_{M,i}$, véase el apartado 6.3.3(2).

(3) De forma alternativa a la expresión (6.6a), la resistencia de cálculo puede obtenerse directamente a partir del valor característico de la resistencia del material o producto, sin la determinación explícita de los valores de cálculo para las variables básicas individuales, utilizando:

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_M} \quad (6.6c)$$

NOTA: Esto es aplicable a productos o elementos hechos de un único material (por ejemplo acero) y también puede usarse en relación con el Apéndice D "Recomendaciones para el cálculo asistido por ensayos".

(4) De forma alternativa a las expresiones (6.6a) y (6.6c), para estructuras o elementos estructurales que se analicen por métodos no lineales y conlleven el uso de más de un material actuando conjuntamente, o cuando las propiedades del terreno se incluyan en la resistencia de cálculo, se puede utilizar la siguiente expresión para la resistencia de cálculo:

$$R_d = \frac{1}{\gamma_{M,1}} R \left\{ \eta_1 X_{k,1}; \eta_i X_{k,i(i>1)} \frac{\gamma_{m,1}}{\gamma_{m,i}}; a_d \right\} \quad (6.6d)$$

NOTA: En algunos casos, la resistencia de cálculo puede expresarse mediante la aplicación directa de los coeficientes parciales γ_M a las resistencias individuales debidas a las propiedades de los materiales.

6.4 Estados Límite Últimos

6.4.1 Generalidades

(1) Se comprobarán los siguientes estados límite:

- a) EQU: Pérdida de equilibrio estático de la estructura o de cualquier parte de ella considerada como un sólido rígido, en que:
 - sean significativas las pequeñas variaciones en el valor o en la distribución espacial de las acciones de un mismo origen, y
 - las resistencias de los materiales de construcción o del terreno no sean, en general, determinantes,
- b) SRT: Fallo interno o deformación excesiva de la estructura o elementos estructurales, incluso zapatas, muros de sótano, etc., cuando sea determinante la resistencia de los materiales,
- c) GEO: Fallo o deformación excesiva del terreno cuando la resistencia del suelo o de la roca sea determinante en la aportación de resistencia,
- d) FAT: Fallo por fatiga de la estructura o de los elementos estructurales.

NOTA: Para el cálculo a fatiga, las combinaciones de acciones se dan en los Anejos 19 a 32, de este Código Estructural o en la reglamentación específica vigente.



- e) UPL: pérdida del equilibrio de la estructura o el terreno debido a la subpresión u otras acciones verticales,
- f) HYD: elevación hidráulica, erosión interna y erosión en túnel (tubidificación) en el terreno, producidas por los gradientes hidráulicos.

NOTA: Véase la normativa técnica específica.

(2) Los valores de cálculo de las acciones deben ser acordes con el Apéndice A.

6.4.2 Comprobación del equilibrio estático y de la resistencia

(1) Cuando se considere un estado límite de equilibrio de la estructura (EQU), se debe verificar que:

$$E_{d,dst} \leq E_{d,stab} \quad (6.7)$$

donde:

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

$E_{d,stab}$ es el valor de cálculo del efecto de las acciones estabilizadoras.

(2) Cuando corresponda, la expresión del estado límite de equilibrio puede complementarse con términos adicionales, incluyendo, por ejemplo, un coeficiente de rozamiento entre sólidos rígidos.

(3) Cuando se considere un estado límite de rotura o de deformación excesiva de una sección, elemento o conexión (STR y/o GEO), debe verificarse que:

$$E_d \leq R_d \quad (6.8)$$

donde:

E_d es el valor de cálculo de los efectos de acciones, tales como esfuerzos, momentos o vectores que representan varios esfuerzos o momentos

R_d es el valor de cálculo de la resistencia correspondiente.

NOTA 1: Los detalles de los métodos STR y GEO se dan en el Apéndice A.

NOTA 2: La expresión (6.8) no cubre todos los formatos de comprobación relativos a pandeo, es decir, el fallo que se produce cuando los efectos de segundo orden no pueden limitarse por la respuesta estructural o mediante una respuesta estructural aceptable. Véanse los Anejos 19 a 32 de este Código Estructural o la reglamentación específica vigente.

6.4.3 Combinación de acciones (excepto para comprobaciones a fatiga)

6.4.3.1 General

(1) Para cada caso de carga crítica, los valores de cálculo de los efectos de las acciones (E_d) deben determinarse mediante la combinación de los valores de las acciones que se considere que puedan ocurrir simultáneamente.

(2) Cada combinación de acciones debe incluir:

- una acción variable predominante, o
- una acción accidental.

(3) Las combinaciones de las acciones deben estar de acuerdo con los apartados 6.4.3.2 a 6.4.3.4.

(4) Cuando los resultados de la comprobación sean muy sensibles a las variaciones de magnitud de una acción permanente de un punto a otro de la estructura, la acción deberá dividirse en dos partes: aquella que tiene efectos favorables y la que tiene efectos desfavorables, que deberán considerarse como acciones individuales.



NOTA: Esto es de aplicación, en particular, para la comprobación del equilibrio estático y otros estados límite semejantes, véase el apartado 6.4.2(2).

(5) Cuando varios efectos de una misma acción (por ejemplo, el momento flector y el esfuerzo axil debidos al peso propio) no estén completamente correlacionados, se puede reducir el coeficiente parcial aplicado a cualquiera de las componentes que den efectos favorables.

NOTA: Para una mayor información en este tema véanse las cláusulas relativas a efectos vectoriales en los Anejos 19 a 32 de este Código Estructural o en la reglamentación específica vigente.

(6) Las deformaciones impuestas deberán tenerse en cuenta cuando corresponda.

NOTA: Para mayor información, véanse el apartado 5.1.2.4 y los Anejos 19 a 32 de este Código Estructural o en la reglamentación específica vigente.

6.4.3.2 Combinación de acciones para situaciones de proyecto permanentes o transitorias (combinaciones fundamentales)

(1) El formato general de los efectos de las acciones será:

$$E_d = \gamma_{sd} E \{ \gamma_{G,j} G_{k,j}; \gamma_P P; \gamma_{Q,1} Q_{k,1}; \gamma_{Q,i} \Psi_{0,i} Q_{k,i} \} \quad j \geq 1; i > 1 \quad (6.9a)$$

(2) La combinación de los efectos de las acciones a considerar debe basarse en:

- el valor de cálculo de la acción variable predominante, y
- los valores de combinación de cálculo de las acciones variables concomitantes:

NOTA: Véase también 6.4.3.2(4).

$$E_d = E \{ \gamma_{G,j} G_{k,j}; \gamma_P P; \gamma_{Q,1} Q_{k,1}; \gamma_{Q,i} \Psi_{0,i} Q_{k,i} \} \quad j \geq 1; i > 1 \quad (6.9b)$$

(3) La combinación de acciones entre llaves { }, en (6.9b) pueden expresarse o como:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + " \gamma_P P " + " \gamma_{Q,1} Q_{k,1} " + " \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \Psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (6.10)$$

o, alternativamente para los estados límite STR y GEO, como la expresión menos favorable de las siguientes:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + " \gamma_P P " + " \gamma_{Q,1} \Psi_{0,1} Q_{k,1} " + " \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \Psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (6.10a)$$

$$\sum_{j \geq 1} \xi_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + " \gamma_P P " + " \gamma_{Q,1} Q_{k,1} " + " \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \Psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (6.10b)$$

donde:

- “+” significa “combinarse con”
- Σ significa “el efecto combinado de”
- ξ es una reducción del factor para acciones permanentes G desfavorables.

NOTA: En el Apéndice A se da una mayor información para esta elección.

(4) Si la relación entre las acciones y sus efectos no es lineal, las expresiones (6.9a) o (6.9b) deben aplicarse directamente, dependiendo del incremento relativo de los efectos de las acciones comparado con el incremento de la magnitud de las acciones (véase también el apartado 6.3.2(4)).

6.4.3.3 Combinación de acciones para situaciones de proyecto accidentales

(1) El formato general de los efectos de las acciones será:

$$E_d = E \{ G_{k,j}; P; A_d; (\Psi_{1,1} \circ \Psi_{2,1}) Q_{k,1}; \Psi_{2,i} Q_{k,i} \} \quad j \geq 1; i > 1 \quad (6.11a)$$

(2) La combinación de acciones entre llaves { } puede expresarse como:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + " P " + " A_d " + " (\Psi_{1,1} \circ \Psi_{2,1}) Q_{k,1} " + " \sum_{i > 1} \Psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (6.11b)$$



(3) La elección entre $\Psi_{1,1}Q_{k,1}$ o $\Psi_{2,1}Q_{k,1}$ estará condicionada por la situación accidental de proyecto de la que trate (impacto, fuego o supervivencia tras un hecho o situación accidental).

NOTA: En los Anejos 19 a 32 de este Código Estructural o en la reglamentación específica vigente se dan indicaciones al respecto.

(4) Las combinaciones de acciones para situaciones de proyecto accidentales deben

- incluir una acción accidental explícita A (fuego o impacto), o
- referirse a una situación posterior a un suceso accidental (A=0).

En situaciones de incendio, además del efecto de la temperatura en las propiedades de los materiales, A_d debe representar el valor de cálculo de los efectos indirectos de la acción térmica debida al fuego.

6.4.3.4 Combinación de acciones para situaciones de proyecto frente al sismo

(1) El formato general de los efectos de las acciones será:

$$E_d = E\{G_{k,j}; P; A_{Ed}; \Psi_{2,i}Q_{k,i}\} \quad j \geq 1; i > 1 \quad (6.12a)$$

(2) La combinación de acciones entre llaves { } puede expresarse como:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + "P" + "A_{Ed}" + \sum_{i \geq 1} \Psi_{2,i}Q_{k,i} \quad (6.12b)$$

6.4.4 Coeficientes parciales de seguridad para acciones y combinaciones de acciones

(1) Los valores de los coeficientes γ y Ψ para las acciones deben obtenerse de la reglamentación específica vigente y del Apéndice A.

6.4.5 Coeficientes parciales para materiales y productos

(1) Los coeficientes parciales para las propiedades de materiales y productos deben obtenerse de los Anejos 19 a 32 de este Código Estructural o de la reglamentación específica vigente.

6.5 Estados Límite de Servicio

6.5.1 Comprobaciones

(1) Debe comprobarse que:

$$E_d \leq C_d \quad (6.13)$$

donde:

C_d es el valor límite de cálculo para el criterio de servicio correspondiente

E_d es el valor de cálculo de los efectos de las acciones consideradas para el criterio de servicio, determinado en base a la combinación correspondiente.

6.5.2 Criterios de servicio

(1) Las deformaciones a considerar en relación con los requisitos de servicio deben ser como las definidas en el Apéndice A, en función del tipo de proceso constructivo.

