

Combinaciones a considerar en el cálculo estructural

Iturribizia, S.L.

25 de octubre de 2007

Índice

1. Introducción	2
1.1. Método de los estados límite	2
1.2. Situaciones de proyecto	3
1.3. Acciones	3
1.4. Vida útil	3
1.5. Nivel de riesgo	4
1.6. Nivel de control	4
1.7. Combinación de acciones	4
1.8. Comprobación de la estructura	4
2. Acciones	5
2.1. Clasificación de las acciones	5
2.1.1. Por su origen	5
2.1.2. Por su naturaleza	5
2.1.3. Por su variación en el tiempo	5
2.1.4. Por su variación en el espacio	6
2.1.5. Por su relación con el resto de acciones	6
2.1.6. Por el modo en que se participa en una combinación	6
2.2. Valores de las acciones	7
2.2.1. Valor característico F_k	7
2.2.2. Valor de combinación F_{r0}	7
2.2.3. Valor frecuente F_{r1}	7
2.2.4. Valor cuasipermanente F_{r2}	7
2.2.5. Valor representativo F_r . Coeficientes de simultaneidad	7
2.2.6. Valor de cálculo F_d	10
3. Situaciones de proyecto	12
4. Nivel de control	14
5. Estados límite	14
5.1. Estados límite últimos	14
5.2. Estados límite de servicio	15

6. Combinación de acciones	15
6.1. Combinaciones a considerar en estados límite últimos	15
6.1.1. En situaciones persistentes o transitorias	16
6.1.2. En situaciones accidentales	17
6.1.3. En situaciones sísmicas	18
6.2. Combinaciones a considerar en estados límite de servicio	18
6.2.1. Combinaciones poco frecuentes:	18
6.2.2. Combinaciones frecuentes:	18
6.2.3. Combinaciones cuasipermanentes:	19
6.3. Combinaciones a considerar en el cálculo	19
6.4. Algoritmo para formación de combinaciones	20
6.4.1. Combinaciones para estados límite últimos	20
6.4.2. Combinaciones para estados límite de servicio	23

Índice de cuadros

1. Vida útil nominal de los diferentes tipos de estructura (según referencia [2]).	3
2. Valores de los coeficientes de simultaneidad de las cargas climáticas según EHE	8
3. Valores de los coeficientes de simultaneidad para cargas de uso según EHE	9
4. Valores de los coeficientes de simultaneidad para cargas de uso según EAE	9
5. Valores de los coeficientes de simultaneidad de las cargas climáticas según EAE	10
6. Valores de los coeficientes de simultaneidad de las cargas variables según IAP.	10
7. Coeficiente de ponderación de acciones en estados límite de servicio según EHE.	11
8. Coeficiente de ponderación de acciones en estados límite últimos según EHE.	11
9. Coeficiente de ponderación de acciones en estados límite de servicio según EAE.	12
10. Coeficiente de ponderación de acciones en estados límite últimos según EAE.	12
11. Coeficiente de ponderación de acciones en estados límite de servicio según IAP.	13
12. Coeficiente de ponderación de acciones en estados límite últimos según IAP.	13

1. Introducción

En el presente apéndice se exponen los criterios a seguir para la obtención de las combinaciones a considerar en los cálculos de comprobación de una estructura.

La comprobación de la seguridad de una estructura se hace, en general, con la ayuda de cálculos¹.

1.1. Método de los estados límite

El procedimiento general que prescriben las normas para la comprobación de la seguridad de una estructura es el denominado *Método de los estados límite*. Se entiende por *estado límite* aquel en el que la estructura alcanza una situación no deseada, que, en consecuencia, debe evitarse.

Atendiendo a la gravedad de sus consecuencias, los estados límite se clasifican en *estados límite últimos (ELU)* y *estados límite de servicio (ELS)*. Estos últimos también se denominan en ocasiones estados límite de utilización.

¹También son admisibles otros procedimientos como pueden ser los ensayos en modelo reducido, los ensayos a escala real de la estructura o de sus piezas, extrapolación del comportamiento de estructuras similares, . . .

Tipo de estructura	Vida útil nominal
Estructuras de carácter temporal(*)	Entre 3 y 10 años (*)
Elementos estructurales reemplazables que no forman parte de la estructura principal (por ejemplo, barandillas, apoyos de tuberías)	Entre 10 y 25 años
Edificios (o instalaciones) agrícolas o industriales y obras marítimas	Entre 15 y 50 años
Edificios de viviendas u oficinas, puentes u obras de paso de longitud total inferior a 10 metros y estructuras de ingeniería civil (excepto obras marítimas) de repercusión económica baja o media	50 años
Edificios públicos, de salud y de educación.	75 años
Edificios de carácter monumental o de importancia especial	100 años
Puentes de longitud total igual o superior a 10 metros y otras estructuras de ingeniería civil de repercusión económica alta	100 años
(*)En función del propósito de la estructura (exposición temporal, etc.). En ningún caso se considerarán como estructuras de carácter temporal aquellas estructuras de vida útil nominal superior a 10 años.	

Cuadro 1: Vida útil nominal de los diferentes tipos de estructura (según referencia [2]).

1.2. Situaciones de proyecto

El concepto de *situación de proyecto* es útil para ordenar las comprobaciones a realizar en el proyecto o estudio de una estructura. Una situación de proyecto es una representación simplificada de la realidad de la obra que sea susceptible de análisis. Así pueden ser situaciones de proyecto las correspondientes a las distintas fases de construcción de la estructura, las de uso normal de la estructura, las de reparación de ésta,... Para cada una de las situaciones de proyecto en las que se deba comprobar la estructura se estudiarán los estados límite últimos y los de servicio en dicha situación de proyecto.

1.3. Acciones

Se denomina *acción* a cualquier causa capaz de producir estados tensionales en una estructura, o modificar los existentes. Los coeficientes de mayoración de las acciones serán diferentes según la norma que se aplique para la comprobación de los distintos elementos de la estructura, IAP, EHE, Eurocódigos,...

1.4. Vida útil

De acuerdo con la referencia [2] se entiende por vida útil de una estructura el período de tiempo, a partir de la finalización de su ejecución, durante el que debe mantener los requisitos de seguridad y funcionalidad de proyecto y un aspecto estético aceptable. Durante ese período requerirá una conservación de acuerdo con el plan de mantenimiento que se establezca a tal efecto.

La vida útil nominal depende del tipo de estructura y debe ser fijada por la Propiedad previamente al inicio del proyecto. En ningún caso su valor será inferior a lo indicado en las Reglamentaciones aplicables o, en su defecto, al dado en la tabla 1.

1.5. Nivel de riesgo

El nivel de riesgo de una obra define las consecuencias que podría tener su fallo estructural durante su construcción o en servicio (edificio público, almacén privado, paso superior sobre vía importante, ...).

1.6. Nivel de control

Independientemente del rigor con el que se realicen los cálculos de comprobación de la estructura durante el proyecto, la seguridad de ésta dependerá además de la cuidadosa construcción de la misma. Las distintas normas establecen la influencia que el nivel de control durante la ejecución de la obra tiene en los coeficientes de seguridad a emplear en la ejecución de la misma.

1.7. Combinación de acciones

En el cálculo estructural basado en los coeficientes de seguridad parciales, se emplean unas combinaciones de acciones para el estudio de los estados límite últimos y otras diferentes para los estados límite de servicio. Cuando se emplea el cálculo mediante coeficientes de seguridad globales, como por ejemplo en los cálculos geotécnicos, las combinaciones de acciones serán las mismas para analizar tanto los estados límite últimos como los de servicio.

Por otra parte, dependiendo de la norma que se esté empleando, es posible que los coeficientes de minoración de las características mecánicas de los materiales y suelos sean distintos dependiendo de la situación de proyecto que se esté considerando.

