

CAPÍTULO II

BASES DE PROYECTO

2.1. Requisitos fundamentales

Los criterios recogidos en la presente Norma tienen como objetivo lograr que los puentes situados en zona sísmica cumplan los requisitos siguientes, cada uno con un grado de fiabilidad aceptable:

- A) *Ausencia de colapso para el sismo último de cálculo.* El puente soportará el sismo último de cálculo, definido en el apartado 2.2.2, sin que se produzca colapso, local o global. Es decir, después de que ocurra un evento sísmico de estas características, el puente mantendrá su configuración y una capacidad resistente residual suficiente para permitir el tráfico de emergencia, aunque los daños producidos podrán ser importantes en determinadas partes de la estructura.

En los puentes cuyo procedimiento constructivo suponga cambios significativos del esquema estructural respecto del correspondiente a la situación de servicio, o cuando el periodo de construcción sea superior a un año, el requisito de ausencia de colapso debe cumplirse bajo la acción de un sismo de construcción, definido en el apartado 2.2.5, para las situaciones constructivas que se consideren críticas.

- B) *Limitación del daño para el sismo frecuente de cálculo.* La acción sísmica denominada sismo frecuente de cálculo, definida en el apartado 2.2.4, podrá causar únicamente daños menores y no será necesario acometer reparaciones inmediatas ni restringir el tráfico sobre el puente después de un terremoto de esas características.

2.2. Definiciones

2.2.1. Sismo básico

En esta Norma se denomina sismo básico a un sismo de baja probabilidad de ocurrencia, que corresponde a un periodo de retorno de 500 años.

2.2.2. Sismo último de cálculo

Se denomina sismo último de cálculo, al que resulta de multiplicar la acción del sismo básico por el factor de importancia γ_I , cuyo valor se indica en el apartado 2.3.

2.2.3. Sismo frecuente

En esta Norma, se denomina sismo frecuente a un sismo de alta probabilidad de ocurrencia, que corresponde a un periodo de retorno de 100 años.

2.2.4. Sismo frecuente de cálculo

Se denomina sismo frecuente de cálculo, al resultado de multiplicar la acción del sismo frecuente por el factor de importancia γ_i , cuyo valor se indica en el apartado 2.3.

2.2.5. Sismo de construcción

Cuando se considere necesario tener en cuenta la acción sísmica durante la construcción, se tomará el sismo correspondiente a un periodo de retorno no menor de cinco veces la duración de la etapa constructiva.

2.3. Clasificación de los puentes según su importancia

Los puentes se clasificarán por su importancia en función de los daños que pueda ocasionar su destrucción.

Para el factor de importancia se adoptarán los valores siguientes:

TABLA 2.1.
Factor de importancia

Importancia del puente	γ_i
Normal	1,0
Especial	1,3

En caso de que un puente sea clasificado como de importancia moderada, la autoridad competente deberá especificar además el valor del factor de importancia correspondiente.

Si debido a la gestión de emergencias un puente fuera considerado de singular importancia, podría adoptarse para el factor γ_i un valor superior al indicado en la tabla 2.1.

Durante la etapa constructiva, para todos los puentes se considerará, salvo justificación especial, un factor de importancia de valor $\gamma_i = 1,0$.

2.4. Situación sísmica de cálculo

Teniendo en cuenta que la acción sísmica se considera accidental, las situaciones de cálculo en que aparece involucrada esta acción son situaciones accidentales.

La combinación de acciones a considerar para el estudio de la situación sísmica que se puede presentar a lo largo de la vida útil de los puentes es la siguiente:

$$\sum_{i \geq 1} \gamma_{G,i} \cdot G_{k,i} + \sum_{j \geq 1} \gamma_{G^*,j} \cdot G_{k,j}^* + \gamma_{Q,1} \cdot \Psi_{2,1} \cdot Q_{k,1} + \gamma_A \cdot A_E \quad (2.1)$$

donde:

- $\gamma_{G,i}, \gamma_{G^*,j}, \gamma_{Q,1}, \gamma_A$: Coeficientes parciales de seguridad para las acciones.
- $G_{k,i}$: Valor característico de las acciones permanentes.
- $G_{k,j}^*$: Valor característico de las acciones permanentes de valor no constante.
- $\Psi_{2,1} Q_{k,1}$: Valor casi-permanente de la sobrecarga de uso. A efectos de la aplicación de esta Norma, en los puentes de baja o media intensidad de tráfico y en las pasarelas peatonales, se podrá tomar $\Psi_{2,1} = 0$.
- A_E : Valor de la acción sísmica que sea pertinente según la comprobación que se vaya a realizar (sismo último de cálculo, sismo frecuente de cálculo o sismo durante la construcción), según el capítulo 3.

