

4.1. PROCESO GENERAL DE CÁLCULO	253
4.1.1. GENERAL	253
4.1.2. PRINCIPIOS DE CÁLCULO	253
4.1.3. ESTADOS LÍMITES	254
a) ESTADOS LÍMITES ÚLTIMOS (ELU)	254
b) ESTADOS LÍMITES DE UTILIZACIÓN (ELS)	256
4.1.4. CRITERIOS DE ANÁLISIS	256
▪ MODELOS DE CÁLCULO	256
▪ MODELOS EXPERIMENTALES	257
▪ COMPROBACIONES	257
4.2. CRITERIOS DE COMBINACIÓN DE ACCIONES E HIPÓTESIS DE CARGA	258
4.2.1. VALORES DE CÁLCULO DE LAS ACCIONES	258
4.2.2. COMBINACIÓN DE ACCIONES	258
a) CRITERIOS GENERALES	258
b) HIPÓTESIS DE CARGA	262
▪ PARA ESTADOS LÍMITES ÚLTIMOS (ELU)	262
▪ PARA ESTADOS LÍMITES DE UTILIZACIÓN (ELS)	264
4.3. COEFICIENTES DE SEGURIDAD (γ_m) DE MINORACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LOS MATERIALES PARA LA COMPROBACIÓN DE ESTADOS LÍMITES	265

4.2.1.1.	Criterios generales para la determinación de valores de cálculo de las acciones, para su uso en estados límites últimos.....	259
4.2.1.2.	Criterios generales para la determinación de valores de cálculo de las acciones, para su uso en estados límites de utilización	261
4.3.1.	Valores medios de los coeficientes (γ_m) de minoración de las propiedades de los materiales para la comprobación de estados límites	266

4.1. PROCESO GENERAL DE CÁLCULO

4.1.1. GENERAL

Los objetivos de todo cálculo estructural será garantizar en cada una de las fases de proyecto que:

- La estructura o elemento estructural analizado sea capaz de resistir todas las acciones normales que puedan actuar sobre él con un nivel de seguridad determinado; teniendo una durabilidad adecuada en relación a la vida útil, y a los programas de mantenimientos previstos.
- El comportamiento de la estructura respeta los criterios funcionales y operacionales que determinan las condiciones adecuadas de utilización y mantenimiento.
- La estructura sea capaz de resistir con un nivel de seguridad aceptable la actuación de acciones de carácter fortuito o anormal que puedan presentarse como resultado de un accidente, mal uso, o condiciones medioambientales extraordinarias (Acciones Accidentales).

4.1.2. PRINCIPIOS DE CÁLCULO

El proceso general de cálculo que se propone en esta Recomendación para verificar el cumplimiento de los objetivos señalados en 4.1.1. corresponde al Método de los Estados Límites; cuyo desarrollo práctico se ajustará a lo que al respecto se indica en las Instrucciones y Normas vigentes referentes a los materiales constituyentes de las estructuras, de acuerdo con las hipótesis y criterios de combinación de cargas específicos para Obras Marítimas y Portuarias indicados en el apartado 4.2.

Únicamente dicho método se considerará compatible con los criterios de valoración de acciones, con los valores representativos de las mismas, y con las hipótesis de carga y condiciones de combinación incluidos en esta Recomendación.

Se definen como Estados Límites aquellos estados o situaciones de la estructura, o de partes de la misma, que de alcanzarse y excederse ponen a la estructura fuera de uso por incumplimiento de las condiciones tensionales o funcionales límite preestablecidas.

El objeto de este método es limitar convenientemente la probabilidad de que en la realidad los Estados Límites puedan ser excedidos en cualquiera de las situaciones e hipótesis de proyecto. Para ello se comprobará en general que los efectos producidos por las acciones actuantes sobre la estructura (S_d) no exceden a la capacidad de respuesta de la misma (R_d), con un margen de seguridad ($S_d \leq R_d$).

Dichas comprobaciones se llevarán a cabo mediante un modelo de cálculo o un modelo experimental haciendo intervenir las siguientes variables, llamadas variables de base:

- Las acciones que actúan (F).
- Las propiedades de los materiales constitutivos de la estructura (f).
- Los parámetros geométricos utilizados para el cálculo de los efectos producidos por las acciones y las capacidades de respuesta de la estructura (a).

Los efectos producidos por las acciones (solicitaciones) serán obtenidos en base a los Valores de Cálculo de las mismas (F_d). El Valor de Cálculo o Valor Ponderado de una acción es aquel que resulta de aplicar a los Valores Representativos de la misma (F_k o $\gamma_i \cdot F_k$) los apropiados coeficientes de seguridad (γ_f) (ver apartados 3.2. y 4.2.).

$$F_d = \gamma_f \cdot F_k \quad \text{o} \quad \gamma_f \cdot \sum_i \gamma_i \cdot F_k$$

Diversas hipótesis y combinaciones de acciones de cálculo compatibles entre sí $\sum_i (\gamma_f \cdot \gamma_i \cdot F_k)_{\theta}$, con distintas posiciones y configuraciones de cada una de ellas, deberán ser consideradas

para determinar aquella que produzca el efecto más desfavorable sobre el elemento o sobre la sección considerada (ver apartado 4.2.2.).

$$S_d = S [(\gamma_f \cdot F_k)_1, \dots, (\gamma_f \cdot F_k)_\theta, \dots]$$

Para la determinación de la capacidad de respuesta de la estructura o del elemento estructural analizado se utilizarán los valores característicos de las propiedades de los materiales (f_k) divididos por un coeficiente de seguridad (γ_m).

$$f_d = f_k / \gamma_m$$

$$R_d = R (f_{d1}, \dots, f_{di}, \dots)$$

Los valores característicos de las propiedades de los materiales (p.e. resistencia característica) se definen como aquellos valores asociados a probabilidades de alcanzarse o excederse del 95% para la distribución estadística obtenida a partir de ensayos realizados bajo condiciones establecidas en la Instrucciones correspondientes (valor característico inferior).

