

## CLASIFICACIÓN DE PUENTES EN ARGENTINA PARA LA EVALUACIÓN DE SU VULNERABILIDAD SÍSMICA

José A. Saracho<sup>1</sup>, Gustavo A. Pérez<sup>2</sup>, José R. Barlek<sup>1</sup>, Oscar Dip<sup>2</sup>, Eduardo A. Castelli<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Tucumán, Rivadavia 1050 (4000), S. M. de Tucumán, 0381 4217150  
PID UTN Evaluación y rehabilitación de puentes - joseanibalsaracho@yahoo.com.ar.

<sup>2</sup>Universidad Nacional de Tucumán, Av. Independencia 1800 (4000), S. M. de Tucumán, 0381 4364087

<sup>3</sup>Vialidad Nacional, 3º Distrito, Tucumán, Av. Mate de Luna 1981(4000), 0381 4331000

**Resumen:** Recientes progresos en los métodos de evaluación del riesgo sísmico han llevado al desarrollo de funciones de fragilidad para clases específicas de puentes. Como primera etapa, para la construcción de dichas Curvas de fragilidad para puentes en Argentina, ubicados en zonas de elevada y muy elevada peligrosidad sísmica, se procedió a la clasificación de los puentes de la red vial nacional correspondientes a las regiones de Cuyo y NOA en grupos característicos, conforme a los rasgos estructurales que tienen influencia preponderante en la respuesta sísmica de estas estructuras. Para ello, se analizaron estadísticamente los datos de inventario provistos por Vialidad Nacional, a través de su Sistema de Gestión de Puentes, para los distritos de Mendoza, San Juan, La Rioja, Salta y Jujuy. Esta tarea, además de servir para la clasificación ya indicada, permitió identificar aquellos puentes representativos de cada clase, los cuales servirán de ejemplares para posteriores análisis estructurales.

**Palabras Claves:** Puentes, Clasificación, Vulnerabilidad sísmica, Evaluación.

**Abstract:** Recent advances in the methods of seismic risk assessment led to the development of fragility functions for specific classes of bridges. As a first step for the construction of such fragility curves for bridges in Argentina located in areas of high and very high seismic hazard, the classification of bridges corresponding national road network to the regions of Cuyo and NOA in characteristic groups according to the structural features that have major influence on the seismic response of these structures was performed. To do this, the inventory data provided by National Highways Administration, through its Bridge Management System (SIGMA Bridges) to the districts of Mendoza, San Juan, La Rioja, Salta and Jujuy were statistically analyzed. This task, in addition to serving for classification as indicated, allowed to identify those representative bridges of each class, which will serving as examples for further structural analysis.

**Keywords:** Bridges, Classification, Seismic vulnerability, Assessment.

### INTRODUCCIÓN

El daño sísmico reportado después de sismos importantes ocurridos en los últimos años en distintas partes del mundo ha vuelto a manifestar que los puentes son los componentes más vulnerables de los sistemas de transporte. Como consecuencia de estos daños se producen interrupciones significativas de las redes de trans-

porte, ocasionando graves pérdidas económicas indirectas. Asimismo, la necesidad de mantener operativas dichas redes para la atención de la emergencia, luego de la ocurrencia del evento sísmico, indica la importancia de que los puentes permanezcan en estado operacional, o de que al menos tengan función parcial y que la total sea restablecida en tiempos mínimos. Una manera de verificar la aptitud estructural de los puentes

para cumplir con estos requerimientos lo constituye la evaluación de su vulnerabilidad sísmica.

Una evaluación preliminar de la vulnerabilidad sísmica de puentes permite identificar aquellas estructuras sísmicamente deficientes y establecer prioridades y pautas relacionadas con la necesidad de su rehabilitación, refuerzo o reemplazo. En este sentido, recientes progresos en los métodos de evaluación del riesgo sísmico han llevado al desarrollo de funciones de fragilidad para clases específicas de puentes. Esta metodología, de tipo analítica, resulta más rigurosa que aquella basada simplemente en la obtención de índices, de tipo empírica, en el caso de los procedimientos denominados de Inspección y puntaje, en razón de que se tienen en cuenta las incertidumbres involucradas.

Como primera etapa, para la construcción de dichas Curvas de fragilidad para puentes en Argentina ubicados en zonas de elevada y muy elevada peligrosidad sísmica, se procedió a la clasificación de los puentes de la red vial nacional correspondientes a las regiones de Cuyo (centro-oeste del territorio nacional) y NOA (NOroeste Argentino) en grupos característicos, conforme a los rasgos estructurales que tienen influencia preponderante en la respuesta sísmica de estas estructuras.

Prueba de la utilidad y potencialidad de esta metodología de evaluación de la vulnerabilidad sísmica es que en años recientes se desarrollaron Curvas de fragilidad analíticas para los puentes de la red vial de distintos países. Es este sentido se destacan los siguientes trabajos:

*(Avşar Ö. et al., 2011), para puentes de Turquía, mediante análisis no lineal dinámico.*

*(Azevedo J. et al., 2010), para Portugal, análisis no lineal estático.*

*(Banerjee S. y Shinozuka M., 2008), para los*

*Estados Unidos, análisis no lineal dinámico.*

*(Cardone D. et al., 2011), Italia, análisis por método espectral de capacidad adaptativa inversa.*

*(Fardis M.N. et al., 2012), para la red europea de caminos, análisis no lineal dinámico.*

*(Franchin P. et al., 2008), Italia, análisis no lineal dinámico.*

*(Jeong S. H. et al., 2007), Estados Unidos y Japón, análisis no lineal dinámico.*

