

ANEJO Nº3: BASES DE CÁLCULO

ESTUDIO DE SOLUCIONES PARA EL VIADUCTO SOBRE EL ARROYO DEL CEREZO, SEGOVIA

Autor:
GALVE ESPINOSA, Arturo

Autora:
APARISI LÓPEZ, Tatiana

Tutor:
LÓPEZ DESFILIS, Vicente José

Tutor:
ALCALÁ GONZÁLEZ, Julián

GRADO EN INGENIERÍA DE OBRAS PÚBLICAS
CURSO 2018/2019

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA





1	OBJETO	4
2	DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA.....	4
3	BASES DE CÁLCULO	5
3.1	NORMATIVA	5
3.2	CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES	5
3.3	DURABILIDAD	6
3.4	ACCIONES.....	6
3.4.1	ACCIONES PERMANENTES	7
3.4.1.1	PESO PROPIO	7
3.4.1.2	CARGAS MUERTAS.....	7
3.4.2	ACCIONES PERMANENTES DE VALOR NO CONSTANTE.....	8
3.4.2.1	PRETENSADO	8
3.4.2.2	ACCIONES REOLÓGICAS	8
3.4.3	ACCIONES VARIABLES.....	9
3.4.3.1	SOBRECARGAS DE USO	9
3.4.3.2	ACCIÓN TÉRMICA.....	9
3.4.4	ACCIONES ACCIDENTALES.....	15
3.4.4.1	IMPACTOS	15
3.5	BASES PARA LA COMBINACIÓN DE ACCIONES	15
3.5.1	VALORES REPRESENTATIVOS DE LAS ACCIONES	15
3.5.2	VALOR DE CÁLCULO DE LAS ACCIONES.....	15
3.5.2.1	VALOR DE CÁLCULO PARA COMPROBACIONES EN ELU.....	16
3.5.2.2	VALOR DE CÁLCULO PARA COMPROBACIONES EN ELS	16
3.5.3	COMBINACIÓN DE ACCIONES.....	16
3.5.3.1	COMBINACIONES PARA COMPROBACIONES EN ELU	16
3.5.3.2	COMBINACIONES PARA COMPROBACIONES EN ELS	17



1 OBJETO

El objetivo del presente anejo es definir detalladamente y justificar el procedimiento y las comprobaciones que se han llevado a cabo para la verificación de los distintos elementos que constituyen el sistema estructural del “Viaducto sobre el Arroyo del Cerezo, en el desdoblamiento de la circunvalación de Segovia”, así como el comportamiento estructural del mismo de acuerdo con la normativa vigente.

Se han realizado las correspondientes comprobaciones de los coeficientes de seguridad frente a los distintos estados límite que, de manera justificada, se exponen en los siguientes puntos.

2 DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

La estructura en cuestión materializa el viaducto sobre el arroyo del Cerezo. Todo el conjunto se inscribe dentro del proyecto denominado Conversión en Autovía de la carretera SG-20, Circunvalación de Segovia del P.K. 0+000 al 15+530.

La estructura consiste en una duplicación de una existente de características similares a la altura del P.K. 5+640. La nueva estructura sobre el arroyo del Cerezo se construirá a la margen derecha de la existente.

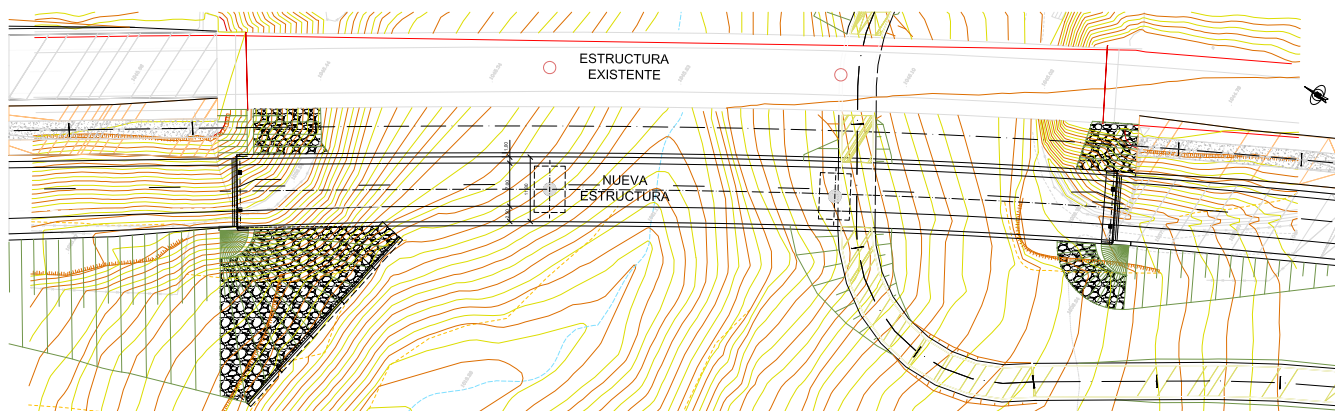


Figura 3.1. Definición en planta del trazado del puente.

Se trata de un viaducto con una longitud de 104,00 metros con dos apoyos entre estribos, dividiéndose así en tres vanos, dos exteriores de 32,00 m y uno central de 40,00 m, el cual se ha resuelto para dos posibles alternativas: con un tablero formado por una viga metálica, tipo artesa, de 1,75 m de canto, sobre la que se dispone una losa superior de compresión de hormigón armado de 0,25 m, y con un tablero continuo de hormigón postesado con una sección

tipo cajón simétrica respecto a un eje vertical y centrado de 2,00 m de canto con un espesor de 0,25 m variable en los cantos de dicho cajón y con dos alerones laterales de espesor variable comprendido entre los 0,25 y los 0,40 m, en cuyo extremo irán colocadas las barreras y pretil.

