

DISEÑO SÍSMICO DE PUENTES

Quiroga, E. Daniel^a; Frau, Carlos D.^b

^aFacultad de Ingeniería. Univ. Nac. de Cuyo, daniel.quiroga@ingenieria.uncuyo.edu.ar

^bRegional Mendoza. Univ. Tecnológica Nacional, carlos.frau@frm.utn.edu.ar

Palabras clave: diseño sísmico, puentes, pilas, ductilidad, INPRES-CIRSOC 103

RESUMEN

El diseño sísmico de puentes constituye uno de los problemas más complejos de la ingeniería estructural debido a la interacción entre superestructura, subestructura, fundaciones y condiciones geotécnicas. Desde 2018 se desarrollan los reglamentos CIRSOC e INPRES-CIRSOC de 3^{ra} generación para la seguridad de obras civiles. En este marco, las resoluciones 112/2023 y 170/2023 del Ministerio de Obras Públicas han puesto en vigencia reglamentos relativos al proyecto de puentes y en particular el INPRES-CIRSOC 103 – 2020 – Parte VI- Puentes Sismorresistentes de Hormigón Armado. Este reglamento aborda el diseño sísmico de puentes con énfasis en el “diseño por capacidad”, donde las solicitaciones en ciertos componentes no provienen del análisis estructural sino de la capacidad resistente de otros componentes seleccionados para la disipación de energía. Así, resulta de interés identificar y ordenar los procedimientos para la evaluación de las acciones sísmicas y solicitaciones de diseño en distintos componentes que resisten la acción sísmica de un puente. El presente trabajo presenta un esquema ordenado y secuencial de los pasos para el análisis sísmico de destinado a facilitar el diseño avanzado de puentes puentes de hormigón armado. En Anexo I se presenta un ejemplo de referencia.

ABSTRACT

The seismic design of reinforced concrete bridges is one of the most complex problems in structural engineering due to the interaction between the superstructure, substructure, foundations, and geotechnical conditions. Since 2018, the third-generation CIRSOC and INPRES-CIRSOC regulations for the safety of civil works have been under development. Within this framework, Resolutions 112/2023 and 170/2023 of the Ministry of Public Works have implemented regulations related to bridge design, and in particular INPRES-CIRSOC 103-2020 - Part VI - Seismic-Resistant Reinforced Concrete Bridges. This regulation addresses the seismic design of bridges with an emphasis on "capacity design," where the loads on certain components are derived not from structural analysis but from the resistance capacity of other selected components for energy dissipation. Therefore, it may be useful to identify and organize the procedures for evaluating seismic actions and obtaining design loads on the various components that resist seismic forces in a bridge. This paper presents an organized and sequential scheme of steps for seismic analysis intended to facilitate the advanced design of reinforced concrete bridges. In Annex I an example is presented.

Organiza:

1. INTRODUCCIÓN

Los puentes constituyen componentes críticos de la infraestructura vial y ferroviaria debido a su importancia estratégica para la conectividad territorial y la respuesta ante emergencias. Los eventos sísmicos severos ocurridos en distintas regiones del mundo han demostrado que las fallas en pilas, apoyos y conexiones pueden producir colapsos parciales o totales con consecuencias económicas y sociales significativas.

El comportamiento sísmico de un puente constituye un problema estructural de elevada complejidad debido a la interacción dinámica entre tablero, apoyos, pilas, estribos y fundaciones y difiere sustancialmente del correspondiente a edificios convencionales debido a la distribución espacial de masas y rigideces; la interacción suelo-estructura; la presencia de apoyos móviles y dispositivos de vinculación; la irregularidad geométrica longitudinal y transversal y a la influencia dinámica de fundaciones profundas.

En regiones de peligrosidad sísmica moderada y elevada, el diseño sismorresistente adquiere especial importancia debido a la necesidad de garantizar la continuidad operativa de las infraestructuras críticas luego de eventos sísmicos severos.

La reglamentación argentina incorpora criterios modernos de desempeño estructural mediante el Reglamento Argentino de Puentes CIRSOC 801 [1] y el INPRES-CIRSOC 103 Parte VI [3], los cuales establecen los procedimientos para evaluar las acciones sísmicas y definir los requisitos de diseño y detallado estructural.

