

5 COMPROBACIONES RESISTENTES

5.1 Introducción

Las comprobaciones que es necesario efectuar para verificar el comportamiento estructural de un puente en situación sísmica son diferentes según cuál sea el comportamiento estructural previsto para el mismo en el proyecto (dúctil, de ductilidad limitada o esencialmente elástico).

Para que se cumpla el requisito fundamental de *ausencia de colapso* establecido en el capítulo 2, se deberán efectuar las comprobaciones indicadas en la tabla 5.1, según el tipo de comportamiento, bajo la acción del sismo último de cálculo y, en su caso, del sismo de construcción. En el caso de puentes proyectados con comportamiento dúctil, si se trata de puentes irregulares, será necesario efectuar una comprobación adicional, siguiendo las indicaciones que a este respecto figuran en el capítulo 4.

El requisito fundamental de *limitación de daño*, que debe verificarse bajo la acción del sismo frecuente de cálculo, podrá considerarse cumplido sin necesidad de efectuar comprobaciones adicionales si, para el sismo último de cálculo, el comportamiento del puente es esencialmente elástico o de ductilidad limitada. Si para el sismo último de cálculo el puente tiene un comportamiento dúctil, será necesario efectuar las comprobaciones indicadas en la tabla 5.1 para el sismo frecuente de cálculo.

En el presente capítulo, se establece la metodología y las condiciones de la comprobación de la capacidad resistente de las secciones y elementos estructurales, cuya respuesta haya sido analizada mediante cálculo modal espectral o algún método lineal equivalente. Si el método de cálculo empleado es no lineal, se seguirá el procedimiento de verificación establecido en los apartados 4.3 ó 4.4.

Como se indica en la tabla 5.1, los detalles específicos de los distintos elementos estructurales o partes de la estructura, necesarios para asegurar el comportamiento deseado, están definidos en el capítulo 6. Las comprobaciones relativas a longitudes de entrega de tableros, anchura de juntas y comprobación de apoyos están especificadas en el capítulo 7.

Acción	Comportamiento	Comprobaciones	Referencia	
Sismo último de cálculo	Dúctil	ELU según criterios de proyecto por capacidad	Apartado 5.3.1	
		Comprobación de nudos contiguos a las rótulas	Apartado 5.3.1	
		Detalles específicos en zonas de rótulas plásticas	Capítulo 6	
		Longitudes de entrega y anchura de juntas	Apartado 7.2	
		Estudio del comportamiento post-elástico <i>(sólo en puentes irregulares)</i>	Capítulo 4	
	Sismo durante la construcción <i>(sólo en caso necesario)</i>	Ductilidad limitada	ELU según Instrucciones de materiales	Apartado 5.3.2
			Detalles específicos en zonas de rótulas plásticas	Capítulo 6
			Longitudes de entrega y anchura de juntas	Apartado 7.2
		Esencialmente elástico	ELU según Instrucciones de materiales	Apartado 5.3.3
			Longitudes de entrega y anchura de juntas	Apartado 7.2
Sismo frecuente de cálculo <i>(sólo si, bajo el sismo último de cálculo, el comportamiento es dúctil)</i>	Elástico	Condición de ausencia de plastificaciones	Apartado 5.4	
		Movimiento de juntas	Apartado 7.1	

Tabla 5.1 Comprobaciones estructurales

5.2 Materiales a utilizar en puentes de zonas sísmicas

Para puentes en zonas sísmicas, con independencia del tipo de comportamiento que se adopte, se utilizarán los materiales que se indican a continuación.

En elementos de hormigón estructural, se utilizarán armaduras de alta ductilidad como las definidas en la Instrucción EHE.

En elementos de acero estructural y en sus uniones, el material cumplirá las condiciones de ductilidad exigidas en la normativa específica.

5.3 Comprobaciones para el sismo último de cálculo

Las comprobaciones que se recogen en este apartado son comprobaciones de resistencia de secciones y de elementos estructurales y varían según cuál sea el comportamiento previsto para la estructura en el proyecto.

El resto de comprobaciones o condiciones que es necesario cumplir para el sismo último de cálculo se detallan en otros capítulos, según se indica en la tabla 5.1.

Cuando, de acuerdo con el capítulo 2, sea necesario estudiar la respuesta del puente bajo la acción de un sismo de construcción, las comprobaciones necesarias serán las mismas que las aquí indicadas, con la combinación de acciones correspondiente a dicho sismo.

En las comprobaciones de estados límite últimos, se utilizarán los coeficientes parciales de seguridad de los materiales definidos para situaciones accidentales de proyecto en las Instrucciones de materiales pertinentes.