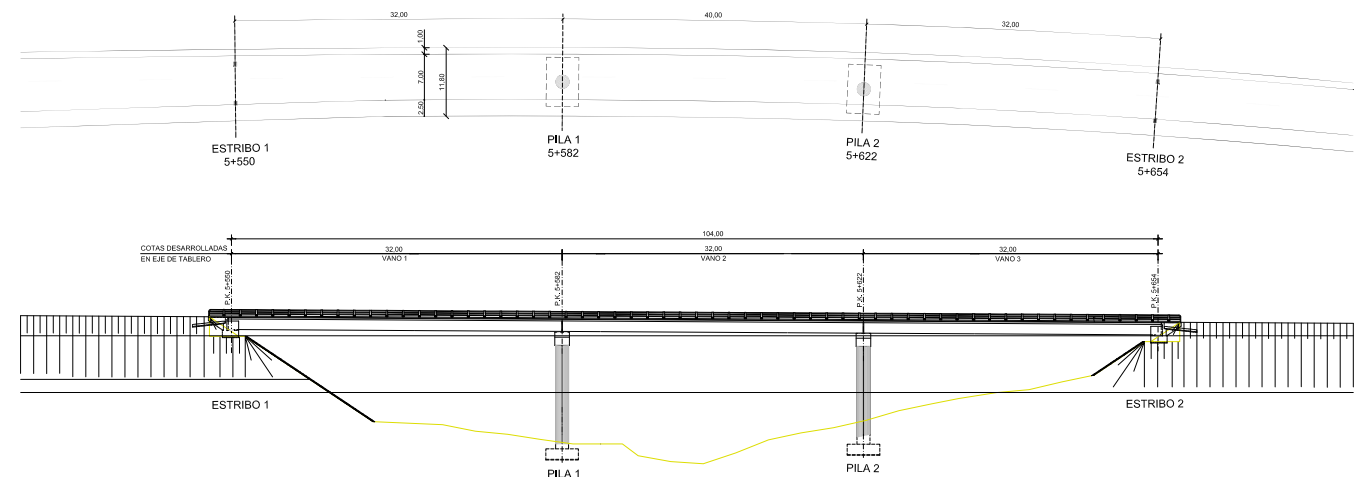


Figura 3.2. Definición en alzado del trazado del puente.

La sección transversal del tablero cuenta con 11,80 metros de ancho en todo el viaducto, para dar cabida a un arcén exterior de 2,50 m, dos carriles de 3,50 m, un arcén interior de 1,00 m y sendas bandas de 0,65 m cada una para disposición del pretil, en este caso un PMC 2/10 f. Se dispone un espesor de firme de 8 cm (3 cm de BBTM11B más 5 cm de AC22BINS).

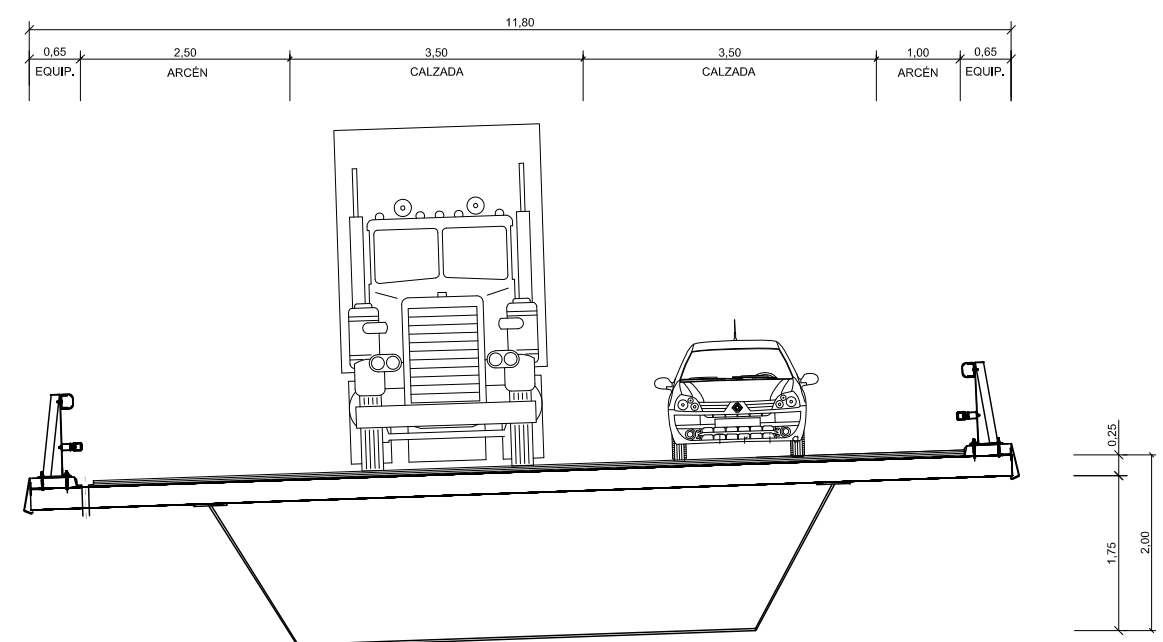


Figura 3.3. Definición transversal del trazado del puente.



3 BASES DE CÁLCULO

El dimensionamiento de la estructura se ha realizado según los principios de la mecánica racional y resistencia de los materiales, adaptadas al diseño estructural. Se han seguido las prescripciones recogidas en la normativa vigente en el territorio español (detallada más adelante), así como las recomendaciones y la normativa internacional de aplicación, cuando proceda. De acuerdo con lo anterior, el cálculo se ha realizado siguiendo el principio de los Estados Límites, que establece que la seguridad de la estructura en su conjunto, o en cualquiera de sus partes, se garantiza comprobando que la sollicitación no supera la respuesta última de las mismas. Este requisito para la seguridad se expresa sintéticamente mediante la siguiente desigualdad:

$$S_d \leq R_d$$

Siendo S_d la sollicitación de cálculo aplicable en cada caso, y R_d la respuesta última de la sección o elemento.

Para la aplicación de este criterio de seguridad, se consideran tanto situaciones de servicio como de agotamiento, esto es, Estados Límites de Servicio (ELS) y Estados Límites Últimos (ELU), de acuerdo con las definiciones dadas para los mismos en las normativas de referencia. En principio, los Estados Límites Últimos están asociados a la rotura de secciones o elementos. Para ellos, se evalúan las sollicitaciones mediante la mayoración de los valores representativos de las acciones (en general característicos), utilizando los oportunos coeficientes parciales que luego se detallan. Las resistencias de las secciones o elementos se estiman mediante las características geométricas, y la resistencia minoradas de los materiales.

Por el contrario, los Estados Límites de servicio están asociados a la pérdida de funcionalidad de la estructura. Las sollicitaciones se evalúan mediante sus valores representativos, en general sin mayorar, afectados de los oportunos coeficientes de combinación, para tener en cuenta la probabilidad de ocurrencia simultánea (concomitancia) de varias acciones. Las resistencias se estiman a partir de los valores nominales de las dimensiones y resistencias de los elementos o secciones de la estructura, sin minorar.

3.1 NORMATIVA

Para la redacción del presente documento se han considerado las siguientes Normas e Instrucciones aplicadas a este proyecto:

- IAP-11 “Instrucción sobre las acciones a considerar en proyecto de puentes de carretera”
- RPX-95 “Recomendaciones para el proyecto de puentes mixtos para carreteras”

- EHE-08 “Instrucción de Hormigón Estructural”
- EAE “Instrucción de Acero Estructural”
- CTE “Código Técnico de la Edificación”
- EUROCODIGO
- Orden Circular 23/2008 sobre criterios de aplicación de pretiles metálicos en carretera
- Obras de paso de nueva construcción

3.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

➤ ACERO:

Deberá tenerse en cuenta que el acero empleado no favorezca a una rotura frágil de elementos traccionados. Para ello se deberá evaluar la resiliencia del material. En las soldaduras debe analizarse también el material de aporte.