El objetivo del presente trabajo consiste en identificar y ordenar los procedimientos para la evaluación sísmica de puentes de hormigón armado establecidos en la reglamentación argentina vigente, con énfasis en el diseño de pilas como elementos fundamentales del sistema resistente lateral.

2. MARCO NORMATIVO ARGENTINO

2.1 Reglamento CIRSOC 801

El reglamento CIRSOC 801 [1], Reglamento Argentino de Puentes de Hormigón Armado establece las bases generales para el diseño de puentes carreteros de hormigón armado y pretensado, incluyendo acciones permanentes y variables; combinaciones de carga; criterios de análisis estructural; verificaciones resistentes y de servicio.

2.2 Reglamento CIRSOC 802

El reglamento CIRSOC 802 [2], Reglamento Argentino de Puentes de Hormigón Armado determina las especificaciones para el dimensionado de componente de hormigón armado y pretensado, en lugar del CIRSOC 201 destinado a edificios.

2.2 INPRES-CIRSOC 103 Parte VI

Esta parte VI de INPRES CIRSOC 103 [3] en materia sísmica, el reglamento adopta los lineamientos normativos definidos por AASHTO [5], que establece los criterios específicos para puentes.

Los aspectos fundamentales contemplados son:

- zonificación sísmica nacional;
- aceleraciones efectivas de diseño;
- clasificación del terreno;
- espectros de diseño;
- factores de ductilidad y comportamiento;
- métodos de análisis;
- requisitos de detallado sismorresistente.

El enfoque reglamentario se basa en filosofía de diseño por capacidad, admitiendo incursiones inelásticas controladas en zonas específicamente detalladas para disipación de energía.

3. FILOSOFÍA DEL DISEÑO SÍSMICO DE PUENTES

El diseño sísmico moderno persigue tres objetivos principales: evitar el colapso ante sismos extremos, limitar daños estructurales ante sismos moderados y asegurar funcionalidad operativa posterior al evento.

La jerarquía operativa condiciona la demanda analítica según las consecuencias de una eventual salida de servicio. De este modo las condiciones y requisitos de diseño estarán establecidos de acuerdo con la clasificación de cada puente según su operatividad, regularidad y tipo constructivo.

3.1. Clasificación Operacional

Esta clasificación es determinada por la Autoridad de Aplicación basándose en una combinación de factores estratégicos, sociales y de su capacidad de respuesta operativa tras un evento sísmico. Los factores determinantes son los siguientes:

- Requerimientos sociales: El impacto que tendría la salida de servicio del puente en la población civil.
- Supervivencia: La importancia de la vía para mantener rutas de evacuación o suministros básicos.
- Seguridad: Su rol en el mantenimiento del orden y la protección civil.
- Defensa: Su valor estratégico para las fuerzas de seguridad o militares.

De este modo se determina si un puente se clasifica como crítico, esencial o común.

- Puentes Críticos: Son aquellos que deben permanecer abiertos a todo el tráfico inmediatamente después del terremoto de diseño (periodo de retorno de 1,000 años) además, deben ser aptos para vehículos de emergencia y propósitos de seguridad o defensa inmediatamente después de un gran sismo con un periodo de recurrencia de 2,500 años.
- Puentes Esenciales: Se definen como aquellos que, como mínimo, deben estar abiertos para vehículos de emergencia y para fines de seguridad o defensa

Organiza:

inmediatamente después del "terremoto de diseño", el cual tiene un periodo de recurrencia de aproximadamente 1.000 años.

- **Puentes Comunes:** Son aquellos que no entran en las categorías anteriores. Aunque se diseñan con una baja probabilidad de colapso, se acepta que ante un sismo severo puedan sufrir daños significativos y salir fuera de servicio, requiriendo incluso su reemplazo total o parcial.

3.2. Clasificación de regularidad

La evaluación de la regularidad se realiza a partir de la tabla 1 (INPRES CIRSOC 103 VI tabla 4.7.4.3.1-2) [3] Requerimientos para puentes regulares, donde los parámetros a evaluar son: el número de tramos, ángulo para puente curvo, relación entre luces de puentes contiguos y relación de rigidez pila/columna. Los puentes que cumplen con las condiciones establecidas en esta tabla pueden considerarse "regulares"

Tabla 1 Requerimientos para Puentes Regulares
(INPRES CIRSOC 103 VI tabla 4.7.4.3.1-2) [3]