NOTA: Para otros criterios de servicio específicos como el ancho de fisura, la limitación de tensión o deformación, la resistencia al deslizamiento, véanse los Anejos 19 a 32 de este Código Estructural o la reglamentación específica vigente.



6.5.3 Combinación de acciones

(1) Las combinaciones de acciones a considerar en las situaciones de proyectos deben ser apropiadas para los requisitos de servicio y los criterios de comportamiento objeto de comprobación.

(2) Las combinaciones de acciones para los Estados Límite de Servicio se definen simbólicamente mediante las expresiones siguientes (véase también el apartado 6.5.4):

NOTA: En estas expresiones, se supone que todos los coeficientes parciales son iguales a 1. Véanse los Anejos 19 a 32 de este Código Estructural o la reglamentación específica vigente.

a) Combinación característica

$$E_d = E\{G_{k,j}; P; Q_{k,1}; \Psi_{0,i}Q_{k,i}\} \quad j \geq 1; i > 1 \quad (6.14a)$$

en la que la combinación de acciones entre llaves { } (denominada combinación característica), puede expresarse como:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + "P" + "Q_{k,1}" + \sum_{i > 1} \Psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (6.14b)$$

NOTA: La combinación característica se utiliza normalmente para estados límite irreversibles.

b) Combinación frecuente:

$$E_d = E\{G_{k,j}; P; \Psi_{1,1}Q_{k,1}; \Psi_{2,i}Q_{k,i}\} \quad j \geq 1; i > 1 \quad (6.15a)$$

en la que la combinación de acciones entre llaves { } (denominada combinación frecuente), puede expresarse como:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + "P" + "\Psi_{1,1}Q_{k,1}" + \sum_{i \geq 1} \Psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (6.15b)$$

NOTA: La combinación frecuente se utiliza normalmente para estados límite reversibles.

c) Combinación cuasi-permanente:

$$E_d = E\{G_{k,j}; P; \Psi_{2,i}Q_{k,i}\} \quad j \geq 1; i \geq 1 \quad (6.16a)$$

en la que la combinación de acciones entre llaves { } (llamada la combinación cuasi-permanente), puede expresarse como:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + "P" + \sum_{i \geq 1} \Psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (6.16b)$$

donde la notación es como la dada en los apartados 1.5 y 6.4.3(1).

NOTA: La combinación cuasi-permanente se utiliza normalmente para efectos a largo plazo y para el aspecto de la estructura.

(3) Para el valor representativo de la acción de pretensado (es decir, P_k o P_m), deberá remitirse al anejo correspondiente en función del tipo de pretensado considerado.

(4) Los efectos de las acciones debidos a deformaciones impuestas deben considerarse cuando corresponda.

NOTA: En algunos casos las expresiones (6.14) a (6.16) deben modificarse. Se dan reglas detalladas en los Anejos 19 a 32 de este Código Estructural o la reglamentación específica vigente.

6.5.4 Coeficientes parciales para los materiales

(1) Para los Estados Límite de Servicio, los coeficientes parciales γ_M para las propiedades de los materiales deben tomarse como 1,0 salvo especificación en contrario en los Anejos 19 a 32 de este Código Estructural.



Apéndice A.1 Aplicación a edificación

Se adoptará lo establecido en el Código Técnico de la Edificación.

Adicionalmente, para la combinación de acciones para situaciones de proyecto persistentes o transitorias (combinaciones fundamentales) definidas en el apartado 6.4.3.2 de este anejo, la verificación se realizará de acuerdo a la ecuación 6.10.

Apéndice A.2 Aplicación en puentes

Se adoptará lo establecido en la Reglamentación específica vigente.

Adicionalmente, para la combinación de acciones para situaciones de proyecto persistentes o transitorias (combinaciones fundamentales) definidas en el apartado 6.4.3.2 de este anejo, la verificación se realizará de acuerdo a la ecuación 6.10.

En el caso de situaciones de proyecto accidentales, la verificación se realizará de acuerdo a la ecuación 6.11b, y en el caso de sísmicas, la ecuación 6.12b.



Apéndice B Recomendaciones para la gestión de la fiabilidad estructural en trabajos de construcción

B.1 Alcance y campo de aplicación

(1) Este anejo proporciona indicaciones adicionales al apartado 2.2 (Gestión de la fiabilidad) y a las cláusulas correspondientes de los Anejos 19 a 32 de este Código Estructural o la reglamentación específica vigente.

NOTA: Las reglas sobre niveles de fiabilidad para aspectos particulares se especifican en los Anejos 19 a 29 de este Código Estructural o en la reglamentación específica vigente.

(2) El planteamiento dado en este apéndice recomienda los siguientes procedimientos de gestión de la fiabilidad estructural para obras de construcción (con respecto a los ELU, excepto la fatiga):

- a) En relación al apartado 2.2(5)b, las clases se introducen y se basan en las presuntas consecuencias del fallo y la exposición al riesgo de las obras de construcción al riesgo. En el apartado B.3 se da un procedimiento para permitir pequeñas diferencias en los coeficientes parciales de acciones y resistencias correspondientes a las diferentes clases.

NOTA: La clasificación de la fiabilidad puede representarse mediante índices β (véase el Apéndice C) que tienen en cuenta la variabilidad estadística aceptada o asumida para los efectos de las acciones, las resistencias y las incertidumbres del modelo.

- b) En relación con los apartados 2.2(5)c y 2.2(5)d, se da en los apartados B.4 y B.5 un procedimiento para permitir la distinción entre diferentes tipos de obras de construcción en los requisitos para los niveles de calidad del proyecto y en los procesos de ejecución.

NOTA: Estas medidas de gestión de calidad y control en el proyecto, disposiciones constructivas y ejecución se dan en los apartados B.4 y B.5 con ánimo de eliminar los fallos debidos a errores groseros y asegurar las resistencias supuestas en el proyecto.

(3) El procedimiento ha sido formulado con el fin de crear un marco que permita, si así se desea, el uso de distintos niveles de fiabilidad.

B.2 Notación

En este anejo son de aplicación los siguientes símbolos.

K_{FI}	Coficiente aplicable a las acciones para el nivel de fiabilidad
β	Índice de fiabilidad.

B.3 Nivel de fiabilidad

B.3.1 Clases de consecuencias

(1) A partir de las consecuencias del fallo o mal funcionamiento de la estructura se pueden establecer unas clases de consecuencias (CC) como las dadas en la tabla B1 con el propósito de emplearlas posteriormente para identificar el nivel de fiabilidad.

Tabla B1 Definición de las clases de consecuencias

Clase de consecuencia	Descripción	Ejemplos de obras de edificación e ingeniería civil
CC3	Consecuencias Graves de pérdida de vidas humanas, o consecuencias económicas, sociales o medioambientales muy importantes.	Graderíos, edificios públicos en los que las consecuencias del fallo son graves (por ejemplo, una sala de conciertos).
CC2	Consecuencia media de pérdida de vidas humanas, o consecuencias económicas, sociales o medioambientales considerables.	Edificios residenciales y administrativos, edificios públicos en los que las consecuencias de fallo son medias (por ejemplo, un edificio de oficinas).
CC1	Consecuencias bajas de pérdida de vidas humanas, o consecuencias económicas, sociales o medioambientales pequeñas o despreciables.	Edificios agrícolas en los que normalmente no entre gente (por ejemplo, almacenes), invernaderos.

(2) El criterio para la clasificación de las consecuencias es la importancia (en términos de consecuencias del fallo) de la estructura o del elemento estructural considerado, véase el apartado B.3.3.

(3) Dependiendo de la forma estructural y de las decisiones tomadas durante el proyecto, los elementos particulares de la estructura pueden proyectarse para una clase de consecuencias, igual, mayor o menor que la del conjunto de la estructura.

NOTA: Actualmente los requisitos de fiabilidad están relacionados con los elementos estructurales de las obras de construcción.

B.3.2 Diferenciación mediante valores de β

(1) Las clases de fiabilidad (RC) pueden definirse mediante el concepto de índice de fiabilidad β .

(2) Se pueden asociar tres clases de fiabilidad RC1, RC2 y RC3 con las tres clases de consecuencias CC1, CC2 y CC3.

(3) La tabla B2 da los valores mínimos recomendados para los índices de fiabilidad asociados con las clases de fiabilidad (véase también el Apéndice C).

(4) El Artículo 5.2.1.1 del Código Estructural establece que, el nivel de fiabilidad mínima que, con carácter general, debe asegurarse en las estructuras incluidas en el ámbito de este Código, vendrá definido por la clase de fiabilidad RC2.

Tabla B2 Valores mínimos recomendados para los índices de fiabilidad β (Estados Límite Últimos)

Clase de fiabilidad	Valores mínimos de β	
	Periodo de referencia de 1 año	Periodo de referencia de 50 años
RC3	5,2	4,3
RC2	4,7	3,8
RC1	4,2	3,3

B.3.3 Diferenciación mediante medidas relativas a los coeficientes parciales

(1) Una forma de alcanzar el nivel de fiabilidad requerido es mediante el uso de distintas clases de coeficientes γ_F en las combinaciones para situaciones de proyecto persistentes. Por ejemplo, para unos mismos niveles de supervisión de proyecto e inspección de la ejecución, se puede aplicar a los coeficientes parciales un coeficiente multiplicador K_{FI} , véase la tabla B3.

Tabla B3 Coeficiente K_{FI} para acciones

Factor K_{FI} para acciones	Clase de fiabilidad		
	RC1	RC2	RC3
K_{FI}	0,9	1,0	1,1

NOTA: En particular, para la clase RC3, se tiende normalmente a utilizar otras medidas como las descritas en este apéndice, antes que utilizar los coeficientes K_{FI} . El coeficiente K_{FI} solo debe aplicarse a las acciones desfavorables.

(2) El nivel de fiabilidad también puede aplicarse a través de coeficientes parciales de resistencia de los materiales γ_M . Una excepción es la relativa a la comprobación de fatiga (véanse los Anejos 22 a 29 de este Código Estructural). Véase también el apartado B.6.

(3) La aplicación de las clases de γ_F puede asociarse al cumplimiento de medidas adicionales como, por ejemplo, el nivel del control de calidad para el proyecto y para la ejecución de la estructura. En este apéndice, se ha adoptado un sistema de tres niveles de control durante el proyecto y la ejecución. Se proponen los niveles de supervisión de proyecto y de inspección asociados con las clases de fiabilidad.

(4) Puede haber casos (por ejemplo, farolas, mástiles, etc.) donde, por razones de economía, la estructura deba estar en RC1, pero sometida a unos niveles más elevados de supervisión de proyecto y de inspección de la ejecución.