En algunos casos, aumentos en los valores de las propiedades de los materiales pueden ocasionar reducciones en la seguridad de la estructura (p.e. aumentos en la resistencia del hormigón da lugar a reducciones en la deformabilidad del mismo, pudiendo ocasionar efectos perjudiciales como en el caso de fisuración en presencia de deformaciones impuestas, plastificaciones en situación sísmica,...). En esos casos deberán diferenciarse valores característicos superiores e inferiores asociados a percentilas del 95% y del 5%, respectivamente.

Los coeficientes de seguridad (γ_m) son introducidos en el cálculo para tener en cuenta, entre otros, los siguientes factores: Posibles desviaciones de los valores de las propiedades de los materiales en la estructura real respecto a los valores característicos; posibilidad de inadecuada valoración o cálculo de las propiedades de los materiales causadas por defectos de modelización de los mismos; efectos de la geometría o de las imperfecciones de los materiales sobre sus propiedades; variación de las propiedades de los materiales en relación a las cargas actuantes (p.e. en cargas de larga duración); y valoración del estado límite considerado.

Los valores de los coeficientes de minoración de los valores característicos de las propiedades de los materiales se determinarán principalmente según lo dispuesto en sus Normas específicas, en función de la propiedad considerada, el material constituyente, el estado límite comprobado, la fase e hipótesis de trabajo analizada, el nivel de control en la ejecución previsto, los daños previsibles en caso de accidente, e incluso del modelo de cálculo adoptado. En aquellos casos no previstos en las Normas citadas se atenderá lo dispuesto simplifícadamente en el apartado 4.3.

Los parámetros geométricos serán usualmente introducidos en los cálculos por medio de sus valores nominales.

$$a_d = a_{nom}$$

En algunos casos podrá introducirse específicamente un término adicional de seguridad (Δa positivo o negativo) con un determinado valor de cálculo.

$$a_d = a_{nom} + \Delta a$$

4.1.3. ESTADOS LÍMITES

Los Estados Límites a considerar en el cálculo se clasifican en:

- Estados Límites Últimos (ELU).
- Estados Límites de Utilización (ELS).

a) ESTADOS LÍMITES ÚLTIMOS (ELU)

La denominación de Estados Límites Últimos engloba a todos aquellos estados correspondientes a una puesta fuera de servicio de la estructura por colapso, rotura, pérdida de estabilidad, u otras formas de fallo estructural de la misma o de parte de ella. Dichos estados están relacionados con la máxima capacidad de carga del sistema estructural.

Deberán tomarse en consideración, siempre que sean significantes, los siguientes Estados Límites Últimos:

- *Estados Límites de Equilibrio Estático*, definidos por la pérdida de estabilidad estática de una parte o del conjunto de la estructura considerada como un cuerpo rígido (p.e. vuelco, deslizamiento, levantamiento de apoyos, flotación).
Se estudiará a nivel de estructura o elemento estructural completo, teniendo en cuenta las condiciones reales de las sustentaciones y en particular las derivadas del comportamiento del terreno, deducidas de acuerdo con los métodos de la Mecánica del Suelo.

Usualmente la condición de comprobación será la siguiente: $E_{d,dst} < E_{d,est}$; siendo $E_{d,dst}$ y $E_{d,est}$ los efectos producidos por las acciones desestabilizadoras y estabilizadoras respectivamente.

A menos que exista Reglamentación específica o criterios usuales de validez reconocida para la definición unívoca de qué acciones son estabilizadoras y cuáles desestabilizadoras para el tipo de estructura y condición límite de equilibrio analizada, el Proyectista tendrá especial cuidado en plantear la condición de comprobación incluyendo los criterios aplicados para la diferenciación entre acciones estabilizadoras y desestabilizadoras.

Dicha condición de comprobación será aplicable siempre y cuando el equilibrio estructural pueda idealizarse de forma suficientemente precisa al de un sólido rígido sobre otro sólido rígido.

Para casos más generales la condición de comprobación podrá establecerse en base a la comparación entre la hipótesis que produce el agotamiento del equilibrio estático, y la hipótesis de cálculo; pudiendo materializarse de diversas formas según el tipo estructural y estado de equilibrio analizado.

- *Estados Límites de Agotamiento o Rotura*, definidos por el agotamiento resistente o la deformación plástica excesiva de una o varias secciones de los elementos de la estructura. Se incluyen en estos estados límites aquellos específicos de solicitaciones tangentes como adherencia o anclaje.

Se estudiarán a nivel de sección.

La condición de comprobación será la siguiente: $S_d \leq R_d$; siendo, en general, S_d las solicitaciones producidas por las acciones de cálculo, y R_d la condición de agotamiento asociada a los valores de cálculo de las propiedades de los materiales constitutivos.

Las definiciones de S_d y R_d variarán según el problema específico analizado; pudiendo ser las relaciones escalares, vectoriales, e incluso más complejas.

En algunos casos, los valores de cálculo de las acciones podrán ser comparados directamente con los valores de cálculo de la capacidad resistente de la estructura o del elemento estructural.