*(Kappos A. et al., 2006), Grecia, análisis no lineal dinámico.*

*(Karim K. R. et al., 2003), Japón, análisis no lineal dinámico.*

*(Moschonas I. F., 2009), Grecia, análisis no lineal estático.*

*(Nielsen y DesRoches, 2007), Estados Unidos, análisis no lineal dinámico.*

*(Yi J. H. et al., 2011), Estados Unidos, análisis no lineal dinámico.*

En América latina los estudios de vulnerabilidad sísmica a través de Curvas de fragilidad se orientaron más bien a las edificaciones, tales como edificios públicos, residenciales, educacionales y hospitalarios. Particularmente, con respecto a los puentes existen trabajos aislados como el de (Olmos et al., 2011), en el que se propusieron Curvas de fragilidad para puentes reales e hipotéticos en el estado de Michoacán, México y el estudio de (Gomez Soberón et al., 2013), en donde se presentan Curvas de fragilidad para tres puentes carreteros tipos de aquel país. En general, los estudios de vulnerabilidad sísmica de puentes se orientaron preferentemente hacia la adaptación de metodologías utilizadas en países desarrollados. Tal es el caso del trabajo de (Galo Atiaga et al., 2003), en donde se realiza una aplicación y adaptación de la metodología americana HAZUS (FEMA, 2003) para evaluar los puentes del distrito metropolitano de QUITO, Ecuador.

En Argentina, son escasos los trabajos en la materia. La vulnerabilidad sísmica de puentes ha sido tratada de manera aislada en algunos trabajos, como el de (Méndez, 2012). Allí se aplicó y adaptó la metodología americana de la FHWA (Federal Highway Administration) (FHWA, 2006) a unos pocos puentes ubicados en la ciudad de San Miguel de Tucumán.

Por ende, en nuestro país es de suma necesidad e importancia incrementar estos estudios y abordarlos a una escala regional, a fin de desarrollar las Curvas de fragilidad de los tipos de puentes más frecuentes. De esta manera, organismos como Vialidad Nacional, Vialidades provinciales, Municipios y Concesionarios viales contarán con una base de datos para la toma de decisiones durante los procesos de inspección, mantenimiento o rehabilitación sísmica de estas obras de infraestructura.

## METODOLOGÍA

Cuando se evalúa la vulnerabilidad sísmica de puentes de una región determinada, lo ideal sería contar con los planos y memorias de cada puente y generar sus respectivas Curvas de fragilidad. No obstante, esto no es posible porque no se tienen todos los antecedentes y porque, además, un procedimiento así demandaría la participación de gran cantidad de personas e insumiría mucho tiempo. Dado el hecho de que los puentes de una región en particular presentan ciertas similitudes, se pueden definir algunas clases generales de puentes que los agrupen en determinada tipología estructural. Luego, la tarea consiste en generar Curvas de fragilidad para las clases típicas de puentes y no para obras de arte particulares. Dichas clases son definidas en la hipótesis de que aquellos puentes asignados a ellas tendrán respuestas similares ante la excitación sísmica.

Se debe partir de la premisa de identificar un número manejable de clases típicas de puentes que representen una porción significativa del inventario global. Para llevar a cabo la clasificación objeto de este estudio es esencial realizar un estudio pormenorizado del inventario de puentes de las regiones de Cuyo y NOA provisto por la base de datos del Sistema de Gestión SIGMA Puentes, que comprende los Distritos de San Juan, Mendoza, La Rioja, Salta y Jujuy. La cantidad total de puentes inventariados en dichos Distritos es de 827 y constituye el universo muestral sobre el cual se llevó adelante este trabajo.

Para hacer la clasificación deben identificarse aquellos parámetros estructurales que tengan influencia predominante en la respuesta sísmica de los puentes.

En estudios previos fueron empleadas diferentes propiedades estructurales para clasificar los puentes en grupos. El consejo de Tecnología Aplicada de California (ATC, 1985), a través de su reporte ATC-13, considera solo dos clases de puentes de acuerdo a su longitud total. Así se tienen los puentes convencionales, de menos de 152 m, y los mayores, de longitud superior. A su vez, los convencionales se agrupan en: tramos múltiples simplemente apoyados y monolíticos continuos. Se trata de una clasificación muy amplia que omite diversas características estructurales que afectan el desempeño sísmico de un puente, tales como el material, las propiedades de la subestructura, ángulo de oblicuidad, etc.

En la clasificación desarrollada por (Basoz y Kiremidjian, 1996), los puentes son agrupados de acuerdo a número de tramos, tipo de superestructura, tipo de subestructura y material, tipo de estribo, y continuidad estructural de los tramos. Se tienen en este caso dos clases principales: puentes de un tramo y de múlti-

ples tramos. En función del tipo de estribo se cuenta con tres sub-categorías para la primera clase. A su vez para la segunda, en consideración del tipo de estribo, tipo de pila y continuidad estructural, se tienen 18 sub-categorías.

La Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos (FHWA), a través de la Guía de Registro y Codificación (FHWA, 1988) define las clases de puentes de acuerdo con el tipo de superestructura, material, y continuidad estructural en apoyos. Dicha clasificación fue modificada por (Hwang et al., 2000) para incluir información de las pilas.

En el estudio de (Nielson et al., 2007) se asignan 11 clases de puentes basadas en el material constitutivo, tipo de construcción y número de tramos.

La metodología HAZUS correspondiente a la Agencia Federal de Gestión de la Emergencia en los Estados Unidos (FEMA, 2003) ofrece una clasificación basada en las siguientes características estructurales:

- Diseño sísmico.
- Número de tramos: simple o múltiples.
- Tipo de estructura: hormigón, acero u otras.
- Tipo de pila: de columnas múltiples, de columna simple o de pared sólida.
- Tipo de estribo y tipo de apoyo: monolítico, no monolítico; apoyos metálicos, apoyos de neopreno.
- Continuidad estructural: continuo, discontinuo (articulación en tramos) y simplemente apoyada.

Esta clasificación incorpora diversos parámetros que afectan al daño en el análisis de fragilidad. En este sentido, se define un total de 28 clases de puentes.

De la información cargada en la base de datos, se pesquisaron los siguientes parámetros para su análisis:

- Número de tramos.
- Máxima longitud de tramos.
- Ancho de tablero.

- Altura de pila.
- Ángulo de oblicuidad.
- Tipo de superestructura.
- Tipo de pila.