El acero que emplearemos en los distintos elementos metálicos del puente presentan las siguientes propiedades mecánicas:

- Viga artesa: S355 J2
- Armaduras pasivas: B 500 S
- Rigidizadores: S355 J2
- Diafragmas: S355 J2
- Armaduras activas: Y-1860 S7

Además de las propiedades indicadas, todos los aceros estructurales presentan las siguientes características comunes:

- Módulo de Elasticidad: $E_a = 210.000 \text{ MPa}$
- Coeficiente de Poisson: $\nu = 0,3$



- Coeficiente de dilatación térmica: $\alpha = 12 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Límite elástico $f_y \text{ (N/mm}^2\text{)} = 355 \text{ MPa}$
- Módulo de cortadura $G: 81000 \text{ MPa}$
- Tensión de rotura $f_u = 470 \text{ MPa}$

➤ HORMIGÓN:

La selección del tipo de ambiente debe efectuarse conforme a lo establecido en los puntos 8.2.1, 8.2.2 y 8.2.3 de la Instrucción del Hormigón Estructural EHE.

Según la Tabla 8.2.2 de la EHE, Clases general de exposición relativas a la corrosión de las armaduras, se tiene una clase de exposición *IIb Clase Normal de Humedad Media*, ya que se trata de exteriores en ausencia de cloruros, sometidos a la acción del agua de lluvia, en zonas con precipitación media anual inferior a 600mm.

Dado que tenemos un ambiente tipo IIb (corrosión con un origen diferente a los cloruros) para elementos al exterior, la normativa de hormigón EHE prescribe unos parámetros de dosificación mínimos, para asegurar la durabilidad:

- Máxima Relación agua/cemento: 0,55
- Mínimo contenido de cemento: 300 Kg/m³

Tenemos un hormigón tipo HA-35 /B /20 /IIb. La resistencia mínima compatible por razones de durabilidad con dicha clase de exposición es de 35 N/mm².

- Coeficiente de Poisson: $\nu = 0,3$
- Coeficiente de dilatación térmica: $\alpha = 12 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}$

De la página web de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) se extraen datos sobre humedad relativa media, nieve y heladas en la provincia de Segovia:

Mes	T	TM	Tm	R	H	DR	DN	DT	DF	DH	DD	I
Enero	4.3	8.2	0.3	38	74	6.9	-	0.0	3.9	14.5	4.5	124
Febrero	5.8	10.4	1.1	31	66	6.0	3.1	0.0	2.0	10.0	4.8	152
Marzo	8.6	13.9	3.2	30	59	5.9	1.7	0.1	1.3	6.1	5.4	203
Abril	9.7	15.1	4.2	44	59	8.0	1.5	0.8	0.6	4.2	3.4	213
Mayo	14.0	19.7	8.2	66	57	10.1	0.2	3.7	0.7	0.5	3.3	250
Junio	19.0	25.8	12.1	43	48	4.8	0.0	4.2	0.6	0.0	6.9	314
Julio	22.2	29.7	14.6	17	39	2.7	0.0	2.6	0.2	0.0	12.5	358
Agosto	22.1	29.4	14.8	20	40	3.0	0.0	3.8	0.1	0.0	10.4	328
Septiembre	17.7	24.0	11.4	28	50	4.7	0.0	2.1	0.4	0.0	5.8	246
Octubre	13.0	18.0	7.9	59	63	8.9	0.1	0.6	1.0	0.7	4.0	177
Noviembre	7.6	11.8	3.4	52	72	8.6	1.6	0.0	2.7	5.8	3.9	126
Diciembre	5.1	8.8	1.3	46	75	8.2	2.2	0.0	4.1	11.7	3.6	110
Año	12.4	17.9	6.9	479	59	78.6	-	18.1	17.6	53.1	-	-

Tabla 3.1. Definición en planta del trazado del puente.

59% de humedad relativa media anual, 53,1 días al año de heladas y 10,4 días al año de nieve > 5 días al año.

Con estos datos se concluye que la clase de exposición del elemento será de IIb+F.

3.3 DURABILIDAD

Para todos los elementos en contacto con el terreno se ha considerado una clase de exposición tipo IIa. Como consecuencia del tipo de ambiente definido, el hormigón armado debe cumplir las siguientes limitaciones:

- Relación máxima agua / cemento de 0,60
- Contenido mínimo en cemento de 275 kg/m³
- Recubrimientos hormigón armado: el mínimo es de 30 mm para una vida útil de 100 años. Con un margen de 5 mm, se adopta un recubrimiento nominal de 35 mm.
- Máxima abertura de fisura de 0,30 mm.

Para el resto de la estructura se considera una clase de exposición tipo IIb. Como consecuencia del tipo de ambiente definido, el hormigón armado debe cumplir las siguientes limitaciones:

- Relación máxima agua / cemento de 0,55



- Contenido mínimo en cemento de 300 kg/m^3
- Recubrimientos hormigón armado: el mínimo es de 35 mm para una vida útil de 100 años. Con un margen de 5 mm, se adopta un recubrimiento nominal de 40 mm.
- Máxima abertura de fisura de 0,30 mm.

3.4 ACCIONES

A efectos del presente proyecto se consideran como valores característicos de las acciones los establecidos en la Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera IAP-11.

A continuación se indicarán las diferentes acciones a considerar, indicando el correspondiente valor característico establecido mediante la instrucción.

3.4.1 ACCIONES PERMANENTES

Las cargas permanentes están constituidas por los pesos de los distintos elementos que forman parte de la estructura. Corresponden a acciones que actúan en todo momento y son constantes en posición y magnitud. Comprenden el peso propio y las cargas muertas. Sus valores se deducen de las dimensiones de los elementos especificadas en los planos y de sus pesos específicos correspondientes.

3.4.1.1 PESO PROPIO

Corresponde al peso de los elementos estructurales, con su sección bruta, aplicándole el peso específico del material.

Para evaluar el peso propio de los elementos de hormigón armado, emplearemos un peso específico de 25 kN/m^3 .

Para los elementos de acero el peso específico utilizado es de $78,50 \text{ kN/m}^3$.

3.4.1.2 CARGAS MUERTAS

Son las debidas a los elementos no estructurales que gravitan sobre la estructura, tales como pavimentos, barreras, etc.

En este caso, se han considerado los siguientes valores característicos:

➤ Pavimento

Para el valor característico de esta acción se adopta un peso específico de 23 kN/m^3 , se considera un espesor de 8 cm.

Se ha tenido en cuenta, según cita la IAP-11, en el cálculo, que para la acción debida al pavimento se deberán considerar dos valores extremos:

- Un valor inferior, determinado con los espesores teóricos definidos en proyecto.
- Y un valor superior, obtenido incrementando en un 50% los espesores teóricos definidos en el proyecto.