No se combinará la acción sísmica con la acción del viento ni de la nieve.

2.5. Tipos de comportamiento estructural

Con el objeto de satisfacer los requisitos fundamentales establecidos en el apartado 2.1, los puentes deben proyectarse para que su comportamiento sea uno de los indicados a continuación, en función de la acción sísmica considerada.

El tipo de comportamiento del puente se asegurará mediante el cumplimiento de las exigencias que se indican en el apartado 2.6.

— *Bajo la acción del sismo último de cálculo*

Los puentes podrán proyectarse para que su comportamiento bajo la acción del sismo último de cálculo sea dúctil, de ductilidad limitada o esencialmente elástico.

— *Bajo la acción del sismo frecuente de cálculo*

El comportamiento de los puentes bajo la acción del sismo frecuente de cálculo deberá ser elástico.

— *Bajo la acción del sismo durante la construcción*

El comportamiento de los puentes durante su construcción, sometidos a la acción del sismo definido en el apartado 2.2.5, podrá ser dúctil, de ductilidad limitada o esencialmente elástico.

2.6. Exigencias para cada tipo de comportamiento

2.6.1. Comportamiento dúctil

En los puentes con comportamiento dúctil, se supone que la disipación de energía se produce por la formación de rótulas plásticas, cuya ductilidad es suficiente y compatible con los efectos de la acción sísmica considerados.

Los puentes para los que se desea un comportamiento dúctil se proyectarán, en general, de forma que las rótulas plásticas aparezcan en las pilas. Aunque no es necesario que las rótulas se formen en todas las pilas, el óptimo comportamiento sísmico post-elástico de un puente se consigue cuando las rótulas plásticas se forman simultáneamente en la mayor cantidad posible de pilas.

El tablero debe permanecer dentro del rango elástico. Únicamente se permitirá la formación de rótulas plásticas en las losas de continuidad entre vanos isostáticos de vigas prefabricadas.

Cuando algún elemento de sustentación del tablero (pila o estribo) esté conectado al mismo mediante apoyos elastoméricos o deslizantes, deberá permanecer dentro del rango elástico.

Para asegurar un comportamiento dúctil bajo la acción del sismo último de cálculo o del sismo de construcción, además de cumplirse las reglas constructivas recogidas en el capítulo 6, es necesario que se cumplan las condiciones indicadas a continuación.

— *Condición de resistencia*

Debe comprobarse que las rótulas plásticas disponen de una resistencia adecuada, tanto a flexión como a cortante, y que el resto de las zonas de la estructura, fuera de las rótulas plásticas, disponen también de resistencias adecuadas, todo ello de acuerdo con los criterios de proyecto por capacidad definidos en el capítulo 5.

Deben tenerse en cuenta los efectos de segundo orden inducidos en las pilas, como consecuencia de los desplazamientos globales de la estructura.

— *Condición de desplazamientos*

Debe comprobarse, siguiendo las indicaciones del capítulo 7, que la longitud de entrega en apoyos es suficiente para evitar descalses y que la anchura de juntas es suficiente para evitar el martilleo entre elementos estructurales.

— *Condición de ductilidad*

Debe garantizarse una ductilidad local adecuada en las zonas en las que se admita la formación de rótulas plásticas. En general, podrá considerarse que se cumple la condición de ductilidad, si se adoptan los criterios definidos en los capítulos 5 y 6.

2.6.2. Comportamiento con ductilidad limitada

En los puentes con comportamiento de ductilidad limitada, se supone que se alcanza un determinado nivel de plastificación que, sin ser significativo, da lugar a una cierta disipación de energía.