1.8. Comprobación de la estructura

A partir de lo expuesto en los apartados anteriores, el procedimiento de comprobación de la estructura consistirá en la realización de las siguientes tareas:

1. Definición de las situaciones de proyecto a considerar en la comprobación de la estructura.
2. Para cada una de las situaciones de proyecto definidas en el punto anterior, definición de los valores de las acciones que intervienen en la comprobación de dicha situación, de la geometría de la estructura y de las características mecánicas de los materiales a considerar en la misma.
3. Definición de las combinaciones de acciones a considerar en la comprobación de los ELS y ELU dependiendo de:
 - a) Materiales que forman la estructura o el elemento a comprobar: acero laminado, hormigón armado, madera, ...
 - b) Nivel de riesgo de la construcción.
 - c) Nivel de control con el que se ejecuta la obra.
 - d) Situación de proyecto a la que correspondan las combinaciones (persistente, transitoria o accidental).
4. Comprobación de cada uno de los elementos de la estructura sometido al efecto de cada una de las combinaciones correspondientes al material de que se trate. Comprobación del comportamiento global de la estructura (estabilidad, deformaciones, ...) sometida al efecto de cada una de las combinaciones a considerar a estos efectos.

2. Acciones

Se denomina *acción* a cualquier causa capaz de producir estados tensionales en una estructura, o modificar los existentes. Los coeficientes de mayoración de las acciones serán diferentes

2.1. Clasificación de las acciones

Las acciones sobre una estructura pueden clasificarse de acuerdo con origen, su naturaleza, su variación en el tiempo, su variación en el espacio y por su relación con el resto de las que actúan sobre la estructura.

2.1.1. Por su origen

Atendiendo a su naturaleza una acción puede ser:

- **Gravitatoria:** Cuyo origen es el campo gravitatorio terrestre (peso propio, carga muerta, empujes del terreno o de fluidos, etc.).
- **Climática:** Cuyo origen se encuentra en el clima (acción térmica y acción del viento²).
- **Reológica:** Son las acciones que se producen debido a las deformaciones que experimentan algunos materiales en el transcurso del tiempo por retracción, fluencia bajo carga u otras causas.
- **Sísmica:** Son aquellas producidas por la aceleración que experimenta la masa de la estructura y del terreno de cimentación durante el terremoto.

2.1.2. Por su naturaleza

De acuerdo con este criterio las acciones pueden ser:

- **Directas:** Aquellas que se aplican directamente sobre la estructura como, por ejemplo, el peso propio, la carga muerta y la sobrecarga de uso.
- **Indirectas:** Son las debidas a deformaciones o aceleraciones impuestas que, indirectamente, dan lugar a la aparición de tensiones en el material de la estructura. Ejemplos de estas acciones son los efectos de las variaciones de temperatura, los asentos de la cimentación, las acciones reológicas, las sísmicas, etc.

2.1.3. Por su variación en el tiempo

Según su variación en el tiempo, tomando como referencia la *vida útil*³ de la estructura, las acciones se clasifican en:

- **Permanentes G:** son las que actúan durante toda la vida útil y son constantes en magnitud y posición. El peso propio, la carga muerta y el empuje de tierras son ejemplos de cargas permanentes.
- **Permanentes de valor no constante G*:** son las que, actuando durante toda la vida útil de la estructura, su valor varía a lo largo de aquélla. Un ejemplo de acción permanente de valor no constante es la producida por la retracción.

²En ocasiones las cargas térmicas o las de viento pueden no deberse al clima como por ejemplo en el caso de la existencia de un horno o en el de estructuras sometidas al empuje de motores a reacción de naves aéreas.

³Ver apartado 1.4.

- **Variables Q:** son las acciones que se producen con frecuencia a lo largo de la vida útil de la estructura y cuyos valores presentan gran dispersión. Las sobrecargas de uso o de tráfico y las climáticas son acciones variables.
- **Accidentales A:** Son aquellas cuya probabilidad de actuar sobre la estructura es muy pequeña, por ejemplo impactos, explosiones, avalanchas, tornados.
- **Sísmicas AS:** Son las producidas por un terremoto. Aunque suelen considerarse dentro de las acciones accidentales, reciben a veces un tratamiento diferente.

Si en lugar de la vida útil de la estructura, se toma como referencia el periodo del primer modo propio de la estructura podemos distinguir entre:

- **Cargas estáticas:** aquellas cuya variación en el tiempo tiene un periodo muy superior al primer modo propio de la estructura.
- **Cargas dinámicas:** aquellas cuya variación en el tiempo tiene un periodo del mismo orden de magnitud que el primer modo propio de la estructura.

2.1.4. Por su variación en el espacio

Según la variación de las acciones en el espacio, éstas se clasifican en:

- **Fijas:** Se aplican siempre en la misma posición y con la misma dirección y sentido (p. ej.: el peso propio, el anclaje del cable de un ascensor).
- **Libres:** La dirección, el sentido y/o la posición en la que se aplican puede variar. (p. ej.: el carro de la instrucción de puentes).

2.1.5. Por su relación con el resto de acciones

Examinando las posibles relaciones que pueden existir entre dos acciones, clasificamos las mismas en:

- **Acciones compatibles:** diremos que dos acciones son compatibles entre sí cuando lo es, físicamente, la actuación de una, otra o ambas simultáneamente (p. ej.: la acción del viento y la sobrecarga de uso).
- **Acciones incompatibles:** diremos que dos acciones son incompatibles entre sí cuando no es posible su actuación simultánea (p. ej.: La actuación de **un** puente grúa simultáneamente en dos posiciones distintas).
- **Acciones sincrónicas:** diremos que la acción a es sincrónica con la acción b cuando la actuación de a implica, físicamente, la actuación de b (p. ej.: la carga de frenado de un puente grúa será sincrónica con la acción del peso del mismo puente grúa).

2.1.6. Por el modo en que se participa en una combinación

Como más adelante se verá (ver apartado 6, el cálculo de la estructura supone la obtención de la respuesta de dicha estructura bajo la acción de distintas combinaciones. Éstas, se obtienen mediante combinación lineal de los valores de las distintas acciones a las que estará sometida la estructura durante su vida útil. En estas combinaciones se supone siempre la actuación de las cargas permanentes y además la presencia de cero o más acciones variables. Es lógico pensar que es muy poco probable que todas las acciones variables se presenten simultáneamente con sus valores característicos, esta circunstancia da lugar a la siguiente clasificación para las acciones no permanentes:

- **Acción determinante:** Es aquella acción variable que interviene en una combinación con su valor característico.
- **Acción de acompañamiento:** Es aquella acción variable que interviene en una combinación con un valor inferior al característico.

2.2. Valores de las acciones

2.2.1. Valor característico F_k

Se denomina valor característico de una acción al que presenta una probabilidad de 0.05 de ser sobrepasado durante la vida útil de la estructura. Para designar este valor se suele emplear el subíndice k .

2.2.2. Valor de combinación F_{r0}

Se denomina valor de combinación de una acción a aquel que se emplea cuando la acción interviene en una hipótesis como acción de *acompañamiento*.

2.2.3. Valor frecuente F_{r1}

Se denomina valor frecuente de una acción a aquel que resulta sobrepasado con frecuencia, pero en períodos de corta duración, durante la vida útil de la estructura.

2.2.4. Valor cuasipermanente F_{r2}

Se denomina valor cuasipermanente de una acción a aquel que resulta sobrepasado durante gran parte⁴ de la vida útil de la estructura.