Esta información servirá para brindar la configuración geométrica típica de cada clase de puente.

Para casi todos los ítems mencionados, es suficiente notar su tendencia general, a través del valor medio, la desviación estándar y la mediana. Para otros, es necesario explorar su probabilidad relativa; tal es el caso del Número de Tramos y la Altura de Pila. Esta última información puede ser formulada y presentada a través de estimaciones surgidas por aplicación de las leyes de probabilidad. Se aplicará un método simple, consistente en la representación no paramétrica de la distribución de probabilidad para la serie de datos provista. En el caso de los Tipos de superestructura y pila bastará con analizar la distribución porcentual de cada configuración.

Adicionalmente, se presentan datos estadísticos sobre el año de construcción de cada clase de puentes con el propósito de inferir, a través de la antigüedad de los mismos, si en su proyecto fue tenido en cuenta algún tipo de previsión sismorresistente. En este sentido cabe destacar la evolución de la normativa sismorresistente en nuestro país. En 1970 el INPRES elabora el Reglamento Nacional de construcciones Antisísmicas (CONCAR 70, 1970). Ese reglamento fue actualizado en 1980, convirtiéndose en las Normas Antisísmicas Argentinas (NAA 80, 1980), que contemplan disposiciones específicas para puentes. Tales disposiciones no fueron actualizadas en los reglamentos posteriores ((INPRES-CIRSOC 103, 1983) e (INPRES-CIRSOC 103, 2008)) y siguen teniendo vigencia para el proyecto de puentes en todo el territorio nacional, por lo que han quedado obsoletas respecto del actual estado del conocimiento.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Un primer análisis estadístico consiste en determinar los porcentajes de las distintas tipologías de puentes existentes. En la Tabla 1 se muestra esta información.

TIPO DE PUENTE	PORCENTAJE
PUENTES DE VIGAS DE HORMIGÓN ARMADO O PRETENSADO	55,50 %
PUENTES METÁLICOS	3,42 %
PUENTES EN ARCO	2,08 %
PUENTES LOSA	39,00 %

TABLA 1: DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE LOS TIPOS DE PUENTES DEL INVENTARIO.

Dados los bajos porcentajes de los puentes metálicos y en arco, estos tipos son descartados para la clasificación.

Otro análisis oportuno lo constituye la distribución porcentual del esquema estructural para cada una de las siguientes tipologías: Puentes Losa, Puentes de Vigas Cajón y Puentes de Vigas Rectangulares, T y Doble T. Estos datos son presentados en las Tablas 2, 3 y 4.

ESQUEMA ESTRUCTURAL EN PUENTES LOSA	PORCENTAJE
SIMPLEMENTE APOYADOS	86,21 %
CONTINUOS	13,19 %

TABLA 2: DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DEL ESQUEMA ESTRUCTURAL PARA PUENTES LOSA

ESQUEMA ESTRUCTURAL EN PUENTES DE VIGAS CAJÓN	PORCENTAJE
SIMPLEMENTE APOYADOS	93,33 %
CONTINUOS	6,67 %

TABLA 3: DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DEL ESQUEMA ESTRUCTURAL PARA PUENTES DE VIGAS CAJÓN.

ESQUEMA ESTRUCTURAL EN PUENTES DE VIGAS CAJÓN	PORCENTAJE
SIMPLEMENTE APOYADOS	93,33 %
CONTINUOS	6,67 %

TABLA 4: DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DEL ESQUEMA ESTRUCTURAL PARA PUENTES DE VIGAS RECTANGULARES, T Y DOBLE T.

Según se aprecia en estas Tablas, debido a los bajos porcentajes revelados de los Puentes de Losa Continuos y de los de Vigas Cajón Continuos, estos tipos tampoco se tomarán en consideración para la clasificación.

Para el caso de los Puentes Losa y de los Puentes de Vigas se analizan también la distribución porcentual para los simplemente apoyados en relación al número de tramos, trátase de un tramo o de múltiples tramos. Las Tablas 5 y 6, respectivamente, brindan esta información.

TRAMOS EN PUENTES LOSA SIMPLEMENTE APOYADOS	PORCENTAJE
UN TRAMO	8,00 %
TRAMOS MÚLTIPLES	92,00 %

TABLA 5: DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL PARA PUENTES LOSA SIMPLEMENTE APOYADOS EN RELACIÓN AL NÚMERO DE TRAMOS Y DOBLE T.

TRAMOS EN PUENTES DE VIGAS SIMPLEMENTE APOYADOS	PORCENTAJE
UN TRAMO	31,60 %
TRAMOS MÚLTIPLES	68,40 %

TABLA 6: DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL PARA PUENTES DE VIGAS SIMPLEMENTE APOYADOS EN RELACIÓN AL NÚMERO DE TRAMOS.

Puede advertirse el bajo porcentaje de Puentes Losas Simplemente Apoyados de un tramo, razón por la cual éstos serán ignorados en la clasificación.

Partiendo de los estudios previos realizados y de los anteriores considerandos, se decidió adoptar cinco clases de puentes basadas en el material de construcción, tipología estructural y número de tramos. En la Tabla 7 se ofrece un listado de dichas clases junto con su designación abreviada.

A continuación se presentan los resultados y análisis de cada uno de los datos estudiados del inventario.

CLASE	DECIGNACIÓN
VIGAS DE HORMIGÓN CONTINUAS EN TRAMOS MÚLTIPLES	VH-CTM
VIGAS DE HORMIGÓN SIMPLEMENTE APOYADAS EN TRAMOS MÚLTIPLES	VH-SATM
VIGAS CAJÓN DE HORMIGÓN SIMPLEMENTE APOYADAS EN TRAMOS MÚLTIPLES	VCH-SATM
LOSAS SIMPLEMENTE APOYADAS EN TRAMOS MÚLTIPLES	L-SATM
VIGAS DE HORMIGÓN SIMPLEMENTE APOYADAS	VH-SA

TABLA 7: CLASES DE PUENTES Y SU DESIGNACIÓN ABREVIADA.