B.4 Niveles de supervisión del proyecto

(1) Los niveles en la supervisión del proyecto consisten en distintas medidas de organización de control de calidad, que pueden usarse conjuntamente. Por ejemplo, la definición del nivel de supervisión de proyecto (apartado B.4(2)) puede utilizarse junto con otras medidas como la clasificación del contratista y el control por parte de las autoridades (apartado B.4(3)).

(2) En la tabla B4 se muestran tres niveles posibles de supervisión de proyecto (DSL). Los niveles de supervisión de proyecto pueden relacionarse con la clase de fiabilidad seleccionada o ser escogidos de acuerdo con la importancia de la estructura en correspondencia con los requisitos nacionales o las indicaciones del proyecto e implementados a través de las medidas adecuadas de gestión de calidad. Véase el apartado 2.5.



Tabla B4 Niveles de supervisión de proyecto (DSL)

Niveles de supervisión de proyecto	Características	Requisitos mínimos recomendados para la comprobación de los cálculos, planos y pliegos
DSL3 relativo al RC3	Supervisión ampliada	Comprobación por un tercero: comprobación realizada por una organización distinta de la que redactó el proyecto
DSL2 relativo al RC2	Supervisión normal	Comprobación por personas distintas de las responsables de la redacción del proyecto y de acuerdo con el procedimiento de la organización.
DSL1 relativo al RC1	Supervisión normal	Autocontrol: comprobación realizada por la misma persona que ha redactado el proyecto

(3) Los niveles de supervisión de proyecto pueden incluir también una clasificación de los proyectistas y/o de los inspectores de proyecto (controladores, autoridades de control, etc.), dependiendo de su competencia, su experiencia, la organización a la que pertenezcan, y el tipo de obra proyectada.

NOTA: El tipo de obra, los materiales empleados y las formas estructurales pueden afectar a esta clasificación.

(4) Alternativamente, los niveles de supervisión de proyecto pueden consistir en una evaluación más precisa y detallada de la naturaleza y magnitud de las acciones a resistir por la estructura o del sistema de distribución de las cargas de proyecto, al objeto de controlar (restringir), de forma activa o pasiva, estas acciones.

B.5 Inspección durante la ejecución

(1) Se pueden introducir tres niveles de inspección (IL), como se muestra en la tabla B5. Los niveles de inspección pueden vincularse a las clases de gestión de calidad seleccionadas o implementadas en la obra, mediante las correspondientes medidas de gestión de calidad. Véase el apartado 2.5. Se dan más indicaciones en las correspondientes normas de ejecución referenciadas en los Anejos 19 a 32 de este Código Estructural o en la reglamentación específica vigente.

Tabla B5 Niveles de inspección (IL)

Niveles de inspección	Características	Requisitos
IL3 relativo al RC3	Inspección ampliada	Inspección por un tercero
IL2 relativo al RC2	Inspección normal	Comprobación de acuerdo con los procedimientos de la organización
IL1 relativo al RC1	Inspección normal	Autoinspección

NOTA: Los niveles de inspección definen los aspectos que deben ser cubiertos para la inspección de los productos y de la ejecución de las obras, así como la fiabilidad de dichas inspecciones. De este modo, las reglas variarán de un material estructural a otro y se darán en las correspondientes normas de ejecución.



B.6 Coeficientes parciales de seguridad para las propiedades de resistencia

(1) El coeficiente parcial de una propiedad de un material o producto, o de la resistencia de un elemento puede reducirse siempre que se utilice una clase de control superior a la necesaria de acuerdo con la tabla B5 y/o se especifiquen requisitos más severos.

NOTA: Para comprobar la eficacia a través de ensayos, véanse el apartado 5 y el Apéndice D.

NOTA: En los Anejos 19 a 32 de este Código Estructural o en la reglamentación específica vigente se dan o referencian reglas para distintos materiales.

NOTA: Dicha reducción, que tiene en cuenta, por ejemplo variaciones dimensionales o incertidumbres del modelo, no supone una modificación del nivel de fiabilidad, sino que se trata únicamente de una medida de compensación a la vista de la mayor eficacia de las medidas de control adoptadas.



Apéndice C Recomendaciones para el cálculo con coeficientes parciales y análisis de la fiabilidad

C.1 Alcance y campo de aplicación

(1) Este apéndice proporciona información y una base teórica sobre el método de los coeficientes parciales descrito en el apartado 6 y el Apéndice A. Este apéndice también proporciona la base para el Apéndice D y está relacionado con los contenidos del Apéndice B.

(2) Este apéndice también proporciona información sobre

- los métodos de fiabilidad estructural,
- la aplicación del método basado en la fiabilidad para calibrar los valores de cálculo y/o coeficientes parciales en las expresiones de cálculo,
- los formatos de comprobación de cálculo utilizados en los Anejos 19 a 32 de ese Código Estructural.

C.2 Notación

En este apéndice son de aplicación los siguientes símbolos.

Letras latinas mayúsculas

P_f	probabilidad de fallo
$Prob(.)$	probabilidad
P_s	probabilidad de supervivencia

Letras latinas minúsculas

a	propiedad geométrica
g	función de comportamiento

Letras griegas mayúsculas

Φ	función de distribución acumulada de la distribución Normal estándar
--------	--

Letras griegas minúsculas

α_E	coeficiente de sensibilidad FORM (método de fiabilidad de primer orden) para los efectos de las acciones
α_R	coeficiente de sensibilidad FORM (método de fiabilidad de primer orden) para la resistencia
β	índice de fiabilidad
θ	incertidumbre del modelo
μ_X	valor medio de X
σ_X	desviación estándar de X
V_X	coeficiente de variación de X



C.3 Introducción

(1) En el método de los coeficientes parciales se dan valores de cálculo de las variables básicas (es decir, acciones, resistencias y propiedades geométricas) a través del uso de coeficientes parciales y coeficientes Ψ , debiéndose realizar una comprobación para asegurar que no se ha superado el estado límite correspondiente. Véase el apartado C.7.

NOTA: El apartado 6 describe los valores de cálculo de las acciones y efectos de las acciones y los valores de cálculo de las propiedades de materiales y productos, así como de los datos geométricos.

(2) En principio, los valores numéricos de los coeficientes parciales y los coeficientes Ψ pueden determinarse de cualquiera de estas dos formas:

a) En base a una calibración por la larga experiencia en la tradición constructora.

NOTA: Para la mayoría de los coeficientes parciales y de los coeficientes Ψ propuestos en este Código Estructural, este es el principio más predominante.

b) En base a una evaluación estadística de datos experimentales y observaciones de campo. (Esto debe desarrollarse dentro del marco de una teoría probabilística de fiabilidad).

(3) Cuando se utilice el método 2b), tanto por sí solo como en combinación con el método 2a), los coeficientes parciales de los Estados Límite Últimos para los distintos materiales y acciones deben calibrarse de forma que los niveles de fiabilidad para las estructuras representativas sean lo más parecidos posible al índice de fiabilidad objetivo. Véase el apartado C.6.

C.4 Resumen de los métodos de fiabilidad

(1) La figura C1 presenta un resumen esquemático de los distintos métodos disponibles para la calibración de las ecuaciones para la obtención del coeficiente parcial (estados límite) y la relación entre ellas.

(2) Los procedimientos de calibración estadística para los coeficientes parciales puede subdividirse en dos clases principales:

- métodos completamente probabilísticos (Nivel III), y
- métodos de fiabilidad de primer orden (FORM) (Nivel II).

NOTA 1: Los métodos completamente probabilísticos (Nivel III) dan, en principio, una respuesta correcta para el problema de la fiabilidad abordado. Los métodos de Nivel III raramente se usan en la calibración de los Códigos de proyecto dada la frecuente falta de datos estadísticos.

NOTA 2: Los métodos de Nivel II hacen uso de ciertas aproximaciones bien definidas y alcanzan resultados que pueden considerarse suficientemente adecuados para la mayoría de las aplicaciones estructurales.

(3) Tanto en los métodos de Nivel II como en los de Nivel III la medida de la fiabilidad debe identificarse con la probabilidad de supervivencia $P_s = (1 - P_f)$, donde P_f es la probabilidad de fallo para el modo de fallo considerado y con un periodo de referencia apropiado. Si la probabilidad de fallo calculada es superior a un valor objetivo prefijado P_0 , entonces la estructura debe considerarse como no segura.

NOTA: La "probabilidad de fallo" y su correspondiente índice de fiabilidad (véase el apartado C.5) únicamente son valores teóricos que no representen necesariamente las tasas de fallo reales, pero se utilizan como valores operativos para los propósitos de calibración del Código y la comparación de los niveles de fiabilidad de las estructuras.

(4) Los Anejos 19 a 32 de este Código Estructural se han basado principalmente en el método a (véase la figura C1).

NOTA: Un ejemplo de método equivalente es el proyecto asistido por ensayos (ver Apéndice D).

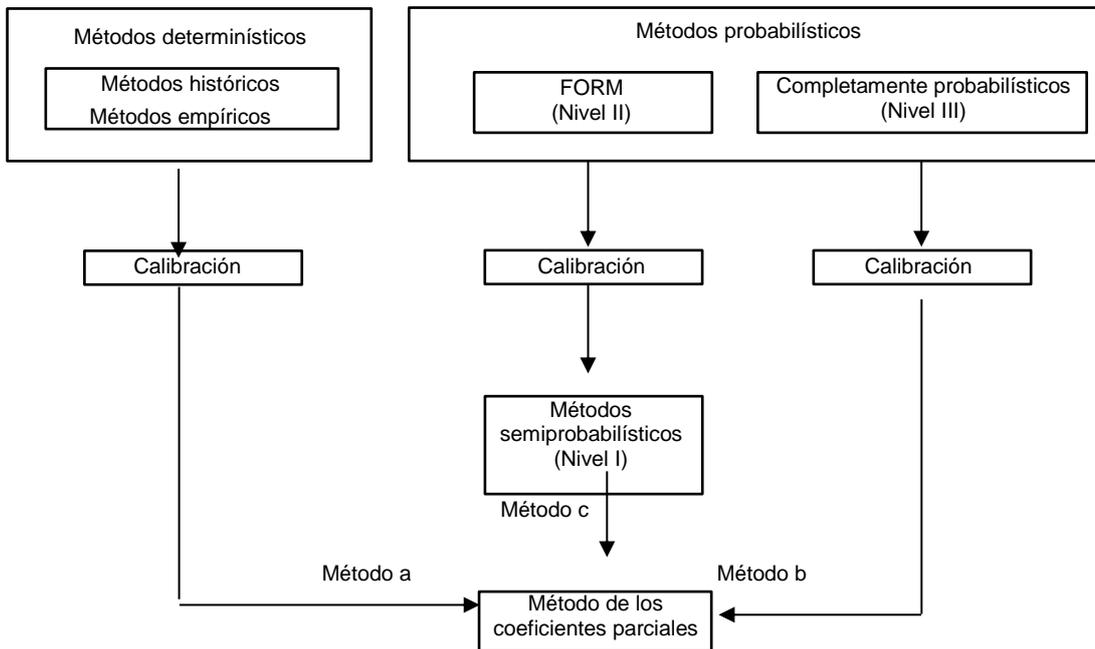


Figura C1 Resumen de los métodos de fiabilidad

C.5 Índice de fiabilidad β

(1) En los procedimientos de Nivel II, se suele definir una medida alternativa de la fiabilidad, definida mediante el índice de fiabilidad β , que está relacionado con P_f por:

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (C.1)$$

donde Φ es la función de distribución acumulativa de la distribución Normal estándar.