Parámetro	Valor				
Número de tramos	2	3	4	5	6
Máximo ángulo subtendido para un puente curvo	90°	90°	90°	90°	90°
Máxima relación entre luces de tramos contiguos	3	2	2	1,5	1,5
Máxima relación de rigidez: pila/columna	-	4	4	3	3

3.3. Clasificación por Tipo de Construcción (Convencionales)

Independientemente de su importancia operativa, el reglamento distingue entre puentes de construcción tradicional y otros sistemas:

- **Puentes Convencionales:** Incluyen estructuras con superestructuras de losa maciza, viga-cajón o cerchas. Sus subestructuras suelen ser pilas de una o varias columnas, pilas tipo tabique o pilotes, con fundaciones tanto superficiales como profundas (pilotes hincados o perforados in situ).
- **Puentes No Convencionales:** En esta categoría se incluyen estructuras más complejas como puentes colgantes, puentes en arco, o aquellos con pilas huecas o torres de celosía. Para estos casos, la Autoridad de Aplicación debe aprobar prescripciones específicas, ya que las reglas generales del reglamento están orientadas a construcciones tradicionales.

Esta clasificación es fundamental en el diseño sismorresistente, ella influye directamente en la asignación de los **Factores de Modificación de Respuesta (R)**, los cuales son más estrictos (menores) para puentes críticos y esenciales con el fin de limitar el daño por comportamiento inelástico y garantizar su operatividad.

En puentes de hormigón armado, la disipación de energía se concentra preferentemente en las pilas mediante formación de rótulas plásticas dúctiles. El

criterio fundamental consiste en garantizar que las pilas desarrollen comportamiento dúctil, las fundaciones permanezcan esencialmente elásticas, los apoyos y conexiones mantengan estabilidad y que la superestructura conserve integridad global.

4. CARACTERIZACIÓN DE LA ACCIÓN SÍSMICA

El Reglamento de puentes presenta una diferencia respecto de toda la línea 103 hasta el momento ya que incorpora la definición de Zonas de Desempeño Sísmico en lugar de las Zonas Sísmicas. Estas zonas se determinan en función del coeficiente de aceleración espectral S_{D1} , que incluye la Peligrosidad y los efectos locales del sitio, según se definen en la Tabla 2 (tabla 3.10.6-1 INPRES CIRSOC 103 VI) [3] Zonas de Desempeño Sísmico.

Tabla 2 Zonas de Desempeño Sísmico
(INPRES CIRSOC 103 VI tabla 3.10.6-1) [3]

S_{D1}	Zonas de Desempeño Sísmico
$S_{D1} \leq 0,15$	1
$0,15 < S_{D1} \leq 0,30$	2
$0,30 < S_{D1} \leq 0,50$	3
$0,50 < S_{D1}$	4

4.1 Zonificación sísmica

La peligrosidad sísmica depende de la ubicación geográfica del puente y se expresa mediante aceleraciones máximas efectivas del terreno.

Las regiones del centro-oeste argentino presentan las mayores demandas sísmicas debido a la actividad tectónica andina, particularmente las provincias de Mendoza, San Juan está expuestas a terremotos corticales de poca profundidad, en tanto que La Rioja, Catamarca, Salta, Jujuy y Santiago del Estero pueden presentar sismicidad de profundidad intermedia o profunda.

4.2 Clasificación del sitio

Las características del subsuelo pueden provocar una significativa amplificación dinámica de las ondas sísmicas. Los efectos de amplificación dinámica asociados a depósitos blandos pueden incrementar considerablemente las solicitaciones sísmicas así como los desplazamientos y el período predominante.

Para tomar en cuenta este efecto los sitios se clasifican a partir de los perfiles geotécnicos según velocidad de ondas de corte, la resistencia a penetración estándar (SPT) o la resistencia al corte no drenado para suelos cohesivos. Así, se identifican sitios tipo **A** hasta **F**, según los valores que adquieran estos parámetros. Una

metodología para este análisis se explica en los comentarios C.3.10.3.1 [4], donde se incluye el análisis para estratos no homogéneos en los primeros 30 metros

4.3 Espectro de diseño

El espectro de diseño viene dado por un espectro de pseudo-aceleraciones elásticas y constituye la herramienta fundamental para la determinación de las acciones sísmicas equivalentes y representa la máxima respuesta dinámica esperable para sistemas estructurales con diferentes períodos naturales.