### NÚMERO DE TRAMOS

Dado que el número de tramos toma valores discretos en la forma de números enteros, resulta apropiado adoptar para este parámetro una distribución discreta. Debido a la propia naturaleza de las distribuciones discretas no es necesario ajustar los datos a una distribución conocida, sino más bien examinar la frecuencia de los datos de cada valor del número de tramos. De esta manera, en este estudio, se generó la función densidad de probabilidad no paramétrica para el número de tramos de cada clase de puente. Esto fue logrado por conteo de la cantidad de puentes con un dado número de tramos y dividiéndolos por el total de puentes. Las Figs. 1 a 4 muestran las funciones de densidad de probabilidad para cada una de las 4 clases de puentes de tramos múltiples. La Tabla 8 ofrece algunas de las estadísticas para este parámetro en cada una de las citadas clases de puentes.

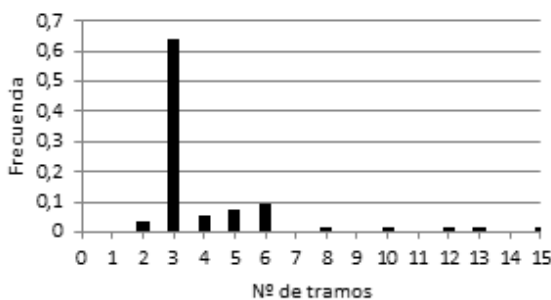


FIG. 1: FUNCIÓN DENSIDAD DE PROBABILIDAD NO PARAMÉTRICA PARA PUENTES VH-CTM.

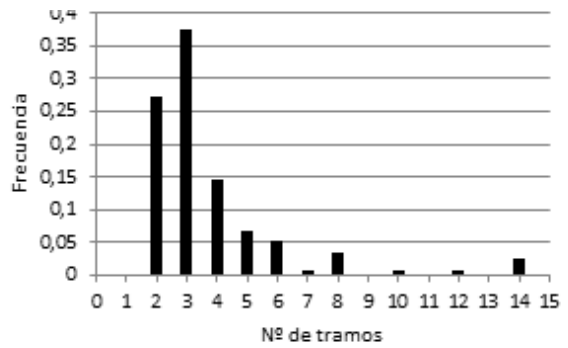


FIG. 2: FUNCIÓN DENSIDAD DE PROBABILIDAD NO PARAMÉTRICA PARA PUENTES VH-SATM.

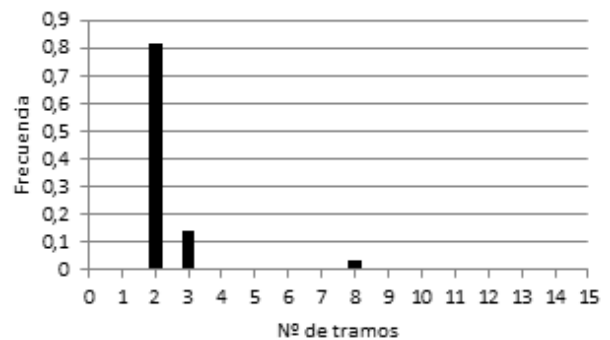


FIG. 3: FUNCIÓN DENSIDAD DE PROBABILIDAD NO PARAMÉTRICA PARA PUENTES VCH-SATM.

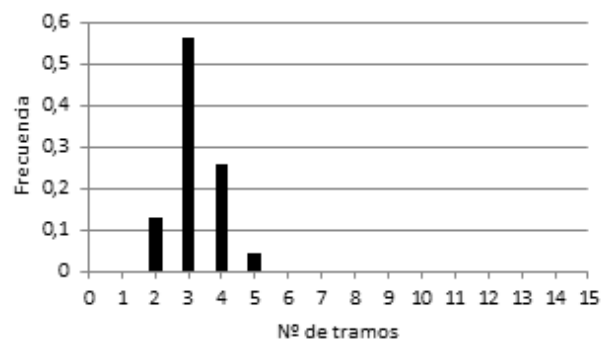


FIG. 4: FUNCIÓN DENSIDAD DE PROBABILIDAD NO PARAMÉTRICA PARA PUENTES L-SATM

CLASE	PROMEDIO	DESV. EST.	MEDIANA	MODA
VH-CTM	4,26	2,70	3	3
VH-SATM	3,79	2,40	3	3
VCH-SATM	2,36	1,16	2	2
L-SATM	3,22	0,74	3	3

TABLA 8: ESTADÍSTICAS DEL PARÁMETRO NÚMERO DE TRAMOS PARA LAS CUATRO CLASES DE TRAMOS MÚLTIPLES.

Hay puntos interesantes a resaltar con respecto a estas estadísticas. El examen de las funciones de densidad de probabilidad revela que la gran mayoría de los Puentes de Vigas (más del 90 %) tiene entre dos y seis tramos. Por su parte, más del 82 % de los puentes de sección cajón poseen dos tramos. En el caso de los Puentes Losa, más del 95 % tienen entre dos y cuatro tramos.

También es importante notar en la Tabla 8, que el número de tramos más probable, para ambas clases de Puentes de Vigas y para los Puentes Losa, es tres; para el caso de los Puentes de Vigas Cajón, resulta ser dos tramos.

Habida cuenta de la necesidad de simplificar el camino para la construcción de las Curvas de fragilidad, estas cantidades de tramos serán usadas en los respectivos modelos analíticos que se generarán a posteriori.

### LONGITUD MÁXIMA DE TRAMOS

El inventario no brinda directamente la longitud de cada tramo de un puente, sino que provee la longitud del más largo. Aunque esto no da una descripción completa de la configuración del puente, brinda una sólida base a partir de la cual hacer hipótesis. En este estudio se asume que dicha configuración es simétrica a lo largo del puente.