- *Estado Límite de Inestabilidad de Segundo Orden* o pandeo de una parte o del conjunto del elemento estructural.
Se estudiará a nivel de estructura o elemento estructural completo.
Deberá verificarse que el mecanismo de inestabilidad no se producirá a menos que se superen los valores de cálculo de las acciones, para las propiedades estructurales asimismo con sus valores de cálculo.

- *Estado Límite de Fatiga*, correspondiente a la rotura de uno o varios materiales de la estructura por efecto de la fatiga bajo la acción de cargas repetidas o variables en el tiempo (p.e. oleaje, corrientes, viento, hielo,...).

No será necesaria la comprobación del estado límite de fatiga si el número de ciclos o fluctuaciones acumuladas de la carga es menor que 1.000 ciclos.

Se estudiará a nivel de sección.

Deberá comprobarse que el efecto de deterioro causado por la aplicación reiterada de las cargas de cálculo sobre la estructura, es menor que el deterioro crítico, función de las propiedades de los materiales constituyentes.

En estructuras marítimas y portuarias son esperables problemas de fatiga especialmente en estructuras de acero sometidas a la acción del oleaje, viento, corrientes, o a sobrecargas de equipos de manipulación de mercancías; γ en pavimentos sometidos a la acción del tráfico rodado convencional y al debido a equipos de manipulación de mercancías.

- *Estado Límite de Colapso Progresivo*, caracterizado por la rotura o pérdida de equilibrio estático de la estructura debido al fallo progresivo de sus elementos una vez que se ha producido el fallo inicial de uno o unos pocos de sus elementos simples (transformación de la estructura en un mecanismo).

Dicho estado límite tendrá especial significación en hipótesis de trabajo extraordinarias; ya que en esos estados de carga suelen admitirse roturas o pérdidas de equilibrio localizadas

siempre y cuando no den lugar al colapso total de la estructura. Después de la actuación de las cargas accidentales la estructura deberá ser capaz de resistir las acciones extremas asociadas al periodo de tiempo necesario para su completa reparación.

El cumplimiento de este estado límite suele ser más una cuestión de concepción estructural, o de materiales constituyentes, que de cálculo.

Se estudiará a nivel de estructura completa.

Deberá verificarse que la estructura no se transforma en un mecanismo a menos que se superen los valores de cálculo de las acciones.

- *Estado Límite de Deformación Acumulada*, o cambios inaceptables en la geometría del sistema.
- *Estados Límites Particulares* asociados a ciertas situaciones accidentales como resistencia al fuego, aislamiento térmico en el curso de un incendio,...

b) ESTADOS LÍMITES DE UTILIZACIÓN (ELS)

La denominación de Estados Límites de Utilización engloba a todos aquellos estados o situaciones de la estructura para las que la misma queda fuera de servicio por razones funcionales, de durabilidad, o estéticas.

Deberá verificarse que: $E_d \leq C_d$; siendo E_d los efectos producidos por las acciones de cálculo y C_d un valor nominal fijado a priori o una función de las propiedades de los materiales. Las relaciones podrán ser escalares, vectoriales, e incluso más complejas.

Deberán tomarse en consideración, siempre que sean significantes, los siguientes Estados Límites de Utilización:

- *Estados Límites de Durabilidad*, caracterizados por el hecho de que la resistencia de la pieza frente a la agresividad del medio, o de las acciones, alcance un determinado valor límite. Incluye estados límite como fisuración o comportamiento frente a la fisuración, corrosión,... El deterioro provocado por influencias agresivas del medio sobre los materiales constitutivos de la estructura puede conducir asimismo a estados límites últimos. Se estudiará a nivel de sección.
- *Estados Límites de Deformación*, caracterizados por alcanzarse determinados movimientos, o velocidades y aceleraciones de los mismos, en la estructura que afectan a la funcionalidad o a la estética de la misma. A falta de criterios en las Instrucciones correspondientes, el Proyectista fijará los límites de deformación admitidos de acuerdo con las condiciones de explotación preestablecidas y con los criterios del Cliente o la Autoridad Competente. Se estudiará a nivel de estructura o elemento estructural.
- *Estado Límite de Vibración*, con objeto de prevenir en la estructura la existencia de vibraciones de una determinada amplitud o frecuencia capaces de producir daños en los elementos no estructurales, interferir en su normal funcionamiento, o causar inconfort. Se estudiará a nivel de estructura o elemento estructural completo.
- *Estado Límite de Daños Permanentes*, caracterizado por el hecho de que la estructura tenga margen de seguridad suficiente para continuar en servicio durante toda su vida útil en el supuesto de que se presenten daños que no puedan ser reparados, por ejemplo por la actuación de una carga accidental (p.e. si el material es hormigón será necesario comprobar, a efectos del estado límite de fisuración, que al desaparecer la acción extraordinaria considerada la fisuración remanente producida no entraña dificultades de tipo funcional o peligro de durabilidad). Se estudiará a nivel de estructura o elemento estructural completo.
- *Estado Límite de Impermeabilidad*, para aquellas estructuras en las cuales su función Principal es la creación de un compartimento impermeable. Se estudiará a nivel de sección.