Para amortiguamiento viscoso equivalente del 5 %, el espectro reglamentario puede representarse gráficamente como se indica en la Figura 1 con los parámetros característicos de máxima aceleración del suelo (A_s), ordenadas espectrales para períodos cortos en la región espectral sensible a las aceleraciones (S_{DS}) y de períodos intermedios ($T_n=1.0s$) en la zona sensible a las velocidades (S_{D1}), valores que se obtienen de la tabla 3 (tabla 3.10.4.1-1. INPRES CIRSOC 103 VI [3] Parámetros del Espectro Elástico de Diseño para un período de retorno de 1000 años), graficados en la figura 2:

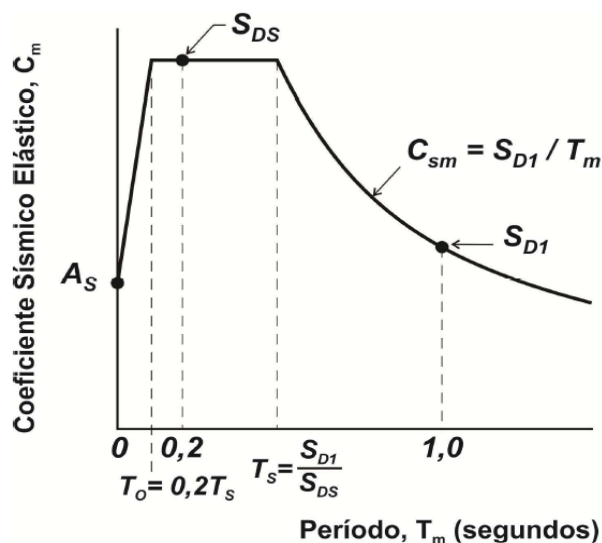


Figura 1. Espectro Elástico de Diseño

Tabla 3 Parámetros del Espectro de Diseño. Período de retorno de 1000 años (INPRES CIRSOC 103 VI tabla 3.10.4.1-1) [3]

Sitio	Zona Sísmica 4			Zona Sísmica 3			Zona Sísmica 2			Zona Sísmica 1		
	A_s	S_{DS}	S_{D1}	A_s	S_{DS}	S_{D1}	A_s	S_{DS}	S_{D1}	A_s	S_{DS}	S_{D1}
A	0,35	0,85	0,30	0,26	0,61	0,20	0,19	0,44	0,13	0,11	0,24	0,07
B	0,44	1,07	0,37	0,33	0,76	0,25	0,24	0,55	0,17	0,14	0,31	0,09
C	0,44	1,07	0,53	0,35	0,83	0,38	0,28	0,65	0,27	0,16	0,37	0,18
D	0,47	1,14	0,62	0,38	0,91	0,47	0,32	0,75	0,36	0,21	0,48	0,21
E	0,40	0,96	0,94	0,37	0,90	0,74	0,36	0,88	0,55	0,30	0,71	0,31

