

# **Modelo de vulnerabilidad sísmica de puentes basado en “Conjuntos Difusos”**

E. Maldonado Rondón  
J.R. Casas Rius  
J.A. Canas

## **Monografías de Ingeniería Sísmica**

Edited by A.H. Barbat

# **Modelo de vulnerabilidad sísmica de puentes basado en “Conjuntos Difusos”**

E. Maldonado Rondón  
J.R. Casas Rius  
J.A. Canas

CENTRO INTERNACIONAL DE MÉTODOS NUMÉRICOS EN INGENIERÍA  
Edificio C1, Campus Norte UPC  
C/ Gran Capitán, s/n  
08034 Barcelona, España

MONOGRAFÍAS DE INGENIERÍA SÍSMICA  
Editor A.H. Barbat

ISSN: 1134-3249

MODELO DE VULNERABILIDAD SÍSMICA DE PUENTES  
BASADO EN "CONJUNTOS DIFUSOS"  
Monografía CIMNE IS-40  
© Los Autores

ISBN: 84-84-89925-62-3  
Depósito Legal: B-18210-2000

IMPRESO EN ESPAÑA - PRINTED IN SPAIN

## **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por la CICYT (Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología) proyectos AMB98-0558 y TAP1999-1079-C03-01, por la Dirección General de Enseñanza Superior proyecto PB96-0139-C04-03 y, por la colaboración de la Universidad Industrial de Santander (Colombia).



## RESUMEN

En este trabajo se presenta un modelo rápido y sencillo de evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes a escala regional. El modelo fue estructurado de forma que puede ser aplicado especialmente a zonas donde no se cuenta con reportes de daños sísmicos de puentes. El método se basa en la identificación de las características más relevantes e influyentes en el daño que sufrirá un puente bajo la acción del sismo. La valoración de estas características fue realizada mediante la determinación de diecinueve (19) parámetros, a los cuales se les asignó un grado de vulnerabilidad y un valor de importancia en base a la opinión de expertos. Debido a las imprecisiones y subjetividad de las opiniones, estas fueron procesadas mediante técnicas difusas. Una vez calificados cada uno de los parámetros, se procedió a relacionar las calificaciones de los parámetros con su valor de importancia por medio de un promedio ponderado difuso. El resultado de esta relación por medio de técnicas basadas en la lógica difusa corresponde al *“índice de vulnerabilidad del puente”*.

## SUMMARY

The focus of this paper is to develop a simple model to assess vulnerability of bridges. This model was especially made for areas where current reports of seismic damages of bridges do not exist. The method is based on the identification of the most influential characteristics associated with the damage in a bridge under the action of an earthquake. The evaluation of these characteristics was carried out by means of the determination of nineteen parameters. A vulnerability degree and an importance value based on the opinion of experts was assigned to each of the 19 parameters. Due to the imprecision and subjectivity of the opinions, these data were processed by using fuzzy techniques. Once qualified each one of the parameters, it is proceeded to relate the qualifications of the parameters with their value of importance by means of a fuzzy weight average. The result of this relationship according to techniques based on fuzzy sets is the *“bridge vulnerability index”*.



# ÍNDICE

## Capítulo 1

### Parámetros del modelo

---

1. Parámetros del modelo.....	1
1.2 Metodología desarrollada en la selección de los parámetros.....	2
1.2.1 Estudios sobre comportamiento sísmico de puentes .....	2
1.2.2 Metodologías existentes de evaluación sísmica de puentes.....	3
1.2.3 Experiencias posterremoto .....	3
1.2.4 Opinión de expertos.....	4
1.3 Parámetros seleccionados.....	4
1.3.1 Año de proyecto y construcción del puente.....	5
1.3.2 Tipo de superestructura .....	8
1.3.3 Forma de la superestructura .....	9
1.3.4 Existencia de articulaciones internas .....	11
1.3.5 Material de la superestructura.....	12
1.3.6 Tipo de pila .....	14
1.3.7 Tipo de cimentación .....	17
1.3.8 Material de las pilas .....	20
1.3.9 Irregularidad longitudinal en geometría y rigidez.....	20
1.3.10 Longitud de apoyo en pilas .....	21
1.3.11 Tipo de suelo .....	23
1.3.12 Tipo de estribo .....	23
1.3.13 Longitud de apoyo en estribo.....	26
1.3.14 Tipo de aparato de apoyo .....	28
1.3.15 Estado de conservación.....	29
1.3.16 Procedimiento constructivo de la superestructura (hormigón).....	31
1.3.17 Procedimiento constructivo de las pilas (hormigón).....	31
1.3.18 Potencial de licuefacción.....	31
1.3.19 Elementos no estructurales.....	32
1.4 Conclusiones.....	33

## Capítulo 2

### Descripción del modelo

---

2. Descripción del modelo.....	35
2.1 Definición.....	35
2.1.1 Algoritmo para el cálculo del índice de vulnerabilidad ...	36
2.2 Variables lingüísticas utilizadas.....	37
2.3 Realización de encuestas a los expertos .....	38
2.3.1 Muestra tomada para realizar las encuestas.....	39
2.3.2 Forma de realizar las encuestas .....	40
2.3.3 Análisis de la información.....	41
2.3.3.1 Resultados .....	42
2.4 Construcción de las funciones de pertenencia.....	43
2.4.1 Ejemplo de cálculo de la función de pertenencia.....	43
2.4.2 Corrección de las funciones de pertenencia.....	45
2.4.2.1 Funciones de pertenencia de las clasificaciones de los parámetros .....	46
2.4.2.2 Funciones de pertenencia de los valores de importancia .....	46
2.4.3 Funciones de pertenencia definitivas .....	47
2.4.3.1 Funciones de pertenencia de las clasificaciones de los parámetros .....	47
2.4.3.2 Funciones de pertenencia de los valores de importancia.....	47
2.5 Programa <i>INDICE</i> para la evaluación del índice de vulnerabilidad sísmica de puentes .....	48
2.5.1 Algoritmo del programa.....	48
2.5.2 Funcionamiento del programa.....	51
2.5.3 Ejecución del programa .....	52
2.6 Conclusiones.....	52

## Capítulo 3

### Forma de aplicación del modelo

---

3. Forma de aplicación del modelo .....	57
3.1 Formulario para la determinación de la vulnerabilidad .....	57
3.2 Conclusiones.....	65

## *Capítulo 4*

### **Calibración del modelo**

---

4. Calibración del modelo .....	67
4.1 Método elegido para la calibración.....	68
4.2 Descripción de la muestra tomada para la calibración .....	70
4.3 Cálculo del índice de vulnerabilidad .....	72
4.4 Determinación del daño .....	72
4.5 Definición de la intensidad correspondiente a la localización de cada uno de los puentes .....	74
4.6 Construcción de las curvas de daño - índice de vulnerabilidad .....	75
4.7 Resumen y conclusiones .....	77

## *Capítulo 5*

### **Aplicación del modelo**

---

5. Aplicación del modelo.....	81
-------------------------------	----

## *Capítulo 6*

### **Conclusiones**

---

6. Conclusiones.....	85
----------------------	----

<b>Referencias .....</b>	<b>91</b>
--------------------------	-----------

### **Anexo 1**

A.1.1 Grados de vulnerabilidad de las categorías de los parámetros .....	99
A.1.2 Valores de importancia de los parámetros .....	104



# INTRODUCCIÓN

Al ser los puentes una de las partes más importantes dentro de la infraestructura viaria de un país, surge la necesidad de estudios como el de la valoración de la vulnerabilidad sísmica de puentes. Ya que durante largos períodos de servicio, los puentes existentes pueden estar expuestos a serios problemas sísmicos, y en muchos casos, ante fuertes sismos la estructura puede alcanzar el colapso.

Sin embargo, los estudios de vulnerabilidad son muy recientes y, debido a su importancia, se han convertido hoy en día en uno de los principales frentes de investigación en ingeniería sísmica en todo el mundo. La mayoría de los estudios de vulnerabilidad en puentes se basan en datos a partir de inventarios actualizados de las estructuras y de daños registrados ante efectos sísmicos, estudios que sólo son aplicables a zonas donde corresponden los datos obtenidos. De aquí la importancia de proponer una metodología adaptable a regiones donde no se cuente con suficiente información sobre daños de puentes.

El objetivo principal de esta monografía es presentar una metodología para evaluar la vulnerabilidad sísmica de cada uno de los puentes de un área determinada (Maldonado *et al.*, 2000). El método se basa en la definición de las características más relevantes de un puente que pueden influir en la vulnerabilidad sísmica y, en base a la opinión de expertos valorar la influencia de cada parámetro. Estas características se han determinado mediante la elección de diecinueve parámetros, la cual se hizo en base a estudios realizados sobre comportamiento sísmico de puentes, experiencias posterremoto, estudios de modelos existentes y opiniones de expertos. Los parámetros fueron clasificados de acuerdo a cuatro condiciones de calidad a los que se les asignó un grado de vulnerabilidad determinado y, a su vez, a cada parámetro se le definió su valor de importancia. Estos grados de vulnerabilidad y valores de peso fueron identificados a partir de opiniones de expertos.

Dado que el modelo propuesto involucra opiniones de expertos y su posterior aplicación se basa en la respuesta de un formulario donde se califica cada parámetro, se decidió utilizar técnicas basadas en conjuntos difusos. Dentro de los conjuntos difusos se utilizó el peso promedio ponderado difuso como medio para el cálculo del “índice de vulnerabilidad sísmica de puentes”. Este índice es la relación entre el grado de vulnerabilidad de cada parámetro y su valor de importancia.

En esta monografía se expone el modelo propuesto para el análisis de la vulnerabilidad sísmica de puentes a gran escala. Se inicia con la descripción de los parámetros del modelo, luego se expone el modelo en sí y los pasos que se requiere seguir para su desarrollo. Posteriormente se describe la forma de su aplicación, su calibración y finalmente se presenta un ejemplo de aplicación.



## Parámetros del modelo

La determinación de la vulnerabilidad sísmica de estructuras, como los puentes, depende en parte de sus características dinámicas, por ello es importante realizar estudios sobre la influencia de las diferentes características estructurales y no estructurales en su respuesta sísmica. Características como, por ejemplo, el tipo de estribo, tipo de superestructura y de subestructura, forma de la superestructura, número de articulaciones, longitudes de apoyo, tipo de dispositivos de apoyos, tipo de fundación en pilas y estribos, historia de mejoramiento sísmico del puente y año de proyecto y construcción influyen de una u otra manera en la respuesta dinámica del puente ante el sismo y, por lo tanto, en el nivel de daño ocurrido.