4.1.4. CRITERIOS DE ANÁLISIS

▪ MODELOS DE CÁLCULO

El proceso general de cálculo correspondiente al Método de los Estados Límites, y demás pres-

cripciones establecidas en las presentes Recomendaciones, podrán aplicarse teniendo en cuenta las condiciones siguientes:

- La respuesta de la estructura asociada a las acciones actuantes será determinada sobre la base de:
 - Un análisis estructural global para la determinación de las solicitaciones o esfuerzos.
 - Un análisis de las secciones transversales de los distintos elementos estructurales y de las uniones para determinar su capacidad resistente.

a partir de una modelización o idealización de la estructura tanto en lo referente a sus materiales constitutivos como a sus características geométricas.

Dicha modelización deberá ser lo suficientemente precisa para predecir de forma correcta el comportamiento de la estructura y a su vez permitir una definición válida de las condiciones inherentes al estado límite considerado. Asimismo deberá ser compatible con las posibilidades de aplicación para los medios de que se disponga.

- Los modelos para los materiales constitutivos podrán ser:
 - Lineales (o elásticos): La respuesta de la estructura es proporcional a las acciones actuantes, eventualmente con posibilidad de redistribuciones.
 - No lineales (o elasto-plásticos): Con aproximaciones distintas para la determinación de los esfuerzos (p.e. en el hormigón, comportamiento elástico con zonas plastificadas; teoría de las rótulas plásticas), y de las capacidades resistentes (p.e. diagramas simplificados tensión/deformación en el hormigón tipo rectángulo o parábola/rectángulo).
- Los modelos geométricos podrán ser:
 - Modelos de Primer Orden, basados en la geometría inicial de la estructura.
 - Modelos de Segundo Orden, basados en la geometría de la estructura deformada.

En la mayor parte de los casos las solicitaciones serán determinadas sobre la base de modelos de primer orden. Para estructuras muy flexibles, para ciertos esfuerzos complejos y para el estudio de ciertos tipos de inestabilidad estructural, puede ser necesario utilizar modelos de segundo orden.

▪ MODELOS EXPERIMENTALES

Los modelos de cálculo podrán ser sustituidos o completados parcial o totalmente por modelos experimentales físicos o matemáticos, o por ensayos sobre prototipos, con objeto de:

- Contribuir al análisis estructural determinando la respuesta de la estructura por vía experimental.
- Definir ciertos aspectos del comportamiento estructural en las condiciones especificadas en los ensayos (p.e. capacidad portante, deformaciones,...).

Los ensayos sobre modelos experimentales serán generalmente utilizados cuando los modelos de cálculo tengan un grado de incertidumbre elevado, pudiendo dar lugar a dimensionamientos no económicos o no fiables.

▪ COMPROBACIONES

Los cálculos realizados en base a modelos de cálculo o a modelos experimentales deberán garantizar que, tanto para la estructura en su conjunto como para cada uno de sus elementos, no se sobrepasan los Estados Límites Últimos y de Utilización en todas las hipótesis de carga consideradas para cada una de las Fases de Proyecto e Hipótesis de Trabajo significativas establecidas según los criterios de combinación de acciones de la presente Recomendación (ver apartado 4.2.).

4.2. CRITERIOS DE COMBINACIÓN DE ACCIONES E HIPÓTESIS DE CARGA

4.2.1. VALORES DE CÁLCULO DE LAS ACCIONES

El valor de cálculo de una acción a considerar en cada una de las combinaciones de cargas será obtenido a partir de la ponderación de uno de sus Valores Representativos (Valor Característico F_k ; Valor de Combinación $\psi_0 \cdot F_k$; Valor Frecuente $\psi_1 \cdot F_k$; Valor cuasi-permanente $\psi_2 \cdot F_k$) mediante Coeficientes de Seguridad (γ_f).

El valor representativo de la acción adoptado para la determinación de su valor de cálculo dependerá de:

- La naturaleza de la acción.
- El efecto desfavorable o favorable de la misma.
- La importancia, o carácter predominante, de la acción en el dimensionamiento de la estructura analizada.
- La fase de proyecto e hipótesis de trabajo analizada.
- El estado límite considerado.

Asimismo, el coeficiente de seguridad adoptado para la ponderación del valor representativo dependerá de:

- La naturaleza de la acción.
- El efecto desfavorable o favorable de la misma.
- La fase de proyecto e hipótesis de trabajo analizada.
- El estado límite considerado.
- El nivel del control de calidad previsto en la ejecución.
- Los daños previsibles en caso de rotura de la estructura.
- E incluso el material constitutivo de la estructura.

Para la determinación de los valores de cálculo de las acciones a utilizar en el proyecto de obras marítimas y portuarias podrán seguirse los criterios generales establecidos en la tabla 4.2.1.1. para Estados Límites Últimos (ELU) y 4.2.1.2. para Estados Límites de Utilización (ELS).

Dicha Reglamentación específica se establece en sustitución de aquellos otros criterios simplificados de determinación de los valores de cálculo de las acciones, prescritos por las Normas Generales vigentes (p.e. EH-88, EP-80, NBE-AE-88, NBE-MV-103; Norma Sismorresistente PDS-1,...), especialmente aplicables en proyectos de edificación y puentes. En obras marítimas y portuarias, la naturaleza y características de las cargas de efecto predominante, las diferentes posibilidades de actuación conjunta compatible de varias cargas variables con distintos orígenes, la existencia de cargas variables de valor minimal no nulo, y la determinación de los valores de las acciones variables medioambientales mediante criterios de riesgo, dan lugar a diferencias relevantes respecto a lo usual en obras de edificación y puentes.

Para la determinación de los valores característicos y demás valores representativos de las acciones se tendrá en cuenta lo dispuesto en los apartados 3.2. Criterios de Valoración de Acciones, y 3.4. Valores Característicos de las Acciones, de las presentes Recomendaciones.