➤ Pretil

Para el conjunto de barreras e impostas se considera una carga longitudinal de 6 kN/ml .

3.4.2 ACCIONES PERMANENTES DE VALOR NO CONSTANTE

Se incluyen en este apartado todas las formas posibles de introducir esfuerzo en una estructura antes de su puesta en servicio con el fin de mejorar su respuesta frente al conjunto de sollicitaciones futuras.

3.4.2.1 PRETENSADO

Las acciones producidas por el pretensado se valorarán teniendo en cuenta la forma de introducción de éstas y la posibilidad de deformación de la estructura. Para el caso particular, se considerarán acciones del tipo P1: las inducidas por elementos colocados dentro del contorno de la sección estructural de hormigón, o fuera de la sección pero dentro del canto de la estructura.

3.4.2.2 ACCIONES REOLÓGICAS

3.4.2.2.1 RETRACCIÓN DEL HORMIGÓN

Para la evaluación del valor de la retracción han de tenerse en cuenta las diversas variables



que influyen en dicho fenómeno, en especial las siguientes: grado de humedad del ambiente, espesor o menor dimensión de la pieza, composición del hormigón y el tiempo transcurrido desde la ejecución, que será el que marque la duración del fenómeno.

La retracción total está compuesta por la retracción autógena y la retracción de secado, desarrollándose la primera durante el endurecimiento del hormigón y la segunda a lo largo del tiempo.

Para el cálculo de estas variables se ha supuesto endurecimiento normal del hormigón, y un tiempo de curado de 7 días.

3.4.2.2.2 FLUENCIA DEL HORMIGÓN

Para el cálculo de la deformación no recuperable de la pieza y dependiente de una tensión constante menor de $0,45 \cdot f_{cm}$ en el instante t aplicada en t_0 se ha considerado un valor de deformación instantánea para una tensión unidad de $1,5 \cdot 10^{-4}$ MPa.

3.4.3 ACCIONES VARIABLES

Las acciones variables son producidas por la interacción del puente con los agentes externos (viento, sobrecargas, temperaturas, etc.). Para obtener el valor característico de las acciones se tendrán en cuenta los valores que especifica la IAP-11.

3.4.3.1 SOBRECARGAS DE USO

Son acciones externas a la estructura que pueden actuar o no sobre ella por razón de su uso. De acuerdo con la vigente IAP-11, esta sobrecarga actúa con un reparto de la superficie del tablero en carriles, del modo que se describe a continuación.

3.4.3.1.1 PLATAFORMA

La plataforma del tablero se define como la superficie apta para el tráfico rodado (incluyendo, por tanto, todos los carriles de circulación, arcenes, bandas de rodadura y marcas viales) situada a nivel de calzada y comprendida entre los bordillos de las aceras laterales del tablero –si éstas existen- cuando tengan más de 150 mm de altura, o entre caras interiores de los pretils del tablero, para el resto de los casos. La plataforma a considerar es por tanto:

- Anchura de plataforma: 10,50 m

3.4.3.1.2 CARRILES VIRTUALES

A efectos de la aplicación de la componente vertical de la sobrecarga de uso sobre el tablero del puente, la plataforma, de ancho w , se dividirá en n_l carriles virtuales, de anchura w_l cada uno, con el criterio que se define en la tabla 4.1-a de la IAP-11.

ANCHURA DE LA PLATAFORMA (w)	NÚMERO DE CARRILES VIRTUALES (n_l)	ANCHURA DEL CARRIL VIRTUAL (w_l)	ANCHURA DEL ÁREA REMANENTE
$w < 5,4$ m	$n_l = 1$	3 m	$w - 3$ m
$5,4 \text{ m} \leq w < 6$ m	$n_l = 2$	$\frac{w}{2}$	0
$w \geq 6$ m	$n_l = \text{ent} \left(\frac{w}{3} \right)$	3 m	$w - 3n_l$

Tabla 3.2.

El tablero tiene una anchura de plataforma “w” de 10,50 metros, por tanto $w \geq 6,00$ m.

El número de carriles viene determinado por la siguiente expresión:

- $n_l = \text{ent} \left(\frac{w}{3} \right) = \text{ent} \left(\frac{10,5}{3} \right) = \text{ent} (3,5) = 3$ carriles

La anchura del carril virtual “ w_l ” es de 3,00 metros.

La anchura del área remanente viene determinada por la siguiente expresión:

- $w - 3n_l = 10,50 - 3 \times 3 = 10,50 - 9,00 = 1,50$ metros

Por tanto se tienen 3 carriles virtuales de 3 m, con un área remanente de 1,50 m.

3.4.3.1.3 CARGAS VERTICALES

Las cargas verticales están formadas por cargas repartidas y puntuales que actúan simultáneamente dentro de cada carril. Son las siguientes:



- Tres vehículos pesados actuando en tres carriles virtuales diferentes, formados por dos ejes separados 1,20 metros entre sí. Cada eje está formado por dos cargas puntuales separadas transversalmente 2,00 m, e iguales. La carga por eje será de 300 kN en un carril, de 200 kN en el segundo carril y de 100 kN en el tercer carril. Dentro del carril la posición será centrada para comprobaciones generales, en la posición más desfavorable en comprobaciones locales (con al menos 0,5 m de separación entre dos vehículos paralelos). En este último caso cada carga puntual se supone actuando en un cuadrado de 0,40x0,40 m.
- Sobrecarga uniformemente repartida actuando en la longitud y anchura que resulte más desfavorable. Esta sobrecarga será de 9 kN/m² en el carril más solicitado, y de 2,5 kN/m² en el resto de carriles y áreas remanentes.

Estos valores incluyen los efectos de impacto.

SITUACIÓN	VEHÍCULO PESADO $2Q_{ik}$ [kN]	SOBRECARGA UNIFORME q_{ik} (ó q_{rk}) [kN/m ²]
Carril virtual 1	2 · 300	9,0
Carril virtual 2	2 · 200	2,5
Carril virtual 3	2 · 100	2,5
Otros carriles virtuales	0	2,5
Área remanente (q_{rk})	0	2,5

Tabla 3.3.

Por tanto se tiene:

- Carril virtual 1: $Q_1 = 600$ kN ; $q_1 = 9$ kN/m²
- Carril virtual 2: $Q_2 = 400$ kN ; $q_2 = 2,5$ kN/m²
- Carril virtual 3: $Q_3 = 200$ kN ; $q_3 = 2,5$ kN/m²
- Área Remanente: $Q_{AR} = 0$ kN ; $q_{AR} = 2,5$ kN/m²

3.4.3.1.4 FUERZAS HORIZONTALES

➤ Frenado y arranque

El frenado, arranque o cambio de velocidad de los vehículos, dará lugar a una fuerza horizontal uniformemente distribuida en la dirección longitudinal de la carretera soportada por el puente, y se supondrá aplicada al nivel de la superficie del pavimento.