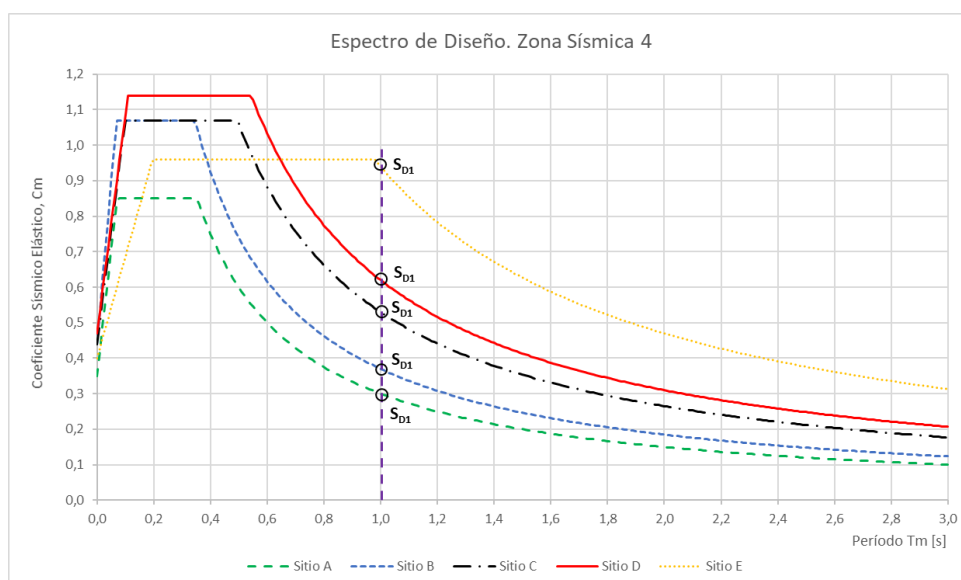


Figura 2. Espectro Elástico de Diseño, Zona Sísmica 4

De esta forma, un puente ubicado en una Zona Sísmica 4 en sitio S_C tendría un S_{D1} de 0.53, mientras que Zona Sísmica 2 y sitio S_E tiene un S_{D1} de 0.55, como se observa en el espectro de la figura 3. A pesar que ambos puentes se encuentran en dos zonas sísmicas diferentes, se los categoriza con la misma Zona de Desempeño Sísmico ZDS4, y deberán cumplir ambos con las mismas exigencias correspondientes a esta Zona de Desempeño.

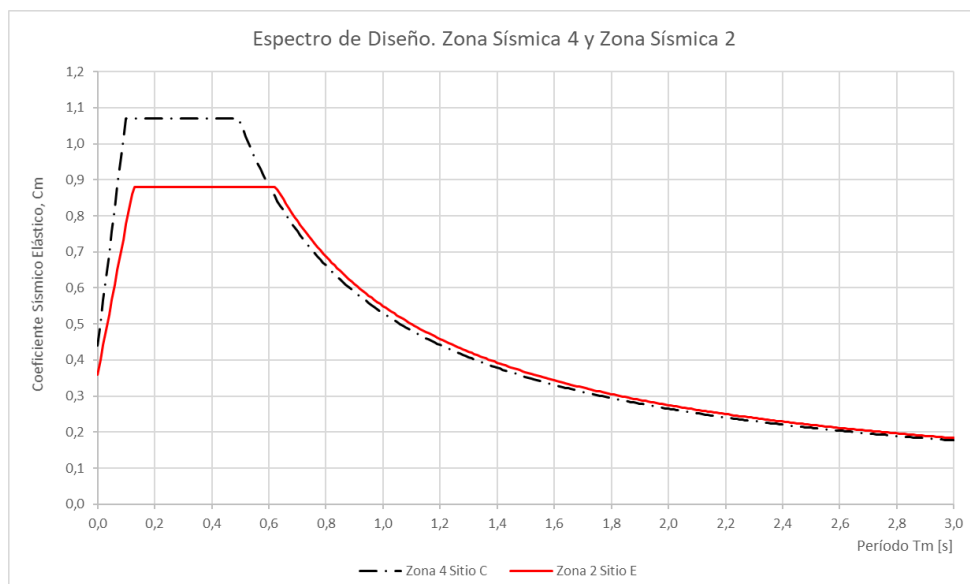


Figura 3. Comparación de Espectros, Zonas Sísmicas 2 y 4

5. MODELACIÓN ESTRUCTURAL DEL PUENTE

El modelo estructural debe representar adecuadamente la distribución de masas, la rigidez de superestructura, el comportamiento flexional de pilas, la interacción suelo-estructura, las condiciones reales de apoyo y, si corresponde, dispositivos de aislación

o disipación. En puentes regulares pueden utilizarse modelos lineales equivalentes, mientras que estructuras complejas o puentes de luces importantes es conveniente utilizar modelos tridimensionales espaciales o análisis espaciales tridimensionales mediante elementos finitos.

En la modelación de las pilas debe considerarse la degradación de la rigidez por fisuración a través de una rigidez efectiva que resulta una fracción de la rigidez bruta.

Los períodos naturales del puente gobiernan la respuesta dinámica y la magnitud de las fuerzas sísmicas por lo que se debe procurar un modelo adecuado que refleje lo mejor posible la dinámica del puente.

5.1 Definición del modelo

El modelo estructural debe representar adecuadamente la distribución de masas, la rigidez de superestructura, el comportamiento flexional de pilas, la interacción suelo-estructura, las condiciones reales de apoyo y, si corresponde, dispositivos de aislación o disipación. En puentes regulares pueden utilizarse modelos lineales equivalentes, mientras que estructuras complejas o puentes de luces importantes es conveniente utilizar modelos tridimensionales espaciales o análisis espaciales tridimensionales mediante elementos finitos.