Algunas estadísticas básicas (media aritmética, mediana y desviación estándar) para la longitud máxima de tramo de cada clase de puentes son presentadas en la Tabla 9. Estas estadísticas son útiles al dar una idea de la tendencia central y dispersión.

Hay unas cuantas tendencias que presenta este parámetro que resultan de valor. En el caso de los Puentes de Vigas, lo previsible era que las longitudes de tramos continuos sean mayores que las de los simplemente apoyados, cuestión que no se da aquí al contar con un promedio

de 18.50 m para los primeros y 22.32 m para los segundos. Esto puede atribuirse a que los puentes de vigas continuas resultan ser los más antiguos del acervo; los mismos fueron construidos antes de 1970 (ver Tabla 26) y, dadas las técnicas constructivas utilizadas en aquellos tiempos, para ellos se acostumbraba a emplear ese rango de luces.

CLASE	PROMEDIO (M)	DESV. EST. (M)	MEDIANA (M)
VH-CTM	18,50	5,38	18,23
VH-SATM	22,32	6,98	22,20
VCH-SATM	31,29	5,66	31,31
L-SATM	19,41	4,36	17,95
VH-SA	24,73	7,93	27,45

TABLA 9: ESTADÍSTICAS DEL PARÁMETRO LONGITUD MÁXIMA DE TRAMOS PARA LAS CINCO CLASES DE PUENTES.

Cuando se compara la clase de puentes de Vigas de Hormigón VH-SATM con su equivalente en Losa L-SATM, se observa que los primeros tienen longitudes algo mayores; en promedio se tienen 22.32 m para el primero y 19.41 m para el segundo.

### ANCHO DE TABLERO

El Ancho de tablero registrado en el Inventario es la distancia medida en forma perpendicular a la línea central del puente, que incluye calzada, aceras y vigas de borde. Una vez más, el promedio, desviación estándar y mediana para cada clase de puente son calculados y son presentados en Tabla 10.

CLASE	PROMEDIO (M)	DESV. EST. (M)	MEDIANA (M)
VH-CTM	10,02	2,51	9,72
VH-SATM	11,02	2,08	10,70
VCH-SATM	11,86	2,71	11,20
L-SATM	12,75	4,11	12,11
VH-SA	13,04	4,25	13,33

TABLA 10: ESTADÍSTICAS DEL PARÁMETRO ANCHO DEL TABLERO PARA LAS CINCO CLASES DE PUENTES.

Puede apreciarse que la clase de puente con menor ancho promedio, 10.02 m, es la de Vigas de Hormigón Continua y de Tramos múltiples. Las de mayor ancho son: la de Losas Simplemente Apoyadas con Tramos Múltiples junto a la de Vigas de Hormigón Simplemente Apoyadas, con 12.75 m y 13.04 m respectivamente.

### ALTURA DE PILAS

La respuesta sísmica de un puente es sensible a la altura de las pilas. El Inventario no registra explícitamente esta magnitud, no obstante se cuenta con dos tipos de datos a partir de los cuales puede inferirse la altura máxima de las pilas. Uno de ellos es el gálibo mínimo, que es la distancia entre la superficie de la calzada de la ruta que pasa por debajo del puente y el fondo de vigas de la superestructura, el cual figura en la planilla de inventario. El otro dato lo constituye la batimetría del perfil transversal, que se extrae de las Planilla de relevamiento en el caso de puentes ubicados sobre cursos de agua.

Para que sea posible hacer una inferencia más sólida sobre la altura máxima de pilas se optó por combinar los datos de todas las clases de puentes y a partir de ello pudo estimarse una Función de densidad de probabilidad (Fig. 5). Se parte

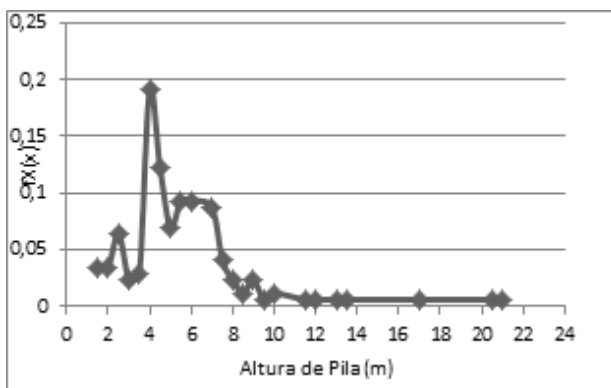


FIG. 5. FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD PARA LA ALTURA MÁXIMA DE PILAS EN TODAS LAS CLASES DE PUENTES.

entonces de la hipótesis de que todas las clases de puentes tienen alturas similares de pilas.

El examen del diagrama de frecuencia muestra que los datos tienen dos picos máximos distintos, 4m y 6m respectivamente. Otras estadísticas tales como el promedio y la desviación estándar resultan menos informativas para este caso de Distribución multimodal, ya que éstas son adecuadas para los casos de distribución unimodal. Se adoptará para toda clase de puente una altura de pilas de 4 m, que constituye el pico más alto del diagrama.

### ÁNGULO DE OBLICUIDAD

El Ángulo de Oblicuidad es el ángulo que forma la línea de una de las pilas del puente con el eje central longitudinal del mismo. Cuando este ángulo  $\theta$  se hace grande puede alterar significativamente la respuesta de la estructura. Por esta razón este parámetro fue investigado para cada clase de puente.

En la Tabla 11 se presentan: promedio, desviación estándar y mediana de este parámetro para cada una de las clases de puentes. Asimismo, resulta de interés apreciar los porcentajes de puentes dentro de ciertos rangos del ángulo de oblicuidad para cada una de dichas clases. De esta manera, en la Tabla 12 se ofrecen los porcentajes distribuidos en cuatro rangos, a saber:  $\theta = 0^\circ$ ,  $1^\circ \leq \theta < 15^\circ$ ,  $15^\circ < \theta < 30^\circ$  y  $\theta \geq 30^\circ$ .