Los coeficientes ψ_0 , ψ_1 , y ψ_2 necesarios para la determinación de los valores representativos de las acciones a partir de sus valores característicos se cuantifican en el subapartado 3.2.2.

Los coeficientes de seguridad γ_f se ajustarán a lo señalado en el apartado 4.2.2. para los modelos de cálculo establecidos en las Normas vigentes referentes al proyecto de obras de materiales específicos.

La corrección de coeficientes en función del nivel de control en la ejecución y de los daños previsibles en caso de accidente podrán llevarse a cabo según lo indicado en dichas Normas.

4.2.2. COMBINACIÓN DE ACCIONES

a) CRITERIOS GENERALES

Para encontrar la hipótesis de carga más desfavorable correspondiente a cada fase de proyecto y condición de trabajo, se procederá de la siguiente forma:

- De las acciones clasificadas en estas Recomendaciones se eliminarán aquellas que no deban considerarse por no actuar o ser despreciables en el caso que se estudia.

TABLA 4.2.1.1. CRITERIOS GENERALES PARA LA DETERMINACIÓN DE VALORES DE CÁLCULO DE LAS ACCIONES, PARA SU USO EN ESTADOS LÍMITES ÚLTIMOS.

FASE DE PROYECTO ANALIZADA	CARGAS PERMANENTES (G _d)		CARGAS VARIABLES (Q _d)				CARGAS ACCIDENTALES (A _d)
	Carga variable de efecto predominante		Otras cargas variables de actuación simultánea compatible				
	De efecto desfavorable	De efecto favorable	De efecto desfavorable	De efecto favorable	De efecto desfavorable	De efecto favorable	
Fases de construcción y Fase de servicio excepto en condiciones excepcionales	$\gamma_{fg} \max \times G_{ksup,i}$	$\gamma_{fg} \min \times G_{kinf,i}$	$\gamma_{fg} \max,1 \times Q_{ksup,1}$	—	$\gamma_{fg} \max,j \times \psi_{0,j} \cdot Q_{ksup,j}$	$\gamma_{fg} \min,j \times \psi_{0,j} \cdot Q_{kinf,j}$	—
Fase de servicio en condiciones excepcionales	$\gamma_{fga} \max \times G_{ksup,i}$	$\gamma_{fga} \min \times G_{kinf,i}$	$\psi_{1,1} \cdot Q_{ksup,1}$	—	$\psi_{2,j} \cdot Q_{ksup,j}$	$\psi_{2,j} \cdot Q_{kinf,j}$	$\gamma_{fa} \times A_k$

LEYENDA:

- G_d : Valor de cálculo de las cargas permanentes.
- G_{ksup,i} : Valor característico maximal de la carga permanente i.
- G_{kinf,i} : Valor característico minimal de la carga permanente i. Normalmente para cargas muertas dicho valor es cero.
- Q_d : Valor de cálculo de la cargas variables.
- Q_{ksup,1} : Valor característico maximal de la carga variable considerada de efecto predominante en la combinación.
- Q_{ksup,j} : Valor característico maximal de la carga variable j, diferenciada de aquella considerada de efecto predominante en la combinación.
- Q_{kinf,j} : Valor característico minimal de la carga variable j, diferenciada de aquella considerada de efecto predominante en la combinación. Usualmente dicho valor es cero, excepto para cargas hidráulicas, cargas del terreno y cargas de deformación.

TABLA 4.2.1.1. (Continuación).

A_d	: Valor de cálculo de las cargas accidentales.
A_k	: Valor característico de la carga accidental.
$\alpha_{0,j}$: Coeficiente para la obtención del valor de combinación de la acción variable j.
$\alpha_{1,1}$: Coeficiente para la obtención del valor frecuente de la acción variable considerada de efecto predominante.
$\Psi_{2,i}$: Coeficiente para la obtención del valor cuasi-permanente de la acción variable j.
$\gamma_{fq\ max}$: Coeficiente de seguridad para los valores característicos maximales de las cargas permanentes.
$\gamma_{fq\ min}$: Coeficiente de seguridad para los valores característicos minimales de las cargas permanentes.
$\gamma_{fga\ max}$: Lo mismo que $\gamma_{fg\ max}$ pero para condiciones excepcionales.
$\gamma_{fga\ min}$: Lo mismo que $\gamma_{fg\ min}$ pero para condiciones excepcionales.
$\gamma_{fq\ max,1}$: Coeficiente de seguridad para los valores característicos maximales de la carga variable considerada de efecto predominante.
$\gamma_{fq\ max,i}$: Coeficiente de seguridad para los valores representativos maximales de la carga variable j.
$\gamma_{fq\ min,i}$: Coeficiente de seguridad para los valores representativos minimales de la carga variable j.
γ_{fa}	: Coeficiente de seguridad para los valores característicos de las acciones accidentales.