El valor característico de esta acción Q_{lk} será igual a una fracción del valor de la carga característica vertical que se considere actuando sobre el carril virtual número 1, de acuerdo con la expresión:

$$Q_{lk} = 0,6 \times 2Q_{1k} + 0,1q_{1k} w_1 L$$

Siendo L la distancia entre juntas contiguas, o longitud del puente si éstas no existieran, en nuestro caso 104,00 metros.

Para el caso de carril virtual de 3,00 m de anchura y $L > 1,20$ m, esta expresión queda como sigue:

$$Q_{lk} = 360 + 2,7L = 360 + 2,7 \times 104 = 640,8 \text{ kN}$$

El valor de Q_{lk} estará limitado superior e inferiormente según lo indicado a continuación:

$$180 \text{ kN} \leq Q_{lk} \leq 900 \text{ kN}$$

3.4.3.1.5 GRUPOS DE CARGAS DE TRÁFICO

Para la acción simultánea de las cargas de uso descritas en apartados anteriores se aplicarán dos grupos de cargas:

- Gr1 (Cargas verticales): Valor característico de las cargas verticales puntuales y repartidas.
- Gr2 (Fuerzas horizontales): Valor característico de las cargas horizontales de frenado, centrífuga y transversal, y el valor de combinación frecuente de las cargas verticales puntuales y repartidas.



3.4.3.2 ACCIÓN TÉRMICA

3.4.3.2.1 ACCIÓN TÉRMICA EN TABLEROS

Los valores representativos de la acción térmica se evaluarán considerando la componente uniforme de temperatura y las componentes de la diferencia de temperatura vertical y horizontal.

Se considera para el presente proyecto un tablero tipo 2, tableros mixtos compuestos por acero estructural y hormigón armado o pretensado (conectados de forma que ambos materiales trabajen de forma solidaria) para el caso de estructura mixta, y como tablero tipo 3: tablero de hormigón, para el caso del tablero de hormigón pretensado.

3.4.3.2.1.1 COMPONENTE UNIFORME DE LA TEMPERATURA

➤ Temperatura máxima y mínima del aire

Para calcular los efectos de la componente uniforme de temperatura se partirá del valor de la temperatura del aire a la sombra en el lugar del emplazamiento del puente.

El valor característico de la temperatura máxima del aire a la sombra T_{max} depende del clima del lugar y de la altitud y, para un periodo de retorno de 50 años será el que se indica en el mapa de isotermas de la figura 4.3-a de la IAP-11.

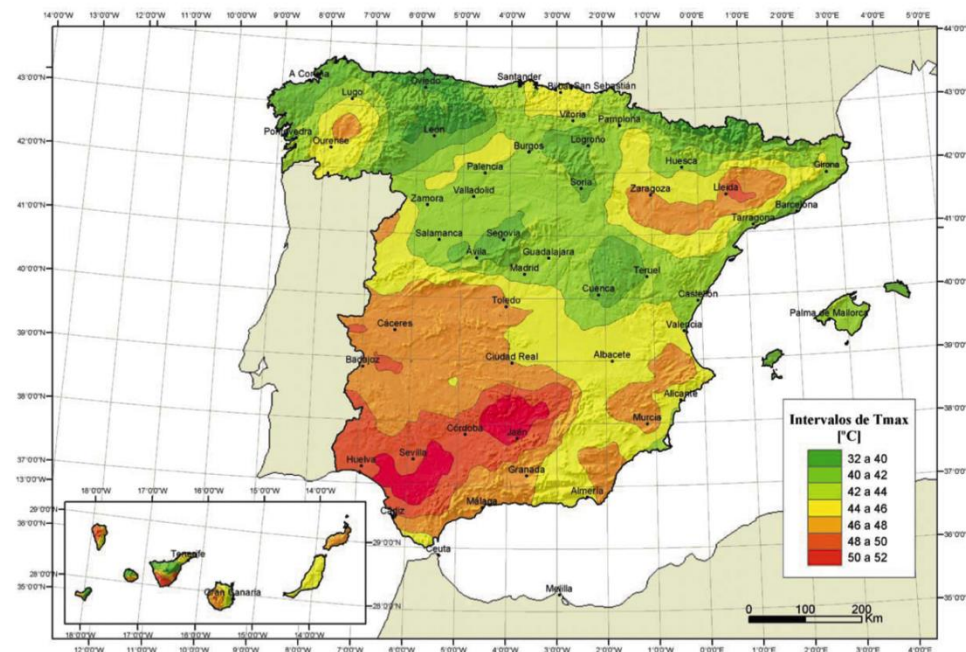


Figura 3.1.

Como valor característico de la temperatura mínima del aire a la sombra T_{min} se tomará, para un periodo de retorno de 50 años, el que se deduce de la tabla 4.3-a en función de la altitud del emplazamiento y de la zona climática invernal que se deduce del mapa de la figura 4.3-b.



Figura 3.2.



ALTITUD [m]	ZONA DE CLIMA INVERNAL (SEGÚN FIGURA 4.3-b)						
	1	2	3	4	5	6	7
0	-7	-11	-11	-6	-5	-6	6
200	-10	-13	-12	-8	-8	-8	5
400	-12	-15	-14	-10	-11	-9	3
600	-15	-16	-15	-12	-14	-11	2
800	-18	-18	-17	-14	-17	-13	0
1000	-20	-20	-19	-16	-20	-14	-2
1200	-23	-21	-20	-18	-23	-16	-3
1400	-26	-23	-22	-20	-26	-17	-5
1600	-28	-25	-23	-22	-29	-19	-7
1800	-31	-26	-25	-24	-32	-21	-8
2000	-33	-28	-27	-26	-35	-22	-10

Tabla 3.4.

Por tanto, considerando que Segovia se encuentra en el intervalo de [40-42] °C en el mapa de isotermas, en la zona climática invernal 3 del mapa y a 1000 metros de altitud, los valores de la temperatura máxima y mínima del aire a la sombra serán:

- $T_{\max} = 42 \text{ °C}$
- $T_{\min} = -19 \text{ °C}$

Al disponer de un periodo de retorno diferente de 50 años, se deben de ajustar los valores de $T_{\max,p}$ y $T_{\min,p}$ según las expresiones siguientes a fin de extrapolar el valor a un periodo de retorno de 100 años.

- $T_{\max,p} = T_{\max} \{k_1 - k_2 \ln [-\ln (1 - p)]\} = 42 \{0,781 - 0,056 \ln [-\ln (1 - 0,01)]\} = 43,62 \text{ °C}$
- $T_{\min,p} = T_{\min} \{k_3 + k_4 \ln [-\ln (1 - p)]\} = -19 \{0,393 + (-0,156) \ln [-\ln (1 - 0,01)]\} = -21,10 \text{ °C}$

Siendo p el inverso del periodo de retorno y considerando para los coeficientes los valores: $k_1 = 0,781$; $k_2 = 0,056$; $k_3 = 0,393$ y $k_4 = -0,156$.