Al ser el objetivo de esta investigación el proponer un método de evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes a gran escala, aplicable a zonas donde no se cuente con informes de daños, el primer paso a desarrollar es la determinación de las características más relevantes e influyentes en el daño que sufrirá un puente bajo la acción del sismo. La identificación de estas características se ha realizado mediante la selección de un número determinado de parámetros, los cuales se considera que son los más influyentes en la vulnerabilidad sísmica.

La definición de los parámetros de mayor influencia en la determinación de la vulnerabilidad sísmica de los puentes, se inicia con el estudio de su comportamiento sísmico, debido a la importancia que tiene tanto entender la forma de respuesta dinámica de la estructura como el papel que desempeñan cada uno de sus elementos ante la acción del sismo. Posteriormente, de los informes de sismos pasados se puede llegar a comprender las causas de los daños en los puentes y, así, como segundo paso en la identificación de los parámetros, se realizó un estudio de las experiencias aprendidas de los sismos que más han

afectado a los puentes. Como tercer paso se analiza algunas metodologías existentes que involucran la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes, viendo que parámetros son los más importantes en cada una de ellas. Los tres pasos citados han permitido realizar una primera selección de parámetros, de los que, posteriormente, se pidió la opinión de expertos en el tema.

Identificados los parámetros a utilizar, a cada uno de ellos se le establecen de tres a cuatro condiciones de calidad, buscando fijar, dentro de cada parámetro, grados de vulnerabilidad que varían de "más" a "menos" vulnerable.

Así pues, el objetivo de este capítulo es presentar los parámetros utilizados en el modelo de vulnerabilidad sísmica.

## 1.2 Metodología desarrollada en la selección de los parámetros

La identificación de los parámetros más influyentes en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de un puente, se efectuó en base a cuatro estudios realizados: **1)** estudios sobre comportamiento sísmico de puentes (Maldonado *et al.*, 1998 a y b), **2)** metodologías existentes de evaluación de la vulnerabilidad sísmica en puentes (Maldonado *et al.*, 1998 c), **3)** experiencias posterremoto y **4)** opiniones de expertos. Con los puntos 1, 2 y 3 se determinaron los parámetros más prevaletentes en la determinación de la vulnerabilidad sísmica de puentes y con el punto 4, opiniones de expertos, se corroboró y complementó el trabajo realizado hasta el momento.

A continuación, se expone con detalle cada uno de los cuatro estudios realizados para la definición de los parámetros que determinan la vulnerabilidad sísmica de puentes en el modelo propuesto.

### 1.2.1 Estudios sobre comportamiento sísmico de puentes

En los estudios de comportamiento sísmico de puentes presentados en los trabajos "*Respuesta de puentes frente a acciones sísmicas*" y "*Comportamiento sísmico de puentes regulares*" (Maldonado *et al.*, 1998 b y a), se estudian las características estructurales de los puentes que definen su respuesta ante la acción sísmica. Es así como en este apartado tan sólo se describen las conclusiones de los aspectos que son de interés en el presente trabajo. Para plasmar estas conclusiones, se presenta una pequeña pero representativa muestra de puentes, la cual sirvió para definir algunos de los parámetros que influyen en la respuesta dinámica de la estructura y que, por lo tanto, van a jugar un papel importante en el momento que se presente el daño en la estructura.

La muestra de puentes de los que se sacaron algunos parámetros, está compuesta de seis puentes, cuatro corresponden a estructuras que en el momento de realizar su estudio estaban muy próximas a su construcción y dos estructuras ya existentes. Por ello, sobre las estructuras proyectadas pero sin construir se pudo realizar un análisis más completo, de tal manera que las conclusiones sirvieran para las decisiones finales en su proyecto y construcción. En las estructuras

existentes se evaluó el comportamiento de la estructura realizando análisis dinámicos que permitieron observar la influencia en la respuesta dinámica de sus elementos como, por ejemplo, las pilas, apoyos y juntas.

Los parámetros con un mayor grado de influencia respecto a la respuesta sísmica fueron los siguientes: existencia de articulaciones internas, tipo de pila, tipo de cimentación, sistema de apoyo de superestructura a subestructura, forma de la superestructura y regularidad longitudinal del puente.

### 1.2.2 Metodologías existentes de evaluación sísmica de puentes

De las diferentes metodologías existentes de evaluación sísmica que involucran modelos de la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes, se escogieron las siguientes cinco: Kiremidjian y Basöz (1997), Seong Kim (Ren y Gaus, 1996), Dicleli y Bruneau (1996), Pezeshk *et al.* (1993) y ATC 6-2 (1983), realizándose un estudio comparativo entre los distintos parámetros considerados en sus modelo.

Luego, se eligieron algunos parámetros considerados en más de un modelo, siendo estos: tipo de estribo, tipo de superestructura, tipo de subestructura, ángulo de esviaje, tipo de cimentación en pilas y estribos, historia de mejoramiento sísmico del puente, año de proyecto, armadura de las pilas, longitud de apoyos, existencia de articulaciones internas, irregularidad en geometría y rigidez, condición de sitio, potencial de licuefacción y tipo de apoyos. El valor de la aceleración máxima en el sitio del puente no se seleccionó dado que el modelo a proponer no pretende llegar hasta la evaluación del daño de la estructura.

### 1.2.3 Experiencias posterremoto

De lo aprendido de sismos pasados, en lo referente a puentes, se pueden extraer las características que los hicieron vulnerables frente a la acción sísmica. Para ello, se escogieron cuatro sismos los cuales causaron daños significativos en los puentes. Los sismos analizados son: el de **San Fernando** en 1971 (National Oceanic and Atmospheric Administration Washington, 1973), **Loma Prieta** en 1989 (Bertero, 1992; Benuska, 1990); Thiel, 1990), **Northridge** en 1994 (Hall, 1995; Astanesh-Asl *et al.*, 1994 a y b; Buckle, 1995; Buckle, 1994; Priestley *et al.* 1994) y **Kobe** en 1995 (Shinosuka, 1995; Committee on Highway Bridge Damage Caused by the Hyogo-Ken Nanbu Earthquake, 1995).

Al comparar los daños causados en los puentes por cada uno de los cuatro sismos anteriores, se determinan las características (parámetros) que hicieron que estas estructuras fuesen más vulnerables frente a la acción del sismo: refuerzo en pilas, especificaciones del proyecto, tipo de estribo, forma de la superestructura (ángulo de esviaje), detalle de uniones, existencia de articulaciones internas, longitud de apoyos y tipo de pilas.

### 1.2.4 Opinión de expertos

Basados en los tres puntos citados anteriormente se realizó una primera selección de diecisiete (17) parámetros (año de proyecto y construcción del puente, tipo de superestructura, forma de la superestructura, existencia de articulaciones internas, material de la superestructura, tipo de pila, tipo de cimentación, material de las pilas, irregularidad longitudinal en geometría y rigidez, longitud de apoyo en pilas, tipo de suelo, tipo de estribo, longitud de apoyo en estribos, tipo de aparato de apoyo, estado de conservación del puente, procedimiento constructivo de la superestructura y procedimiento constructivo de las pilas), los cuales se dividieron, a su vez, en varias categorías; y, de esta manera, se pidió la opinión a cincuenta (50) expertos acerca de su consideración, grado de vulnerabilidad y valor de importancia. De los cincuenta (50) expertos se recibieron veinticinco respuestas (25) y, con sus aportaciones, se redefinieron los parámetros a considerar, quedando finalmente diecinueve (19) parámetros.

Los expertos en sus opiniones, consideraron que otros parámetros podrían ser importantes en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes. Estos fueron analizados y reconsiderados en los ya propuestos, ya que muchos podían involucrarse en las categorías formuladas para cada parámetro, considerándose algunos de ellos como nuevos parámetros.

## 1.3 Parámetros seleccionados

Basados en los cuatro estudios realizados, anteriormente resumidos, se seleccionaron los siguientes parámetros (ver Figura 1.1):

- ( $K_1$ ) Año de proyecto y construcción del puente
- ( $K_2$ ) Tipo de superestructura
- ( $K_3$ ) Forma de la superestructura
- ( $K_4$ ) Existencia de articulaciones internas
- ( $K_5$ ) Material de la superestructura
- ( $K_6$ ) Tipo de pila
- ( $K_7$ ) Tipo de cimentación
- ( $K_8$ ) Material de las pilas
- ( $K_9$ ) Irregularidad longitudinal en geometría o rigidez
- ( $K_{10}$ ) Longitud de apoyo en pilas
- ( $K_{11}$ ) Tipo de suelo
- ( $K_{12}$ ) Tipo de estribo
- ( $K_{13}$ ) Longitud de apoyo en estribos
- ( $K_{14}$ ) Tipo de aparato de apoyo
- ( $K_{15}$ ) Estado de conservación del puente
- ( $K_{16}$ ) Procedimiento constructivo de la superestructura (hormigón)
- ( $K_{17}$ ) Procedimiento constructivo de las pilas (hormigón)
- ( $K_{18}$ ) Potencial de licuefacción
- ( $K_{19}$ ) Elementos no estructurales

Siguiendo el mismo procedimiento realizado para la selección de estos parámetros, de cada uno de ellos se consideraron tres o cuatro condiciones de calidad. Es así como, basados en el estudio del comportamiento sísmico de puentes, en las experiencias posterremoto y en la comparación de metodologías existentes de evaluación sísmica que involucran modelos de vulnerabilidad, se efectuó una primera subdivisión de cada uno de los parámetros inicialmente identificados (17). Éstos, se presentan en el Anexo 1 del trabajo Maldonado *et al.* (2000), sirviendo para realizar la primera encuesta enviada a los expertos. En ella, se pidió la opinión de la consideración de los parámetros y de los grados de vulnerabilidad para cada una de las condiciones de calidad de ellos.