2.2.5. Valor representativo F_r . Coeficientes de simultaneidad

Se denomina valor representativo de una acción a aquél con el que la acción interviene (antes de introducir el coeficiente de ponderación γ_f) en una hipótesis de cálculo. Este valor, para una misma acción, depende de la combinación específica que en cada momento se esté estudiando. Dicho de otro modo el valor representativo depende de que, en la combinación en cuestión, la acción intervenga como *determinante* o de *acompañamiento*. El valor representativo de una acción se obtiene mediante la aplicación, al valor característico de la carga, de un coeficiente de simultaneidad ψ igual o menor que la unidad. En general, para las acciones permanentes, así como para las accidentales, el valor representativo coincide con el valor característico⁵ ($\psi = 1$). En cambio para las acciones variables, los coeficientes de simultaneidad que se emplean para obtener los valores representativos que se emplean son los siguientes:

- $\psi = 1$ El valor representativo de la acción coincide con su valor característico cuando dicha acción interviene en la hipótesis como acción *determinante* y no se consideran en la hipótesis acciones accidentales.
- $\psi = \psi_0$ El valor representativo de la acción coincide con su valor de combinación cuando dicha acción interviene en la hipótesis como acción de *acompañamiento* y no se consideran en la hipótesis acciones accidentales.

⁴Según el Documento Nacional de Aplicación español del Eurocódigo de Hormigón (UNE ENV 1992-1-1) el valor cuasipermanente es el que resulta sobrepasado durante más de la mitad de la vida útil de la estructura.

⁵La instrucción IAP (referencia [3]), hace algunas excepciones a esta regla.

ACCIONES CLIMÁTICAS	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Sobrecarga de nieve	0.6	0.2	0.0
Sobrecarga de viento	0.6	0.5	0.0
Sobrecarga térmica	0.6	0.5	0.0

Cuadro 2: Valores de los coeficientes de simultaneidad de las cargas climáticas según EHE

- $\psi = \psi_1$ El valor representativo de la acción coincide con su valor frecuente cuando dicha acción interviene en la hipótesis como acción *determinante* y además en la hipótesis se consideran acciones accidentales.
- $\psi = \psi_2$ El valor representativo de la acción coincide con su valor cuasipermanente cuando dicha acción interviene en la hipótesis como acción *de acompañamiento* y además en la hipótesis se consideran acciones accidentales.

La instrucción IAP considera un único valor representativo para las acciones permanentes igual a su valor característico, excepto en el caso de la acción correspondiente al peso del pavimento y, en su caso, las acciones producidas por los servicios situados en el puente, para las que se consideran dos valores representativos. En el caso del pavimento se considerarán dos valores representativos:

$G_{k,inf}$: Valor inferior, determinado con los espesores teóricos del pavimento definidos en el proyecto.

$G_{k,sup}$: Valor superior, obtenido incrementando en un cincuenta por ciento los espesores teóricos del pavimento definidos en el proyecto.

En resumen el valor representativo de una acción depende de:

- Su variación en el tiempo (G, G^*, Q, A, AS).
- Su intervención en la hipótesis como *determinante* o *de acompañamiento*.
- La presencia o ausencia de acciones accidentales en la combinación en la que interviene la acción.
- El origen de la carga (climática, de uso, ...).

Valores de los coeficientes de simultaneidad

Según EHE: los valores de los coeficientes de simultaneidad ψ_0, ψ_1, ψ_2 según el Documento Nacional de Aplicación español del Eurocódigo de Hormigón (UNE ENV 1992-1-1) son los que figuran en las tablas 2 y 3.

Según EAE: en el caso de la instrucción EAE (referencia [2]) los valores de estos coeficientes se dan en las tablas 5 y 4.

Según IAP: Los coeficientes de simultaneidad que adopta la instrucción IAP (referencia [3]) son los que figuran en la tabla 6.

SOBRECARGAS DE USO	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Azoteas			
Inaccesibles o sólo para conservación	0.7	0.5	0.3
Accesibles	s/uso	s/uso	s/uso
Viviendas			
Habitaciones	0.7	0.5	0.3
Escaleras y accesos públicos	0.7	0.5	0.3
Balcones volados	0.7	0.5	0.3
Hoteles, hospitales, cárceles, etc.			
Zonas de dormitorios	0.7	0.5	0.3
Zonas públicas, escaleras y accesos	0.7	0.7	0.6
Locales de reunión y de espectáculo	0.7	0.7	0.6
Balcones volados	s/uso	s/uso	s/uso
Oficinas y comercios			
Locales privados	0.7	0.5	0.3
Oficinas públicas	0.7	0.5	0.3
Tiendas	0.7	0.7	0.6
Galerías comerciales, escaleras y accesos	0.7	0.7	0.6
Locales de almacén	1.0	0.9	0.8
Balcones volados	s/uso	s/uso	s/uso
Edificios docentes			
Aulas, despachos y comedores	0.7	0.7	0.6
Escaleras y accesos	0.7	0.5	0.6
Balcones volados	s/uso	s/uso	s/uso
Iglesias, edificios de reunión y de espectáculo			
Locales con asientos fijos	0.7	0.7	0.6
Locales sin asientos fijos, tribunas, escaleras	0.7	0.7	0.6
Balcones volados	s/uso	s/uso	s/uso
Calzadas y garajes			
Áreas con vehículos de peso no mayor de 30 kN	0.7	0.7	0.6
Áreas con vehículos de peso entre 30 y 160 kN	0.7	0.5	0.3

Cuadro 3: Valores de los coeficientes de simultaneidad para cargas de uso según EHE

USO DEL ELEMENTO	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Zonas residenciales y domésticas	0.7	0.5	0.3
Zonas de oficinas	0.7	0.5	0.3
Zonas de reunión	0.7	0.7	0.6
Zonas comerciales	0.7	0.7	0.6
Zonas de almacenamiento	1.0	0.9	0.8
Zonas de tráfico, peso del vehículo $\leq 30 \text{ kN}$	0.7	0.7	0.6
Zonas de tráfico, $30 \text{ kN} < \text{peso del vehículo} \leq 160 \text{ kN}$	0.7	0.5	0.3
Cubiertas no accesibles	0.0	0.0	0.0

Cuadro 4: Valores de los coeficientes de simultaneidad para cargas de uso según EAE

ACCIONES CLIMÁTICAS	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Sobrecarga de nieve en edificios emplazados a más de mil metros sobre el nivel del mar.	0.7	0.5	0.2
Sobrecarga de nieve en edificios emplazados a menos de mil metros sobre el nivel del mar.	0.5	0.2	0.0
Sobrecarga de viento	0.6	0.2	0.0
Sobrecarga térmica	0.6	0.5	0.0

Cuadro 5: Valores de los coeficientes de simultaneidad de las cargas climáticas según EAE

ACCIONES VARIABLES	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Tren de carga para fatiga.	1.0	1.0	1.0
Resto de acciones variables.	0.6	0.5	0.2

Cuadro 6: Valores de los coeficientes de simultaneidad de las cargas variables según IAP.

2.2.6. Valor de cálculo F_d

Se denomina valor de cálculo de una acción al obtenido multiplicando su valor representativo por un coeficiente de ponderación γ_f :

$$F_d = \gamma_f \cdot F_r \quad (1)$$

El coeficiente γ_f introduce en el cálculo la probabilidad de que la acción alcance en realidad un valor superior al adoptado como característico debido a una o más de las siguientes circunstancias:

1. Incertidumbre en el valor de la carga realmente aplicada. Se considera la probabilidad de que la carga aplicada en la realidad se encuentre dentro de ese 5%⁶ de casos en los que se supera el valor característico.
2. Incertidumbre en los resultados del cálculo. Todos los métodos de cálculo introducen simplificaciones en el fenómeno físico a analizar. A esto se suman los errores numéricos⁷ que se comenten al operar.
3. Incertidumbre en las características geométricas y mecánicas de la estructura real. Durante la ejecución de la estructura se cometerán errores⁸ que harán que las dimensiones de las secciones, la posición de las armaduras, la posición de los ejes y planos medios de las piezas, las características mecánicas de los materiales etc. sean distintos de los teóricos.