- A las acciones actuantes se les adjudicarán como valores de cálculo los ponderados según los criterios del apartado 4.2.1.
- Para cada Estado Límite a comprobar se considerarán las hipótesis de carga que se indican en el párrafo b) de este apartado, eligiéndose la que, en cada caso, resulte más desfavorable.
- En cada hipótesis deberán tenerse en cuenta únicamente aquellas acciones cuya actuación simultánea sea compatible.
- A falta de una Reglamentación específica para el tipo estructural analizado, o de experiencia del Proyectista, cada carga variable significativa con distinto origen será tomada sucesivamente como acción variable de efecto predominante, a menos que sea evidente que la combinación resultante no puede ser determinante.
- Aunque el número de acciones variables de actuación simultánea compatible pueda ser elevado, raramente será necesario tomar en consideración la combinación de la totalidad de dichas cargas. Generalmente no se aplicarán conjuntamente más de dos cargas variables de uso o explotación, y dos medioambientales.
- En cada combinación accidental que se considere se incluirá una única acción accidental; con objeto de tener en cuenta la pequeña probabilidad de actuación simultánea de más de una carga accidental.
- Cuando en una misma hipótesis de carga varios casos de carga sean posibles, se considerarán aquellos casos más desfavorables para el estado límite y la sección analizada.
- A los efectos de combinación de acciones, las cargas debidas al sismo serán consideradas como acciones accidentales, independientemente de los criterios de valoración aplicados.

TABLA 4.2.1.2. CRITERIOS GENERALES PARA LA DETERMINACIÓN DE VALORES DE CÁLCULO DE LAS ACCIONES, PARA SU USO EN ESTADOS LÍMITES DE UTILIZACIÓN.

TIPO DE COMBINACIÓN	CARGAS PERMANENTES (G _d)		CARGAS VARIABLES (Q _d)				CARGAS ACCIDENTALES (A _d)
	De efecto desfavorable	De efecto favorable	Carga variable de efecto predominante		Otras cargas variables de actuación simultánea compatible		
			De efecto desfavorable	De efecto favorable	De efecto desfavorable	De efecto favorable	
Rara o poco frecuente	G _{ksup,i}	G _{kinf,i}	Q _{ksup,1}	—	ψ _{0,j} · Q _{ksup,i}	ψ _{0,j} · Q _{kinf,j}	—
Frecuente	G _{ksup,i}	G _{kinf,i}	ψ _{1,1} · Q _{ksup,1}	—	ψ _{2,j} · Q _{ksup,i}	ψ _{2,j} · Q _{kinf,j}	—
Cuasi-permanente	G _{ksup,i}	G _{kinf,i}	—	—	ψ _{2,j} · Q _{ksup,i}	ψ _{2,j} · Q _{kinf,j}	—

LEYENDA:

Según Tabla 4.2.1.1.

NOTAS:

Como excepción a los criterios indicados en esta tabla se señala que para la obtención de los valores de cálculo de las cargas de deformación con carácter de permanencia (p.e. pretensado) deberán aplicarse además los siguientes coeficientes de seguridad γ_f:

γ_{fq max} = 1,10 si el efecto de la carga en la combinación de acciones es desfavorable.

γ_{fq min} = 0,90 si el efecto de la carga en la combinación de acciones es favorable.

b) HIPÓTESIS DE CARGA

- PARA ESTADOS LÍMITES ÚLTIMOS (ELU)

— Estados Límites de Equilibrio

La verificación de las condiciones de equilibrio estático consistirán generalmente en el cumplimiento de la siguiente desigualdad para cada estado de equilibrio analizado:

$$E[\sum \gamma_{fg \min} \cdot G_{k \text{ inf}, i} + \gamma_{fg \min} \cdot (\sum_{j>1} \Psi_{0,j} \cdot Q_{k \text{ inf}, j})] \geq E[\sum \gamma_{fg \max} \cdot G_{k \text{ sup}, i} + \gamma_{fg \max, j} \cdot Q_{k \text{ sup}, 1} + \sum_{j>1} \gamma_{fg \max, j} \cdot \Psi_{0,j} \cdot Q_{k \text{ sup}, j}]$$

estando en la parte izquierda de la misma los efectos producidos por las acciones estabilizadores, y en la parte derecha los producidos por las desestabilizadoras.

Los parámetros se definen en la tabla 4.2.1.1.

La comprobación de Estados Límites de Equilibrio no suele realizarse en condiciones extraordinarias, es decir cuando actúan acciones accidentales, ya que en esos estados de carga pueden admitirse daños localizados siempre y cuando no den lugar al colapso total de la estructura. Para estos casos, los estados límites de equilibrio se considerarán verificados con la comprobación del Estado Límite de Colapso Progresivo.

A título indicativo, los valores de los coeficientes de seguridad (γ_f) a utilizar en la comprobación de los estados límites de equilibrio serán:

TIPO DE ACCIÓN	De efecto desfavorable (γ_{fmax})	De efecto favorable (γ_{fmin})
Carga Permanente (γ_{fg})	1,10	0,90
Carga Variable Medioambiental obtenida a partir de datos estadísticos y criterios de riesgo (γ_{fg})	1,00	—
Carga de Deformación (γ_{fg})	1,10	0,90
Otras Cargas Variables (γ_{fq})	1,50	1,00

Dichos valores serán aplicables a falta de Reglamentación específica para el tipo estructural analizado.

— Estados Límites de Agotamiento o Rotura; Inestabilidad de Segundo Orden; y Colapso Progresivo

La verificación de los estados límites de agotamiento o rotura, inestabilidad de segundo orden, y colapso progresivo deberá efectuarse en base a las combinaciones siguientes:

- Combinaciones Fundamentales

(Para fases de construcción y servicio en condiciones normales de operación, en condiciones extremas, y en reparación)

$$\sum \gamma_{fg \max} \cdot G_{k \text{ sup}, i} + \sum \gamma_{fg \min} \cdot G_{k \text{ inf}, i} + \gamma_{fq \max, 1} \cdot Q_{k \text{ sup}, 1} + \sum_{j>1} \gamma_{fq \max, j} \cdot \Psi_{0,j} \cdot Q_{k \text{ sup}, j} + \sum_{r>1} \gamma_{fq \min, r} \cdot \Psi_{0,r} \cdot Q_{k \text{ inf}, r}$$

Los parámetros se definen en la tabla 4.2.1.1.