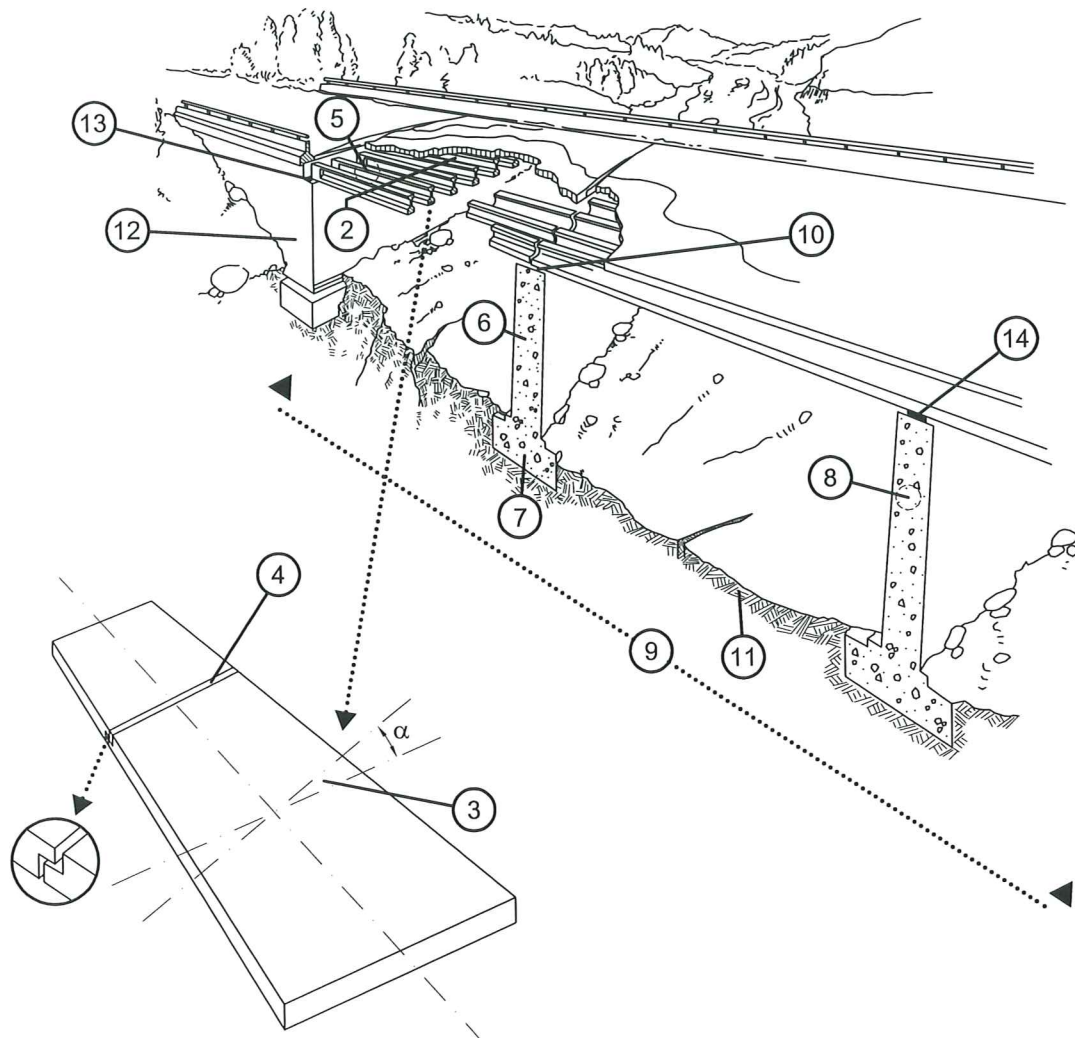
Después, del estudio de sus respuestas y de la comparación de sus opiniones con el estudio bibliográfico del comportamiento sísmico de los elementos del puente, se llegó a la subdivisión de cada uno de los parámetros en la forma que se presenta en los siguientes apartados.

### 1.3.1 Año de proyecto y construcción del puente ( $K_1$ )

El año de proyecto y construcción de un puente puede decir qué especificaciones de proyecto fueron empleadas en su realización, incluso se puede saber si fue proyectado bajo normativas sísmicas o no. Además, de acuerdo a las especificaciones utilizadas para el proyecto y construcción de un puente, se pueden conocer detalles de refuerzo y longitudes mínimas de apoyo requeridas. Por ello, el año de proyecto y construcción de un puente es un aspecto de vital importancia en el momento de clasificar un puente dentro una categoría relativa a la respuesta sísmica.

Trabajos como los comentados a continuación justifican la consideración de este parámetro, y a su vez, fundamentan la clasificación tomada:

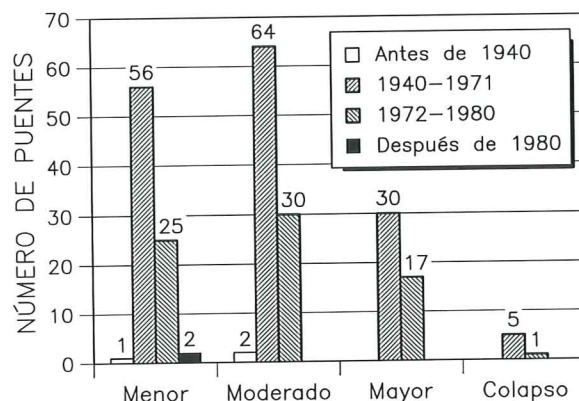
- Barenberg y Foutch (1988) estudiaron la respuesta transversal y longitudinal de puentes proyectados, según las especificaciones implementadas después del sismo de San Fernando. De sus trabajos, se concluye que muchos de los puentes que habían sido construidos en los Estados Unidos, antes de los noventa, para resistir movimientos sísmicos se podían clasificar en dos grupos. En el primero se hallaban los puentes que fueron proyectados y construidos antes del desarrollo de las especificaciones modernas. Estos tenían una considerable cantidad de armadura longitudinal pero muy poco confinamiento transversal y poca longitud de anclaje. Los puentes del segundo grupo, fueron proyectados de acuerdo a los códigos desarrollados a partir de lo aprendido de los puentes dañados durante el sismo de San Fernando de 1971. Éstos fueron mejorados en cuanto a los detalles de confinamiento y longitud de anclaje. De igual modo la capacidad de las pilas para resistir fuerzas sísmicas y grandes desplazamientos habían sido mejorados. Además, se llegó a la conclusión que las fuerzas de proyecto en los estribos calculadas con las normas de los noventa, no eran muy conservadoras en la mayoría de los casos.



- |  |   |
|--|---|
| 1. Año de diseño y construcción del puente           | 11. Tipo de suelo   |
| 2. Tipo de superestructura                           | 12. Tipo de estribo   |
| 3. Forma de superestructura                          | 13. Longitud de apoyo en estribos                               |
| 4. Existencia de articulaciones internas             | 14. Tipo de aparato de apoyo                                    |
| 5. Material de superestructura                       | 15. Estado de conservación del puente                           |
| 6. Tipo de pila                                      | 16. Procedimiento constructivo de la superestructura (hormigón) |
| 7. Tipo de cimentación                               | 17. Procedimiento constructivo de las pilas (hormigón)          |
| 8. Material de las pilas                             | 18. Potencial de licuefacción                                   |
| 9. Irregularidad longitudinal en geometría o rigidez | 19. Elementos no estructurales                                  |
| 10. Longitud de apoyo en pilas                       |   |

Figura 1.1 Parámetros seleccionados.

- Kiremidjian y Basöz (1997), presentan la distribución de los puentes dañados de acuerdo al año de proyecto y tipo de daño durante los sismos de Loma Prieta y el de Northridge (ver Figura 1.2). Este informe de daños, fue realizado sobre una muestra de puentes, donde el 72% de ellos fueron diseñados entre 1940 y 1971, es decir antes de las normativas de proyecto de 1971. El 16% correspondía a puentes proyectados entre 1972 y 1980, el 8% después de 1980 y el 4% antes de 1940.



**Figura 1.2** Distribución de puentes dañados en función del estado de daño y del año de construcción, Kiremidjian y Basöz (1997).

Se puede observar que los puentes mas afectados durante los dos sismos citados, fueron los puentes construidos antes de la normativa de 1971.

- El informe presentado por el Committee on Highway Bridge Damage Caused by the Hyogo-Ken Nanbu Earthquake (1995) muestra los daños en pilas de puentes de acuerdo al año de la norma utilizada para su proyecto (ver Tabla 1.1). Los grados de daño están clasificados en cinco categorías,  $A_s$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $C$  y  $D$ . Correspondiendo la letra  $D$  a un grado de daño muy pequeño o nulo y la  $A_s$  al colapso.

**Tabla 1.1** Grado de daño de las pilas en función del año de la norma utilizada para el proyecto, sismo de Kobe.

Año de la Norma	GRADO DE DAÑO					Total Pilas
	$A_s$	$A$	$B$	$C$	$D$	
1964 o cercano	3%	6%	6%	27%	58%	2756
1971	0%	0%	10%	37%	53%	290
1980	0%	0%	4%	14%	82%	294
1990	0%	0%	4%	4%	93%	56

En la Tabla anterior se puede ver como el porcentaje de pilas proyectadas, de acuerdo a las Especificaciones Sísmicas para Puentes de Carretera de 1971 o a

las Guías de Proyecto para Puentes de Carretera de 1980 y 1990, registraron un porcentaje de daños pequeño.

- Mander y Chen (1992) y Mander *et al.* (1996), estudiando el comportamiento sísmico de puentes en los Estados Unidos, concluyeron que los más antiguos (proyectados sin especificaciones sísmicas) pueden tener alguna resistencia intrínseca, que puede ser usada durante el sismo; sin embargo, argumentan que un adecuado comportamiento sísmico depende, en gran manera, de la cantidad de armadura. Además, dice que las columnas con bajo volumen de acero transversal pueden fallar a cortante, siendo difícil asegurar el grado de vulnerabilidad en puentes antiguos. Por ello, consideran que si no han sido proyectados sísmicamente son más vulnerables.

Basados en lo anterior, se escogieron las siguientes categorías para este parámetro (en caso de utilizarse en América):

- (A) Después de 1981.
- (B) Entre 1972 y 1980.
- (C) Entre 1940 y 1971.
- (D) Antes de 1940.

En caso de ser utilizado en España, las modificaciones correspondientes son:

- (A) Después de 1995.
- (B) Entre 1975 y 1994.
- (C) Entre 1968 y 1974.
- (D) Antes de 1968.

### 1.3.2 Tipo de superestructura ( $K_2$ )

Los elementos más críticos en un sistema de resistencia sísmica lateral, generalmente, son las pilas y la subestructura. Sin embargo, no se puede ignorar el papel que puede llegar a desempeñar la superestructura en el momento que ocurre un sismo.

Este parámetro, considera el efecto del tipo de superestructura en el comportamiento general del puente ante el sismo. Se ha estudiado que puentes con superestructura continua y con apoyos que pueden permitir grandes desplazamientos de translación, generalmente, permanecen en servicio con pequeñas reparaciones después de ocurrido un sismo. Lo contrario ocurre en puentes no continuos, donde es usual la presencia de daños severos ante la acción sísmica (ATC 6-2, 1983).

La información relativa a este parámetro, se genera a partir del tipo de estructura del vano principal del puente. Siendo la descripción, para cada clasificación del parámetro  $K_2$ , es la siguiente:

- (A) Puentes suspendidos, atirantados y puentes de un único vano cuyo sistema de superestructura corresponde a losa, vigas y sistemas de tablero en losa, vigas T, vigas cajón, vigas canal (artesa), vigas en celosía, pórtico o arco.
- (B) Puentes de dos o más vanos con superestructura en sistema pórtico o arco.
- (C) Puentes de dos o más vanos con superestructura continua construida en sistema losa, vigas y tablero en losa, vigas T, vigas cajón, vigas canal (artesa) o viga en armadura.
- (D) Puentes de dos o más vanos contruidos en vigas simplemente apoyadas. Otros tipos.