Valores del coeficiente de ponderación. El valor del coeficiente de ponderación γ_f a emplear con una acción depende de:

1. El estado límite que se esté considerando en el cálculo: estado límite último o estado límite de servicio.
2. La situación que se esté considerando en el cálculo, según la clasificación dada en 3.
3. La variación de la acción respecto al tiempo, según la clasificación dada en 2.1.3.

⁶Ver definición de valor característico en el apartado 2.2.1.

⁷redondeo, truncamiento, ...

⁸Se entiende que estos errores están comprendidos dentro de las tolerancias establecida en la normativa y en el pliego de prescripciones técnicas particulares de proyecto, es decir, no se contemplan aquí los errores debidos a una deficiente ejecución que deberán ser subsanados antes de la puesta en carga de la pieza de que se trate.

ACCIÓN	EFECTO	
	favorable	desfavorable
Permanente	$\gamma_G = 1,00$	$\gamma_G = 1,00$
Pretensado (armadura pretesa)	$\gamma_P = 0,95$	$\gamma_P = 1,05$
Pretensado (armadura postesa)	$\gamma_P = 0,90$	$\gamma_P = 1,10$
Permanente de valor no constante	$\gamma_{G^*} = 1,00$	$\gamma_{G^*} = 1,00$
Variable	$\gamma_Q = 0,00$	$\gamma_Q = 1,00$
NOTACIÓN:		
G: Acción permanente.		
P: Pretensado.		
G*: Acción permanente de valor no constante.		
Q: Acción variable.		
A: Acción accidental.		

Cuadro 7: Coeficiente de ponderación de acciones en estados límite de servicio según EHE.

Acción	N. control	Efecto en situación persistente o transitoria		Efecto en situación accidental o sísmica	
		favorable	desfavorable	favorable	desfavorable
G	intenso	$\gamma_G = 1,00$	$\gamma_G = 1,35$	$\gamma_G = 1,00$	$\gamma_G = 1,00$
	normal	$\gamma_G = 1,00$	$\gamma_G = 1,50$	$\gamma_G = 1,00$	$\gamma_G = 1,00$
	reducido	$\gamma_G = 1,00$	$\gamma_G = 1,60$	$\gamma_G = 1,00$	$\gamma_G = 1,00$
G*	intenso	$\gamma_{G^*} = 1,00$	$\gamma_{G^*} = 1,50$	$\gamma_{G^*} = 1,00$	$\gamma_{G^*} = 1,00$
	normal	$\gamma_{G^*} = 1,00$	$\gamma_{G^*} = 1,60$	$\gamma_{G^*} = 1,00$	$\gamma_{G^*} = 1,00$
	reducido	$\gamma_{G^*} = 1,00$	$\gamma_{G^*} = 1,80$	$\gamma_{G^*} = 1,00$	$\gamma_{G^*} = 1,00$
Q	intenso	$\gamma_Q = 0,00$	$\gamma_Q = 1,50$	$\gamma_Q = 0,00$	$\gamma_Q = 1,00$
	normal	$\gamma_Q = 0,00$	$\gamma_Q = 1,60$	$\gamma_Q = 0,00$	$\gamma_Q = 1,00$
	reducido	$\gamma_Q = 0,00$	$\gamma_Q = 1,80$	$\gamma_Q = 0,00$	$\gamma_Q = 1,00$
A	-	-	-	$\gamma_A = 1,00$	$\gamma_A = 1,00$
NOTACIÓN:					
G: Acción permanente.					
G*: Acción permanente de valor no constante.					
Q: Acción variable.					
A: Acción accidental.					

Cuadro 8: Coeficiente de ponderación de acciones en estados límite últimos según EHE.

- El efecto, favorable o desfavorable⁹, de la acción respecto del estado límite que se esté comprobando en el cálculo.
- En su caso, nivel de control de la ejecución.

Según EHE: determinados estos cinco parámetros puede obtenerse el valor del coeficiente de ponderación de acuerdo con el siguiente criterio:

- Si se trata de un estado límite de servicio el coeficiente de ponderación se obtiene a partir del cuadro 7.
- Si se trata de un estado límite último, el valor del coeficiente de ponderación se obtiene a partir de los valores propuestos en el cuadro 8.

Según EAE: El valor del coeficiente de ponderación se determina en este caso de acuerdo con el siguiente criterio:

⁹el carácter favorable o desfavorable de la acción no es común a toda la estructura. Dado un estado límite, la misma acción puede ser favorable para ciertas partes de la misma y desfavorable para otras

ACCIÓN	EFECTO	
	favorable	desfavorable
Permanente	$\gamma_G = 1,00$	$\gamma_G = 1,00$
Permanente de valor no constante	$\gamma_{G^*} = 1,00$	$\gamma_{G^*} = 1,00$
Variable	$\gamma_Q = 0,00$	$\gamma_Q = 1,00$

Cuadro 9: Coeficiente de ponderación de acciones en estados límite de servicio según EAE.

Acción	Efecto en situación persistente o transitoria		Efecto en situación accidental o sísmica	
	favorable	desfavorable	favorable	desfavorable
G	$\gamma_G = 1,00$	$\gamma_G = 1,35$	$\gamma_G = 1,00$	$\gamma_G = 1,00$
G*	$\gamma_{G^*} = 1,00$	$\gamma_{G^*} = 1,50$	$\gamma_{G^*} = 1,00$	$\gamma_{G^*} = 1,00$
Q	$\gamma_Q = 0,00$	$\gamma_Q = 1,50$	$\gamma_Q = 0,00$	$\gamma_Q = 1,00$
A	-	-	$\gamma_A = 1,00$	$\gamma_A = 1,00$

NOTACIÓN:
 G: Acción permanente.
 G*: Acción permanente de valor no constante.
 Q: Acción variable.
 A: Acción accidental.

Cuadro 10: Coeficiente de ponderación de acciones en estados límite últimos según EAE.

- Si se trata de un estado límite de servicio el coeficiente de ponderación se obtiene a partir del cuadro 9.
- Si se trata de un estado límite último, el valor del coeficiente de ponderación se obtiene a partir de los valores propuestos en el cuadro 10.

Según IAP: El valor del coeficiente de ponderación se determina en este caso de acuerdo con el siguiente criterio:

- Si se trata de un estado límite de servicio el coeficiente de ponderación se obtiene a partir del cuadro 11.
- Si se trata de un estado límite último, el valor del coeficiente de ponderación se obtiene a partir de los valores propuestos en el cuadro 12.

3. Situaciones de proyecto

A los efectos del cálculo de una estructura, a lo largo de su vida útil, esta puede encontrarse en una de las tres siguientes situaciones:

1. Situación persistente: La que corresponde a las condiciones de uso normal de la estructura.
2. Situación transitoria: La que se produce durante la construcción o la reparación (no simultánea con el uso) de la estructura.
3. Situación accidental: La que se produce cuando la estructura se encuentra sometida a condiciones excepcionales (choques, ...).