5.3.1 Comprobaciones en estructuras con comportamiento dúctil

5.3.1.1 Principios generales del proyecto por capacidad

En las estructuras con comportamiento dúctil, la deformación plástica se concentra en zonas localizadas donde se forman rótulas, en las que prevalecen las deformaciones de flexión.

El proyecto sísmico debe comenzar por identificar las zonas en las que se formarán las rótulas plásticas del puente (ver apartado 2.6.1). Las secciones de las zonas de rótulas plásticas se denominan, de aquí en adelante, secciones dúctiles. Las secciones situadas fuera de estas zonas se denominan secciones no dúctiles o, en su caso, secciones protegidas por capacidad.

La capacidad resistente, tanto de las secciones dúctiles como de las no dúctiles, se obtendrá de acuerdo con los criterios definidos a estos efectos por las Instrucciones de materiales que corresponda, con algunas particularidades cuando así se indique específicamente en este capítulo. Adicionalmente, deberán cumplirse las reglas constructivas que se definen en el capítulo 6, para garantizar la ductilidad que se ha supuesto en el cálculo de esfuerzos.

Los esfuerzos solicitantes que intervienen en las verificaciones resistentes no son en todos los casos los que resultan del cálculo modal espectral definido en el apartado 4.2, sino que deben modificarse de acuerdo con los criterios de *proyecto por capacidad*.

Según estos criterios, los esfuerzos transversales solicitantes en las secciones dúctiles serán los máximos compatibles con la capacidad resistente real a flexocompresión. Con estos esfuerzos transversales, se efectuará la comprobación en estado límite último.

En las zonas protegidas por capacidad, los esfuerzos solicitantes serán los máximos compatibles con la capacidad resistente real a flexocompresión de las secciones dúctiles correspondientes.

5.3.1.2 Momento de sobre-resistencia en rótulas plásticas y esfuerzos asociados

Para la determinación del esfuerzo cortante asociado al de flexión compuesta en las secciones dúctiles y los esfuerzos máximos que pueden actuar en las secciones protegidas por capacidad, es necesario efectuar primero una estimación de la resistencia real a flexocompresión de las secciones dúctiles, que se denomina momento de sobre-resistencia, M_o .

El momento de sobre-resistencia se calculará mediante la expresión siguiente:

$$M_o = \gamma_o M_{Rd} \quad (5.1)$$

donde:

M_{Rd} Momento flector último de la sección dúctil, en la dirección y sentido considerados, calculado de acuerdo con los criterios de estado límite último establecidos por las Instrucciones de materiales, en presencia del axil correspondiente a la combinación sísmica definida en el apartado 2.4, teniendo en cuenta las armaduras longitudinales realmente existentes en la sección transversal y con los coeficientes parciales de seguridad para los materiales correspondientes a situaciones accidentales.

γ_o Coeficiente de sobre-resistencia para el que, en general, se tomará un valor $\gamma_o = 1,35$

En el caso de elementos de hormigón armado, que disponen de la armadura de confinamiento definida en el apartado 6.2.2.3, cuando se cumpla que $\eta_k > 0,1$ deberá incrementarse el valor del coeficiente de sobre-resistencia hasta:

$$\gamma_o = 1,35 [1 + 2(\eta_k - 0,1)^2] \quad (5.2)$$

siendo η_k el axil reducido definido en el apartado 4.2.2.1.

En los elementos que contienen secciones dúctiles, a partir del momento de sobre-resistencia, se determina la ley de momentos a considerar en el resto de las secciones, suponiendo, según se indica en la figura 5.1, que esa ley es lineal. Los esfuerzos así obtenidos se denominan esfuerzos por capacidad.

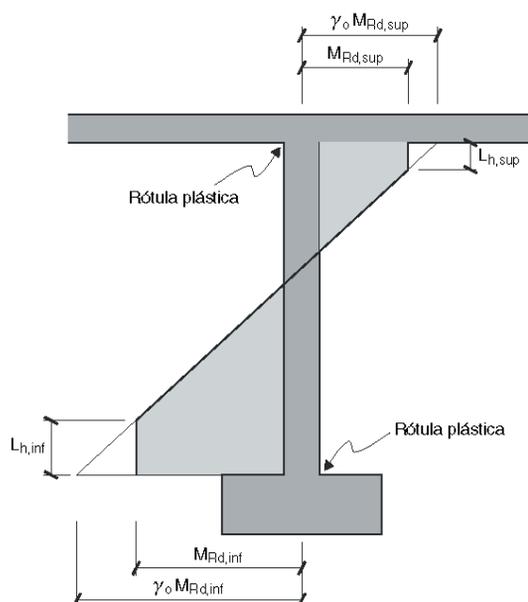


Figura 5.1 Distribución de momentos por capacidad M_C para pilas en ménsula y pilas empotradas

La longitud L_h (figura 5.1), a lo largo de la cual el momento por capacidad M_C está limitado por el momento flector último M_{Rd} , es la longitud teórica de cada rótula plástica. Esta longitud delimita la zona de rótula plástica respecto a la zona protegida por capacidad, únicamente a efectos de las comprobaciones que figuran en los apartados 5.3.1.3 y 5.3.1.4.