### 1.3.3 Forma de la superestructura ( $K_3$ )

Este parámetro se usa para tener en cuenta el efecto que puede tener la forma irregular del puente sobre su vulnerabilidad sísmica. Diversas investigaciones sobre este parámetro han aportado observaciones que se resumen a continuación:

- El comportamiento de un puente esviado difiere del de uno de alineamiento recto de similares dimensiones, bajo carga estática y dinámica. Bajo cargas estáticas, el comportamiento de un puente esviado, generalmente, es mejor debido a que las cargas son transportadas a través del vano más corto, haciendo que la longitud del vano efectivo del puente se reduzca y se incremente la capacidad de transportar la carga. Cuando un puente esviado está sujeto a cargas dinámicas, bien sea en la dirección horizontal o en la vertical, el esviaje puede convertirse en un problema, ya que éste puede amplificar ya sea a uno ó a más de los seis tipos de movimientos principales; los cuales se definen como: translación longitudinal, translación lateral, rotación en el plano del tablero, flexión vertical, flexión lateral y distorsión torsional del tablero del puente (Wakefield *et al.*, 1992).
- McCallen y Romstad (1994) realizaron un estudio de respuesta sísmica en el puente US/101, Painter Street (California), comparando dos modelos, uno considerando el esviaje del puente y otro asumiéndolo como un puente recto. En el modelo no esviado, las formas modales individuales constan o bien de torsión pura o de flexión pura; en cambio, las formas modales del modelo esviado, muestran una combinación de deformaciones flexo-torsionales. Comparando los resultados de los modelos, para estructuras esviadas y no esviadas, las frecuencias difieren hasta el 15%, concluyendo que el efecto de esviaje en la superestructura del puente le proporciona un efecto combinado de deformación flexión-torsión que lo hace una estructura más vulnerable ante la acción del sismo.

- Según Pezeshk *et al.* (1993), el alineamiento de un puente tiene un importante efecto en el comportamiento de sus apoyos. Definiendo el esviaje como el ángulo entre la línea central de los apoyos y una línea perpendicular al eje del puente. En cuanto a la evaluación dependiendo del ángulo de esviaje, Pezeshk *et al.* (1993) indica que los puentes más vulnerables son aquellos que tienen un ángulo de esviaje mayor que 20 grados o los curvos, dando baja vulnerabilidad a los puentes rectos ó con ángulo de esviaje menor que 20 grados.
- El Eurocódigo, Parte 2, considera que los puentes esviados (ángulo de inclinación con respecto al eje longitudinal del puente menor de 70 grados) y con una relación longitud total a ancho del tablero menor de dos, tienden a girar alrededor de un eje vertical, a pesar de la coincidencia teórica de los centros de masa y rigidez.
- La respuesta sísmica de puentes curvos está fuertemente influenciada por su geometría. Por ejemplo, en un puente curvo de tres vanos, con dos juntas intermedias situadas simétricamente en el primer y último vano, sujeto a fuerza sísmica transversal, se producen fuerzas axiales sísmicas en las columnas, las cuales incrementan la resistencia lateral creando, a su vez, problemas en las juntas. Esta fuerza axial que se produce debe ser resistida por la superestructura, la cual induce momentos de signos contrarios en la parte superior e inferior de las columnas (Priestley *et al.* 1996).
- Se pueden presentar problemas en puentes donde dada la alineación se requiere de una bifurcación en las líneas de tráfico adyacentes. Bajo respuesta transversal, las dos bifurcaciones pueden responder en desfase, desarrollándose fuerzas elevadas en la superestructura, especialmente en el punto de bifurcación, cuando la conexión superestructura-bifurcación sea monolítica. Si en el sitio de bifurcación se coloca una junta de movimiento independiente del cuerpo del puente, la respuesta estructural será mejor (Priestley *et al.*, 1996).

Por lo tanto, este parámetro representa un factor de forma, que se puede calcular mediante el ángulo de esviaje, el cual para cada clasificación se expresa de la siguiente forma:

- (A) Puentes rectos.
- (B) Puentes esviados con ángulo de esviaje menor a veinte grados.
- (C) Puentes esviados con ángulo de esviaje entre veinte y cuarenta y cinco grados.
- (D) Puentes con una esviación mayor de cuarenta y cinco grados. Puentes curvos. A su vez, esta categoría incluye los puentes con ángulos de esviaje diferentes en los extremos del puente, y puentes en los que, por cualquier otra razón, su forma no es regular. Por ejemplo, puentes con variación significativa de su ancho a través de su longitud, entre otros

casos. También incluye los puentes con bifurcaciones con conexión monolítica a la superestructura.

Definiendo el ángulo de esviaje como:

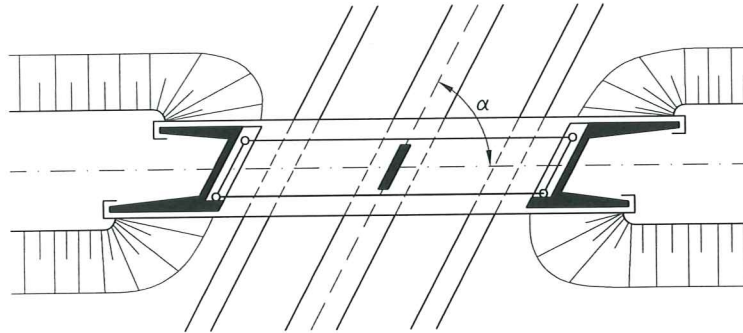


Figura 1.3 Ángulo de esviaje de un puente.

#### 1.3.4 Existencia de articulaciones internas ( $K_4$ )

Las juntas de dilatación que se colocan, principalmente, para permitir los movimientos longitudinales debidos a la dilatación por efecto de la variación de la temperatura en la superestructura, al efecto de fluencia y a la retracción, merecen especial atención desde el punto de vista sísmico. En aquellos casos donde no se suministra una capacidad de movimiento adecuado, capaz de resistir los movimientos producidos por el sismo, las luces pueden llegar a perder apoyo en estos puntos; agudizándose aún más este problema si no son suministrados los sistemas para restringir el movimiento longitudinal. Además, durante el sismo las juntas deben ser capaces de transferir cortante transversal entre las secciones adyacentes de la superestructura.

Ante efectos transversales, las secciones adyacentes de la superestructura en la junta pueden tender a responder fuera de fase; por ello, estos puntos deben contar con mecanismos que limiten los movimientos en esta dirección. Estos mecanismos suelen estar configurados por dientes, los cuales deben contar a su vez con claros entre ellos de tal manera que faciliten una adecuada rotación lateral sísmica entre las secciones adyacentes de la superestructura. No debemos ignorar que una fuerza cortante elevada transferida a través de la junta de movimiento puede venir acompañada por fuerzas de fricción induciendo, adicionalmente, una inesperada transferencia de fuerzas longitudinales.

Es así como, la experiencia y los estudios realizados han demostrado la importancia de la existencia de articulaciones internas en estructuras como puentes durante la acción del sismo, ya que en algunos casos su existencia afecta la estabilidad total de ellos. Durante un sismo, como se expuso anteriormente, pueden ocurrir cambios como la pérdida de apoyo, dando como resultado la falla de la superestructura. Por esta razón, las articulaciones se han considerado como un parámetro más en la determinación de la vulnerabilidad de un puente.

En el cálculo de este parámetro es recomendable conocer tanto el número de articulaciones como la longitud de apoyo en dichas articulaciones. En caso de carecer de la información de la longitud de los apoyos, éstas pueden estimarse a partir del año de construcción del puente, del tipo de puente y del código vigente bajo el cual el puente fue construido (Mireles y Reinoso, 1997; Ren y Gaus, 1996; Pezeshk *et al.*, 1993).

Este parámetro se califica de la siguiente manera:

- (A) No existen articulaciones internas en el puente.
- (B) Existen articulaciones internas, con longitud de soporte mayor a la mínima longitud de soporte requerida  $N_d$ .
- (C) Existen articulaciones internas, con una longitud de soporte entre 0.5 y 1 veces la mínima longitud de soporte requerida  $N_d$ .
- (D) Existen articulaciones internas y alguna de ellas cuenta con una longitud de soporte menor a 0.5 veces la mínima longitud de soporte requerida  $N_d$ .

Siendo  $N_d$  la longitud de soporte mínima, estipulada por el ATC-6-2 (1983). La mínima longitud de soporte,  $N_d$ , se calcula de la siguiente manera (mm):

$$N_d = 305 + 2.5L + 10H \quad (1.1)$$

Donde  $L$  es la suma de las longitudes  $L_1$  y  $L_2$ , es decir la distancia a cada lado de la articulación, medida en metros y  $H$  es la altura promedio de las dos pilas adyacentes, también en metros.

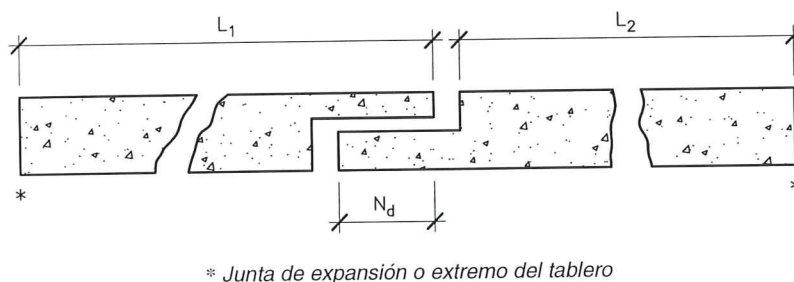


Figura 1.4 Longitud de apoyo en una articulación.