Para asegurar este tipo de comportamiento, bajo la acción del sismo último de cálculo o del sismo de construcción, además de cumplirse las reglas constructivas recogidas en el capítulo 6, deben cumplirse las condiciones indicadas a continuación.

— *Condición de resistencia*

Debe comprobarse que todas las secciones y elementos estructurales tienen una resistencia adecuada, de acuerdo con los mismos criterios que los utilizados para situaciones persistentes (no sísmicas), establecidos en las Instrucciones o disposiciones específicas para cada material, sin que sea necesario tener en cuenta criterios de proyecto por capacidad.

— *Condición de desplazamientos*

Debe comprobarse, siguiendo las indicaciones del capítulo 7, que la longitud de entrega en apoyos es suficiente para evitar descalces y que la anchura de juntas es suficiente para evitar el martilleo entre elementos estructurales.

— *Condición de ductilidad*

En las zonas donde se prevea la formación de rótulas plásticas, deberán adoptarse los detalles constructivos indicados en el capítulo 6.

2.6.3. Comportamiento esencialmente elástico

En los puentes con comportamiento esencialmente elástico, se supone que no se produce disipación de energía por la formación de rótulas plásticas y, por tanto, los efectos de la acción sísmica no se reducen como en los casos descritos en los apartados 2.6.1 y 2.6.2.

Para asegurar este tipo de comportamiento, bajo la acción del sismo último de cálculo o del sismo de construcción, deben cumplirse las condiciones recogidas a continuación.

— *Condición de resistencia*

Debe comprobarse que todas las secciones y elementos estructurales tienen una resistencia adecuada, de acuerdo con los mismos criterios que los utilizados para situaciones persistentes (no sísmicas).

— *Condición de desplazamientos*

Debe comprobarse, siguiendo las indicaciones del capítulo 7, que la longitud de entrega en apoyos es suficiente para evitar descalces y que la anchura de juntas es suficiente para evitar el martilleo entre elementos estructurales.

— *Condición de ductilidad*

Para este tipo de comportamiento, no es necesario hacer ninguna comprobación específica de ductilidad ni adoptar ningún tipo de detalle constructivo específico.

2.6.4. Comportamiento elástico

Este comportamiento se exige a todos los puentes bajo la acción del sismo frecuente de cálculo. Se puede considerar que queda asegurado, sin necesidad de comprobaciones adicionales, cuando el puente ha sido proyectado para tener un comportamiento esencialmente elástico o de ductilidad limitada bajo la acción del sismo último de cálculo. Si, para esta acción, se ha previsto un comportamiento dúctil, será necesario efectuar las comprobaciones indicadas a continuación para la combinación de acciones correspondiente al sismo frecuente de cálculo.

— *Condición de plastificaciones*

Debe comprobarse que en ninguna sección se alcanza el límite elástico del acero ni se producen pérdidas de recubrimiento de las armaduras.

— *Condición de desplazamientos*

Debe tenerse en cuenta que en esta situación se supone que el puente queda abierto al tráfico después del sismo, por lo que es necesario comprobar que las juntas de calzada permiten los desplazamientos máximos y mínimos calculados teniendo en cuenta la acción sísmica.

2.7. Algunos criterios conceptuales de proyecto

En general, las estructuras con tablero continuo funcionan, en condiciones de sollicitación sísmica, mejor que los puentes con muchas juntas.

En puentes en los que se admita comportamiento dúctil, las rótulas plásticas deberán formarse en las pilas. Sólo con carácter excepcional se admitirá la formación de rótulas plásticas en los tableros.

Es conveniente que las zonas en las que se haya previsto la formación de rótulas plásticas sean accesibles para su reparación. La falta de accesibilidad se considerará en el cálculo según se indica en el apartado 4.2.2.1.

Debe procurarse que las rótulas plásticas se produzcan de forma simultánea ya que, en caso contrario, se incrementa la demanda de ductilidad local en las que se forman primero. Ello es difícil en puentes de tablero continuo en los que la rigidez transversal de los estribos o las pilas cortas es muy alta frente a otras pilas más esbeltas. En estos casos debe considerarse la posibilidad de apoyos deslizantes o elastoméricos que minimicen la participación de las pilas cortas u otros elementos rígidos, en el proceso de reparto de la carga.