ACCIÓN	EFECTO	
	favorable	desfavorable
Permanente	$\gamma_G = 1,00$	$\gamma_G = 1,00$
Pretensado interior (armadura postesa)	$\gamma_{P_1} = 0,9$	$\gamma_{P_1} = 1,1$
Pretensado interior (armadura pretesa)	$\gamma_{P_1} = 0,95$	$\gamma_{P_1} = 1,05$
Pretensado exterior	$\gamma_{P_2} = 1,0$	$\gamma_{P_2} = 1,0$
Otra presolicitación	$\gamma_{G^*} = 1,00$	$\gamma_{G^*} = 1,00$
Reológica	$\gamma_{G^*} = 1,00$	$\gamma_{G^*} = 1,00$
Debidas al terreno	$\gamma_{G^*} = 1,00$	$\gamma_{G^*} = 1,00$
Variable	$\gamma_Q = 0,00$	$\gamma_Q = 1,00$
NOTACIÓN:		
G : Acción permanente. P_1 : Pretensado interior. P_2 : Pretensado exterior. G^* : Acción permanente de valor no constante. Q : Acción variable. A : Acción accidental.		

Cuadro 11: Coeficiente de ponderación de acciones en estados límite de servicio según IAP.

Acción	Efecto en situación persistente o transitoria		Efecto en situación accidental o sísmica	
	favorable	desfavorable	favorable	desfavorable
Permanente	$\gamma_G = 1,00$	$\gamma_G = 1,35$	$\gamma_G = 1,00$	$\gamma_G = 1,00$
Pretensado interior	$\gamma_{G^*} = 1,00$	$\gamma_{G^*} = 1,00$	$\gamma_{G^*} = 1,00$	$\gamma_{G^*} = 1,00$
Pretensado exterior	$\gamma_{G^*} = 1,00$	$\gamma_{G^*} = 1,35$	$\gamma_{G^*} = 1,00$	$\gamma_{G^*} = 1,00$
Otra presolicitación	$\gamma_{G^*} = 0,95$	$\gamma_{G^*} = 1,05$	$\gamma_{G^*} = 1,00$	$\gamma_{G^*} = 1,00$
Reológica	$\gamma_{G^*} = 1,0$	$\gamma_{G^*} = 1,35$	$\gamma_{G^*} = 1,00$	$\gamma_{G^*} = 1,00$
Acción del terreno	$\gamma_{G^*} = 1,00$	$\gamma_{G^*} = 1,50$	$\gamma_{G^*} = 1,00$	$\gamma_{G^*} = 1,00$
Variable	$\gamma_Q = 0,00$	$\gamma_Q = 1,50$	$\gamma_Q = 0,00$	$\gamma_Q = 1,00$
Accidental	-	-	$\gamma_A = 1,00$	$\gamma_A = 1,00$

Cuadro 12: Coeficiente de ponderación de acciones en estados límite últimos según IAP.

4. Nivel de control

Para introducir en el cálculo el efecto que las imperfecciones en la ejecución tendrá sobre los esfuerzos en la estructura se distinguen tres niveles de control:

- Intenso.
- Normal.
- Reducido.

Como se verá posteriormente el nivel de control previsto para la ejecución de las obras influirá en los coeficientes de ponderación a adoptar en el cálculo.

5. Estados límite

Se definen como estado límite de una estructura respecto a determinado parámetro (tensión, deformación, fisuración, . . .) la situación tal que, de ser superada, se considera que la estructura no cumple alguna de las funciones para las que ha sido proyectada.

El dimensionamiento de la estructura será correcto cuando:

1. La estructura no supera ninguno de los estados límite últimos en ninguna de las hipótesis de carga definidas en 6.1.
2. La estructura no supera ninguno de los estados límite de servicio en ninguna de las hipótesis de carga definidas en 6.2.

5.1. Estados límite últimos

Se llaman estados límite últimos a aquellos que producen la puesta fuera de servicio de la estructura por colapso o rotura de la misma o de una de sus partes.

Los estados límite últimos a considerar en el cálculo de la estructura son los siguientes:

1. Estado límite de equilibrio.
2. Estado límite de agotamiento.
 - a) Por solicitaciones normales.
 - b) Por cortante.
 - c) Por torsión.
 - d) Por punzonamiento.
 - e) Por rasante.
3. Estado límite de inestabilidad.
4. Estado límite de fatiga.

5.2. Estados límite de servicio

Se llaman estados límite de servicio a aquellos cuya superación implica que la estructura no cumpla los requisitos de:

- funcionalidad.
- comodidad.
- durabilidad.
- aspecto estético.

Los estados límite de servicio a considerar en el cálculo son los siguientes:

1. Estado límite de deformación.
2. Estado límite de vibraciones.
3. Estado límite de fisuración.

6. Combinación de acciones

La comprobación de la estructura para cada uno de los estados límite se debe efectuar para la hipótesis de carga más desfavorable, es decir, para aquella combinación de acciones tal que, siendo compatible su actuación simultánea, produce los efectos más adversos en relación con el estado límite en cuestión.

A los efectos de eliminar las combinaciones que no son posibles (o que no tienen sentido) físicamente, se tendrán en cuenta los siguientes criterios:

- Cuando en una combinación interviene una acción, en la misma combinación no deberá intervenir ninguna de las acciones incompatibles con la misma.
- Cuando en una combinación interviene una acción, en la misma combinación deberán intervenir necesariamente todas las acciones sincrónicas¹⁰ con ella.

En lo que sigue, consideraremos una estructura cualquiera, sometida a las siguientes acciones:

- n_G acciones permanentes: G_i ¹¹.
- n_{G^*} acciones permanentes de valor no constante: G^*_j .
- n_Q acciones variables: Q_l .
- n_A acciones accidentales: Q_m .
- n_{AS} acciones sísmicas: Q_n .

6.1. Combinaciones a considerar en estados límite últimos

Para cada uno de los estados límite últimos a considerar en la estructura, se deberá comprobar el efecto sobre la misma de los siguientes grupos de combinaciones:

¹⁰Ver definición de acción sincrónica y de acción compatible en el apartado 2.1.5.

¹¹El subíndice indica cada una de las acciones permanentes que actúan sobre la estructura $G_1, G_2, G_3, G_4, \dots, G_{n_G}$

6.1.1. En situaciones persistentes o transitorias

Para cada acción variable, se planteará un grupo de combinaciones en la que ésta es la acción determinante¹².

$$\sum_{i=1}^{n_G} \gamma_G \cdot G_{k,i} + \sum_{j=1}^{n_{G*}} \gamma_{G*} \cdot G_{*k,j} + \gamma_Q \cdot Q_{k,d} + \sum_{l=1}^{d-1} \gamma_Q \cdot Q_{r0,l} + \sum_{l=d+1}^{n_Q} \gamma_Q \cdot Q_{r0,l} \quad (2)$$

siendo:

$\gamma_G \cdot G_{k,i}$: Valor de cálculo de la acción permanente i , obtenido a partir de su valor característico.

$\gamma_{G*} \cdot G_{*k,j}$: Valor de cálculo de la acción permanente de valor no constante j , obtenido a partir de su valor característico.

$\gamma_Q \cdot Q_{k,d}$: Valor de cálculo de la acción variable determinante d , obtenido a partir de su *valor característico*.

$\gamma_Q \cdot Q_{r0,l}$: Valor de cálculo de la acción variable l , obtenido a partir de su *valor representativo de combinación*.

Número de combinaciones a considerar: De acuerdo con lo expuesto en el apartado 2.2.6 tendremos que:

- Las acciones permanentes tendrán, en las combinaciones para estados límite último correspondientes a situaciones permanentes o transitorias, dos coeficientes de ponderación no nulos.
- Las acciones permanentes de valor no constante tendrán, en el mismo caso, dos coeficientes de ponderación no nulos que, en algún caso, pueden ser iguales (ver el caso del pretensado interior en la tabla 12).
- Las cargas variables tendrán un sólo coeficiente de ponderación no nulo.

en consecuencia, sean:

n_{G2} : el número de acciones permanentes que tienen dos coeficientes de ponderación distintos.

n_{G1} : el número de acciones permanentes que tienen un sólo coeficiente de ponderación¹³.

n_{G*2} : el número de acciones permanentes de valor no constante que tienen dos coeficientes de ponderación distintos.

n_{G*1} : el número de acciones permanentes de valor no constante que tienen un sólo coeficiente de ponderación.

n_Q el número de acciones variables, todas ellas tienen un sólo coeficiente de ponderación no nulo.