### 1.3.5 Material de la superestructura ( $K_5$ )

El análisis del comportamiento de los puentes ante acciones sísmicas han puesto de manifiesto la influencia que puede tener el material de sus principales elementos. A continuación, se presentan algunos resultados de investigaciones respecto al tema:

- Varios puentes en acero, de luz corta, fueron sacudidos durante el sismo de Northridge del 17 de enero. Sólo algunos de estos puentes sufrieron daños, siendo la forma más común el agrietamiento del hormigón de los estribos a causa del golpeteo de las juntas de expansión y el daño en las conexiones de la superestructura de acero a la subestructura de hormigón (Astaneh-Asl *et al.*, 1994 b).
- Iverson y Hawkins (1994) a partir de observaciones y estudios del comportamiento de estructuras durante el sismo de Northridge, observaron cómo las estructuras de hormigón pretensado, independientemente de estar construidas en hormigón pretesado o postesado, generalmente, se comportaron adecuadamente.
- Dunker y Rabbat (1995 y 1990), al estudiar las deficiencias en puentes a partir del Inventario Nacional de Puentes (NBI) de los Estados Unidos, hallaron que el tipo y porcentaje de deficiencias varía en función del material de la superestructura. Es así como dicen que no todos los puentes de hormigón armado son estructuralmente deficientes; definiendo a un puente estructuralmente deficiente como aquel que está restringido a soportar cargas bajas, o que requiere de rehabilitación inmediata. Pero para puentes de acero, los autores, identifican un mayor número de puentes como estructuralmente deficientes. Dunker y Rabbat (1995 y 1990) atribuyen las diferencias de deficiencias entre los puentes de hormigón armado y acero a la gran cantidad de puentes construidos en hormigón, no encontrando explicación en razones estructurales. En cuanto a los puentes de madera, que típicamente corresponden a puentes rurales, mostraron un alto valor de deficiencias, indicando que la mitad de los puentes de madera inventariados tenían deficiencias estructurales. Otra de las diferencias existentes al comparar los puentes de hormigón y los restantes, se debe a las especificaciones, materiales y maquinaria utilizada en la construcción. Mientras los puentes de hormigón suelen estar proyectados por profesionales, y construidos por constructores cualificados, con materiales de buena calidad, los puentes de acero y madera identificados como deficientes reflejan estar proyectados y construidos con especificaciones menores. Los porcentajes de puentes de hormigón pretensado, con deficiencias estructurales, fueron similares a las de hormigón armado.
- La aceleración vertical puede ser importante ante el efecto sísmico, particularmente, en puentes de superestructura pretensada, debido a que las acciones desarrolladas por el pretensado para equilibrar las cargas muertas pueden verse alteradas al reducirse la fuerza de gravedad por la acción vertical del sismo, (Priestley *et al.*, 1996). Aunque es difícil predecir el comportamiento de la superestructura ante este efecto, debido a la alta ductilidad de la superestructura, es un aspecto que no se puede ignorar al diseñar una estructura con tablero pretensado.

- Los puentes de acero son, inherentemente, más livianos que los puentes de hormigón, produciendo fuerzas sísmicas más bajas comparadas con las superestructuras en hormigón, requiriendo, al mismo tiempo, elementos más pequeños en la subestructura. La desventaja de estos sistemas está en los dispositivos de apoyo que se deben suministrar a la estructura para poderse obtener una eficiencia estructural óptima.

Dado que este factor describe el material usado en la superestructura de puentes, las categorías de material son: acero, hormigón armado, hormigón pretensado, madera, mampostería y otros materiales, pudiéndose clasificar como:

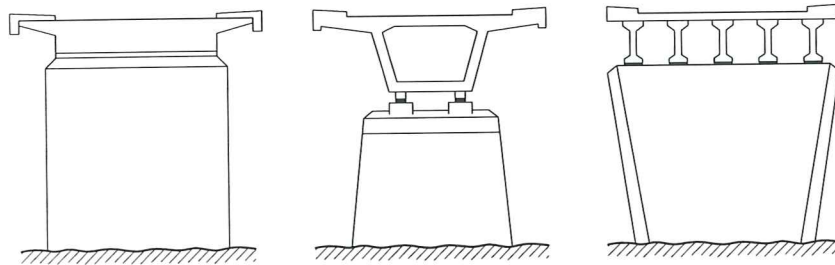
- (A) Acero.
- (B) Hormigón armado o pretensado.
- (C) Madera.
- (D) Mampostería y otros materiales.

### 1.3.6 Tipo de pila ( $K_6$ )

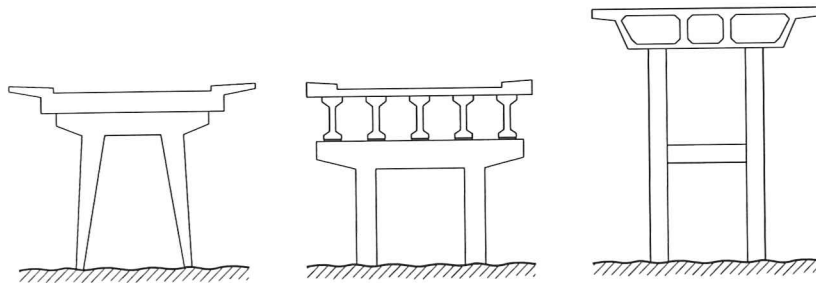
Las pilas son los elementos estructurales más importantes de un puente respecto a la respuesta frente a un sismo. Del tipo de pila, de su buena configuración, correcto armado y regularidad depende en gran parte el nivel de daño que puede ocurrir en el puente, como se ha verificado en los reportes de daños de sismos pasados. Los sistemas de pilas más usados, se presentan en la Figura 1.5 y 1.6 (Leonhardt, 1987 y 1986; Arenas y Aparicio, 1981). Algunos comentarios al respecto pueden ser enunciados para resaltar la importancia del sistema de pilas en un puente, tales como:

- Los puentes con pilas configuradas con columnas simples (ver Figura 1.6 b) tienen la ventaja de poderse determinar fácilmente, con un alto grado de fiabilidad, el comportamiento de la pila, dado que solamente existirá un posible punto de articulación plástica en la columna. Otra ventaja se presenta en puentes con superestructura soportada sobre aparatos de apoyo, debido a que la respuesta en las dos direcciones, longitudinal y transversal, pueden ser iguales; representando una condición óptima de proyecto sísmico. No obstante, el sistema es desfavorable si se conecta de forma monolítica superestructura-columna, ya que los momentos de proyecto sísmico serán mayores en la dirección transversal que en la longitudinal, siendo, a su vez, considerable la demanda de cortante. Al mismo tiempo, en sistemas de columnas simples, los momentos inducidos en ellas y los desplazamientos de la superestructura tenderán a ser más altos que los presentados en sistemas de columnas múltiples. Finalmente, otra desventaja de estos sistemas, es la de transferir fuerzas más elevadas, a las cimentación, dado que este tipo de pila requiere estar fija en la base de la columna (Priestley *et al.*, 1996).

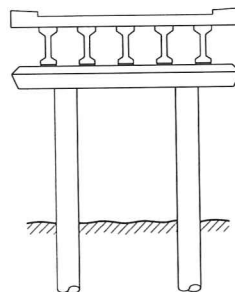
- En puentes con pilas multicolumnas (ver Figura 1.6 a) si la base está fija a la cimentación, los momentos inducidos por las columnas serán menores, en comparación a la opción de columna simple; pudiéndose, incluso, llegar a disminuir fuertemente las fuerzas de la cimentación, articulando las columnas en su base. Sin embargo, se corre el peligro de incrementar los momentos en la parte superior de las columnas. En este tipo de pilas, los desplazamientos de la superestructura se reducen y se obtiene una mejor distribución de momentos en la parte superior de las columnas dentro de la superestructura, comparativamente respecto a las pilas de columnas simples. Una desventaja de este sistema, se debe a la dificultad de determinar la demanda de ductilidad en las articulaciones críticas, ya que las articulaciones plásticas en las regiones críticas no se desarrollan simultáneamente (Priestley *et al.*, 1996).



a) Pilas pantalla.

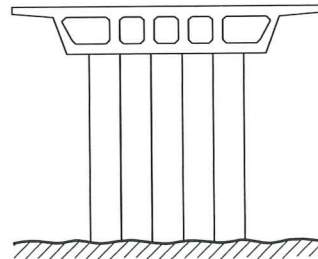
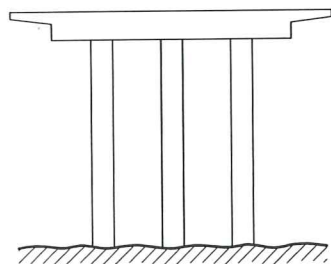


b) Pilas pórtico.

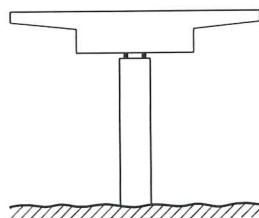


c) Pila pilotes.

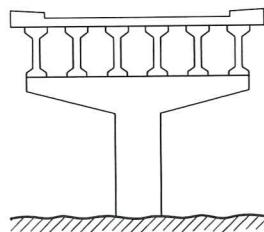
**Figura 1.5** Tipo de pilas: a) Pilas pantalla, b) Pilas pórtico, c) Pila pilotes.



a) Pilas multicolumnas.



b) Pila columna simple.



c) Pila martillo.

**Figura 1.6** Tipo de pilas: a) Pilas multicolumnas, b) Pila columna simple, c) Pila martillo.

- Los puentes con pilas muy altas, cuyas columnas están conectadas por una o varias vigas de enlace, como se muestra en la Figura 1.10 b, dan buenos resultados siempre y cuando las columnas tengan una buena rigidez y un número adecuado de vigas de enlace, de forma que reduzcan las fuerzas y los desplazamientos en la estructura.
- El trabajo presentado por el Committee on Highway Bridge Damage Caused by the Hyogo-Ken Nanbu Earthquake (1995), indica, en la Tabla 1.2, los daños de pilas de puentes, de acuerdo a su tipo estructural en la línea de Kobe durante el sismo de 1995. Los grados de daño están clasificados en cinco categorías,  $A_s$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $C$  y  $D$ . Indicando  $D$  sin daño o daño pequeño, y  $A_s$  el colapso.

**Tabla 1.2** Grado de daño de las pilas de acuerdo al tipo estructural de la pilas.  
Sismo de Kobe. Trabajo realizado por el Committee on Highway Bridge Damage  
Caused by the Hyogo-Ken Nanbu Earthquake (1995).

Tipo Estructural	GRADO DE DAÑO					Total Pilas
	A <sub>s</sub>	A	B	C	D	
Columna Simple	7%	10%	11%	29%	43%	758
Otros	5%	3%	8%	33%	51%	321

En la Tabla se puede ver cómo el porcentaje de pilas, tipo columnas simples, sufrieron mayor daño.

Este parámetro se ha clasificado como:

- (A) Puentes sin pilas. Sistema de pilas pantalla o pilas pórtico.
- (B) Sistema correspondiente a pila pilote.
- (C) Sistema de pilas multicolumnas.
- (D) Sistema de pilas correspondiente a columna simple, pilas martillo.  
Cualquier otro tipo de pila no expuesto en divisiones anteriores.

En la clase **D** se hallan aquellos puentes que están constituidos por pilas con problemas de configuración, geometría o cuyos aspectos arquitectónicos no favorecen un buen comportamiento ante el sismo.