CLASE	PROMEDIO (M)	DESV. EST. (M)	MEDIANA (M)
VH-CTM	89	11,53	90
VH-SATM	87	13,78	90
VCH-SATM	84	13,75	88
L-SATM	88	7,28	90
VH-SA	89	13,98	90

TABLA 11: ESTADÍSTICAS DEL PARÁMETRO ÁNGULO DE OBLICUIDAD PARA LAS CINCO CLASES DE PUENTES.



CLASE	RANGO DEL ÁNGULO DE OBLICUIDAD			
	90°	1° - 15°	15° - 30°	> 30°
VH-CTM	75.56%	6.67%	13.33%	4.44%
VH-SATM	70.18%	9.65%	12.28%	7.89%
VCH-SATM	21.43%	42.86%	28.57%	7.14%
L-SATM	94.12%	0%	0%	5.88%
VH-SA	70.37%	11.11%	7.41%	11.11%

TABLA 12: DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL POR RANGOS DEL ÁNGULO DE OBLICUIDAD PARA LAS CINCO CLASES DE PUENTES.

Es interesante resaltar que, contemplando las cinco clases de puentes, los ángulos de oblicuidad menores a 15° acusan porcentajes de: 64.29% para la clase VCH-SATM, 79.82% para VH-SATM, 81.48 % para VH-SA, 82.22% para VH-CTM y 94.12% para L-SATM. Esto implica que la mayoría de los puentes considerados en este estudio tienen pequeño ángulo de oblicuidad, por lo cual queda justificado ignorar la influencia de este parámetro en el análisis de fragilidad de estas clases de puentes.

### TIPO DE SUPERESTRUCTURA

Con vistas a dirimir las secciones transversales típicas que se usarán en los modelos estructurales de las distintas clases de puentes, se realizó un estudio estadístico que contempla:

- La distribución porcentual del Número de Vigas en Puentes de Clase VCH-SATM (Tabla 13), de Clases VH-SATM y VH-SA (Tabla 16) y de Clase VH-CTM (Tabla 20).

- La distribución porcentual del tipo de viga en la conformación de la sección transversal del

CLASE VCH-SATM			
Nº DE VIGAS	1	2	4
PORCENTAJE	90.91%	6.82%	2.27%

TABLA 13: DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DEL Nº DE VIGAS EN PUENTES DE VIGA CAJÓN, CLASE VCH-SATM.

puente, para Clases VH-SATM y VH-SA (Tabla 14) y para VH-CTM (Tabla 19).

- Promedio, Desviación estándar y mediana de la Separación entre Vigas Rectangulares para las Clases VH-SATM y VH-SA (Tabla 17) y entre Vigas Doble T para las mismas clases (Tabla 18).

TIPO DE VIGA	PORCENTAJE
RECTANGULA	39.44%
T	1.41%
DOBLE T	59.15%

TABLA 14: DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DEL TIPO DE VIGA EN PUENTES DE VIGAS DE LAS CLASES VH-SATM Y VH-SA.

CLASES VH-SATM Y VH-SA								
Nº DE VIGAS	2	3	4	5	6	8	12	16
%	10	10	52,5	5	5	12.5	2.5	2.5

TABLA 15: DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DEL Nº DE VIGAS PARA PUENTES DE VIGAS DE SECCIÓN RECTANGULAR, CLASES VH-SATM Y VH-SA.

CLASES VH-SATM Y VH-SA									
Nº DE VIGAS	3	4	5	6	7	8	10	12	16
%	4,9	36,6	19,5	24,4	4,9	4,9	1,2	2,4	1,2

TABLA 16: DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DEL Nº DE VIGAS PARA PUENTES DE VIGAS DE SECCIÓN DOBLE T, CLASES VH-SATM Y VH-SA.

SEPARACIÓN ENTRE VIGAS RECTANGULARES (M) PARA 4 VIGAS EN TOTAL	
PROMEDIO	2,30
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	0,19
MEDIANA	2,4

TABLA 17: ESTADÍSTICAS DE LA SEPARACIÓN ENTRE VIGAS PARA SECCIÓN TRANSVERSAL DE 4 VIGAS RECTANGULARES EN CLASES VH-SATM Y VH-SA.

SEPARACIÓN VIGAS DOBLE T (M)			
Nº DE VIGAS TOTAL	4 VIGAS	5 VIGAS	6 VIGAS
PROMEDIO	2,52	2,39	1,84
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	0,21	0,29	0,13
MEDIANA	2,5	2,4	1,9

TABLA 18: ESTADÍSTICAS DE LA SEPARACIÓN ENTRE VIGAS PARA SECCIÓN TRANSVERSAL DOBLE T, EN CLASES VH-SATM Y VH-SA.

TIPO DE VIGA	PORCENTAJE
RECTANGULAR	100 %
DOBLE T	0 %

TABLA 19: DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DEL TIPO DE VIGA EN PUENTES DE VIGAS CONTINUOS, CLASES VH-CTM.

CLASE VH-CTM				
Nº DE VIGAS	2	3	4	5
PORCENTAJE	6.67 %	4.44%	86.67%	2,22%

TABLA 20: DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DEL Nº DE VIGAS EN PUENTES DE VIGAS CONTINUOS, CLASE VH-CTM.

SEPARACIÓN ENTRE VIGAS RECTANGULARES (M) PARA 4 VIGAS EN TOTAL	
PROMEDIO	2,28
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	0,32
MEDIANA	2,4

TABLA 21: ESTADÍSTICAS DE LA SEPARACIÓN ENTRE VIGAS PARA SECCIÓN TRANSVERSAL DE 4 VIGAS RECTANGULARES EN CLASE VH-CTM.

En Tabla 13 puede verse que más del 90 % de los puentes de Vigas de sección Cajón de la clase VCH-SATM poseen una sola viga de este tipo, por lo cual esta será la configuración elegida para la conformación de los modelos respectivos. La Tabla 14 muestra que en el caso de los puentes de Vigas, de clases VH-SATM y VH-SA, las secciones mayormente usadas son la Doble T y la Rectangular, con porcentajes superiores al 59% y 39% respectivamente. La Tabla 15 indica que para los puentes de vigas de sección rectangular, clases VH-SATM y VH-SA, la configuración mayoritaria es la constituida por 4 vigas, con un porcentaje mayor al 52%. En la misma dirección, la Tabla 16 muestra que para el caso de vigas Doble T, las configuraciones dominantes son las de 4, 5 y 6 vigas, representado más del 80% del total.