La relación entre Φ y β se da en la tabla C1.

Tabla C1 Relación entre β y P_f

P_f	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}
β	1,28	2,32	3,09	3,72	4,27	4,75	5,20

(2) La probabilidad de fallo P_f puede expresarse a través de la función de comportamiento g de forma que se considera que una estructura resiste si $g > 0$ y falla si $g \leq 0$:

$$P_f = \text{Prob}(g \leq 0) \quad (C.2a)$$

Si R es la resistencia y E los efectos de las acciones, la función de comportamiento g es:

$$g = R - E \quad (C.2b)$$

siendo R , E y g variables aleatorias.

(3) Si g sigue la distribución Normal, β se toma como:

$$\beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g}$$

donde:

μ_g es el valor medio de g , y

σ_g es la desviación estándar,

de forma que:

$$\mu_g - \beta\sigma_g = 0 \quad (C.2d)$$

y

$$P_f = Prob(g \leq 0) = Prob(g \leq \mu_g - \beta\sigma_g) \quad (C.2e)$$

Para otras distribuciones de g , β es únicamente una medida convencional de fiabilidad

$$P_s = (1 - P_f)$$

C.6 Valores objetivo del índice de fiabilidad β

(1) Los valores objetivo para el índice de fiabilidad β para las distintas situaciones de proyecto y para los periodos de referencia de 1 y 50 años, son los indicados en la tabla C2. Los valores de β en la tabla C2 corresponden a niveles de seguridad para las clases de fiabilidad RC2 de los elementos estructurales (véase Apéndice B).

NOTA 1: Para estas evaluaciones de β :

- Habitualmente se han utilizado las distribuciones log-normal o de Weibull para los parámetros de resistencia del material, resistencia estructural y para las incertidumbres del modelo.
- La distribución Normal se ha utilizado habitualmente para el peso propio.
- En las comprobaciones en las que no intervengan fenómenos de fatiga se ha venido utilizando, como simplificación, la distribución Normal para acciones variables, si bien serían más apropiadas las distribuciones extremales.

NOTA 2: Cuando la incertidumbre principal venga de acciones que tienen un máximo estadísticamente independiente cada año, los valores β para un periodo de referencia distinto se pueden calcular utilizando la siguiente expresión:

$$\Phi(\beta_n) = [\Phi(\beta_1)]^n \quad (C.3)$$

donde:

β_n es el índice de fiabilidad para un periodo de referencia de n años

β_1 es el índice de fiabilidad para un año.

Tabla C2 Índice de fiabilidad objetivo β para elementos estructurales de Clase RC2¹⁾

Estado límite	Índice de fiabilidad objetivo	
	1 año	50 años
Último	4,7	3,8
Fatiga	-	1,5 a 3,8 ²⁾
Servicio (irreversible)	2,9	1,5
<p>1) Véase Apéndice B.</p> <p>2) Depende del grado de facilidad de inspección, de reparación y de la tolerancia al daño.</p>		

(2) La frecuencia real de fallo es significativamente dependiente del error humano, lo que no se considera en el método de los coeficientes parciales (véase el Apéndice B). Por lo tanto, β no proporciona necesariamente una indicación de la frecuencia real del fallo estructural.

C.7 Enfoque para la calibración de los valores de cálculo

(1) En el método del valor de cálculo para la comprobación de la fiabilidad (véase la figura C1), los valores de cálculo necesitan estar definidos para todas las variables básicas. Se considera que un dimensionamiento es aceptable si no se alcanzan los estados límite cuando se introducen los valores de cálculo en los modelos de análisis. En notación simbólica se expresa como:

$$E_d < R_d \quad (C.4)$$

donde el subíndice “d” se refiere a los valores de cálculo. Este es el modo práctico de asegurar que el índice de fiabilidad β es igual o mayor que el valor objetivo.

E_d y R_d pueden expresarse de forma parcialmente simbólica como:

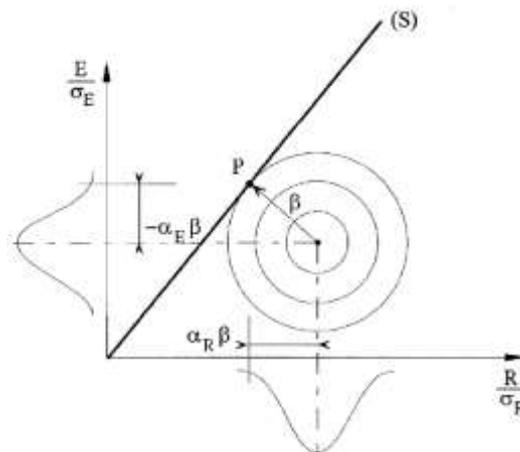
$$E_d = E \{F_{d1}, F_{d2}, \dots, a_{d1}, a_{d2}, \dots, \theta_{d1}, \theta_{d2}, \dots\} \quad (C.5a)$$

$$R_d = R \{X_{d1}, X_{d2}, \dots, a_{d1}, a_{d2}, \dots, \theta_{d1}, \theta_{d2}, \dots\} \quad (C.5b)$$

donde:

- E es el efecto de la acción
- R es la resistencia
- F es una acción
- X es la propiedad del material
- a es una propiedad geométrica
- θ es una incertidumbre del modelo.

Para estados límite particulares (por ejemplo fatiga) puede ser necesaria una formulación más general para expresar un estado límite.



(S): límite de fallo $g = R - E = 0$

P: punto de cálculo

Figura C2 Punto de cálculo e índice de fiabilidad β acorde con el método de fiabilidad de primer orden (FORM) para variables normalmente distribuidas sin correlación.

(2) Los valores de cálculo deben basarse en los valores de las variables básicas en el punto de cálculo del FORM que puede definirse como el punto en la superficie de fallo ($g = 0$) más próximo al punto



correspondiente a los valores medios, en el espacio de las variables normalizadas (como se indica en el diagrama de la figura C2).

(3) Los valores de cálculo de los efectos de las acciones E_d y las resistencias R_d deben definirse de forma que la probabilidad de tener un valor más desfavorable sea como sigue:

$$P(E > E_d) = \Phi(+\alpha_E\beta) \quad (C.6a)$$

$$P(R \leq R_d) = \Phi(-\alpha_R\beta) \quad (C.6b)$$

donde:

β es el índice de fiabilidad objetivo (véase el apartado C.6).

α_E y α_R , con $|\alpha| \leq 1$, son los valores de los coeficientes de sensibilidad del FORM. El valor de α es negativo para acciones y efectos de las acciones desfavorables, y positivo para las resistencias.

α_E y α_R pueden tomarse como $-0,7$ y $0,8$ respectivamente, siempre que:

$$0,16 < \sigma_E/\sigma_R < 7,6 \quad (C.7)$$

donde σ_E y σ_R son las desviaciones estándar del efecto de las acciones y de la resistencia, en las expresiones (C.6a) y (C.6b) respectivamente. Esto da:

$$P(E > E_d) = \Phi(-0,7\beta) \quad (C.8a)$$

$$P(R \leq R_d) = \Phi(-0,8\beta) \quad (C.8b)$$

(4) Cuando no se satisfaga la condición (C.7), debe utilizarse $\alpha = \pm 1,0$ para la variable con la mayor desviación estándar y, $\alpha = \pm 0,4$ para la variable con la menor desviación estándar.

(5) Cuando el modelo de acciones contenga múltiples variables básicas, debe utilizarse la expresión (C.8a) únicamente para la variable predominante. Para las acciones concomitantes pueden definirse los valores de cálculo mediante:

$$P(E > E_d) = \Phi(-0,4x0,7x\beta) = \Phi(-0,28\beta) \quad (C.9)$$

NOTA: Para $\beta = 3,8$ los valores definidos por la expresión (C.9) corresponden aproximadamente al cuantil de 0,90.

(6) Las expresiones que se proporcionan en la tabla C3 deben utilizarse para obtener los valores de cálculo de las variables para una distribución de probabilidad dada.

Tabla C3 Valores de cálculo para varias funciones de distribución

Distribución	Valores de cálculo
Normal	$\mu - \alpha\beta\sigma$
Log-normal	$\mu \exp(-\alpha\beta V)$ para $V = \sigma/\mu < 0,2$
Gumbel	$u - \frac{1}{a} \ln\{\ln\Phi(-\alpha\beta)\}$ donde $u = \mu - \frac{0,577}{a}$; $a = \frac{\pi}{\sigma\sqrt{6}}$

NOTA: En estas expresiones, μ , σ y V son, respectivamente, el valor medio, la desviación estándar y el coeficiente de variación de una variable dada. Para acciones variables, estas pueden basarse en el mismo periodo de referencia que β .

(7) Un método para obtener el coeficiente parcial correspondiente es dividir el valor de cálculo de una acción variables entre su valor característico representativo.



C.8 Formatos de comprobación de la fiabilidad

(1) En los Anejos 19 a 32 de este Código Estructural o en la reglamentación específica vigente, los valores de cálculo de las variables básicas, X_d y F_d , no se introducen, en general, directamente en las ecuaciones de cálculo de los coeficientes parciales. Se introducen en términos de sus valores representativos X_{rep} y F_{rep} , que pueden ser:

- valores característicos, es decir, valores con una probabilidad establecida o supuesta de ser superados, por ejemplo para acciones, propiedades de materiales y propiedades geométricas (véanse los apartados 1.4.3.14, 1.4.4.1 y 1.4.5.1, respectivamente),
- los valores nominales, que se tratan como valores característicos para las propiedades de los materiales (véase el apartado 1.4.4.3) y como valores de cálculo para propiedades geométricas (véase el apartado 1.4.5.2).

(2) Los valores representativos X_{rep} y F_{rep} , deben dividirse y/o multiplicarse, respectivamente, por los coeficientes parciales apropiados para obtener los valores de cálculo X_d y F_d .

NOTA: Véase también la expresión (C.10).