Si por el momento se ignora la incompatibilidad o sincronicidad de las acciones tendremos que, por cada acción variable determinante, habrá:

- $2^{n_{G2}}$ combinaciones de acciones permanentes del conjunto $G2$.
- 1 combinación de acciones permanentes del conjunto $G1$.

¹²Ver apartado 2.1.6.

¹³Porque ambos coeficientes sean iguales.

- $2^{n_{G*2}}$ combinaciones de acciones permanentes del conjunto $G * 2$.
- 1 combinación de acciones permanentes del conjunto $G * 1$.
- 2^{n_Q-1} combinaciones de acciones variables de acompañamiento.

Como para cada acción determinante habra que considerar dos coeficientes, el número total de combinaciones $n_{comb,spt}$ en situaciones persistentes o transitorias será el cardinal del producto cartesiano de las combinaciones anteriores multiplicado por $2^{n_{Qd}}$, siendo Qd el número de acciones variables que pueden ser determinantes:

$$n_{comb,ELU,spt} = 2^{n_{G2}} \cdot 2^{n_{G*2}} \cdot 2^{n_Q-1} \cdot 2^{n_{Qd}} = 2^{n_{G2}+n_{G*2}+n_Q+n_{Qd}-1} \quad (3)$$

De estas combinaciones será necesario eliminar las que contengan acciones incompatibles.

Para tratar las acciones sincrónicas se puede seguir el siguiente procedimiento. Sea a una acción sincrónica de otra b :

1. Se elimina a de la lista de acciones variables.
2. Se agrega a la lista de acciones variables la acción $a + b$.
3. Se establece la incompatibilidad de $a + b$ con la acción b ,

6.1.2. En situaciones accidentales

Para cada acción variable Q_l , se plantearán n_A combinaciones, en las que aquella es la acción determinante:

$$\sum_{i=1}^{n_G} \gamma_G \cdot G_{k,i} + \sum_{j=1}^{n_{G*}} \gamma_{G*} \cdot G_{*k,j} + A_{k,m} + \gamma_Q \cdot Q_{r1,d} + \sum_{l=1}^{d-1} \gamma_Q \cdot Q_{r2,l} + \sum_{l=d+1}^{n_Q} \gamma_Q \cdot Q_{r2,l} \quad (4)$$

siendo:

$A_{k,m}$: Valor de cálculo de la acción accidental m , obtenido a partir de su valor característico.

$\gamma_Q \cdot Q_{r1,d}$: Valor de cálculo de la acción variable determinante d , obtenido a partir de su valor representativo frecuente.

$\gamma_Q \cdot Q_{r2,l}$: Valor de cálculo de la acción variable l , obtenido a partir de su valor representativo cuasipermanente.

Número de combinaciones a considerar: En este caso el número de combinaciones que se obtiene para cada uno de los sumatorios es el mismo que en 6.1.1 (ver expresión 3), aunque ahora los valores representativos de las acciones variables son distintos a los empleados allí. Si, como es habitual, los coeficientes de ponderación de la acción sísmica son iguales en caso de efecto favorable o desfavorable, sólo tendremos que multiplicar por el número de acciones accidentales n_A .

$$n_{comb,ELU,acc} = 2^{n_{G2}+n_{G*2}+n_Q+n_{Qd}-1} \cdot n_A \quad (5)$$

El procedimiento para tratar las acciones incompatibles será el mismo que se describió en 6.1.1.

6.1.3. En situaciones sísmicas

Para cada acción variable sísmica se planteará una combinación:

$$\sum_{i=1}^{n_G} \gamma_G \cdot G_{k,i} + \sum_{j=1}^{n_{G^*}} \gamma_{G^*} \cdot G^*_{k,j} + AS_{k,n} + \sum_{l=1}^{n_Q} \gamma_Q \cdot Q_{r2,l} \quad (6)$$

siendo:

$A_{k,m}$: Valor de cálculo de la acción accidental m , obtenido a partir de su valor característico.

$\gamma_Q \cdot Q_{r2,l}$: Valor de cálculo de la acción variable l , obtenido a partir de su valor representativo cuasipermanente.

Número de combinaciones a considerar: El número de combinaciones a plantear será:

$$n_{comb,ELU,sism} = 2^{n_{G2}+n_{G^*2}+n_Q} \cdot n_{AS} \quad (7)$$

El procedimiento para tratar las acciones incompatibles será el mismo que se describió en 6.1.1.

6.2. Combinaciones a considerar en estados límite de servicio

Para cada uno de los estados límite últimos a considerar en la estructura, se deberá comprobar el efecto sobre la misma de las siguientes combinaciones:

6.2.1. Combinaciones poco frecuentes:

Para cada acción variable, se planteará una combinación en la que ésta es la acción determinante.

$$\sum_{i=1}^{n_G} G_{k,i} + \sum_{j=1}^{n_{G^*}} G^*_{k,j} + Q_{k,d} + \sum_{l=1}^{d-1} Q_{r0,l} + \sum_{l=d+1}^{n_Q} Q_{r0,l} \quad (8)$$

Esto implica que en el caso general, en el que no haya combinación incompatibles o concomitantes, será necesario plantear (empleando la notación definida en 6.1.1):

$$n_{comb,ELS,pf} = 2^{n_{G2}+n_{G^*2}+n_Q+n_{Qd}-1} \quad (9)$$

Al tratarse de coeficientes de mayoración en estados límite de servicio los conjuntos $G2$ y G^*2 no coincidirán con los correspondientes a estados límite últimos, en general, puesto que en muchos casos ambos coeficientes serán iguales a la unidad, el cardinal de estos conjuntos será muy inferior al de los equivalentes del apartado 6.1.1.

El procedimiento para tratar las acciones incompatibles será el mismo que se describió en 6.1.1.

6.2.2. Combinaciones frecuentes:

Para cada acción variable, se planteará una combinación en la que ésta es la acción determinante.

$$\sum_{i=1}^{n_G} G_{k,i} + \sum_{j=1}^{n_{G^*}} G^*_{k,j} + Q_{r1,d} + \sum_{l=1}^{d-1} Q_{r2,l} + \sum_{l=d+1}^{n_Q} Q_{r2,l} \quad (10)$$

El número de combinaciones será igual al del caso anterior, ya que solo varían los coeficientes de simultaneidad a emplear.