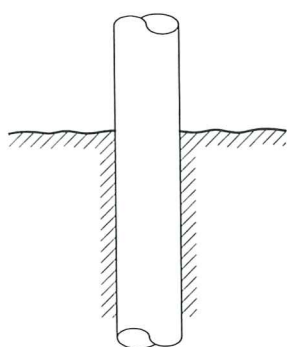
### 1.3.7 Tipo de cimentación ( $K_7$ )

El sistema de cimentación tiene una gran influencia respecto a la respuesta sísmica total del puente. A su vez, influye directamente sobre la distribución de las fuerzas en las pilas y en la cimentación en sí. Las alternativas posibles de sistemas de cimentación se presentan en la Figura 1.7. A continuación se discute cada una de ellas:

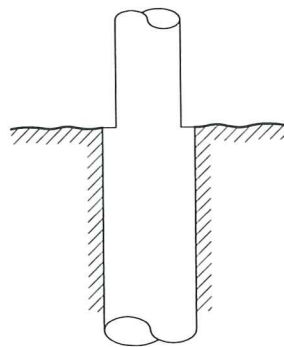
- La cimentación superficial (ver Figura 1.7 c) es la opción más económica sobre suelo firme o roca. En ella una articulación plástica puede formarse en la base de la columna, ocurriendo que esta condición es más crítica cuando está cimentado en suelo y no en roca. En el suelo, las dimensiones de la cimentación serán tales que la resistencia dada por las fuerzas de gravedad excedan el momento a volcamiento en la base de la cimentación, dependiendo de la capacidad de soportar cortante del tipo de suelo; es decir, si éste es cortado de terreno original o si corresponde a material de relleno. En cimentación sobre roca, las dimensiones del cimientto se escogen más deliberadamente para que la respuesta lateral tienda a disminuir, en comparación a la alternativa de cimentación sobre suelo, protegiendo a la columna de daño durante un sismo a costa de un incremento significativo de desplazamiento. Para el ideal funcionamiento de los cimientos extendidos, lo recomendado es que en cimentación sobre suelo, la transferencia de cortante se

suministre mediante un adecuado mecanismo a cortante que acople el material de cimentación en la base de la cimentación; y, sobre roca, deben colocarse unos bloques de reacción, los cuales prevengan la deformación plástica del material de la cimentación bajo el pie durante la oscilación (Priestley *et al.*, 1996).

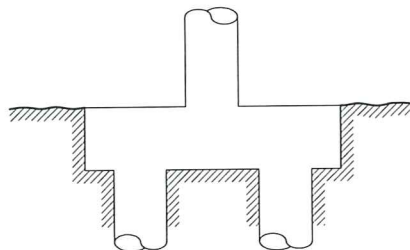
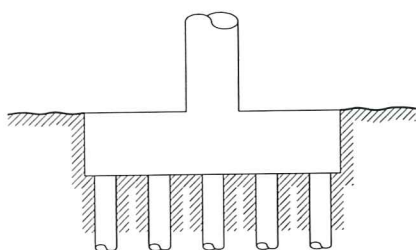
- En cimentación pila pilote (ver Figura 1.7 a) el momento máximo se forma, normalmente, a una profundidad de 1,5 a 2,5 veces el diámetro del pilote, siendo precisamente allí donde se forma la articulación plástica. En este tipo de cimentación el descascarillamiento se alcanza en el momento que se desarrollan grandes rotaciones plásticas, siendo una desventaja el no poderse ver el daño hasta que se hayan hecho las respectivas excavaciones después de ocurrido el sismo. Dada la gran flexibilidad de este sistema de cimentación, los desplazamientos elásticos pueden ser altos, dando como resultado grandes demandas de ductilidad. En sistemas pila pilotes donde el pilote se ensancha, como se muestra en la Figura 1.7 a, la capacidad del pilote se incrementa asegurando que la articulación ocurra en la base de la columna, donde el daño se puede inspeccionar directamente después del sismo. A su vez, debido al ensanchamiento del diámetro del pilote, los desplazamientos elásticos del pilote-suelo serán menores en comparación a sistemas sin ensanchamiento del pilote, dando como resultado una mejor relación entre la ductilidad de la articulación y de la estructura, ofreciendo a la vez menor desplazamiento total bajo carga sísmica (Priestley *et al.*, 1996).
- Respecto a la opción de utilizar pilotes en la cimentación (ver Figura 1.7 b) una variedad de tipos de pilotes pueden emplearse incluyendo pilotes en H de acero, pilotes con camisa de acero rellenos de hormigón, pilotes de hormigón armado, hormigón presforzado, etc., donde la selección del tipo depende de la capacidad del material de cimentación. Uno de los puntos críticos en este tipo de cimentación, es el punto de conexión columna-cimentación, el cual debe proveer mecanismos adecuados que permitan transferir las fuerzas que demande el tipo de unión. Para muchas cimentaciones soportadas en pilotes, la filosofía de proyecto se basa en forzar la ocurrencia de la articulación plástica en la base de la columna, en los casos que se proyecte una conexión columna-cimiento resistente a momento, manteniendo los pilotes bajo comportamiento elásticos durante la respuesta sísmica (Priestley *et al.*, 1996).



a) Cimentación integrada pila pilote.



b) Cimentación en pilotes.



c) Cimentación superficial (extendida).

**Figura 1.7** Tipos de cimentación: a) Cimentación integrada pila pilote, b) Cimentación en pilotes, c) Cimentación superficial (extendida).

La clasificación establecida para los tipos de cimentación es la siguiente:

- (A) Pila pilotes.
- (B) Cimentación de pilotes.
- (C) Cimentación superficial en sistema de pilas multiple-columnas (cimientto extendido).
- (D) Cimentación superficial en sistema de pila de columna simple (cimientto extendido). Puentes que cuentan con columnas articuladas en sus puntos de unión con la cimentación y en las cuales no se puede garantizar que la unión provea la suficiente capacidad para soportar las grandes demandas de fuerza cortante que se espera ocurrirán durante un sismo en este tipo de conexión.

### 1.3.8 Material de las pilas ( $K_8$ )

Este factor describe el material usado en la subestructura del puente. Su consideración dentro del análisis de la vulnerabilidad sísmica se toma de la misma base teórica que la del material de la superestructura. Las categorías de material son acero, hormigón armado, hormigón pretensado, mampostería y otros tipos de materiales, pudiendo clasificarse como:

- (A) Acero.
- (B) Hormigón armado o pretensado.
- (C) Madera.
- (D) Mampostería y otros materiales viejos.

### 1.3.9 Irregularidad longitudinal en geometría o rigidez ( $K_9$ )

Un puente se llama irregular si existe diferencia en rigidez, en altura de pilas, o existen grandes cambios. La experiencia y los estudios de comportamiento sísmico de puentes han demostrado que, los puentes irregulares son penalizados sísmicamente. Por ejemplo, en puentes donde existe una alta rigidez transversal de los estribos y pilas adyacentes, en relación con la del resto de las pilas (un caso típico se presenta en valles con laderas empinadas), puede producirse una distribución muy desfavorable de la acción sísmica transversal (EC 8:Parte 2).

Generalmente, desde el punto de vista sísmico, la estructura ideal es un puente recto con luces cortas y altura de pilas uniforme; sin embargo, frecuentemente, esto no es posible. Particularmente, en las salidas de los intercambiadores de autopista, es común encontrar puentes con longitudes de vanos variables y pilas con considerable variación en altura. Consecuentemente, esto produce desigualdad de demanda sobre las pilas, haciendo que las más cortas resistan un nivel más elevado de fuerzas inerciales, en comparación con las pilas más altas.

Además, de acuerdo al dimensionamiento y reforzamiento de las pilas, su comportamiento, va a verse, aún más, modificado ante el sismo. Es decir, si las pilas cortas están más reforzadas y son más rígidas, éstas van a absorber una mayor proporción de fuerza sísmica y en el caso contrario, si pilas de diferente altura cuentan con el mismo tamaño, forma de sección y similar reforzamiento, las pilas más cortas podrían estar sometidas a un mayor incremento de demanda de ductilidad, facilitando que sean éstas las primeras en sufrir daño ante el sismo.

Otro caso que puede presentarse en puentes de intercambiadores que se cruzan, es el uso de una columna común para el puente más alto y el más bajo en un lado. Esta columna, para el puente de nivel más bajo, la cual, será probablemente mayor en resistencia y rigidez que la de la pila adyacente, soportando el lado opuesto del puente, con lo cual se atrae una mayor fuerza sísmica creando, por tanto, una excesiva demanda de ductilidad en esta columna. A su vez, la respuesta de la columna común es probable que se encuentre fuertemente influenciada por los desplazamientos relativos entre los dos puentes;

pudiendo ocurrir, en cualquier instante dado, en diferente dirección, afectando fuertemente la demanda de ductilidad de la columna (Priestley *et al.*, 1996).

Este factor permite identificar la irregularidad en la altura de las pilas de apoyo del puente, clasificándose de la siguiente manera:

- (A) No existe.
- (B) Dos pilas cualesquiera cuentan con una diferencia de altura mayor de 1.25 veces.
- (C) Dos pilas adyacentes cualesquiera con alturas que difieren más de 1.25 veces.
- (D) Dos pilas cualesquiera con alturas que difieren más de 1.5 veces. En esta categoría se clasifican los puentes con cualquier tipo de irregularidad en rigidez como, la presencia de columnas cortas por causa de la existencia de otro tipo de estructura cerca a las pilas, la variación del número de columnas por eje de pilas, etc.

### 1.3.10 Longitud de apoyo en pilas ( $K_{10}$ )

Uno de los problemas más graves que se ha observado en puentes durante la acción de un sismo, es la caída de sus tramos y, por ello, independientemente del grado de refinamiento en el cálculo, conviene disponer de longitudes de apoyo adecuadas y abundantes (Alarcón, 1998). De ello, dan evidencia la caída de luces de puentes debido a movimientos diferenciales entre luces adyacentes durante sismos ocurridos recientemente; como el colapso de un panel del puente de la Bahía de San Francisco durante el sismo de Loma Prieta de 1989, y más reciente, el colapso de un vano de aproximación del puente Nishinomiya-ko, durante el sismo de Kobe en Japón de 1995. Los puentes citados quedaron fuera de servicio inmediatamente después de ocurrido el sismo. En trabajos como los de Hao (1998), se demuestra que los desplazamientos diferenciales se deben principalmente a la diferencia de las propiedades dinámicas de los vanos adyacentes y, a su vez, a la no uniformidad de la excitación en los apoyos de los puentes.

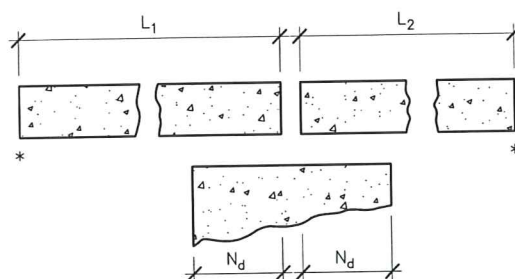
En terrenos difíciles, o cuando se requiere atravesar corrientes de agua, generalmente se buscan puentes con grandes luces y pocas pilas, éstos, a su vez, deben involucrar algún tipo de apoyo deslizante que permita desarrollar los movimientos que provocan las variaciones térmicas, la retracción y la fluencia. En otros casos, como los puentes con gran número de vanos de luz corta, los apoyos deslizantes se seleccionan para reducir el número de articulaciones a media madera (vano). Al contar con este tipo de uniones, no existirá transferencia de momentos sísmicos entre las pilas y la superestructura bajo respuesta longitudinal, incrementando los momentos sísmicos en la superestructura en comparación con un apoyo monolítico. Sísmicamente la condición más crítica se presentará en puentes con vigas simplemente apoyadas en las pilas, es decir donde cada pila

recibe dos extremos de vigas y, en los cuales, se debe garantizar el ancho de apoyo de tal manera que se evite la pérdida de apoyo de cada extremo de viga.