(3) Los valores de cálculo de las acciones F , propiedades de los materiales X y propiedades geométricas a , se dan en las expresiones (6.1), (6.3) y (6.4), respectivamente.

Cuando se utilice un valor superior de la resistencia de cálculo (véase el apartado 6.3.3), la expresión (6.3) toma la forma:

$$X_d = \eta \gamma_{fM} X_{k,Sup} \quad (C.10)$$

donde γ_{fM} es un coeficiente adecuado superior a 1.

NOTA: La expresión (C.10) puede utilizarse para el diseño por capacidad.

(4) Los valores de cálculo de las incertidumbres del modelo pueden incorporarse a las expresiones de cálculo a través de coeficientes parciales γ_{Sd} y γ_{Rd} aplicados al modelo total, de forma que:

$$E_d = \gamma_{Sd} E \{ \gamma_{gi} G_{kj}; \gamma_P P; \gamma_{q1} Q_{k1}; \gamma_{qi} \Psi_{0i} Q_{ki}; a_d \dots \} \quad (C.11)$$

$$R_d = R \left\{ \frac{\eta X_k}{\gamma_m}; a_d \dots \right\} / \gamma_{Rd} \quad (C.12)$$

(5) El coeficiente Ψ , que tiene en cuenta las reducciones de los valores de cálculo de las acciones variables, se aplica como Ψ_0 , Ψ_1 o Ψ_2 sobre las acciones variables concomitantes que ocurren simultáneamente.

(6) Cuando se requiera, se pueden hacer las simplificaciones siguientes a las expresiones (C.11) y (C.12).

- a) En el lado de la carga (para una acción simple o donde exista linealidad de los efectos de las acciones):

$$E_d = E \{ \gamma_{F,i} F_{rep,i}; a_d \} \quad (C.13)$$

- c) En el lado de la resistencia, el formato general viene dado en las expresiones (6.6) y se dan más simplificaciones en los anejos de este Código Estructural en función del material correspondiente. Solo se podrán hacer simplificaciones si el nivel de fiabilidad no disminuye.

NOTA: En los anejos mencionados se encuentran muy a menudo modelos no lineales y modelos multi-variables de acciones y/o resistencias. En esos casos, las relaciones anteriores se vuelven más complejas

C.9 Coeficientes parciales

(1) Los coeficientes parciales empleados en este anejo se definen en el apartado 1.5.

(2) Las relaciones entre los coeficientes parciales de los anejos se muestran esquemáticamente en la figura C3.

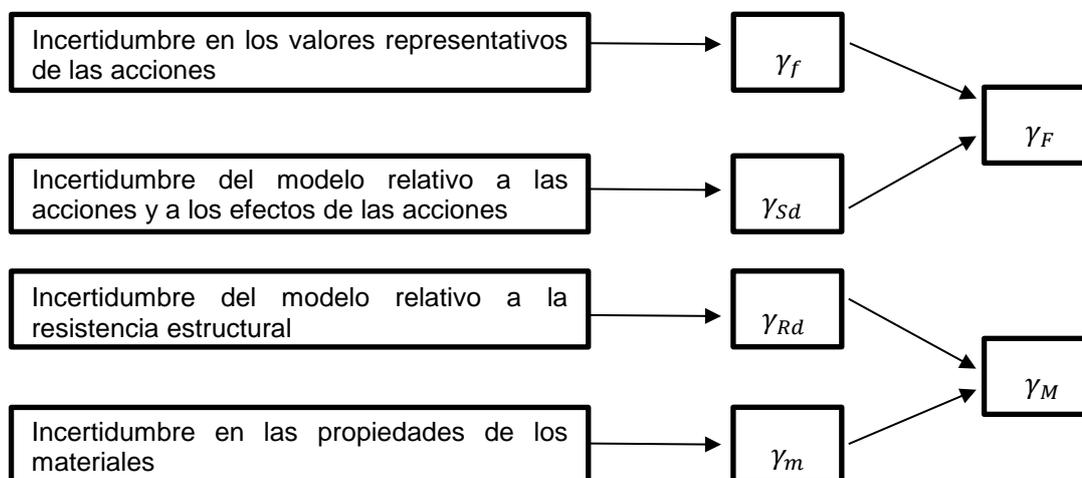


Figura C3 Relación entre los coeficientes parciales.

C10 Coeficientes Ψ_0

(1) La tabla C4 recoge las expresiones para la obtención de los coeficientes Ψ_0 (véase el apartado 6) para el caso en el que haya dos acciones variables.

(2) Las expresiones de la tabla C4 se han calculado utilizando los siguientes supuestos y condiciones:

- las dos acciones a combinar son independientes entre sí,
- el periodo básico (T_1 o T_2) para cada acción es constante, siendo T_1 el periodo básico de mayor valor,
- los valores de las acciones son constantes en sus respectivos periodos básicos,
- las intensidades de una acción, en sus respectivos periodos básicos, no están correlacionadas,
- las dos acciones pertenecen a procesos ergódicos.

(3) Las funciones de distribución de la tabla C4 se refieren a los máximos dentro del periodo de referencia. Estas funciones de distribución son funciones totales que consideran la probabilidad de que el valor de una acción sea cero durante ciertos periodos.

Tabla C4 Expresiones para Ψ_0 para el caso en el que haya dos acciones variables

Distribución	$\Psi_0 = F_{\text{concomitante}} / F_{\text{principal}}$
General	$\frac{F_S^{-1}\{\Phi(0,4\beta t)^{N_1}\}}{F_S^{-1}\{\Phi(0,7\beta t)^{N_1}\}}$ con $\beta' = -\Phi^{-1}\left\{\frac{\Phi(-0,7\beta)}{N_1}\right\}$
Aproximación para N_1 muy elevada	$\frac{F_S^{-1}\{\exp[-N_1\Phi(0,4\beta t)]\}}{F_S^{-1}\{\Phi(0,7\beta)\}} - \Phi^{-1}\left\{\frac{\Phi(-0,7\beta)}{N_1}\right\}$ con $\beta' =$
Normal (aproximación)	$\frac{1 + (0,28\beta - 0,7\ln N_1)V}{1 + 0,7\beta V}$



Gumbel (aproximación)	$\frac{1 - 0,78V[0,58 + \ln(-\ln\Phi(0,28\beta)) + \ln N_1]}{1 - 0,78V[0,58 + \ln(-\ln\Phi(0,7\beta))]}$	
F _s (.)	es la función de distribución de la probabilidad del valor extremo de la acción concomitante en el periodo de referencia T	
Φ(.)	es la función de distribución Normal estándar	
T	es el periodo de referencia	
T ₁	es el mayor de los periodos básicos para las acciones a combinar	
N ₁	es el cociente T/T ₁ aproximado al entero más próximo	
B	es el índice de fiabilidad	
V	es el coeficiente de variación de la acción concomitante para el periodo de referencia	



Apéndice D Recomendaciones para el cálculo asistido por ensayos

D.1 Alcance y campo de aplicación

(1) Este apéndice proporciona indicaciones sobre los apartados 3.4, 4.2 y 5.2.

D.2 Notación

En este apéndice son de aplicación los siguientes símbolos.

Letras latinas mayúsculas

$E(.)$	El valor medio de $(.)$
V	Coficiente de variación [$V = (\text{desviación estándar})/(\text{valor medio})$]
V_x	Coficiente de variación de X
V_δ	Estimador del coeficiente de variación del término de error δ
\underline{X}	Serie de variables básicas $j X_1 \dots X_j$
$X_{k(n)}$	Valor característico, incluyendo la incertidumbre estadística para una muestra de tamaño n excluyendo cualquier factor de conversión
\underline{X}_m	Serie de valores medios de las variables básicas
\underline{X}_n	Serie de valores nominales de las variables básicas

Letras latinas minúsculas

b	Coficiente de corrección
b_i	Coficiente de corrección para la muestra i del ensayo
$g_{rt}(\underline{X})$	Función de resistencia (de la variable básica \underline{X}) utilizada como el modelo de proyecto
$k_{d,n}$	Coficiente del cuantil de proyecto
k_n	Coficiente del cuantil característico
m_x	Media de los n resultados de una muestra
n	Número de experimentos o resultados numéricos del ensayo
r	Valor de la resistencia
r_d	Valor de cálculo de la resistencia
r_e	Valor de la resistencia experimental
r_{ee}	Valor extremo (máximo o mínimo) de la resistencia experimental (es decir, valor de r_e que más se desvía del valor medio r_{em})
r_{ei}	Resistencia experimental para la muestra i
r_{em}	Valor medio de la resistencia experimental
r_k	Valor característico de la resistencia
r_m	Valor de la resistencia calculado utilizando los valores medios \underline{X}_m de las variables básicas
r_n	Valor nominal de la resistencia
r_t	Resistencia teórica determinada a partir de la función de resistencia $g_{rt}(\underline{X})$



r_{ti}	Resistencia teórica determinada utilizando los parámetros \underline{X} medidos para la muestra i
s	Valor estimado de la desviación estándar σ
s_{Δ}	Valor estimado de σ_{Δ}
s_{δ}	Valor estimado de σ_{δ}

Letras griegas mayúsculas

Φ	Función de distribución acumulada de la distribución Normal estándar
Δ	Logaritmo del término de error δ [$\Delta_i = \ln(\delta_i)$]
$\bar{\Delta}$	Valor estimado de $E(\Delta)$

Letras griegas minúsculas

α_E	Coefficiente de sensibilidad FORM (método de fiabilidad de primer orden) para los efectos de las acciones
α_R	Coefficiente de sensibilidad FORM (método de fiabilidad de primer orden) para la resistencia
β	Índice de fiabilidad
γ_M^*	Coefficiente parcial corregido para resistencias [$\gamma_M^* = r_n/r_d$ así $\gamma_M^* = k_c \gamma_M$]
δ	Término de error
δ_i	Término de error observado para la muestra i , obtenido de la comparación de la resistencia experimental r_{ei} y el valor medio corregido de la resistencia teórica br_{ei}
η_d	Valor de cálculo del posible factor de conversión (siempre que no esté incluido en el coeficiente parcial de la resistencia γ_M)
η_k	Coefficiente de reducción aplicable en caso de disponer de información previa
σ	Desviación estándar [$\sigma = \sqrt{\text{varianza}}$]
σ_{Δ}^2	Varianza del término Δ

D.3 Tipos de ensayos

(1) Debe distinguirse entre los siguientes tipos de ensayos:

- Ensayos para establecer directamente la resistencia última o las propiedades de servicio de las estructuras o elementos estructurales para unas condiciones de carga dadas. Estos ensayos pueden realizarse, por ejemplo, para cargas de fatiga o cargas de impacto.
- Ensayos para obtener propiedades específicas de los materiales utilizando procedimientos de ensayo específicos; por ejemplo, los ensayos del terreno *in situ* o en el laboratorio, o en el ensayo de nuevos materiales.
- Ensayos para reducir las incertidumbres en los parámetros de los modelos de carga o del efecto de la carga; por ejemplo, mediante ensayo en túnel de viento o en ensayos para identificar acciones de oleaje o de corrientes.
- Ensayos para reducir las incertidumbres en los parámetros empleados en los modelos de resistencia; por ejemplo, mediante el ensayo de elementos estructurales o conjuntos de elementos estructurales (por ejemplo, cubiertas o forjados).