- Componente uniforme de temperatura

La componente uniforme de la temperatura del tablero, también denominada temperatura efectiva (temperatura media de la sección transversal), tendrá un valor mínimo $T_{e,\min}$ y un valor máximo $T_{e,\max}$ que se determinarán a partir de la temperatura del aire, mediante las expresiones siguientes:

Los valores de $\Delta T_{e,\min}$ y $\Delta T_{e,\max}$ vienen definidos en la tabla 4.3-b de la IAP-11 en función del tipo de tablero:

TIPO DE TABLERO	$\Delta T_{e,\min} [^{\circ}\text{C}]$	$\Delta T_{e,\max} [^{\circ}\text{C}]$
Tipo 1: Tablero de acero	-3	+16
Tipo 2: Tablero mixto	+4	+4
Tipo 3: Tablero de hormigón	+8	+2

Tabla 3.5

Tablero mixto:

- $T_{e,\min} = T_{\min} + \Delta T_{e,\min} = -21,10 + (+4) = -17,10 \text{ °C}$
- $T_{e,\max} = T_{\max} + \Delta T_{e,\max} = 43,62 + (+4) = 47,62 \text{ °C}$

Tablero de hormigón:

- $T_{e,\min} = T_{\min} + \Delta T_{e,\min} = -21,10 + (+8) = -13,10 \text{ °C}$
- $T_{e,\max} = T_{\max} + \Delta T_{e,\max} = 43,62 + (+2) = 45,62 \text{ °C}$

Por tanto considerando un tablero mixto, los valores de $\Delta T_{e,\min}$ y $\Delta T_{e,\max}$, serán +4 en ambos casos, mientras que considerando un tablero de hormigón, los valores de $\Delta T_{e,\min}$ y $\Delta T_{e,\max}$, serán +8 y +2 respectivamente.

- Rango de la componente uniforme de temperatura

La variación de la componente uniforme de temperatura ocasionará, un cambio en la longitud del elemento. El rango de variación de la componente uniforme de temperatura en el tablero será:



$$\Delta T_N = T_{e,max} - T_{e,min}$$

A partir de los valores característicos máximo y mínimo de la componente uniforme de temperatura y a partir de la temperatura inicial T_0 (temperatura media del tablero en el momento en que se coacciona su movimiento), se obtendrán los rangos de variación térmica que permitan determinar la contracción y la dilatación máximas del tablero.

Se considera $T_0 = 15\text{ °C}$

Tablero mixto:

El valor característico de la máxima variación de la componente uniforme de temperatura en contracción $\Delta T_{N,con}$ será:

$$\Delta T_{N,con} = T_0 - T_{e,min} = 15 - (-17,10) = 32,10\text{ °C}$$

El valor característico de la máxima variación de la componente uniforme de temperatura en dilatación $\Delta T_{N,exp}$ será:

$$\Delta T_{N,exp} = T_{e,max} - T_0 = 47,62 - 15 = 32,62\text{ °C}$$

Para el dimensionamiento de los aparatos de apoyo y de las juntas de dilatación se toma el valor de $\Delta T_{N,con} + 5$ en contracción y de $\Delta T_{N,exp} + 5$ en expansión.

Por tanto queda definido de la siguiente manera:

- Contracción: $\Delta T_{N,con} + 5 = 32,10 + 5 = 37,10\text{ °C}$
- Expansión: $\Delta T_{N,exp} + 5 = 32,62 + 5 = 37,62\text{ °C}$

Tablero de hormigón:

El valor característico de la máxima variación de la componente uniforme de temperatura en contracción $\Delta T_{N,con}$ será:

$$\Delta T_{N,con} = T_0 - T_{e,min} = 15 - (-13,10) = 28,10\text{ °C}$$

El valor característico de la máxima variación de la componente uniforme de temperatura en dilatación $\Delta T_{N,exp}$ será:

$$\Delta T_{N,exp} = T_{e,max} - T_0 = 45,62 - 15 = 30,62\text{ °C}$$

Para el dimensionamiento de los aparatos de apoyo y de las juntas de dilatación se toma el valor de $\Delta T_{N,con} + 5$ en contracción y de $\Delta T_{N,exp} + 5$ en expansión.

Por tanto queda definido de la siguiente manera:

- Contracción: $\Delta T_{N,con} + 5 = 28,10 + 5 = 33,10\text{ °C}$
- Expansión: $\Delta T_{N,exp} + 5 = 30,62 + 5 = 35,62\text{ °C}$

3.4.3.2.1.2 COMPONENTE DE LA DIFERENCIA DE TEMPERATURA

➤ Diferencia vertical aplicada al tablero mixto

El efecto de la diferencia vertical de temperatura en tableros mixtos (Tipo 2) se considerará mediante una diferencia en la temperatura de las secciones parciales de acero y de hormigón.

Se considerarán condiciones de calentamiento aquéllas que originan una ganancia de calor de la sección parcial de acero respecto de la de hormigón. Por el contrario, condiciones de enfriamiento serán las que dan lugar a una pérdida de calor de la sección parcial de acero respecto de la de hormigón.

Durante el día, las secciones parciales de acero están más calientes que las secciones parciales de hormigón, exista o no soleamiento, y durante la noche sucede lo contrario, las secciones parciales de acero presentan menor temperatura que las secciones parciales de hormigón.

En las condiciones de calentamiento, se considerará que la sección parcial de acero tiene un incremento $\Delta T_{M,heat} = +18\text{ °C}$ respecto a la sección parcial de hormigón.

En las condiciones de enfriamiento, se considerará que la sección parcial de acero tiene un incremento $\Delta T_{M,cool} = -10\text{ °C}$ respecto a la sección parcial de hormigón.

Para la determinación de los efectos debidos a la componente lineal equivalente de la diferencia vertical de temperatura producida por $\Delta T_{M,heat}$ ó $\Delta T_{M,cool}$, se emplearán los valores de los coeficientes de dilatación lineal α_T , considerando para el acero estructural un coeficiente de dilatación lineal de $\alpha_T = 12 \times 10^{-6}\text{ °C}$.



➤ Diferencia vertical aplicada al tablero de hormigón

A lo largo de un periodo de tiempo determinado, el calentamiento y enfriamiento de la cara superior del tablero da lugar a una variación de temperatura en la altura de la sección transversal que tendrá un valor de máximo calentamiento (cara superior más caliente) y un valor de máximo enfriamiento (cara superior más fría).