- Combinaciones Accidentales

(Para fase de servicio en condiciones excepcionales, y fase de servicio después de una situación excepcional ($A_k = 0$))

$$\sum \gamma_{fga \max} \cdot G_{k \text{ sup}, i} + \sum \gamma_{fga \min} \cdot G_{k \text{ inf}, i} + \Psi_{1,1} \cdot Q_{k \text{ sup}, 1} + \sum_{j>1} \Psi_{2j} \cdot Q_{k \text{ sup}, j} + \sum_{r>1} \Psi_{2,r} \cdot Q_{k \text{ inf}, r} + \gamma_{fa} \cdot A_k$$

Los parámetros se definen en la tabla 4.2.1.1.

A falta de Reglamentación específica para el tipo estructural analizado, los valores de los coeficientes de seguridad (γ_i) a utilizar en la comprobación de estados límites de agotamiento o rotura, inestabilidad de segundo orden, y colapso progresivo, serán los indicados en A para combinaciones fundamentales, y en B para combinaciones accidentales.

A. COEFICIENTES DE SEGURIDAD PARA COMBINACIONES FUNDAMENTALES		
TIPO DE ACCIÓN	De efecto desfavorable (γ_{max})	De efecto favorable (γ_{min})
Cargas Permanentes (γ_{fg})	1,35	1,00
Cargas Variables Medioambientales obtenidas a partir de datos estadísticos y criterios de riesgo (γ_{fq})	1,00	—
Cargas de Deformación (γ_{fq})	1,20	0,90
Otras Cargas Variables (γ_{fq})	1,50	1,00

B. COEFICIENTES DE SEGURIDAD PARA COMBINACIONES ACCIDENTALES		
TIPO DE ACCIÓN	De efecto desfavorable (γ_{max})	De efecto favorable (γ_{min})
Cargas Permanentes (γ_{fga})	1,10	0,90
Cargas Variables (γ_{fqa})	1,00	1,00
Cargas Accidentales (γ_{fa})	1,00	—

— Estado Límite de Fatiga

Para la comprobación del estado límite de fatiga, todas las cargas fluctuantes (p.e. oleaje, vientos, corrientes,...) que puedan actuar sobre la estructura durante la fase de proyecto analizada deberán ser tomadas en consideración con cada uno de sus valores usuales en dicha fase.

El coeficiente de ponderación (γ_f) aplicado a las cargas de fatiga es generalmente 1,00. No obstante, si los datos estadísticos de los que se dispone para la determinación de las cargas de fatiga no son fiables o suficientes (periodos mínimos de registros de datos de 1/20 de la duración de la fase analizada) deberán considerarse coeficientes de ponderación superiores.

Para la comprobación del estado límite de fatiga, las cargas podrán ser condensadas en grupos uniformes tales que sus componentes produzcan estados tensionales equivalentes (p.e. oleajes dentro de un intervalo altura/periodo), o transformadas en cargas ficticias equivalentes a efectos de deterioro (p.e. las cargas transmitidas por equipos de manipulación de mercancías equivalen a un número acumulado de Cargas Tipo. Ver apartado 3.4.2.3.4.). Podrá entonces definirse un coeficiente de seguridad a fatiga de la siguiente forma:

$$\text{Factor de Seguridad: } \sum_{i=1}^{n_T} (n_i / N_i) < 1$$

siendo:

n_i : Número de acciones de un grupo determinado que actuarán durante la fase analizada, o número de acciones ficticias equivalentes acumuladas durante dicha fase. (con un 50% de probabilidad de excedencia).

N_i : Número de acciones del grupo determinado, o número de cargas Tipo acumuladas, necesarias para producir el deterioro crítico de la estructura.

n_T : Número de grupos de cargas actuantes adoptados.

▪ **PARA ESTADOS LÍMITES DE UTILIZACIÓN (ELS)**

La verificación de los distintos Estados Límites de Utilización deberá efectuarse en base a las siguientes combinaciones de cargas:

— *Combinación Poco-Frecuente*

$$\sum G_{k,i} + Q_{k,1} + \sum_{j>1} \Psi_{0,j} \cdot Q_{k,j}$$

— *Combinación Frecuente*

$$\sum G_{k,i} + \Psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{j>1} \Psi_{2,j} \cdot Q_{k,j}$$

— *Combinación Cuasi-Permanente*

$$\sum G_{k,i} + \sum_{j \geq 1} \Psi_{2,j} \cdot Q_{k,j}$$

Los parámetros se definen en la tabla 4.2.1.2.

Para cada acción se adoptará su valor maximal o minimal en función de su efecto favorable o desfavorable en la combinación de acciones para el estado límite de utilización considerado.

Como se observa en las combinaciones de acciones indicadas, los coeficientes de seguridad (γ_i) a utilizar en la comprobación de los estados límites de utilización serán 1,00; no obstante para cargas de deformación con carácter de permanencia (p.e. Cargas de Pretensado) deberán aplicarse los siguientes:

- $\gamma_{q \max} = 1,10$,si el efecto de la carga en la combinación de acciones es desfavorable.
- $\gamma_{q \min} = 0,90$,si el efecto de la carga en la combinación de acciones es favorable.