Para puentes muy largos, el uso de juntas de tablero puede ser obligado cuando la traza transcurra a lo largo de formaciones heterogéneas de suelo y sea inadecuado absorber los movimientos inducidos a costa de esfuerzos en la estructura.

Los aparatos de apoyo deben estar accesibles para su reparación o sustitución después del sismo.

En algunos casos, puede plantearse la conveniencia de sustituir un comportamiento dúctil basado en el desarrollo de rótulas plásticas por el aislamiento del tablero o la utilización de elementos amortiguadores especiales. La utilización de este tipo de sistemas está permitida por esta Norma siempre que para su proyecto se efectúen las comprobaciones, teóricas y experimentales, necesarias para garantizar un comportamiento adecuado, de acuerdo con el estado actual del conocimiento.

2.8. Consideración de la acción sísmica

No será necesaria la consideración de las acciones sísmicas cuando la aceleración sísmica horizontal básica del emplazamiento a_b definida en el apartado 3.4 cumpla:

$$a_b < 0,04 g \quad (2.2a)$$

donde g es la aceleración de la gravedad.

Tampoco será necesaria la consideración de las acciones sísmicas en las situaciones en que la aceleración sísmica horizontal de cálculo a_c definida en el apartado 3.4 cumpla:

$$a_c < 0,04 g \quad (2.2b)$$

Comentarios

C.2.1. Requisitos fundamentales

C.2.2. Definiciones

C.2.2.1. Sismo básico

Este terremoto es equivalente, en términos de peligrosidad sísmica, al recogido en el mapa sísmico de la «Norma de Construcción Sismorresistente: Parte general y edificación».

Teniendo en cuenta que los puentes se proyectan con una vida útil de 100 años, este terremoto tiene una probabilidad del orden del 20% de ser superado a lo largo de ese tiempo (véase a este respecto el comentario al apartado 3.4).

C.2.2.2. Sismo último de cálculo

Este terremoto es equivalente al que queda definido por la «aceleración sísmica de cálculo» en la «Norma de Construcción Sismorresistente: Parte general y edificación» (véase a este respecto el apartado 3.4).

C.2.2.3. Sismo frecuente

Teniendo en cuenta que los puentes se proyectan con una vida útil de 100 años, este terremoto tiene una probabilidad aproximada del 60% de ser superado a lo largo de ese tiempo (véase a este respecto el comentario al apartado 3.4).

C.2.2.4. Sismo frecuente de cálculo

C.2.2.5. Sismo de construcción

C.2.3. Clasificación de los puentes según su importancia

Las indicaciones necesarias para efectuar la clasificación de los puentes, están recogidas en la Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (IAP) y en la Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de ferrocarril (IAPF), y podrán figurar además en otras normas o disposiciones específicas que les sean de aplicación.

La introducción de un factor de importancia de valor 1,3 equivale, en el caso del sismo básico, a reducir la probabilidad de excedencia de esa acción de un 20% a un 10% aproximadamente. Dicho de otra forma, equivale a aumentar el período de retorno de 500 a 1000 años, aproximadamente.

En el caso del sismo frecuente, el factor de importancia de valor 1,3 supone una reducción aproxima-

da de la probabilidad de excedencia del 60% al 40% o, desde otro punto de vista, equivale a aumentar el período de retorno de 100 a algo menos de 200 años.

C.2.4. Situación sísmica de cálculo

El valor de las acciones permanentes y de la sobrecarga de uso, así como de los coeficientes parciales de seguridad, figura en las Instrucciones IAP e IAPF.

C.2.5. Tipos de comportamiento estructural

La elección del tipo de comportamiento exige una valoración ponderada de la resistencia, de la flexibilidad y de la demanda de ductilidad necesarias en cada caso (véase a este respecto el comentario al apartado 4.2.2). Aunque una flexibilidad alta reduce, en principio, los esfuerzos, al aumentar los desplazamientos, es necesario dotar de ductilidad suficiente a unas determinadas zonas y controlar además los posibles efectos de segundo orden que se puedan generar.