- e) Ensayos de control para comprobar la identidad o calidad de los productos suministrados o la coherencia de las características de producción; por ejemplo, ensayo de cables de puentes o ensayo de probetas de hormigón.
- f) Ensayos realizados durante la ejecución con el fin de obtener la información necesaria para parte de la ejecución; por ejemplo, ensayo de la resistencia de un pilote, ensayo de las fuerzas del cable durante la ejecución.
- g) Ensayo de control para comprobar el comportamiento de una estructura real o de los elementos estructurales tras la finalización de su ejecución, por ejemplo, para obtener la flecha elástica, frecuencias de vibración o amortiguamiento.

(2) Para los ensayos tipo (a), (b), (c) y (d), los valores de cálculo a utilizar deben obtenerse, cuando sea posible, a partir de resultados de ensayos mediante la aplicación de técnicas estadísticas reconocidas. Véanse los apartados D.5 a D.8.

NOTA: Se pueden necesitar técnicas especiales para evaluar los resultados de ensayo tipo (c).

(3) Los ensayos tipo (e), (f) y (g) pueden considerarse ensayos de aceptación cuando no se disponga de resultados de ensayos en el momento del proyecto. Los valores de proyecto deben ser estimados de forma conservadora, de manera que se puedan cumplir los criterios de aceptación (ensayos (e), (f), (g)) en un nivel posterior.

D.4 Planificación de los ensayos

(1) Antes de realizar los ensayos, debe acordarse un plan de ensayos con la organización que los vaya a realizar. Este plan debe contener los objetivos del ensayo y todas las especificaciones necesarias para la selección o producción de las muestras de ensayo, la ejecución de los ensayos y la evaluación de los mismos. El plan de ensayo debe cubrir:

- los objetivos y el alcance,
- la predicción de los resultados de ensayo,
- la especificación de las probetas de ensayo y la toma de muestras,
- las especificaciones de la aplicación de las cargas,
- los dispositivos de ensayo,
- las medidas a realizar, y
- la evaluación e informe de los ensayos.

Objetivos y alcance: El objetivo de los ensayos debe establecerse con claridad, por ejemplo, las propiedades requeridas, la influencia de la variación de ciertos parámetros de proyecto durante el ensayo y el rango de validez. Deben especificarse las limitaciones de los ensayos y las conversiones necesarias (por ejemplo, efectos de escala).

Predicción de los resultados de ensayo: Deben tenerse en cuenta todas las propiedades y circunstancias que pueden afectar a la predicción de los resultados de los ensayos, incluyendo:

- parámetros geométricos y su variabilidad,
- imperfecciones geométricas,
- propiedades de los materiales,
- parámetros afectados por los procedimientos de fabricación y ejecución,
- efectos de escala de las condiciones ambientales teniendo en cuenta, si afecta, el programa detallado de aplicación de cargas.



Deben describirse los modos de fallo esperados y/o modelos de cálculo, junto con las variables correspondientes. Si hay una duda significativa acerca de qué modo de fallo puede ser crítico, entonces, el plan de ensayo debe desarrollarse en base a ensayos piloto adicionales.

NOTA: Debe prestarse atención al hecho de que un elemento estructural pueda poseer varios modos de fallo diferentes.

Especificación de las muestras de ensayo y muestreo: Las muestras de ensayo deben especificarse, u obtenerse mediante muestreo, de forma que representen las condiciones de la estructura real.

Los factores que deben tenerse en cuenta incluyen:

- dimensiones y tolerancias,
- materiales y fabricación de prototipos,
- número de probetas de ensayos,
- procedimientos de muestreo,
- coacciones.

El objetivo del procedimiento de toma de muestras debe ser el de obtener una muestra estadísticamente representativa.

Debe prestarse atención a cualquier diferencia entre las muestras de ensayo y la población del producto que pueda afectar a los resultados del ensayo.

Especificaciones de la carga: las condiciones de carga y medioambientales a especificar para el ensayo deben incluir:

- puntos de carga,
- historia de cargas,
- coacciones,
- temperaturas,
- humedad relativa,
- carga por control de la deformación o de la fuerza, etc.

La secuencia de carga debe elegirse de forma que represente el uso previo del elemento estructural, tanto bajo condiciones normales de uso como bajo condiciones severas. Las interacciones entre la respuesta estructural y el equipo empleado para aplicar la carga, deben tenerse en cuenta, en su caso.

Cuando el comportamiento estructural dependa de los efectos de una o más acciones que no vayan a variar sistemáticamente, es conveniente especificar dichos efectos mediante sus valores representativos.

Dispositivos de ensayo: el equipo de ensayo debe ser el adecuado para el tipo de ensayos y el rango esperado de las mediciones. Debe prestarse especial atención a las medidas para poder disponer de la resistencia y rigidez suficientes de los equipos de carga y elementos de soporte, así como disponer de espacio suficiente para las deformaciones, etc.

Mediciones: Antes del ensayo, deben enumerarse todas las propiedades susceptibles de ser medidas para cada una de las probetas de ensayo. Adicionalmente debe hacerse una lista:

- a) de los puntos de medida,
- b) de los procedimientos para el registro de los resultados, incluyéndose si corresponde:
 - el historial de desplazamientos a lo largo del tiempo,



- las velocidades,
- las aceleraciones,
- las deformaciones unitarias,
- las fuerzas y presiones,
- la frecuencia requerida,
- la precisión de las medidas, y
- los dispositivos de medida adecuados.

Evaluación e informe de los ensayos: Para indicaciones específicas, véanse los apartados D.5 a D.8. Deberá indicarse cualquier norma en la que se basen los ensayos.

D.5 Obtención de los valores de cálculo

(1) La obtención, a partir de ensayos, de los valores de cálculo de una propiedad de un material, un parámetro del modelo o una resistencia, deben realizarse de una de las siguientes formas:

- a) mediante la evaluación de un valor característico, que se dividirá entre un coeficiente parcial y, posiblemente, se tenga que multiplicar por un coeficiente de conversión explícito, si fuera necesario (véanse los apartados D.7.2 y D.8.2),
- b) mediante determinación directa del valor de cálculo, justificando implícita o explícitamente la conversión de los resultados y la fiabilidad total requerida (véanse los apartados D.7.3 y D.8.3).

NOTA: En general, es preferible al método a) siempre que el valor del coeficiente parcial se determine a partir del procedimiento normal de cálculo (véase el punto (3) de este apartado).

(2) En el cálculo del valor característico a partir de ensayos (Método (a) recogido en el apartado D.8.2) debe tenerse en cuenta:

- a) la dispersión de los datos del ensayo,
- b) la incertidumbre estadística asociada al número de ensayos,
- c) información estadística previa.

(3) El coeficiente parcial a aplicar al valor característico, debe tomarse del anejo apropiado de este Código Estructural, siempre que haya una similitud suficiente entre los ensayos y el campo de aplicación usual del coeficiente parcial en las comprobaciones numéricas.

(4) Si la respuesta de la estructura o elemento estructural o la resistencia del material dependen de factores que no están suficientemente cubiertos por los ensayos como:

- los efectos del tiempo y la duración,
- los efectos de escala y tamaño,
- las distintas condiciones ambientales, de carga y de contorno,
- los efectos de la resistencia,

el modelo de cálculo debe tener en cuenta dichos factores de manera apropiada.

(5) En casos especiales en los que se utilice el método indicado en el apartado D.5(1)b), la determinación de los valores de cálculo deberá tener en cuenta los siguientes aspectos:

- los estados límite correspondientes,
- el nivel de fiabilidad requerido,



- la compatibilidad con las hipótesis correspondientes a la parte de las acciones en la expresión (C.8a),
- la vida útil requerida, en su caso,
- información previa deducida de casos similares.

NOTA: En los apartados D.6, D.7 y D.8 se puede encontrar más información.

D.6 Principios generales para las evaluaciones estadísticas

(1) Cuando se evalúen los resultados de los ensayos, deben compararse el comportamiento de las probetas de ensayo y sus modos de fallo con las predicciones teóricas. Cuando se produzcan desviaciones significativas respecto a la predicción, deberá buscarse una explicación, eventualmente con la realización de ensayos adicionales, tal vez bajo condiciones distintas, o la modificación del modelo teórico.

(2) La evaluación de los resultados de los ensayos debe basarse en métodos estadísticos, con el uso de la información (estadística) disponible sobre el tipo de distribución a emplear y sus parámetros asociados. Los métodos contenidos en este apéndice solo podrán utilizarse cuando se satisfagan las siguientes condiciones:

- que los datos estadísticos (incluyendo la información previa) se tomen de poblaciones identificadas como suficientemente homogéneas, y
- que se disponga de un número suficiente de observaciones.

NOTA: Se pueden distinguir tres categorías principales en el nivel de interpretación de los resultados de ensayos:

- cuando se haga un único ensayo (o muy pocos ensayos), no es posible realizar una interpretación estadística clásica. Únicamente, el uso de una amplia información previa asociada con las hipótesis sobre los grados relativos de importancia de esta información y de los resultados de los ensayos, hacen posible presentar una interpretación como estadística (procedimientos bayesianos, véase la norma ISO 12491);
- si se realiza una serie mayor de ensayos para evaluar un parámetro, es posible realizar una interpretación estadística clásica. Los casos más comunes se tratan, como ejemplos, en el apartado D.7. Esta interpretación necesitará todavía el uso de información previa sobre el parámetro que, de todas formas, será menor que en el caso anterior;
- cuando se realice una serie de ensayos para calibrar un modelo (como una función) y uno o más parámetros asociados, es posible realizar una interpretación estadística clásica.

(3) El resultado de una evaluación de ensayos se considerará válido únicamente para las especificaciones y características de carga consideradas en el ensayo. Si los resultados pueden extrapolarse para abarcar otros parámetros de cálculo y situaciones de carga, deberá emplearse la información adicional disponible de ensayos previos o de bases teóricas.

D.7 Determinación estadística de una propiedad

D.7.1 Generalidades

(1) Este apartado da las expresiones de trabajo para la obtención de los valores de cálculo a partir de los tipos de ensayo a) y b) del apartado D.3(3) para una propiedad (por ejemplo, resistencia) cuando se utilicen los métodos de evaluación (a) y (b) del apartado D.5(1).