5.2 Rigidez efectiva de pilas

La rigidez efectiva de pilas fisuradas difiere significativamente de la rigidez bruta.

Para columnas de hormigón armado:

$$E_{ef} = \alpha \ E_c \ I_g \quad (1)$$

donde:

E_{ef} = rigidez efectiva

E_c = módulo de elasticidad del hormigón;

I_g = inercia bruta;

α = coeficiente de reducción por fisuración.

5.3 Determinación de períodos naturales

Los períodos naturales del puente gobiernan la respuesta dinámica y la magnitud de las fuerzas sísmicas.

El problema modal, según Chopra [5], se expresa mediante:

$$[K \ \omega^2 M] \ \varphi = 0 \quad (2)$$

donde:

K = matriz de rigidez;

M = matriz de masas;

ω = frecuencia circular;

φ = vector modal.

6. MÉTODOS DE ANÁLISIS SÍSMICO

La reglamentación admite distintos procedimientos de análisis según lo establecido en la tabla 4 (INPRES CIRSOC 103 VI tabla 4.7.4.3.1-1) [3]:

- Método elástico de carga uniforme (UL)
- Método elástico monomodal (SM)
- Método elástico Multimodal (MM)
- Método de historia en el tiempo (TH)

Tabla 4 Requerimientos mínimos para el Análisis Sísmico
(INPRES CIRSOC 103 VI tabla 4.7.4.3.1-1) [3]

Zona de Desempeño Sísmico	Puente de un Solo Tramo	Puentes de Varios Tramos					
		Puentes Comunes		Puentes Esenciales		Puentes Críticos	
		Regular	Irregular	Regular	Irregular	Regular	Irregular
1	No se requiere ningún análisis sísmico	*	*	*	*	*	*
2		SM/UL	SM	SM/UL	MM	MM	MM
3		SM/UL	MM	MM	MM	MM	TH
4		SM/UL	MM	MM	MM	TH	TH

7. DISEÑO SÍSMICO DE PILAS DE HORMIGÓN ARMADO

7.1 Filosofía de diseño por capacidad

La acción sísmica aplicada sobre el tablero debe transferirse adecuadamente hacia pilas, estribos y fundaciones mediante trayectorias resistentes claramente definidas.

La distribución de fuerzas depende fundamentalmente de rigidez relativa de pilas, disposición de apoyos, continuidad estructural y la interacción longitudinal y transversal. En sistemas hiperestáticos, pequeñas variaciones de rigidez pueden modificar significativamente el reparto de esfuerzos sísmicos. La reglamentación establece además criterios de jerarquía resistente para garantizar mecanismos dúctiles globales. En consecuencia:

- las pilas deben desarrollar comportamiento inelástico controlado,
- las fundaciones deben poseer sobrerresistencia,
- los apoyos deben evitar pérdidas de sustentación.

Las pilas deben diseñarse para desarrollar ductilidad mediante plastificación flexional controlada. Las regiones críticas suelen localizarse en la base de pilas, en conexiones pila–dintel o en cambios abruptos de sección. Estas zonas requieren confinamiento transversal intensivo. La resistencia al corte debe superar la capacidad flexional desarrollable de modo de evitar fallas frágiles. El confinamiento incrementa la ductilidad, la resistencia máxima y la capacidad de deformación inelástica. El espaciado de armaduras transversales debe reducirse significativamente en zonas plásticas.

7.2 Verificación de desplazamientos

Los desplazamientos laterales constituyen un parámetro fundamental del desempeño sísmico. La deriva se expresa como:

$$\theta = \Delta / H \quad (3)$$

donde:

θ = deriva;

Δ = desplazamiento lateral;

H = altura de pila.

7.3. Interacción suelo–estructura

La flexibilidad de fundaciones modifica significativamente la respuesta dinámica del puente. Los principales efectos incluyen aumento de períodos naturales, redistribución de esfuerzos, incremento de amortiguamiento y modificación de desplazamientos relativos. En fundaciones profundas debe considerarse la interacción dinámica pilote–suelo. La reglamentación exige niveles elevados de seguridad para pilotes y cabezales debido a la dificultad de reparación posterior a un evento sísmico severo.