6.2.3. Combinaciones cuasipermanentes:

Se plantearán las combinaciones:

$$\sum_{i=1}^{n_G} G_{k,i} + \sum_{j=1}^{n_{G^*}} G^*_{k,j} + \sum_{l=1}^{n_Q} Q_{r2,l} \quad (11)$$

El número de combinaciones será:

$$n_{comb,ELS,cp} = 2^{n_{G2}+n_{G^*2}+n_Q} \quad (12)$$

6.3. Combinaciones a considerar en el cálculo

De acuerdo con lo expuesto en los apartados anteriores el número de combinaciones a plantear en el cálculo, en el caso general, resulta ser el siguiente:

	no. combinación
Estados límite últimos	
Situaciones persistentes o transitorias	$2^{(n_G+n_{G^*}+n_Q)} \cdot n_Q$
Situaciones accidentales	$2^{(n_G+n_{G^*}+n_Q)} \cdot n_Q \cdot n_A$
Situaciones sísmicas	$2^{(n_G+n_{G^*}+n_Q)} \cdot n_{AS}$
Total ELU	$2^{(n_G+n_{G^*}+n_Q)} \cdot (n_Q(1+n_A) + n_{AS})$
Estados límite de servicio	
Combinaciones poco frecuentes	n_Q
Combinaciones frecuentes	n_Q
Combinación cuasipermanente	1
Total ELS	$2n_Q + 1$
Total combinaciones	$2^{(n_G+n_{G^*}+n_Q)} \cdot (n_Q(1+n_A) + n_{AS}) + 2n_Q + 1$

Por ejemplo, si tuviéramos:

- 2 acciones permanentes.
- 1 acción permanente de valor no constante.
- 3 acciones variables.
- 1 acción accidental.
- 2 acciones sísmicas.

el número de combinaciones sería:

	no. combinación
Estados límite últimos	
Situaciones persistentes o transitorias	$2^{(2+1+3)} \times 3 = 192$
Situaciones accidentales	$2^{(2+1+3)} \times 3 \times 1 = 192$
Situaciones sísmicas	$2^{(2+1+3)} \times 2 = 128$
Total ELU	$2^{(2+1+3)} \times (3 \times (1+1) + 2) = 512$
Estados límite de servicio	
Combinaciones poco frecuentes	3
Combinaciones frecuentes	3
Combinación cuasipermanente	1
Total ELS	$6 + 1 = 7$
Total combinaciones	519

6.4. Algoritmo para formación de combinaciones

6.4.1. Combinaciones para estados límite últimos

Cada uno de los sumatorios que aparecen en las expresiones (2),(4) y (6) tiene la forma:

$$\sum_{i=1}^n \gamma_f \cdot F_{r,i} \quad (13)$$

Para cada acción F_i el coeficiente de ponderación puede tomar dos valores, según el efecto¹⁴ de la acción sea favorable o desfavorable.

El valor de cálculo de la acción $F_{r,i}$ dependerá, como ya se ha dicho, de:

- La variación de la acción en el tiempo (G,G*,A,A,AS).
- Su intervención en la combinación como acción determinante o de acompañamiento.
- La presencia o ausencia de acciones accidentales en la combinación en la que interviene la acción.
- La naturaleza de la carga (climática o de uso).

en cualquier caso, definida la combinación a formar, el valor de $F_{r,i}$ es conocido.

Por otra parte, el valor de n es conocido para cada uno de los sumatorios.

Como consecuencia de lo anterior, los sumandos de (13) corresponden a las variaciones con repetición¹⁵ de dos elementos¹⁶ tomados de n en n.

Para generar las variaciones con repetición correspondientes a la expresión (13), procederemos de la forma siguiente:

Sea $\gamma_{\mathbf{f}_v}$ el vector fila cuyas componentes son los coeficientes de ponderación correspondientes a la variación v ($1 \leq v \leq 2^n$):

$$\gamma_{\mathbf{f}_v} = [\gamma_{f,1}, \gamma_{f,2}, \dots, \gamma_{f,i}, \dots, \gamma_{f,n}] \quad (14)$$

es decir que el elemento $\gamma_{f,i}$ es el coeficiente de ponderación que multiplica a la acción $F_{r,i}$ y su valor será el correspondiente a efecto favorable o desfavorable.

Sea \mathbf{F}_r el vector columna cuyas componentes son las acciones $F_{r,i}$ de la expresión (13):

$$\mathbf{F}_r^T = [F_{r,1}, F_{r,2}, \dots, F_{r,i}, \dots, F_{r,n}] \quad (15)$$

entonces la expresión (13) equivale al producto escalar:

$$\sum_{i=1}^n \gamma_f \cdot F_{r,i} = \gamma_{\mathbf{f}_v} \cdot \mathbf{F}_r \quad (16)$$

y habrá que formar tantos productos escalares como variaciones con repetición puedan formarse, esto es, 2^n .

Si designamos por $S_{F,v}$ al sumatorio correspondiente a la variación v:

¹⁴Suponemos que, a priori, desconocemos si el efecto de la acción es favorable o desfavorable para el estado límite y elemento estructural que estemos considerando.

¹⁵Se llaman variaciones con repetición de m elementos tomados de n en n a los distintos grupos formados por n elementos de manera que :

- Los elementos que forman cada grupo pueden estar repetidos
- Dos grupos son distintos si se diferencian en algún elemento o en el orden en que estos están colocados (influye el orden).

¹⁶Los coeficientes de ponderación favorable y desfavorable

$$S_{F_r, v} = \gamma_{f_v} \cdot \mathbf{F}_r \quad (17)$$

Tendremos que cada uno de los sumatorios de (2),(4) y (6) da lugar a un conjunto de variaciones:

$$\begin{aligned} S_{F_r, 1} &= \gamma_{f_1} \cdot \mathbf{F}_r \\ S_{F_r, 2} &= \gamma_{f_2} \cdot \mathbf{F}_r \\ &\dots \\ S_{F_r, v} &= \gamma_{f_v} \cdot \mathbf{F}_r \\ &\dots \\ S_{F_r, n_F} &= \gamma_{f_{n_F}} \cdot \mathbf{F}_r \end{aligned}$$

siendo n_F el número de acciones en cada caso, esto es n_G , n_{G^*} , n_Q , n_A , ó n_{AS} .

Así, los sumandos de (2),(4) y (6) serán alguno de los siguientes productos escalares:

- Sumando correspondiente a acciones permanentes: S_{G_r, v_G} ($1 \leq v_G \leq 2^{n_G}$).
- Sumando correspondiente a acciones permanentes de valor no constante: $S_{G^*, v_{G^*}}$ ($1 \leq v_{G^*} \leq 2^{n_{G^*}}$).
- Sumando correspondiente a acciones variables: S_{Q_r, v_Q} ($1 \leq v_Q \leq 2^{n_Q}$).
- Sumando correspondiente a acciones accidentales: S_{A_r, v_A} ($1 \leq v_A \leq 2^{n_A}$).
- Sumando correspondiente a acciones sísmicas: $S_{AS_r, v_{AS}}$ ($1 \leq v_{AS} \leq 2^{n_{AS}}$).

Combinaciones correspondientes a situaciones persistentes o transitorias Con esta notación, la expresión (2) puede escribirse como:

$$CQ_{v_G, v_{G^*}, v_Q, d} = S_{G_k, v_G} + S_{G^*_k, v_{G^*}} + S_{Q_{r0, d}, v_Q} \quad (18)$$

siendo

v_G : Variación correspondiente a las acciones permanentes.

v_{G^*} : Variación correspondiente a las acciones permanentes de valor no constante.

v_Q : Variación correspondiente a las acciones variables.

d : Índice correspondiente a la acción variable determinante.

$\mathbf{Q}_{r0, d}$: el vector $[Q_{r0, 1}, Q_{r0, 2}, \dots, Q_{r0, d-1}, Q_{k, d}, Q_{r0, d+1}, \dots, Q_{r0, n_Q}]$

Combinaciones correspondientes a situaciones accidentales Análogamente, la expresión (4) puede escribirse como:

$$CA_{v_G, v_{G^*}, v_Q, d, m} = S_{G_k, v_G} + S_{G^*_k, v_{G^*}} + S_{Q_{r2, d}, v_Q} + A_{k, m} \quad (19)$$

siendo

v_G : Variación correspondiente a las acciones permanentes.

v_{G^*} : Variación correspondiente a las acciones permanentes de valor no constante.

v_Q : Variación correspondiente a las acciones variables.

d : Índice correspondiente a la acción variable determinante.

$\mathbf{Q}_{r2,d}$: el vector $[Q_{r2,1}, Q_{r2,2}, \dots, Q_{r2,d-1}, Q_{r1,d}, Q_{r2,d+1}, \dots, Q_{r2,n_Q}]$

m : Índice correspondiente a la acción accidental considerada.