En cuanto a las separaciones, la Tabla 17 indica que la magnitud dominante es 2.4 m para la configuración de 4 vigas rectangulares en puentes de clases VH-SATM y VH-SA. Por su parte, para las

mismas clases de puentes, con vigas doble T se tienen: 2.5 m para 4 vigas, 2.4 m para 5 vigas y 1.9 m para 6 vigas.

Para los Puentes de Vigas Continuos de clase VH-CTM, en la totalidad de los casos se registra la presencia de vigas rectangulares (Tabla 19). La tabla 20 deja ver que la configuración dominante se constituye de 4 vigas, con más del 86 % de los casos. Para esta conformación la separación más frecuente es 2.4 m.

### TIPOS DE PILA

Para establecer las tipologías de pilas más habituales en las distintas clases de puentes de tramos múltiples, se llevó a cabo un análisis de la distribución porcentual de dichas tipologías para cada una de estas clases. En Tablas 21 a 24 se presentan tales distribuciones porcentuales.

TIPO DE PILA	PORCENTAJE
PILA SÓLIDA	83.93%
2 O MÁS COLUMNAS CON CABEZAL COMÚN	1.79%
2 O MÁS COLUMNAS CON DINTEL COMÚN	3.57%
2 O MÁS COLUMNAS SIN DINTELES	1.79%
COLUMNA CON DINTEL	1.79%
OTRO	7.14%

TABLA 21: DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DEL TIPO DE PILA EN PUENTES DE VIGAS DE CLASE VH-CTM.

TIPO DE PILA	PORCENTAJE
PILA SÓLIDA	83.93%
COLUMNA SIN DINTEL	1.79%

TABLA 22: DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DEL TIPO DE PILA EN PUENTES DE VIGAS CAJÓN DE CLASE VCH-SATM.

En Tabla 21 puede observarse que la conformación más común de Pilas en el caso de puentes de vigas continuos de clase VH-CTM está constituida por Tabiques, designadas aquí como "Pilas

sólidas”, con casi el 84 % del total.

Asimismo, las Tablas 22, 24 y 25, respectivamente, ponen en evidencia la prevalencia de este mismo tipo de pila en los casos de puentes de vigas cajón (VCH-SATM), puentes de vigas rectangulares de clase VH-SATM y en puentes Losa de clase L-SATM.

TIPO DE PILA	PORCENTAJE
PILA SÓLIDA	85.42%
COLUMNA SIN DINTEL	4.17%
2 O MÁS COLUMNAS CON CABEZAL COMÚN	8.33%
2 O MÁS COLUMNAS CON DINTEL COMÚN	2.08%

TABLA 23: DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DEL TIPO DE PILA EN PUENTES DE VIGAS RECTANGULARES DE CLASE VH-SATM.

TIPO DE PILA	PORCENTAJE
PILA SÓLIDA	45.45%
2 O MÁS COLUMNAS CON CABEZAL COMÚN	43.64%
2 O MÁS COLUMNAS CON DINTEL COMÚN	3.64%
OTRO	7.27%

TABLA 24: DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DEL TIPO DE PILA EN PUENTES DE VIGAS DOBLE T DE CLASE VH-SATM.

TIPO DE PILA	PORCENTAJE
PILA SÓLIDA	78.26%
2 O MÁS COLUMNAS SIN DINTEL COMÚN	4.35%
COLUMNA SIN DINTEL	17.39%

TABLA 25: DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DEL TIPO DE PILA EN PUENTES LOSA DE CLASE L-SATM.

Por lo tanto, ésta es la configuración que se utilizará en los modelos estructurales para las citadas clases de puentes.

El único caso que se aparta de esta tendencia es el de los puentes de vigas doble T de clase VH-SATM, con una distribución prácticamente pareja entre los tipos de “pila sólida” y de “dos o más columnas con dintel común”, que representan cerca del 90 % del total, según puede advertirse en Tabla 24.

## AÑO DE CONSTRUCCIÓN

Como información adicional, en la Tabla 26 se presentan los valores de las medianas que corresponden al año de construcción para cada clase de puentes.

CLASE DE PUENTE		MEDIANA (AÑO)
VH-CTM		1970
VH-SATM	RECTANGULAR	1973
	DOBLE T	1986
VCH-SATM		1977
L-SATM		1981
OTRO VH-SA	RECTANGULAR	1970
	CAJÓN	1977
OTRO	DOBLE	2003

TABLA 26: MEDIANA DEL AÑO DE CONSTRUCCIÓN PARA CADA CLASE DE PUENTES.

Se observa que los puentes más viejos del acervo corresponden a las siguientes clases: los de vigas continuas (VH-CTM), los de vigas rectangulares simplemente apoyadas en tramos múltiples (VH-SATM) y los del mismo tipo de vigas con un solo tramo (VH-SA). En estos casos, al tratarse de puentes construidos en su mayoría antes de la década del 70, se considera que los mismos se proyectaron sin ningún tipo de previsión sismorresistente.

## CONCLUSIONES

Se presentó una metodología para identificar las clases típicas de puentes en las regiones de elevada y muy elevada peligrosidad sísmica del territorio de la República Argentina para la evaluación de su vulnerabilidad sísmica a través de Curvas de fragilidad.

Se identificaron 5 clases de Puentes, a saber: 1) Vigas de Hormigón Continuas en Tramos Múltiples, 2) Vigas de Hormigón Simplemente

Apoyadas en Tramos Múltiples, 3) Vigas Cajón de Hormigón Simplemente Apoyadas en Tramos Múltiples, 4) Losas Simplemente Apoyadas en Tramos Múltiples y 5) Vigas de Hormigón Simplemente Apoyadas de un Tramo.