8. PROCEDIMIENTO SECUENCIAL PARA EL ANÁLISIS SÍSMICO

A continuación, se indica un esquema sistemático para el diseño sísmico de pilas de puentes según el Reglamento INPRES CIRSOC 103, Parte VI [3]:

1. Definición geométrica y estructural del puente.
2. Determinación de la zona sísmica, espectros de diseño y periodos de retorno.
3. Caracterización geotécnica del sitio: a partir de los perfiles estratigráficos, parámetros dinámicos del suelo y condiciones de fundación (3.10.3.1.1).
4. Definición de la Zona de Desempeño Sísmico (ZDS)
5. Obtención del espectro elástico de diseño.
6. Definición del modelo estructural: construir modelo 2D o 3D que incluya tablero, pilas, estribos, apoyos y fundaciones. Representando masas y amortiguamiento estructural. Determinación del período fundamental de vibración.
7. Selección del método de análisis.
8. Obtención de solicitaciones sísmicas
9. Diseño por capacidad de pilas: comparar solicitaciones con resistencias de hormigón y acero; aplicar factores de reducción y control de desplazamientos.
10. Verificación de corte y confinamiento.
11. Diseño de detalles sismorresistentes: armaduras de confinamiento, estribos, longitud de anclaje.
12. Verificación de fundaciones: capacidad de pilotes o zapatas frente a solicitaciones combinadas y considerar pandeo o pérdida de capacidad por licuación, si aplicara.

9. DISCUSIÓN

El diseño sísmico de pilas de puentes de hormigón armado requiere una evaluación integral de acciones dinámicas, propiedades estructurales y mecanismos de disipación de energía.

No obstante, la práctica profesional evidencia desafíos asociados a la caracterización dinámica del suelo, modelación no lineal, interacción suelo–estructura, definición de ductilidad disponible y validación experimental de modelos.

Asimismo, el incremento de exigencias normativas conduce a diseños más robustos, aunque también aumenta complejidad analítica y demanda computacional.

La incorporación de metodologías basadas en desempeño representan una evolución natural para futuras actualizaciones reglamentarias.

10. CONCLUSIONES

Los reglamentos CIRSOC 801 [1] e INPRES–CIRSOC 103 Parte VI [3] proporcionan un marco metodológico adecuado, alineados con las recomendaciones internacionales, para caracterizar la acción sísmica, modelar la respuesta estructural, determinar sollicitaciones de diseño y garantizar ductilidad mediante criterios de diseño por capacidad, promoviendo mecanismos dúctiles controlados en columnas y pilas, mientras se preserva la integridad de fundaciones y elementos críticos.

El enfoque por capacidad y la adecuada jerarquización resistente constituyen aspectos esenciales para alcanzar niveles satisfactorios de seguridad y desempeño frente a eventos sísmicos severos.

La organización secuencial de los procedimientos presentada en este trabajo facilita la implementación práctica del análisis sísmico de puentes y contribuye a uniformar criterios de diseño dentro del ámbito profesional argentino.

12. REFERENCIAS

- [1] INTI-CIRSOC, *CIRSOC 801: Reglamento Argentino de Puentes*, Buenos Aires, Argentina, 2019.
- [2] INTI-CIRSOC, *CIRSOC 802: Reglamento Argentino de Puentes*, Buenos Aires, Argentina, 2019.
- [3] INPRES-CIRSOC, *Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes – Parte VI: Puentes de Hormigón Armado*, Buenos Aires, Argentina, 2020.
- [4] INPRES-CIRSOC, *Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes – Comentarios a la Parte VI: Puentes de Hormigón Armado*, Buenos Aires, Argentina, 2020.
- [5] AASHTO, *LRFD Bridge Design Specifications*, 8th ed., Washington D.C., USA, 2017.
- [6] Chopra, A. *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, 5th ed., Pearson Education, 2017.
- [7] M. J. N. Priestley, F. Seible y G. M. Calvi, *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, John Wiley & Sons, 1996.

ANEXO 1. EJEMPLO NUMÉRICO

Se presenta un ejemplo de análisis de una pila de un puente clasificado como esencial. La pila es de una sola columna en Zona Sísmica 4 en un sitio tipo C. La pila soporta dos tramos de puentes de 30 metros de luz cada uno con cargas del tren tipo A-30 según el reglamento nacional. La columna es circular de 1.50 metros de diámetro y una altura de 6.0 metros.