El Proyectista, el Cliente o la Autoridad Competente fijarán justificadamente las condiciones de verificación de cada estado límite de utilización en cada fase e hipótesis de proyecto, indicando el tipo de combinación de acciones aplicable. No obstante, siempre deberá tomar en consideración las condiciones mínimas prescritas en las Normas, Instrucciones, y demás Reglamentaciones específicas para el tipo estructural analizado.

Ejemplos de condiciones mínimas de cumplimiento de estados límites de utilización prescritos en Normas son:

Ejemplo 1: La Norma EP-80 distingue tres clases de comprobaciones en una estructura de hormigón pretensado en relación con los estados límites de fisuración en fase de servicio, aplicables en función del tipo estructural analizado: Clase I: correspondiente al cumplimiento del estado límite de descompresión para la combinación poco-frecuente; Clase II: correspondiente al cumplimiento del estado límite de formación de fisuras para la combinación poco-frecuente, y del de descompresión para la combinación frecuente; y Clase III: correspondiente al cumplimiento del estado límite de descompresión para la combinación cuasi-permanente.

Ejemplo 2: La Norma NBE MV-103 fija limitaciones de flechas en piezas de acero de directriz recta sometidas a flexión para la combinación poco-frecuente.

En algunos casos la verificación de un estado límite puede exigir la consideración simultánea de dos o más combinaciones de cargas. Es particularmente aplicable cuando se prevean efectos diferidos significativos debidos a cargas reológicas. En ese caso las combinaciones de acciones a tomar en consideración podrán ser:

- Para los efectos instantáneos: combinación poco-frecuente.
- Para los efectos diferidos: combinación cuasi-permanente.

La comprobación de Estados Límites de Utilización no suele realizarse para condiciones extraordinarias, es decir cuando se considera la actuación de una acción accidental. Bastará comprobar que, una vez retirada la acción accidental, los posibles efectos remanentes derivados de su actuación no representan impedimento alguno para que el comportamiento posterior de la estructura sea el previsto para la misma antes de haber sufrido la actuación de la carga extraordinaria, muy en particular en todo aquello relativo a las condiciones funcionales y de durabilidad (p.e. fisuraciones remanentes en estructuras de hormigón, deformaciones remanentes en estructuras de acero,...). Es decir, deberá verificarse el Estado Límite de Daños Permanentes.

4.3. COEFICIENTES DE SEGURIDAD (γ_m) DE MINORACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LOS MATERIALES PARA LA COMPROBACIÓN DE ESTADOS LÍMITES

Según el proceso general de cálculo desarrollado en el apartado 4.1. de estas Recomendaciones, la determinación de la capacidad de respuesta de la estructura o del elemento estructural analizado se realizará en base a los valores característicos de las propiedades de los materiales (f_k) divididos por un coeficiente de seguridad (γ_m).

Los valores de los coeficientes de minoración de los valores característicos de las propiedades de los materiales se determinarán principalmente según lo dispuesto en sus Normas específicas.

Los valores medios de los coeficientes de seguridad para el estudio de estados límites se indican en la tabla 4.3.1. Dichos valores se considerarán aplicables siempre que se prevean niveles de control de calidad en la ejecución normales y daños previsibles medios en caso de fallo, valorados según lo dispuesto en las Normas específicas.

Para otros niveles de control y de valoración de daños deberán efectuarse las correcciones previstas en las citadas Normas.

Podrán ser aplicados en los cálculos coeficientes de seguridad mayores o menores que los aquí indicados, siempre que se justifique adecuadamente su empleo mediante más severos procedimientos de control.

TABLA 4.3.1. VALORES MEDIOS DE LOS COEFICIENTES (γ_m) DE MINORACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LOS MATERIALES PARA LA COMPROBACIÓN DE ESTADOS LÍMITES.		
A. ESTADOS LÍMITES ÚLTIMOS		
MATERIAL	COMBINACIONES DE ACCIONES	
	FUNDAMENTALES	ACCIDENTALES
Hormigón en compresión (γ_c)	1,50	1,30
Acero en armaduras pasivas (γ_s)	1,15	1,00
Acero en armaduras activas (γ_p)	1,15	1,00
Acero de construcción (γ_a)	1,00	0,90
Conectores en estructuras mixtas (γ_v)	1,25	1,10
Madera (γ_t)	1,40	1,10
B. ESTADOS LÍMITES DE UTILIZACIÓN		
MATERIAL	CUALQUIER COMBINACIÓN	
Todos los Materiales (γ_m)	1,00	
<p>NOTAS:</p> <p>— Los valores anteriores no son aplicables a las propiedades siguientes de los materiales, a los cuales se aplicará un coeficiente de minoración de 1,00:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Módulo de elasticidad (E) - Módulo de rigidez (G) - Coeficiente de Poisson (ν) - Coeficiente de dilatación térmica (α) <p>— Los valores dados en la tabla tampoco serán aplicables para la comprobación del estado límite último de fatiga y colapso progresivo. En ese caso se utilizarán los siguientes factores diferenciados:</p> <p>Para estado límite de fatiga:</p> <p>$\gamma_c = 1,25$ $\gamma_s = 1,00$</p> <p>Para estado límite de colapso progresivo:</p> <p>$\gamma_c = 1,10$ $\gamma_s = 1,00$</p> <p>Asimismo, para el cálculo a fatiga de estructuras de hormigón se adoptará un coeficiente de elasticidad igual a 0,80 veces el valor del módulo instantáneo de deformación longitudinal secante.</p>		