Una forma de limitar la mínima longitud de apoyo para tableros en la superestructura, es empleando las expresiones definidas por algunas normativas para puentes como las del CFE (1993), AASTHO (1996 y 1994), EURO-94 (CEE 1995) (comentadas y comparadas en trabajos como los de Mireles y Reinoso 1997) y las del ATC-6 (1986) y ATC-6-2 (1983). Estudiando las diferentes expresiones, se decidió utilizar las del ATC-6-2 (1983), según las cuales debe existir una longitud de apoyo mayor que una longitud de soporte mínima,  $N_d$ , de tal manera que, durante un sismo, si ocurre pérdida de apoyo, esto no ocasione la falla de la superestructura. La mínima longitud de soporte, ( $N_d$  en mm), representada en la Figura 1.8, se puede calcular de la siguiente manera:

$$N_d = 305 + 2.5L + 10H \quad (1.2)$$

Donde  $L$  es la longitud del tablero adyacente a la junta de expansión (suma de  $L_1$  y  $L_2$ ), dada en metros, y  $H$  es la altura promedio de las dos pilas adyacentes, también en metros.



\* Junta de expansión o extremo del tablero

**Figura 1.8** Longitud de apoyo en pilas.

Para su determinación, dado que este parámetro pretende tomar en cuenta lo apropiado de la longitud de apoyo en las pilas se clasifica en:

- (A) Excelente.
- (B) Aceptable.
- (C) Regular.
- (D) Deficiente.

Cada una de estas condiciones de apoyo se pueden calificar como:

**Excelente:** Longitud de apoyo mayor o igual a 1.5 veces la mínima longitud de apoyo requerida,  $N_d$ .

**Aceptable:** Longitud de apoyo mayor o igual a la mínima longitud de apoyo requerida y menor a 1.5 veces la mínima longitud de apoyo requerida,  $N_d$ .

**Regular:** Longitud de apoyo real entre 0.5 y 1.0 veces la mínima longitud de apoyo requerido,  $N_d$ .

**Deficiente:** Longitud de apoyo real menor a la mitad de la mínima longitud de apoyo requerido,  $N_d$ .

Siendo  $N_d$ , la expresión presentada en la ecuación 1.2.

### 1.3.11 Tipo de suelo ( $K_{11}$ )

En algunos casos los puentes atraviesan suelos inestables, con lo que se hace necesario colocar columnas sobre laderas escarpadas que podrían fallar, produciendo fuerzas laterales inaceptables sobre las columnas de las pilas. Esta situación se agrava si, a su vez, las pilas no cuentan con algún sistema de protección que las aisle del suelo inestable y las lleve hasta un nivel de cimentación sobre suelo estable (Priestley *et al.*, 1996). De tal forma que, al fallar el suelo, éste pueda moverse sin restricciones y sin alterar la capacidad de la columna.

El efecto del suelo de cimentación, a su vez, es un aspecto importante, ya que influye directamente en la respuesta de la estructura ante el sismo. Por esta razón, no se puede ignorar el grado de relevancia que tiene en la vulnerabilidad sísmica de puentes y, por lo tanto, se considera como un parámetro más.

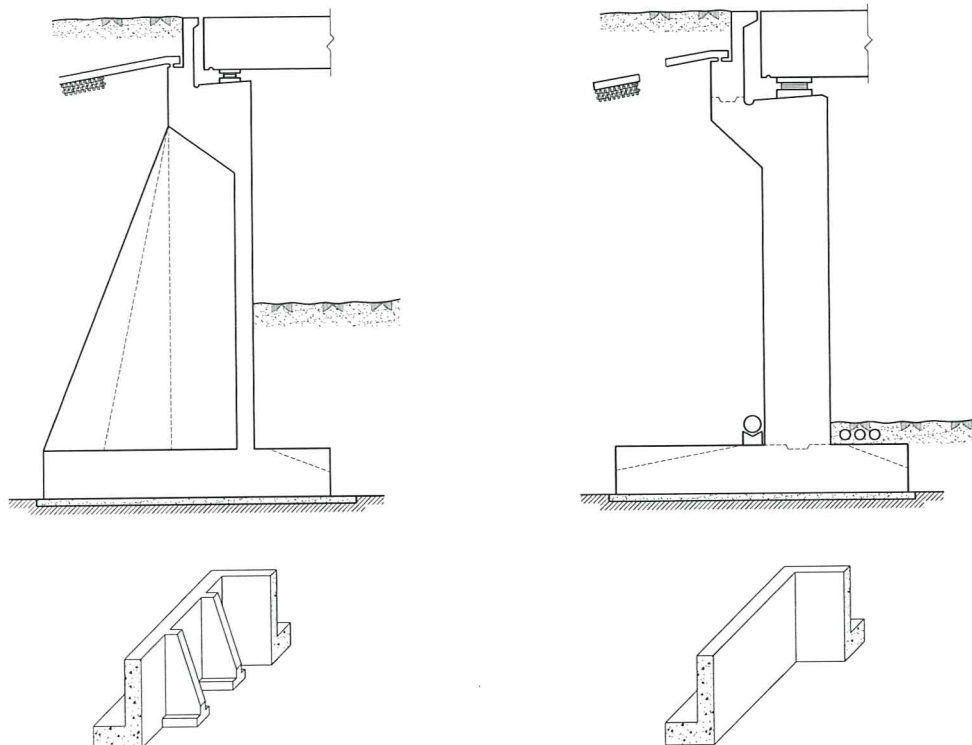
Mediante una simple inspección se puede evaluar este factor, simplificándose la determinación, limitando el análisis a la consistencia del terreno. La calificación que se sigue es la siguientes:

- (A) Roca.
- (B) Suelo granular denso o arcillas preconsolidadas rígidas.
- (C) Arenas de densidad media (limosas).
- (D) Arcillas medias a blandas.

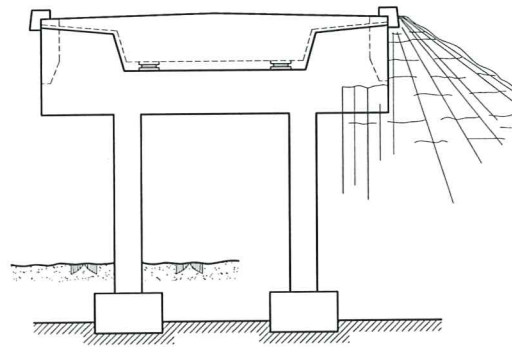
### 1.3.12 Tipo de estribo ( $K_{12}$ )

Mediante este parámetro, se intenta considerar el efecto de los estribos en el comportamiento sísmico del puente. Debido a la importancia de los efectos suelo-estructura en la respuesta sísmica de los estribos, el comportamiento es más difícil de pronosticar en comparación con el caso de las pilas. Los tipos de estribo más utilizados se presentan en la Figuras 1.9 y 1.10 (Leonhardt, 1987; Arenas y Aparicio, 1984), pudiendo ser estribos cerrados, abiertos, de tierra armada y flotantes. Algunos comentarios en cuanto a cada uno de los tipos de estribos citados son los siguientes:

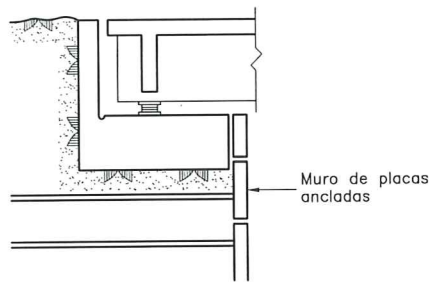
- En el estribo cerrado (ver Figura 1.9), en caso de utilizarse bajo una unión monolítica o mediante un apoyo fijo con la superestructura, debido a la relativa elevada rigidez de los estribos, en comparación con cualquier pila interna, se puede asumir que gran parte de la fuerza sísmica será absorbida por los estribos. En este caso, las pilas pueden únicamente soportar efectos diferentes a los sísmicos, aunque no se debe ignorar la posibilidad de ocurrencia de articulaciones plásticas en la parte superior o inferior de las columnas. Este tipo de estribo, bajo unión monolítica, puede hacer que la estructura se comporte como una unidad rígida, incluso con niveles de aceleración elevados. Sin embargo, a pesar del buen comportamiento observado ante sismos como los ocurridos en California, el tipo de estribo monolítico es un sistema ideal para puentes de uno o dos vanos de luces cortas. En puentes de mayor cantidad y/o longitud de luces, puede ser necesario proveer alguna forma de soporte que permita los movimientos de contracción, cambios de temperatura y la fluencia producidos entre el muro del estribo y la superestructura. Bajo respuesta sísmica longitudinal, el sistema provee una elevada rigidez y resistencia en el momento en que la separación entre el muro y la superestructura se cierre. En la dirección transversal la rigidez y resistencia dependerán de las condiciones de apoyo.



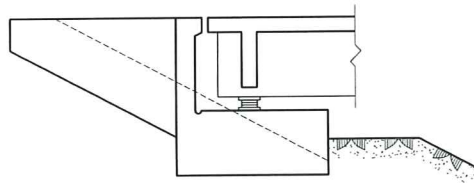
a) Estribo con muro frontal y contrafuertes  
**Figura 1.9** Tipos de estribos: a) Estribo con muro central y contrafuerte, b) Estribo con muro central.



a) Estribo abierto.



b) Estribo de tierra armada.



c) Estribo flotante sobre terraplén.

**Figura 1.10** Tipos de estribos: a) Estribo abierto, b) Estribo de tierra armada, c) Estribo flotante sobre terraplén.

- El tipo de estribo cerrado con contrafuertes, como el que se muestra en la Figura 1.9 a, aporta resistencia en la dirección transversal por medio de los muros en los extremos perpendiculares al muro frontal. En caso de requerirse resistencia adicional, una buena alternativa es colocar un sistema de cimentación con pilotes para los estribos. La resistencia lateral de los estribos puede también incrementarse mediante el uso de contrafuertes colocados detrás

del muro frontal, los cuales, a su vez, también actuarán como elementos de apoyo ante la respuesta transversal (Priestley *et al.*, 1996).