El cortante máximo transmitido por cada pila, V_C , será el correspondiente a la ley definida por los momentos flectores de sobre-resistencia.

Para una pila en ménsula de altura H , el máximo esfuerzo cortante por capacidad podrá calcularse mediante la expresión siguiente:

$$V_{C,max} = \frac{\gamma_0 M_{Rd}}{H} \quad (5.3)$$

En el caso de una pila biempotrada, podrá calcularse mediante la expresión:

$$V_{C,max} = \frac{|\gamma_0 M_{Rd,inf}| + |\gamma_0 M_{Rd,sup}|}{H} \quad (5.4)$$

Los esfuerzos por capacidad deberán calcularse, en general, para cada sentido de la acción sísmica tanto en la dirección longitudinal como transversal.

En el caso de que algún apoyo deslizante participe en el mecanismo plástico de colapso, la máxima fuerza horizontal que puede transmitir se supondrá igual a $\gamma_{of} R_{df}$ en donde $\gamma_{of} = 1,3$ es el factor de amplificación de la fricción por el envejecimiento del material y R_{df} es la máxima fuerza de fricción que es capaz de transmitir el apoyo.

En los puentes proyectados con comportamiento dúctil, en el caso de elementos donde no se prevé la formación de rótulas plásticas y que tienen que resistir esfuerzos cortantes transmitidos por apoyos elastoméricos, los esfuerzos de proyecto por capacidad se obtendrán a partir de la deformación máxima de los apoyos elastoméricos, correspondiente al desplazamiento de cálculo del tablero y considerando la rigidez del apoyo incrementada en un 30%.

Los esfuerzos por capacidad calculados con los criterios definidos en este apartado estarán limitados superiormente, a efectos de las comprobaciones resistentes, por los que resultarían en la hipótesis de comportamiento esencialmente elástico.

5.3.1.3 Comprobación de las secciones dúctiles

— *Estado límite de agotamiento frente a solicitaciones normales*

Deberá verificarse que:

$$M_{Ed} \leq M_{Rd} \quad (5.5)$$

siendo:

M_{Ed} Momento flector solicitante correspondiente a la combinación sísmica, considerando el espectro de respuesta reducido definido por la expresión (4.1) e incluyendo, si procede, los efectos de segundo orden

M_{Rd} Momento flector último definido en el apartado 5.3.1.2

En el caso de elementos de hormigón, la armadura longitudinal debe ser constante y efectiva en toda la longitud de la rótula L_h indicada en la figura 5.1.

En el caso de elementos metálicos o mixtos, sólo se permitirá la formación de rótulas plásticas en secciones compactas.

— *Estado limite de agotamiento frente a cortante*

Deberá verificarse que:

$$V_C \leq V_{Rd} \quad (5.6)$$

siendo:

V_C Esfuerzo cortante por capacidad en la rótula, según las expresiones (5.3) ó (5.4)

V_{Rd} Esfuerzo cortante último según Instrucciones de materiales, tomando, en el caso de elementos de hormigón, como dimensiones de la sección las del hormigón confinado y considerando que el ángulo entre las bielas de compresión y la armadura principal de tracción es de 45°.

5.3.1.4 Comprobación de las secciones protegidas por capacidad

— *Estado limite de agotamiento frente a solicitaciones normales*

Deberá verificarse que:

$$M_C \leq M_{Rd} \quad (5.7)$$

siendo:

M_C Momento por capacidad definido en el apartado 5.3.1.2 (figura 5.1)

M_{Rd} Momento flector último de la sección, según las Instrucciones de materiales, teniendo en cuenta la interacción con el axil correspondiente a la combinación sísmica

— *Estado limite de agotamiento frente a cortante*

Deberá verificarse que:

$$V_C \leq V_{Rd} \quad (5.8)$$

siendo:

V_C Esfuerzo cortante por capacidad definido en el apartado 5.3.1.2

V_{Rd} Esfuerzo cortante último según los criterios habituales en las Instrucciones de materiales