El efecto de la diferencia vertical de temperatura se debe considerar mediante el empleo de una componente lineal equivalente de la diferencia de temperatura con $\Delta T_{M,heat}$ y $\Delta T_{M,cool}$, siendo estos valores diferencias de temperatura entre las fibras superior e inferior del tablero, obtenidas de la tabla 4.3-d:

TABLA 4.3-d COMPONENTE LINEAL DE LA DIFERENCIA VERTICAL DE TEMPERATURA PARA TABLEROS TIPO 1 Y TIPO 3

TIPO DE TABLERO	FIBRA SUPERIOR MÁS CALIENTE	FIBRA SUPERIOR MÁS FRÍA
	$\Delta T_{M,heat}$ [°C]	$\Delta T_{M,cool}$ [°C]
Tipo 1: Tablero de acero	18	13
Tipo 3: Tablero de hormigón		
— Sección cajón	10	5
— Sección de vigas	15	8
— Sección losa	15	8

Tabla 3.6.

Estos valores corresponden a espesores de pavimento de 50 mm. Para espesores de pavimento diferentes a 50 mm se aplicará a estos valores un factor corrector en función de la siguiente tabla:

TABLA 4.3-e COEFICIENTE k_{sur} DE INFLUENCIA DEL TIPO Y ESPESOR DE PAVIMENTO

ESPESOR DEL PAVIMENTO	TABLERO TIPO 1		TABLERO TIPO 3	
	FIBRA SUPERIOR MÁS CALIENTE	FIBRA SUPERIOR MÁS FRÍA	FIBRA SUPERIOR MÁS CALIENTE	FIBRA SUPERIOR MÁS FRÍA
	k_{sur}	k_{sur}	k_{sur}	k_{sur}
Sin impermeabilización ni pavimento	0,7	0,9	0,8	1,1
Con impermeabilización y sin pavimento ⁽¹⁾	1,6	0,6	1,5	1,0
50 mm	1,0	1,0	1,0	1,0
100 mm	0,7	1,2	0,7	1,0
150 mm	0,7	1,2	0,5	1,0

⁽¹⁾ Estos valores representan valores límite superiores para superficies de color oscuro.

Tabla 3.7.

➤ Diferencia horizontal

La diferencia de soleamiento entre un lado y otro de la sección transversal del tablero puede dar lugar a una diferencia horizontal de temperatura.

Dada la orientación próxima a la Norte-Sur, se considera diferencia horizontal de temperatura entre un lado y otro del tablero, ya que se produce un mayor soleamiento en el lado este al amanecer con un máximo en los meses de verano, y en el lado oeste al atardecer con un máximo en los meses de invierno.

Esta acción puede dar lugar a efectos estructurales o funcionales significativos, por tanto se consideran los valores característicos de la diferencia de temperatura entre las dos caras laterales extremas del tablero definidos en la tabla 4.3-f de la IAP-11, donde l_v es la longitud del voladizo y h_a es la proyección del paramento lateral del tablero sobre el plano vertical.

Por tanto los valores serán:

- $l_v = 2,25$ m
- $h_a = 2$ m



TABLEROS TIPO 1 Y TIPO 2		TABLEROS TIPO 3	
$l_v \leq 2 h_a$	$l_v > 2 h_a$	$l_v \leq 2 h_a$	$l_v > 2 h_a$
18 °C	–	5 °C	–

Tabla 3.8.

$$l_v \leq 2 h_a \rightarrow 2,25 \leq 4$$

Tablero mixto:

Dado que se trata de un tablero de tipo 2 y se cumple $l_v \leq 2 h_a$, la diferencia transversal de temperatura entre las dos caras externas del tablero es de 18 °C.

Tablero de hormigón:

Dado que se trata de un tablero de tipo 3 y se cumple $l_v \leq 2 h_a$, la diferencia transversal de temperatura entre las dos caras externas del tablero es de 5 °C.

- Diferencia local en paredes de secciones cajón de hormigón:

En los grandes puentes de hormigón con sección cajón, en los que pueden aparecer diferencias significativas de temperatura entre las caras interior y exterior de las almas del cajón, se tendrá en cuenta dicho efecto considerando una diferencia lineal de temperatura entre ambas caras.

A falta de datos específicos, se adoptará una diferencia de 15 °C.

3.4.3.2.1.3 SIMULTANEIDAD DE LA COMPONENTE UNIFORME Y DE LA DIFERENCIA DE TEMPERATURA

Se tendrá en cuenta la actuación simultánea de la variación de la componente uniforme, $\Delta T_{N,exp}$ o $\Delta T_{N,con}$, y la diferencia de temperatura, $\Delta T_{M,heat}$ o $\Delta T_{M,cool}$, ambas componentes se combinarán de acuerdo con las expresiones siguientes:

$$\Delta T_M + w_N \Delta T_N$$

$$w_M \Delta T_M + \Delta T_N$$

con $w_N = 0,35$ y $w_M = 0,75$

Estas expresiones dan lugar a ocho posibles formas de considerar la concomitancia de las distintas componentes de la acción térmica.

$$\Delta T_{M,heat} + w_N \Delta T_{N,exp} \quad w_M \Delta T_{M,heat} + \Delta T_{N,exp}$$

$$\Delta T_{M,heat} + w_N \Delta T_{N,con} \quad w_M \Delta T_{M,heat} + \Delta T_{N,con}$$

$$\Delta T_{M,cool} + w_N \Delta T_{N,exp} \quad w_M \Delta T_{M,cool} + \Delta T_{N,exp}$$

$$\Delta T_{M,cool} + w_N \Delta T_{N,con} \quad w_M \Delta T_{M,cool} + \Delta T_{N,con}$$

3.4.4 ACCIONES ACCIDENTALES

3.4.4.1 IMPACTOS

- Impacto contra sistemas de contención de vehículos

Según se dispone en la IAP-11, a efectos del proyecto estructural, el impacto de un vehículo contra el sistema de contención, se asimilará a una carga estática compuesta por una fuerza horizontal transversal y un momento de eje longitudinal concomitante, aplicados en la zona de conexión entre el elemento de contención y la estructura.

Se tomará para esta acción el valor de las fuerzas y momentos máximos, que facilitará a estos efectos el fabricante del sistema de contención, definidos en la normativa correspondiente.

3.5 BASES PARA LA COMBINACIÓN DE ACCIONES

3.5.1 VALORES REPRESENTATIVOS DE LAS ACCIONES

De acuerdo con la Instrucción IAP-11, los valores representativos de las acciones utilizados para la verificación de los estados límites serán:

- Acciones Permanentes

Para las acciones permanentes se considerará un único valor representativo, coincidente con el valor característico G_k o G_k^* , excepto en el caso de la acción correspondiente al peso del pavimento y, en su caso, las acciones producidas por los servicios situados sobre la estructura,



para la que se considerarán dos valores representativos $G_{k,sup}$ y $G_{k,inf}$.