En la figura C.2.1, se muestra, de forma simplificada, la diferencia entre los tipos de comportamiento admitidos en puentes. Para el mismo terremoto, la fuerza F_e que actúa sobre un puente durante el sismo es máxima si el comportamiento del puente es idealmente elástico. En este caso la deformación es mínima. Si se admite un comportamiento dúctil, la fuerza que actúa es mínima y la deformación de la estructura es máxima, debido a que se minimiza el efecto de la acción con la formación de las rótulas plásticas, cuyo comportamiento dúctil supone grandes deformaciones. El comportamiento dúctil de los puentes depende de las características de ductilidad de las secciones o regiones donde se forman las rótulas plásticas. A mayor ductilidad de estas regiones, menor es el efecto de la acción sísmica y mayores son las deformaciones de la estructura.

C.2.6. Exigencias para cada tipo de comportamiento

C.2.6.1. Comportamiento dúctil

Los puentes con comportamiento dúctil, se proyectan con unos esfuerzos debidos al sismo menores que los que corresponderían a la estructura con un comportamiento elástico. La relación entre ellos es un factor, mayor que la unidad, denominado factor de comportamiento. Esta reducción está basada en el hecho de que, al ser dúctil, la estructura es capaz de deformarse en régimen no lineal, debido a la formación de rótulas plásticas en sitios previamente elegidos, cuya capacidad de deformación es adecuada para garantizar la reducción adoptada.

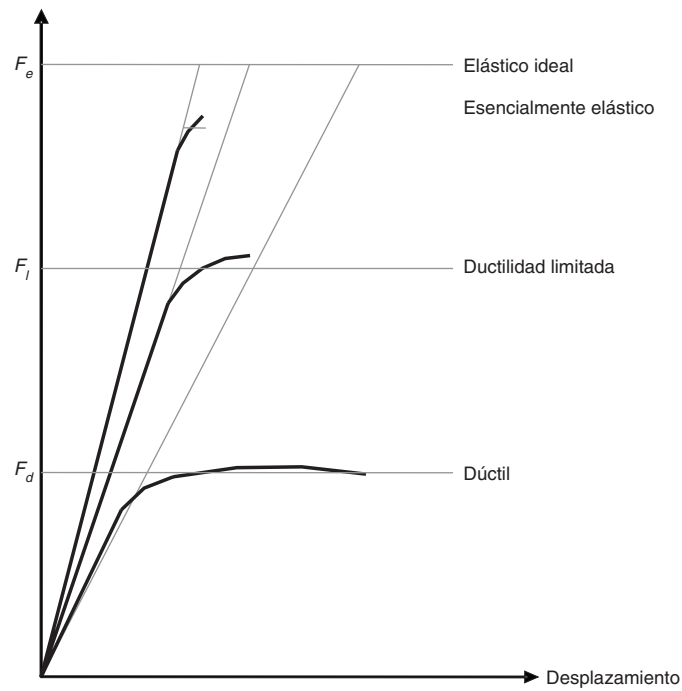


Figura C.2.1. Comportamiento sísmico

C.2.6.2. Comportamiento con ductilidad limitada

Los puentes con ductilidad limitada, se proyectan con unos esfuerzos debidos al sismo menores que los que corresponderían a la estructura con un comportamiento elástico, aunque con un factor de comportamiento menor que en el caso del comportamiento dúctil. Esta reducción supone unas exigencias de ductilidad mucho menores que las definidas en el apartado 2.6.1.

C.2.6.3. Comportamiento esencialmente elástico

C.2.6.4. Comportamiento elástico

C.2.7. Algunos criterios conceptuales de proyecto

C.2.8. Consideración de la acción sísmica

Se considera que si la aceleración sísmica es inferior a la indicada en el articulado, no se generan solicitaciones peores que en las demás hipótesis de carga, dada la diferencia de coeficientes de seguridad y de acciones simultáneas que deben considerarse con el sismo. La segunda condición supone en la práctica que, en muchas ocasiones, no será necesario el cálculo con la acción sísmica del sismo frecuente y que, generalmente, no será necesario considerar el sismo durante la construcción.