$A_{k,m}$: Valor de cálculo de la acción accidental m , obtenido a partir de su valor característico.

Combinaciones correspondientes a situaciones sísmicas Análogamente, la expresión (6) puede escribirse como:

$$CS_{v_G, v_{G^*}, v_Q, n} = S_{G_k, v_G} + S_{G^*k, v_{G^*}} + S_{Q_{r2}, v_Q} + AS_{k, n} \quad (20)$$

siendo

v_G : Variación correspondiente a las acciones permanentes.

v_{G^*} : Variación correspondiente a las acciones permanentes de valor no constante.

v_Q : Variación correspondiente a las acciones variables.

\mathbf{Q}_{r2} : el vector $[Q_{r2,1}, Q_{r2,2}, \dots, Q_{r2,n_Q}]$

n : Índice correspondiente a la acción sísmica considerada.

$AS_{k,n}$: Valor de cálculo de la acción sísmica n , obtenido a partir de su valor característico.

Algoritmo de cálculo El algoritmo de cálculo de todas las combinaciones correspondientes a estados límites últimos sería el siguiente:

1. Cálculo de todas las variaciones correspondientes a acciones G: γ_{g, v_G} ($1 \leq v_G \leq 2^{n_G}$).
2. Cálculo de todas las variaciones correspondientes a acciones G*: $\gamma_{g^*, v_{G^*}}$ ($1 \leq v_{G^*} \leq 2^{n_{G^*}}$).
3. Cálculo de todas las variaciones correspondientes a acciones Q: γ_{q, v_Q} ($1 \leq v_Q \leq 2^{n_Q}$).
4. Desde $d = 1$ hasta $d = n_q$
 - a) Cálculo de todas las combinaciones $CQ_{v_G, v_{G^*}, v_Q, d}$.
5. Desde $d = 1$ hasta $d = n_Q$
 - a) Desde $m = 1$ hasta $m = n_A$
 - 1) Cálculo de todas las combinaciones $CA_{v_G, v_{G^*}, v_Q, d, m}$.
6. Desde $n = 1$ hasta $n = n_{AS}$
 - a) Cálculo de todas las combinaciones $CS_{v_G, v_{G^*}, v_Q, n}$.
7. fin

refinamiento del paso 4a:

1. Desde $v_G = 1$ hasta $v_G = 2^{n_G}$
 - a) Calcular S_{G_k, v_G}
 - b) Desde $v_{G^*} = 1$ hasta $v_{G^*} = 2^{n_{G^*}}$
 - 1) Calcular $S_{G^*k, v_{G^*}}$

- 2) Desde $v_Q = 1$ hasta $v_Q = 2^{n_Q}$
 - a' Calcular $S_{Q_{r0,d},v_Q}$.
 - b' Calcular $CQ_{v_G,v_{G^*},v_Q,d} = S_{G_k,v_G} + S_{G^*_{k,v_{G^*}}} + S_{Q_{r0,d},v_Q}$

2. fin

refinamiento del paso 5a1:

1. Desde $v_G = 1$ hasta $v_G = 2^{n_G}$
 - a) Calcular S_{G_k,v_G}
 - b) Desde $v_{G^*} = 1$ hasta $v_{G^*} = 2^{n_{G^*}}$
 - 1) Calcular $S_{G^*_{k,v_{G^*}}}$
 - 2) Desde $v_Q = 1$ hasta $v_Q = 2^{n_Q}$
 - a' Calcular $S_{Q_{r2,d},v_Q}$.
 - b' Calcular $CA_{v_G,v_{G^*},v_Q,d,m} = S_{G_k,v_G} + S_{G^*_{k,v_{G^*}}} + S_{Q_{r2,d},v_Q} + A_{k,m}$

2. fin

refinamiento del paso 6a:

1. Desde $v_G = 1$ hasta $v_G = 2^{n_G}$
 - a) Calcular S_{G_k,v_G}
 - b) Desde $v_{G^*} = 1$ hasta $v_{G^*} = 2^{n_{G^*}}$
 - 1) Calcular $S_{G^*_{k,v_{G^*}}}$
 - 2) Desde $v_Q = 1$ hasta $v_Q = 2^{n_Q}$
 - a' Calcular S_{Q_{r2},v_Q} .
 - b' Calcular $CS_{v_G,v_{G^*},v_Q,n} = S_{G_k,v_G} + S_{G^*_{k,v_{G^*}}} + S_{Q_{r2},v_Q} + AS_{k,n}$

2. fin

6.4.2. Combinaciones para estados límite de servicio

En este caso todos los coeficientes de ponderación por lo que si llamamos:

$$S_{G_k} = \sum_{i=1}^{n_G} G_{k,i} \quad (21)$$

$$S_{G^*_{k,j}} = \sum_{j=1}^{n_{G^*}} G^*_{k,j} \quad (22)$$

$$S_{Q_{r0,d}} = \sum_{l=1}^{d-1} Q_{r0,l} + Q_{k,d} + \sum_{l=d+1}^{n_Q} Q_{r0,l} \quad (23)$$

$$S_{Q_{r2,d}} = \sum_{l=1}^{d-1} Q_{r2,l} + Q_{r1,d} + \sum_{l=d+1}^{n_Q} Q_{r2,l} \quad (24)$$

y

$$S_{Q_{r2}} = \sum_{l=1}^{n_Q} Q_{r2,l} \quad (25)$$

tendremos que, las n_Q combinaciones poco frecuentes serán:

$$CPF_d = S_{G_k} + S_{G^{*k}} + S_{Q_{r0,d}} \quad (26)$$

las n_Q combinaciones frecuentes serán:

$$CF_d = S_{G_k} + S_{G^{*k}} + S_{Q_{r2,d}} \quad (27)$$

y, por último, la combinación cuasipermanente será:

$$CCP = S_{G_k} + S_{G^{*k}} + S_{Q_{r2}} \quad (28)$$

Algoritmo de cálculo El algoritmo de cálculo de todas las combinaciones correspondientes a estados límites de servicio quedaría:

1. Cálculo de S_{G_k} .
2. Cálculo de $S_{G^{*k}}$.
3. Desde $d = 1$ hasta $d = n_Q$
 - a) Calcular $S_{Q_{r0,d}}$.
 - b) Calcular $CPF_d = S_{G_k} + S_{G^{*k}} + S_{Q_{r0,d}}$
4. Desde $d = 1$ hasta $d = n_Q$
 - a) Calcular $S_{Q_{r2,d}}$.
 - b) Calcular $CF_d = S_{G_k} + S_{G^{*k}} + S_{Q_{r2,d}}$
5. Cálculo de $S_{Q_{r2}}$.
6. Calcular $CCP = S_{G_k} + S_{G^{*k}} + S_{Q_{r2}}$
7. fin

Referencias

- [1] Ministerio de Fomento, *EHE; Instrucción de hormigón estructural*. (España: Comisión Permanente del Hormigón. Ministerio de Fomento. 1998).
- [2] Ministerio de Fomento, *EAE; Instrucción de acero estructural*. (España: Comisión Permanente de estructuras de acero. Ministerio de Fomento. 2004).
- [3] Ministerio de Fomento, *IAP; Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera*. (España: Dirección General de Carreteras. Ministerio de Fomento. 1998).
- [4] Ministerio de Fomento, *NCSE-02; Norma de construcción sismorresistente: parte general y edificación*. (España: Comisión permanente de Normas Sismorresistentes. Ministerio de Fomento. 2002).
- [5] Ministerio de Fomento, *NBE-AE-88; Acciones en la edificación*. (España: Ministerio de Fomento. 1988).