5.3.1.5 Comprobación de nudos contiguos a las rótulas

Los nudos contiguos a las rótulas plásticas, es decir, los empotramientos de pilas dúctiles con cimentación o tablero, deben dimensionarse para resistir el esfuerzo cortante vertical V_v indicado en la expresión siguiente.

$$V_v = \frac{M_0}{z_p} - V_c \quad (5.9)$$

donde:

- M_0 momento de sobre-resistencia de la rótula (según expresión (5.1))
- z_p brazo mecánico del mecanismo de flexión de la pila
- V_c esfuerzo cortante en el elemento transversal (cimentación o tablero), en la zona adyacente a la cara de tracción de la pila, correspondiente a los esfuerzos por capacidad de la rótula

A efectos de la comprobación, se supondrá que la anchura efectiva del nudo está limitada por la anchura de la pila más la mitad de su canto y, en el caso de una pila cilíndrica, por vez y media su diámetro.

Además de efectuar la comprobación indicada en la expresión (5.9), en los nudos adyacentes a las rótulas plásticas, las tensiones principales de compresión σ_c y de tracción σ_t deben cumplir las condiciones siguientes:

$$\sigma_c \leq 0,6 f_{cd} \quad (5.10)$$

$$\sigma_t \leq 4,0 f_{ctd} \quad (5.11)$$

siendo:

- f_{cd} resistencia de cálculo del hormigón en compresión
- f_{ctd} resistencia de cálculo del hormigón en tracción

Las tensiones principales podrán obtenerse a partir de las expresiones siguientes:

$$\sigma_c = \frac{\sigma_h + \sigma_v}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_h - \sigma_v}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad (5.12)$$

$$\sigma_t = \frac{\sigma_h + \sigma_v}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_h - \sigma_v}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad (5.13)$$

donde:

- σ_v tensión vertical media (carga vertical transmitida por la pila dividida por su área)
- σ_h tensión horizontal media (fuerza horizontal transmitida por el tablero o, en su caso, por la cimentación dividida por el área efectiva de la conexión vertical)
- τ tensión tangencial media (momento de sobre-resistencia de la rótula plástica dividido por el brazo mecánico efectivo de la rótula y por el área efectiva de la conexión vertical)

En el capítulo 6, apartado 6.2.3, se recogen algunos criterios de armado específicos para los nudos.

5.3.2 Comprobaciones en estructuras con ductilidad limitada

En puentes proyectados con ductilidad limitada, las verificaciones de secciones y elementos estructurales en estado límite último deberán efectuarse de acuerdo con la condición siguiente:

$$E_d \leq R_d \quad (5.14)$$

donde:

E_d esfuerzos de cálculo correspondientes a la combinación sísmica, considerando el espectro de respuesta reducido definido por la expresión (4.9), con un factor de comportamiento $q \leq 1,5$, e incluyendo si procede los efectos de segundo orden

R_d capacidad resistente de la sección de acuerdo con las Instrucciones de materiales pertinentes (con los coeficientes parciales de seguridad correspondientes a verificaciones de estado límite último en situación accidental)

Para verificar la resistencia a cortante, se adoptará el valor de E_d correspondiente a la combinación sísmica con los efectos de la acción sísmica multiplicados por el factor de comportamiento utilizado en el cálculo.

En el caso de elementos metálicos o mixtos, las secciones en las que se prevea la formación de rótulas plásticas serán compactas.

5.3.3 Comprobaciones en estructuras con comportamiento esencialmente elástico

En puentes proyectados con comportamiento esencialmente elástico, las verificaciones de secciones y elementos estructurales en estado límite último deberán efectuarse de acuerdo con la expresión (5.14), con la salvedad de que, en este caso, el valor del factor de comportamiento es $q = 1$.

5.4 Comprobaciones para el sismo frecuente de cálculo

Cuando, de acuerdo con el apartado 5.1, sea necesario comprobar que bajo la acción del sismo frecuente de cálculo la estructura se comporta elásticamente, tal comprobación se llevará a cabo de la forma indicada a continuación.

En las secciones donde se prevé que bajo la acción del sismo último de cálculo se formarán rótulas plásticas, la condición de ausencia de plastificaciones bajo el sismo frecuente de cálculo quedará asegurada si, para la combinación sísmica correspondiente, se verifica lo siguiente:

- En secciones de hormigón estructural, la tensión en la armadura no alcanza el límite elástico del acero y la máxima deformación unitaria en el hormigón es inferior a la deformación de rotura del hormigón a compresión simple.
- En secciones metálicas, la tensión de comparación definida en la normativa en vigor no supera el límite elástico del acero.
- En secciones mixtas, las tensiones y deformaciones de los distintos materiales están dentro de los límites indicados en los párrafos anteriores.