NOTA: Las expresiones que se presentan aquí, que emplean procedimientos bayesianos con distribuciones previas "vagas", llegan prácticamente a los mismos resultados que la estadística clásica con niveles de confianza de 0,75.

(2) La propiedad aislada X puede representar:

- a) una resistencia de un producto,
- b) una propiedad colaborante con la resistencia de un producto.

(3) En el caso a) puede aplicarse directamente el procedimiento de los apartados D.7.2 y D.7.3 para determinar los valores característicos, los de cálculo o los de los coeficientes parciales.

(4) En el caso b) puede considerarse que el valor de proyecto de la resistencia también puede incluir:

- los efectos de otras propiedades,
- la incertidumbre del modelo,
- otros efectos (escala, volumen, etc.)

(5) Las tablas y expresiones en los apartados D.7.2 y D.7.3 se basan en las siguientes hipótesis:

- todas las variables siguen una distribución Normal o una log-normal,
- no se conoce previamente el valor de la media,
- para el caso de “ V_x desconocido”, no hay conocimiento previo sobre el coeficiente de variación,
- para el caso de “ V_x conocido”, se conoce perfectamente el coeficiente de variación.

NOTA: La adopción de una distribución log-normal para ciertas variables tiene la ventaja de que no pueden aparecer valores negativos como, por ejemplo, para variables geométricas o de resistencia.

En la práctica, normalmente es preferible emplear el caso de “ V_x conocido” junto con la sobreestimación conservadora de V_x , mejor que aplicar las reglas dadas para el caso “ V_x desconocido”. Además, V_x , cuando sea conocido, debe suponerse no inferior a 0,10.

D.7.2 Evaluación mediante el valor característico

(1) El valor de cálculo de una propiedad X debe encontrarse mediante el empleo de:

$$X_d = \eta_d \frac{X_{k(n)}}{\gamma_m} = \frac{\eta_d}{\gamma_m} m_x \{1 - k_n V_x\} \quad (D.1)$$

donde:

η_d es el valor de cálculo del factor de conversión.

NOTA: La evaluación del factor de conversión correspondiente depende enormemente del tipo de ensayo y del tipo de material.

El valor de k_n puede obtenerse de la tabla D1.

(2) Cuando se utilice la tabla D1, debe considerarse uno de los dos casos siguientes:

- La fila “ V_x conocido” debe utilizarse si se conoce con anterioridad el coeficiente de variación V_x , o un límite superior realista del mismo.

NOTA: El conocimiento previo puede provenir de la evaluación de ensayos previos en situaciones comparables. Lo que es “comparable” debe determinarse mediante criterio ingenieril (véase el apartado D.7.1(3)).

- La fila “ V_x desconocido” debe utilizarse si el coeficiente de variación V_x no se conoce con anterioridad y, por lo tanto, necesita estimarse a partir de la muestra como:

$$s_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum (x_i - m_x)^2 \quad (D.2)$$

$$V_x = s_x / m_x \quad (D.3)$$

(3) El coeficiente parcial γ_m debe elegirse en concordancia con el campo de aplicación de los resultados del ensayo.



Tabla D1 Valores de k_n para el valor característico del 5%

n	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	∞
V_x conocido	2,31	2,01	1,89	1,83	1,80	1,77	1,74	1,72	1,68	1,67	1,64
V_x desconocido	-	-	3,37	2,63	2,33	2,18	2,00	1,92	1,76	1,73	1,64

NOTA 1: Esta tabla se basa en la distribución Normal.

NOTA 2: Con una distribución log-normal la expresión (D.1) se convierte en:

$$X_d = \frac{\eta_d}{\gamma_m} \exp[m_y - k_n s_y]$$

donde:

$$m_y = \frac{1}{n} \sum \ln(x_i)$$

Si V_x es conocido previamente, $s_y = \sqrt{\ln(V_x^2 + 1)} \approx V_x$

Si V_x es desconocido a priori, $s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (\ln x_i - m_y)^2}$

D.7.3 Evaluación directa del valor de cálculo para las comprobaciones en Estado Límite Último

(1) El valor de cálculo X_d de X debe hallarse utilizando:

$$X_d = \eta_d m_x \{1 - k_{d,n} V_x\} \quad (D.4)$$

En este caso, η_d debe cubrir todas las incertidumbres que no cubran los ensayos.

(2) $k_{d,n}$ debe obtenerse de la tabla D2.

Tabla D2 Valores de $k_{d,n}$ para el valor de cálculo del Estado Límite Último

n	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	∞
V_x conocido	4,36	3,77	3,56	3,44	3,37	3,33	3,27	3,23	3,16	3,13	3,04
V_x desconocido	-	-	-	11,40	7,85	6,36	5,07	4,51	3,64	3,44	3,04

NOTA 1: Esta tabla se basa en la hipótesis de que el valor de cálculo corresponde al resultado del producto $\alpha_R \beta = 0,8 \times 3,8 = 3,04$ (véase el Apéndice C) y en que X sigue una distribución Normal. Esto da una probabilidad de que se produzca un valor inferior alrededor del 0,1%.

NOTA 2: Con una distribución log-normal, la expresión (D.4) se convierte en:

$$X_d = \eta_d \exp[m_y - k_{d,n} s_y]$$

D.8 Determinación estadística de modelos de resistencia

D.8.1 Generalidades

(1) El fin principal de esta cláusula es definir los procedimientos (métodos) para calibrar los modelos de resistencia y para deducir los valores de cálculo a partir de los ensayos tipo d) (véase el apartado D.3(1)). Se utilizará la información previa de la que se disponga (conocimientos o hipótesis).



(2) Debe desarrollarse un “modelo de cálculo”, basado en la observación del comportamiento real en ensayos y en las consideraciones teóricas, que permita la determinación de una función de resistencia. La validez de este modelo se comprobará a través de una interpretación estadística de todos los datos de ensayos disponibles. Si fuese necesario, se ajustará el modelo de cálculo hasta conseguir una correlación suficiente entre los valores teóricos y los resultados de los ensayos.

(3) También debe determinarse, a partir de ensayos, la desviación en la predicción obtenida al utilizar el modelo de cálculo. Esta desviación tendrá que combinarse con las desviaciones de otras variables de la función de resistencia con el fin de obtener un índice global de desviación. Estas otras variables incluyen:

- desviación en la resistencia y rigidez del material,
- desviación en las propiedades geométricas.

(4) La resistencia característica debe determinarse teniendo en cuenta las desviaciones de todas las variables.

(5) En el apartado D.5(1) se distinguen dos métodos distintos. Estos métodos se recogen en los apartados D.8.2 y D.8.3, respectivamente. Adicionalmente, en el apartado D.8.4 se dan algunas posibles simplificaciones.

Estos métodos se presentan como un número de pasos discretos y se hacen y explican algunas hipótesis acerca de la población del ensayo. Debe tenerse en cuenta que estas hipótesis no son más que recomendaciones que abarcan algunos de los casos más comunes.

D.8.2 Procedimiento de evaluación estándar (Método (a))

D.8.2.1 Generalidades

(1) En el procedimiento de evaluación estándar se hacen las siguientes hipótesis:

- a) la función de resistencia es una función de un número de variables independientes \underline{X} ,
- b) se dispone de un número suficiente de resultados de ensayos,
- c) se han medido todas las propiedades geométricas y del material correspondientes,
- d) no hay correlación (dependencia estadística) entre las variables en la función de resistencia,
- e) todas las variables siguen una distribución Normal o una log-normal.

NOTA: La adopción de una distribución log-normal para las variables tiene la ventaja de que no se pueden obtener valores negativos.

(2) El procedimiento estándar para el método D.5(1) a) comprende los siete pasos indicados en los apartados D.8.2.2.1 a D.8.2.2.7.

D.8.2.2 Procedimiento estándar

D.8.2.2.1 Paso 1: Desarrollar un modelo de cálculo

(1) Desarrollar un modelo de cálculo para la resistencia teórica r_t del elemento o detalle estructural considerado, representado por la función de resistencia:

$$r_t = g_{rt}(\underline{X}) \quad (D.5)$$

(2) La función de resistencia debe abarcar todas las variables básicas \underline{X} que afecten a la resistencia en el estado límite correspondiente.

(3) Todos los parámetros básicos deben medirse para cada muestra i de ensayo (hipótesis (c) en el apartado D.8.2.1) y deben estar disponibles para su uso en la evaluación.

D.8.2.2.2 Paso 2: Comparar los valores experimentales y teóricos

- (1) Sustituir las propiedades reales medidas en la función de resistencia, de forma que se obtengan valores teóricos r_{ti} que formen la base de una comparación con los valores experimentales r_{ei} de los ensayos.
- (2) Los puntos que representan los pares de valores correspondientes (r_{ti} , r_{ei}) deben representarse en un diagrama como el indicado en la figura D1.

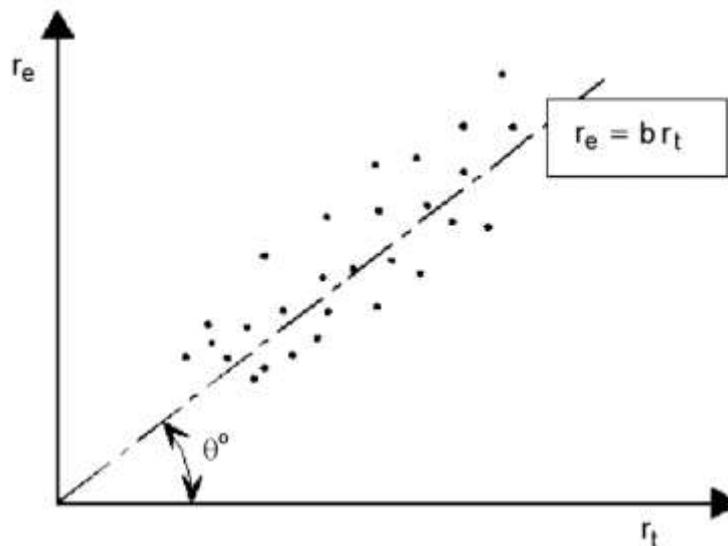


Figura D1 Diagrama $r_e - r_t$

- (3) Si la función de resistencia es exacta y completa, todos los puntos estarán en la línea $\theta = \pi/4$. En la práctica, los puntos mostrarán cierta dispersión, por lo que deberán investigarse las causas de cualquier desviación sistemática de aquella línea para comprobar si es indicativo de errores en los procedimientos de ensayo o en la función de resistencia.