Este ejemplo de cálculo se desarrolla siguiendo los lineamientos del Reglamento Argentino INPRES-CIRSOC 103, Parte VI (2020) [3] para una pila de columna única .

1. Caracterización de la Peligrosidad Sísmica

Basándonos en los datos proporcionados y las tablas del reglamento:

- **Zona Sísmica:** 4 (Peligrosidad muy elevada).
- **Tipo de Sitio:** C (Suelos densos o roca blanda).
- **Parámetros Espectrales** (Tabla 3.10.4.1-1):

Para Zona 4 y Sitio C, los valores son:

- A_s (Aceleración máxima del terreno): 0,44
- S_{DS} (Aceleración espectral para período corto): 1,07
- S_{D1} (Aceleración espectral para período de 1 seg): 0,53

2. Determinación de la Zona de Desempeño Sísmico

Según el valor de S_{D1} , se asigna la categoría de desempeño:

- Como $S_{D1} = 0,53$ (es decir, $S_{D1} > 0,50$), el puente pertenece a la **Zona de Desempeño Sísmico 4**.
- Implicancia: Al estar en la zona de mayor exigencia, es obligatorio realizar un análisis de rotulación plástica y diseñar las fundaciones para las fuerzas de sobrerresistencia.

3. Cálculo del Coeficiente Sísmico Elástico

Para determinar la fuerza, primero calculamos los períodos característicos del espectro:

- $T_s = S_{D1} / S_{DS} = 0,53 / 1,07 = 0,495s$ (4)
- $T_0 = 0,2 T_s = 0,2 * 0,495 = 0,099s$ (5)

Suponiendo que el análisis dinámico de la pila (columna de 6m y 1,50m de diámetro) arroja un período fundamental $T_m = 0,8s$ (período largo, ya que $T_m > T_s$):

- $C_{sm} = S_{D1} / T_m = 0,53 / 0,8 = 0,662$. (6)

4. Determinación de las Solicitaciones de Diseño

Para una columna individual de un puente Esencial según la Tabla 3.10.7.1-1), el factor $R = 2,0$

1. **Carga Permanente (W):** Se debe calcular el peso de la superestructura (60m de tramos) más el peso propio de la columna y la carga viva contemporánea. Se asume un peso total tributario $W = 5.000\text{kN}$.

- **Corte Basal Elástico:** $V_e = C_{sm} * W = 0,662 * 5.000\text{kN} = 3.312\text{kN}$. (7)
- **Corte de Diseño Reducido:** $V_u = V_e/R = 3.312\text{kN}/2,0 = 1.656\text{kN}$. (8)
- **Momento de Diseño en Base:** $M_u = V_u * H = 1.656\text{kN} * 6,0\text{m} = 9.938\text{kNm}$ (9)
- **Esfuerzo axial en la Base:** $P_u = 5.000\text{kN} + 600\text{kN} + 2000\text{kN} = 7.600\text{kN}$ (10)

5. Cálculo de Sobrerresistencia (Requerido para Zona 4)

Una vez diseñada la armadura para resistir el M_u , se debe calcular la capacidad máxima real para proteger las fundaciones [6]:

$$\text{Armadura long. } 72\phi 32\text{mm} \rightarrow M_n = 11.044\text{kNm} \quad M_d = \phi M_n ; \quad (11)$$

$$M_d = 0.90 * 11.044\text{kNm} = 9.940\text{kNm} > M_u = 9.938\text{kNm} \quad (12)$$

- **Paso 1 - Momento de Sobrerresistencia:** Se utiliza un factor $\phi = 1,3 p/H^\circ A^\circ$
 - $M_{\Omega_0} = 1,3 * M_n = 1,3 * 11.044\text{kNm} = 14.357\text{kNm}$. (13)
- **Paso 2 - Corte de Sobrerresistencia V_{Ω_0} :** Es el corte asociado a la formación de la rótula plástica.

$$V_{\Omega_0} = M_{\Omega_0} / H = 14.357\text{kNm} / 6,0 \text{ m} = 2.392\text{kN}. \quad (14)$$

Conclusión del ejemplo: La columna se diseña para un corte de **1.656 kN**, pero la fundación y las conexiones deben ser capaces de resistir el corte de sobrerresistencia de **2.392 kN** para garantizar que el la disipación de energía se limite a la columna y no ocurra una falla o plastificación en el sistema de fundación.