En base al estudio estadístico del inventario de puentes de la región analizada se establecieron las magnitudes de los parámetros característicos de cada una de las clases: Número de tramos, Máxima longitud de tramos, Ancho de tablero, Altura de pilas, Tipo de superestructura y Tipo de pila. Dado el pequeño a nulo ángulo de oblicuidad acusado por la gran mayoría de los puentes, se justificó no tomar en consideración este parámetro.

Asimismo se determinó que, por el año de su construcción, los puentes de las clases: a) Vigas de Hormigón Continuas en Tramos Múltiples, b) Vigas Rectangulares de Hormigón Simplemente Apoyadas en Tramos Múltiples y c) Vigas Rectangulares de Hormigón Simplemente Apoyadas de un Tramo, se proyectaron sin ningún tipo de previsión sismorresistente.

Estos resultados son de suma utilidad, ya que constituyen la base a partir de la cual se elegirán los puentes representativos de cada clase, los cuales servirán para posteriores análisis estructurales. Con los resultados obtenidos de dichos análisis se podrán desarrollar las Curvas de fragilidad para las distintas clases de puentes característicos.

## REFERENCIAS

Avsar O., Yakut A., Caner A., "Analytical fragility curves for ordinary highway bridges in Turkey", *Earthquake Spectra*, 27(4), 971-996, (2011).

Azevedo J., Guerreiro L., Bento R., Lopes M., Proenca J., "Seismic vulnerability of lifelines in the greater Lisbon area", *Bulletin of Earthquake Engineering* 8(1), 157-180, (2010).

Banerjee S y Shinozuka M., "Mechanistic quantification of RC bridge damage states under earthquake through fragility analysis", *Probabilistic Engineering Mechanics* 23(1), 12-22, (2008).

Cardone D., Perrone G., Sofis S., "A performance-based adaptive methodology for the seismic evaluation of multi-span simply supported deck bridges", *Bull Earthquake Eng* 9:1463-1498, (2011).

Fardis M.N., Tsionis G., Askouni P., "Analytical fragility functions for reinforced concrete bridges - UPAT methodology", *Internal Report Syner-G Project*, (2012).

Franchin P., Lupoi A., Pinto P., "On the role of road networks in reducing human losses after earthquakes", *Journal of Earthquake Engineering*, 10(2), 195-206, (2008).

Jeong S.H., Elnashai A.S., "Probabilistic fragility analysis parameterized by fundamental response quantities", *Engineering Structures* 29(6), 1238-1251, (2007).

Kappos A., Moschonas I., Paraskeva T. and Sextos A., "A methodology for derivation of seismic fragility curves for bridges with the aid of advanced analysis tools", *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, (2006).

Karim K.R. & Yamazaki F., "A simplified method for constructing fragility curves for highway bridges", *Earthquake and Structural Dynamics*, 32(10), 1603-1626, (2003).

Moschonas I.F., Kappos A.J., Panetsos P., Papadopoulos V., Makarios T. & Thanopoulos P., "Seismic fragility curves for greek bridges: methodology and case studies", *Bulletin of Earthquake Engineering* 7(2), 439-468, (2009).

Nielson, B. G., R. DesRoches, "Analytical seismic fragility curves for typical bridges in the central and Southeastern United States", *Earthquake Spectra*, Vol. 23, No. 3, pp. 615-633, (2007).

Yi J.H., Kim S.H., Koshiyama S. "PDF interpolation technique, for seismic fragility analysis of bridges", *Engineering Structures* 29 (7), 1312-1322, (2007).

Olmos, B., Jara M., "Curvas de fragilidad de desplazamiento de puentes con subestructura tipo marco",

XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Artículo VI-18, Aguascalientes, México, (2011).

Gómez Soberón C. y Soria Rodríguez I., "Curvas de fragilidad para tres puentes carreteros típicos de concreto", *Concreto y Cemento - Investigación y desarrollo*, Vol. 4, num. 2, pp. 26-42, (2013).

Galo Atiaga, Florent Demoraes, "Vulnerabilidad sísmica de pasos elevados y puentes que forman parte de la infraestructura vial del distrito metropolitano de Quito-Adaptación de la metodología HAZUS 99", *Informe técnico presentado al municipio de Quito, Ecuador*, (2003).

FEMA, "HAZUS-MH MR1 Technical Manual", Vol. *Earthquake Model, Federal Emergency Management Agency, Washington DC*, (2003).

Méndez J., "Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes existentes de hormigón armado", *Tesis de Maestría, Instituto de Estructuras, Universidad Nacional de Tucumán, Argentina*, (2012).

FHWA, "Seismic retrofitting manual for highway structures: part 1 - bridges", *Federal Highway Administration, USA*, (2006).

ATC, "Earthquake Damage Evaluation Data for

California", *Report No. ATC-13, Applied Technology Council*, (1985).

Basoz N. and Kiremidjian, A. S., "Risk Assessment for Highway Transportation Systems", *Report No. NCEER-118, John A. Blume Earthquake Engineering Center*, (1996).

FHWA, "Recording and Coding Guide for the Structure Inventory and Appraisal of the Nation's Bridges", *Federal Highway Administration, Rep. No. FHWA-ED-89-044, Ofc. of Engrg., Bridge Division, Washington*, (1988).

CONCAR 70, "Reglamento Nacional de Construcciones Antisísmicas", *Instituto Nacional de Previsión Sísmica, Buenos Aires*, (1970).

NAA 80, "Normas Antisísmicas Argentinas", *Instituto Nacional de Previsión Sísmica, Buenos Aires, Argentina*, (1980).

INPRES-CIRSOC 103, "Normas Argentinas para Construcciones Sismorresistentes", *Instituto Nacional de Previsión Sísmica, Buenos Aires, Argentina*, (1983).

INPRES-CIRSOC 103, "Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes", *Instituto Nacional de Previsión Sísmica, Buenos Aires, Argentina*, (2008).