D.8.2.2.3 Paso 3: Estimar el valor medio del factor de corrección b

- (1) Representar el modelo probabilístico de la resistencia r en la forma:

$$r = b r_t \delta \quad (D.6)$$

donde:

b es el mejor ajuste "por mínimos cuadrados" para la pendiente, obtenido como:

$$b = \frac{\sum r_e r_t}{r_t^2} \quad (D.7)$$

- (2) El valor medio de la función de resistencia teórica, calculado utilizando valores medios \underline{X}_m de las variables básicas, puede obtenerse como:

$$r_m = b r_t(\underline{X}_m) \delta = b g_{rt}(\underline{X}_m) \delta \quad (D.8)$$

D.8.2.2.4 Paso 4: Estimar el coeficiente de variación de los errores

- (1) El término de error δ_i para cada valor experimental r_{ei} debe determinarse a partir de la expresión (D.9):

$$\delta_i = \frac{r_{ei}}{b r_{ti}} \quad (D.9)$$



(2) Debe determinarse un valor estimado V_δ a partir de los valores de δ_i calculando:

$$\Delta_i = \ln(\delta_i) \quad (D.10)$$

(3) El valor estimado $\bar{\Delta}$ para $E(\Delta)$ debe obtenerse de:

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i \quad (D.11)$$

(4) Este valor estimado s_Δ^2 debe obtenerse para σ_Δ^2 a partir de:

$$s_\Delta^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{\Delta})^2 \quad (D.12)$$

(5) La siguiente expresión puede utilizarse como el coeficiente de variación V_δ de los términos de error δ_i :

$$V_\delta = \sqrt{\exp(s_\Delta^2) - 1} \quad (D.13)$$

D.8.2.2.5 Paso 5: Analizar la compatibilidad

(1) Debe analizarse la compatibilidad de la población del ensayo con las hipótesis hechas en la función de resistencia.

(2) Si la dispersión de los valores (r_{ti}, r_{ei}) es muy elevada para dar unas funciones económicas de cálculo de la resistencia, esta dispersión puede reducirse de una de las siguientes formas:

- corrigiendo el modelo de cálculo para tener en cuenta los parámetros que previamente hayan sido ignorados,
- modificando b y V_δ dividiendo la población total del ensayo en los subgrupos apropiados para los que la influencia de esos parámetros adicionales pueda considerarse constante.

(3) Para determinar qué parámetros tienen más influencia en la dispersión, los resultados de los ensayos pueden separarse en subgrupos en lo que respecta a estos parámetros.

NOTA: El propósito es mejorar la función de resistencia para los subgrupos mediante el análisis de cada uno de ellos utilizando el procedimiento estándar. La desventaja de separar los resultados de ensayo en subgrupos, es que el número de resultados de ensayos en cada subgrupo puede ser muy pequeño.

(4) Cuando se determinen los coeficientes percentiles k_n (véase el paso 7), el valor k_n para los subgrupos puede determinarse basándose en el número total de ensayos de las series originales.

NOTA: Se prestará atención al hecho de que la distribución de frecuencias para la resistencia puede describirse mejor mediante una función bi-modal o multi-modal. Pueden emplearse técnicas de aproximación especiales para transformar estas funciones en una distribución uni-modal.

D.8.2.2.6 Paso 6: Determinar los coeficientes de variación V_{X_i} de las variables básicas

(1) Si se puede demostrar que la población del ensayo es completamente representativa de la variación en la realidad, entonces los coeficientes de variación V_{X_i} de las variables básicas en la función de resistencia pueden determinarse a partir de los datos del ensayo. De todas formas, puesto que este no suele ser el caso, los coeficientes de variación V_{X_i} tendrán que determinarse normalmente basándose en ciertos conocimientos previos.

D.8.2.2.7 Paso 7: Determinar el valor característico r_k de la resistencia

(1) Si la función de resistencia para j variables básicas es una función producto de la forma:

$$r = br_t \delta = b\{X_1 X_2 \dots X_j\} \delta$$

el valor medio $E(r)$ puede obtenerse de:



$$E(r) = b\{E(X_1) \times E(X_2) \dots E(X_j)\} = b g_{rt}(X_m) \quad (D.14a)$$

y el coeficiente de variación V_r puede obtenerse de la función producto:

$$V_r^2 = (V_\delta^2 + 1)[\prod_{i=1}^j (V_{X_i}^2 + 1)] - 1 \quad (D.14b)$$

(2) Alternativamente, para valores pequeños de V_δ^2 y $V_{X_i}^2$ se puede utilizar la siguiente aproximación para V_r :

$$V_r^2 = V_\delta^2 + V_{rt}^2 \quad (D.15a)$$

con:

$$V_{rt}^2 = \sum_{i=1}^j V_{X_i}^2 \quad (D.15b)$$

(3) Si la función de resistencia es una función más compleja, con la forma:

$$r = b r_t \delta = b g_{rt}\{X_1, \dots, X_j\} \delta$$

el valor medio de $E(r)$ puede obtenerse de:

$$E(r) = b g_{rt}(E(X_1), \dots, E(X_j)) = b g_{rt}(X_m) \quad (D.16a)$$

y el coeficiente de variación V_{rt} puede obtenerse a partir de:

$$V_{rt}^2 = \frac{VAR[g_{rt}(X)]}{g_{rt}^2(X_m)} \cong \frac{1}{g_{rt}^2(X_m)} \times \sum_{i=1}^j \left(\frac{\partial g_{rt}}{\partial X_i} \sigma_i\right)^2 \quad (D.16b)$$

(4) Si el número de ensayos es limitado (es decir, $n < 100$) deben tenerse en cuenta las incertidumbres estadísticas en la distribución de Δ . La distribución puede considerarse como una distribución t de Student con los parámetros $\bar{\Delta}$, V_Δ y n .

(5) En este caso, la resistencia característica r_k debe obtenerse de:

$$r_k = b g_{rt}(X_m) \exp(-k_\infty \alpha_{rt} Q_{rt} - k_n \alpha_\delta Q_\delta - 0,5Q^2) \quad (D.17)$$

con:

$$Q_{rt} = \sigma_{\ln(rt)} = \sqrt{\ln(V_{rt}^2 + 1)} \quad (D.18a)$$

$$Q_\delta = \sigma_{\ln(\delta)} = \sqrt{\ln(V_\delta^2 + 1)} \quad (D.18b)$$

$$Q = \sigma_{\ln(r)} = \sqrt{\ln(V_r^2 + 1)} \quad (D.18c)$$

$$\alpha_{rt} = \frac{Q_{rt}}{Q} \quad (D.19a)$$

$$\alpha_\delta = \frac{Q_\delta}{Q} \quad (D.19b)$$

donde:

k_n es el coeficiente percentil característico de la tabla D1 para el caso de V_x desconocido

k_∞ es el valor de k_n para $n \rightarrow \infty$ [$k_\infty = 1,64$]

α_{rt} es el coeficiente de ponderación para Q_{rt}

α_δ es el coeficiente de ponderación para Q_δ .

NOTA: El valor de V_δ debe estimarse a partir del muestreo del ensayo considerado.



(6) Si se dispone de un mayor número de ensayos ($n \geq 100$), la resistencia característica r_k puede obtenerse de:

$$r_k = b g_{rt}(\underline{X}_m) \exp(-k_{\infty} Q - 0,5 Q^2) \quad (D.20)$$

D.8.3 Procedimiento de evaluación estándar (Método (b))

(1) En este caso el procedimiento es el mismo que en D.8.2, excepto que el paso 7 se adapta reemplazando el coeficiente percentil característico k_n por el coeficiente percentil de cálculo $k_{d,n}$ igual al producto $\alpha_R \beta$ evaluado como $0,8 \times 3,8 = 3,04$ de acuerdo con la expresión comúnmente aceptada (véase el Apéndice C) para obtener el valor de cálculo de la resistencia r_d .

(2) Para el caso de un número limitado de ensayos, el valor de cálculo r_d debe obtenerse de:

$$r_d = b g_{rt}(\underline{X}_m) \exp(-k_{d,\infty} \alpha_{rt} Q_{rt} - k_{d,n} \alpha_{\delta} Q_{\delta} - 0,5 Q^2) \quad (D.21)$$

donde:

$k_{d,n}$ es el coeficiente percentil de proyecto de la tabla D2 para el caso de "V_x desconocido"

$k_{d,\infty}$ es el valor de $k_{d,n}$ para $n \rightarrow \infty$ [$k_{d,\infty} = 3,04$].

NOTA: El valor de V_{δ} debe estimarse a partir del muestreo del ensayo considerado.

(3) Para el caso de un mayor número de ensayos, el valor de cálculo r_d puede obtenerse de:

$$r_d = b g_{rt}(\underline{X}_m) \exp(-k_{d,\infty} Q - 0,5 Q^2) \quad (D.22)$$

D.8.4 Uso de información previa adicional

(1) Si ya se conocen la validez de la función de resistencia r_t y un límite superior (estimación conservadora) del coeficiente de variación V_r a partir de un número significativo de ensayos previos, se puede adoptar el siguiente procedimiento simplificado cuando se realicen más ensayos.

(2) Si solo se realiza un ensayo adicional, el valor característico r_k puede determinarse a partir del resultado r_e de este ensayo mediante la aplicación de:

$$r_k = \eta_k r_e \quad (D.23)$$

donde:

η_k es el coeficiente de reducción aplicable en caso de tener información previa y que puede obtenerse de:

$$\eta_k = 0,9 \exp(-2,31 V_r - 0,5 V_r^2) \quad (D.24)$$

donde:

V_r es el máximo coeficiente de variación observado en ensayos previos.

(3) Si se realizan dos o tres ensayos adicionales, el valor característico r_k puede determinarse a partir del valor medio r_{em} de los resultados del ensayo aplicando:

$$r_k = \eta_k r_{em} \quad (D.25)$$

donde:

η_k es un factor de reducción aplicable en el caso de tener información previa y que se puede obtener de:

$$\eta_k = \exp(-2,0 V_r - 0,5 V_r^2) \quad (D.26)$$

donde:



V_r es el máximo coeficiente de variación observado en ensayos previos, siempre que cada valor extremo (máximo o mínimo) r_{ee} satisfaga la condición:

$$|r_{ee} - r_{em}| \leq 0,10r_{em} \quad (D.27)$$

(4) Los valores del coeficiente de variación V_r recogidos en la tabla D3, pueden ser supuestos para los tipos de fallo a especificar (por ejemplo, en el anejo de este Código Estructural correspondiente), y conducir a los valores indicados de η_k de acuerdo con las expresiones (D.24) y (D.26).

Tabla D3 Factor de reducción η_k

Coeficiente de variación V_r	Factor de reducción η_k	
	Para 1 ensayo	Para 2 o 3 ensayos
0,05	0,80	0,90
0,11	0,70	0,80
0,17	0,60	0,70