➤ Acciones Variables

Para cada una de las acciones variables, excepto el tren de carga de fatiga, además de su valor característico, se considerarán los siguientes valores representativos, según la comprobación de que se trate:

- Valor de combinación $\psi_0 Q_k$: Será el valor de la acción cuando actúe con alguna otra acción variable, para tener en cuenta la pequeña probabilidad de que actúen simultáneamente los valores más desfavorables de varias acciones independientes. Este valor se utilizará en las comprobaciones de estados límite últimos en situación persistente o transitoria y de estados límite de servicio irreversibles.
- Valor frecuente $\psi_1 Q_k$: Será el valor de la acción tal que sea sobrepasado durante un periodo de corta duración respecto a la vida útil del puente. Corresponde a un periodo de retorno de una semana. Este valor se utilizará en las comprobaciones de estados límite últimos en situación accidental y de estados límite de servicio reversibles.
- Valor casi-permanente $\psi_2 Q_k$: Será el valor de la acción tal que sea sobrepasado durante una gran parte de la vida útil del puente. Este valor se utilizará también en las comprobaciones de estados límite últimos en situación accidental y de estados límite de servicio reversibles, además de en la evaluación de los efectos diferidos.

ACCIÓN			ψ_0	ψ_1	ψ_2
Sobrecarga de uso	gr 1, Cargas verticales	Vehículos pesados	0,75	0,75	0
		Sobrecarga uniforme	0,4	0,4	0 / 0,2 ⁽¹⁾
		Carga en aceras	0,4	0,4	0
	gr 2, Fuerzas horizontales		0	0	0
	gr 3, Peatones		0	0	0
	gr 4, Aglomeraciones		0	0	0
	Sobrecarga de uso en pasarelas		0,4	0,4	0
Viento	F_{wk}	En situación persistente	0,6	0,2	0
		En construcción	0,8	0	0
		En pasarelas	0,3	0,2	0
Acción térmica	T_k		0,6	0,6	0,5
Nieve	$Q_{Sn,k}$	En construcción	0,8	0	0
Acción del agua	W_k	Empuje hidrostático	1,0	1,0	1,0
		Empuje hidrodinámico	1,0	1,0	1,0
Sobrecargas de construcción	Q_c		1,0	0	1,0

Tabla 3.9.

El valor de los factores de simultaneidad ψ será diferente según la acción de que se trate. Se adoptarán los valores recogidos en la tabla 6.1-a de la IAP-11.

3.5.2 VALOR DE CÁLCULO DE LAS ACCIONES

El valor de cálculo de una acción se obtiene multiplicando su valor representativo por el correspondiente coeficiente parcial γ_F . Estos coeficientes tendrán valores diferentes según la situación de proyecto de la que se trate y según el estado límite objeto de comprobación.



3.5.2.1 VALOR DE CÁLCULO PARA COMPROBACIONES EN ELU

Para los coeficientes parciales de seguridad γ_F , se adoptan los valores recogidos en la siguiente tabla:

Tabla 3.10. Coeficientes parciales de seguridad para ELU.

TIPO DE ACCIÓN	SITUACIONES PERSISTENTES Y TRANSITORIAS		SITUACIONES ACCIDENTALES	
	Efecto favorable	Efecto desfavorable	Efecto favorable	Efecto desfavorable
PERMANENTE	1,0	1,35	1,0	1,0
VARIABLE	0,0	1,50	0,0	1,0
ACCIDENTAL	-	-	1,0	1,0

3.5.2.2 VALOR DE CÁLCULO PARA COMPROBACIONES EN ELS

Para los coeficientes parciales de seguridad γ_F , se adoptan los valores recogidos en la siguiente tabla:

Tabla 3.11. Coeficientes parciales de seguridad para ELS.

TIPO DE ACCIÓN	SITUACIONES PERSISTENTES Y TRANSITORIAS	
	Efecto favorable	Efecto desfavorable
PERMANENTE	1,0	1,0
VARIABLE	0,0	1,0

3.5.3 COMBINACIÓN DE ACCIONES

Para cada situación de proyecto se identificarán las hipótesis de carga críticas y, para cada una de ellas, el valor de cálculo del efecto de las acciones se obtendrá combinando las acciones que puedan actuar simultáneamente, según los criterios generales que se indican a continuación.

3.5.3.1 COMBINACIONES PARA COMPROBACIONES EN ELU

Las combinaciones de acciones a tener en cuenta para las verificaciones en ELU, excluida la fatiga, serán las indicadas a continuación.

- Situación persistente o transitoria

La combinación de acciones se hará de acuerdo con la expresión siguiente (combinación fundamental):

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \sum_{m \geq 1} \gamma_{G,m} G_{k,m}^* + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \Psi_{0,i} Q_{k,i}$$

donde:

$G_{k,j}$	valor característico de cada acción permanente.
$G_{k,m}^*$	valor característico de cada acción permanente de valor no constante.
$Q_{k,1}$	valor característico de la acción variable dominante.
$\Psi_{0,i} Q_{k,i}$	valor de combinación de las acciones variables concomitantes con la acción variable dominante.
γ_G, γ_Q	coeficientes parciales.

Deberán realizarse tantas hipótesis o combinaciones como sea necesario, considerando, en cada una de ellas, una de las acciones variables como dominante y el resto como concomitantes.

- Situación accidental

La combinación de acciones en situación accidental se hará de acuerdo con la expresión siguiente:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \sum_{m \geq 1} \gamma_{G,m} G_{k,m}^* + \gamma_{Q,1} \Psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \Psi_{2,i} Q_{k,i} + A_d$$

donde:

$G_{k,j}$	valor representativo de cada acción permanente.
-----------	---



$G_{k,m}^*$	valor representativo de cada acción permanente de valor no constante.
$\Psi_{1,1} Q_{k,1}$	valor frecuente de la principal acción variable concomitante con la acción accidental.
$\Psi_{2,i} Q_{k,i}$	valor casi-permanente del resto de las acciones variables concomitantes.
A_d	valor de cálculo de la acción accidental.

3.5.3.2 COMBINACIONES PARA COMPROBACIONES EN ELS

Según el estado límite de servicio que se vaya a verificar, se adoptará uno de los tres tipos de combinación de acciones indicados a continuación.

- Combinación característica (poco probable o rara)

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \sum_{m \geq 1} \gamma_{G,m} G_{k,m}^* + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \Psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Esta combinación, que coincide formalmente con la combinación fundamental de ELU, se utiliza en general para la verificación de ELS irreversibles.

- Combinación frecuente

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \sum_{m \geq 1} \gamma_{G,m} G_{k,m}^* + \gamma_{Q,1} \Psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \Psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Esta combinación se utiliza en general para la verificación de ELS reversibles.

- Combinación casi-permanente

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \sum_{m \geq 1} \gamma_{G,m} G_{k,m}^* + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \Psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Esta combinación se utiliza también para la verificación de algunos ELS reversibles y para la evaluación de los efectos diferidos.