- En el estribo abierto (ver Figura 1.10 a), la construcción del muro y las alas puede reducirse fuertemente, prolongando el puente hasta casi el coronamiento del terraplén y construyendo en este lugar un banco de apoyo de poca altura que descansa sobre pilares, los cuales quedan sobre el terraplén (Leonhardt, 1986). Esta solución es adecuada para paso superior de autopista, debido a que la visión es más abierta. Sin embargo, como se muestra en la Figura 1.10 a, es un sistema que, comparativamente, no aporta la misma rigidez transversal y longitudinal que un estribo cerrado.
- Otras soluciones consisten en la utilización de estribos en tierra armada y estribos flotantes tales como los mostrados en las Figuras 1.10 b y c, aunque aportan menos resistencia sísmica al sistema.

Por lo dicho es importante el tipo de estribo que tenga el puente. La clasificación, en cuanto al tipo de estribo, es la siguiente:

- (A) Estribo cerrado (con muro frontal con o sin aletas, con muro frontal y contrafuerte).
- (B) Estribo abierto.
- (C) Estribo de tierra armada.
- (D) Estribo flotante (cimentado sobre terraplén). Muro en mampostería.

### 1.3.13 Longitud de apoyo en estribo ( $K_{13}$ )

Las uniones entre elementos portantes y soportantes deben proyectarse adecuadamente para asegurar la integridad estructural y evitar descalces en caso de grandes desplazamientos sísmicos. En las uniones móviles, deben disponerse longitudes de apoyo apropiadas entre los elementos portantes y los soportantes para evitar pérdidas de apoyo (EC 8:Parte 2, capítulo XIV).

Un inventario de puentes realizado por Chen y Mander en 1990, en el Este de los Estados Unidos, mostró que los apoyos en los estribos y los asientos de las vigas son frecuentemente considerados los más vulnerables durante un sismo. En zonas de elevado riesgo sísmico, tales como California, se ha llegado a plantear el mejoramiento sísmico de los puentes existentes con la utilización de dispositivos de apoyo aisladores, mecanismos a cortante o sistemas de restricción para limitar la demanda de ancho de apoyo. Sin embargo, suministrando tales mecanismos se corre el peligro de mejorar el comportamiento de la superestructura, trasladando el problema a la subestructura (Mander *et al.*, 1996).

En cada uno de los tipos de estribos mostrados en la Figura 1.9 y 1.10, existen varias posibilidades de conexión superestructura-estribo. Su selección depende de las condiciones del terreno, tamaño del puente y desplazamientos esperados. Cuando el estribo está rígidamente conectado al tablero, la conexión se

hace monolíticamente ó bien mediante apoyos fijos o enlaces destinados a absorber la acción sísmica. Estos estribos contribuyen a la resistencia sísmica del tablero en dirección longitudinal y transversal. En caso contrario, en uniones flexibles entre los estribos y el tablero, donde el tablero está soportado por aparatos de apoyo móviles o de tipo elastomérico, los estribos tienen una contribución despreciable a la sujeción horizontal del tablero (EC8:Parte2).

Dada la importancia de mantener el apoyo de la superestructura sobre los estribos durante y después del sismo, este parámetro se toma en consideración y, para su categorización, se considera el mismo criterio utilizado que en la evaluación de las longitudes de apoyo en pilas y articulaciones. Es así como, para su determinación, la longitud de apoyo en estribos se clasifica como:

- (A) Excelente.
- (B) Aceptable.
- (C) Regular.
- (D) Deficiente.

Calificándose cada una de estas condiciones de apoyo como:

**Excelente:** Longitud de apoyo mayor o igual a 1.5 veces la mínima longitud de apoyo requerido,  $N_d$ .

**Aceptable:** Longitud de apoyo mayor o igual a la mínima longitud de apoyo requerido y menor a 1.5 veces la mínima longitud de apoyo requerido,  $N_d$ .

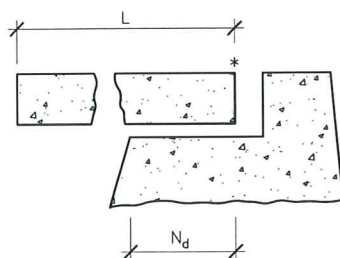
**Regular:** Longitud de apoyo real entre 0.5 y 1.0 veces la mínima longitud de apoyo requerido,  $N_d$ .

**Deficiente:** Longitud de apoyo real menor a la mitad de la mínima longitud de apoyo requerido,  $N_d$ .

Siendo  $N_d$  (mm), la longitud de soporte mínima estipulada por el ATC-6-2 (1983):

$$N_d = 305 + 2.5 L + 10 H \quad (1.3)$$

Donde  $L$ , es la longitud del tablero del puente a la junta de expansión adyacente o al extremo del puente, dada en metros (ver Figura 1.11) y  $H$  (m) es la altura promedio de las pilas que soportan el tablero del puente en la proximidad de la junta de expansión.  $H$  es igual a cero en puentes de un solo vano.



\* Junta de expansión o extremo del tablero

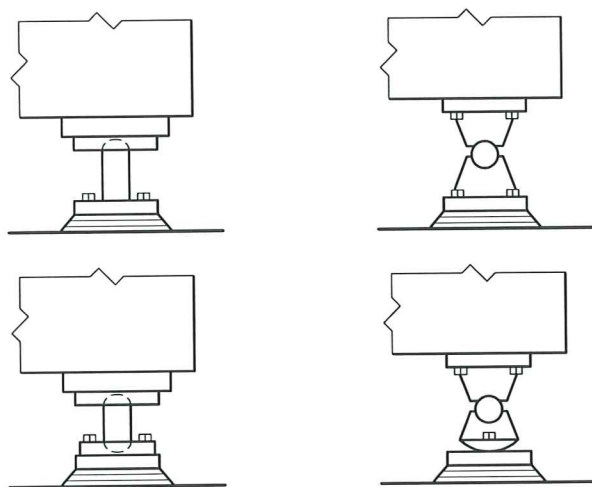
Figura 1.11 Longitud de apoyo en estribos.

### 1.3.14 Tipo de aparato de apoyo ( $K_{14}$ )

En trabajos como el de Pezeshk *et al.* (1993), se evalúa el grado de vulnerabilidad de cuatro tipos de apoyos: los apoyos oscilantes (ver Figura 1.12), apoyos de rodillos, almohadillas elastoméricas y apoyos deslizantes. Los apoyos oscilantes generalmente contruidos de acero, proveen movimiento de translación y/o rotación. Sísmicamente es el más vulnerable de los apoyos de puentes ya que, usualmente, cuenta con una gran dimensión vertical, son difíciles de reparar y pueden llegar a ser inestables después de un movimiento limitado. Los apoyos de rodillos, generalmente contruidos en acero, son estables durante un sismo, excepto en los casos que están desalineados y desplazados horizontalmente. El tercer tipo, de almohadillas elastoméricas, los cuales están contruidos de elastómero sintético o natural, dependiendo de la distorsión del material permiten el movimiento y es muy estable durante un sismo. El último tipo, de apoyo deslizante, el cual depende del deslizamiento de una superficie, puede estar constituido de láminas de asbesto entre dos superficies de hormigón o por sofisticados apoyos de TFE (Teflón) y acero inoxidable; es considerado uno de los menos vulnerables.

Cuando se construye una superestructura larga en una zona de elevada peligrosidad sísmica, se plantea la duda de si es suficiente confiar su estabilidad horizontal en algunos apoyos elásticos de neopreno zunchado. Es indudable que la presencia de un apoyo fijo aumenta la seguridad, pero la concentración de fuerza horizontal que éste debe soportar plantea serios problemas para su proyecto y aspecto estético. Por ello, una solución es utilizar los dispositivos amortiguadores para acciones dinámicas debidas a sismo, (Arenas y Aparicio, 1987).

A su vez, basados en las experiencias obtenidas de sismos pasados, en lo referente a tipos de apoyos, se ha podido confrontar que los apoyos articulados y con rótulas (ver Figura 1.12), han mostrado un comportamiento pobre ante la acción del sismo. Cuando se tienen estos apoyos, debe pensarse en su sustitución, dependiendo de en que zona sísmica se encuentre el puente. La sustitución del dispositivo de apoyo puede realizarse con apoyos elastoméricos y otros más sofisticados, como los dispositivos disipadores de energía, recientemente desarrollados (ATC 6-2, 1983).



**Figura 1.12** Apoyos vulnerables.

En lo referente a tipos de apoyos, la clasificación adoptada es:

- (A) Apoyos con dispositivos disipadores de energía o con aislamiento sísmico.
- (B) Apoyos elastoméricos.
- (C) Apoyos de rodillos.
- (D) Aparatos de apoyos metálicos que pueden ser fijos u oscilantes (rótula lineal y rótula lineal deslizante). Rótulas de hormigón.

### 1.3.15 Estado de conservación del puente ( $K_{15}$ )

Un aspecto de vital importancia en cualquier estructura, desde el punto de vista de la evaluación de su vulnerabilidad sísmica, es su estado de conservación. Es obvio que una estructura, y en el caso de un puente, aspectos como el período de servicio, el mantenimiento de todos los elementos de la estructura, el reacondicionamiento sísmico del puente a lo largo de su vida útil y el reemplazamiento de los elementos deteriorados, juegan un papel importante en el momento de producirse la acción del sismo. Por esta razón, se ha considerado como un parámetro más en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de un puente.

Es evidente que, con la edad, el porcentaje de deficiencias de un puente va en aumento. Sin embargo, la aplicación de buenos programas de mantenimiento pueden hacer que las tasas de deficiencias sean menores. De aquí, la importancia de la existencia de políticas de mantenimiento de puentes, con lo cual a pesar de los años, éstos se conserven en buen estado. Esto implica contar con un completo y buen inventario de puentes, en el que se evalúe el estado actual del puente.

Otro aspecto a considerar en el momento de evaluar el estado de conservación de un puente, es saber si con los años el puente ha sido estudiado sísmicamente y, en caso de haber requerido algún tratamiento especial, si éste se ha llevado a cabo. Si el puente no ha sido reacondicionado sísmicamente, debido a

que los estudios realizados han mostrado buen comportamiento ante el sismo, evidentemente se puede estar más tranquilo que en los casos donde el puente no ha sido sometido a ningún tipo de análisis sísmico. Sin embargo, el hecho de reacondicionar sísmicamente un puente no quiere decir que esté fuera de peligro ante cualquier acción sísmica a lo largo del tiempo, pero sí, al menos, será una estructura que contará con un grado de fiabilidad mayor.

De todo lo anterior no se puede descartar el efecto que puede tener el someter al puente a cargas mayores a las que fue proyectado. Este aspecto en muchos casos es difícil de evaluar, pero no se ignora el gran efecto que puede tener sobre el estado de conservación del puente y, por tanto, sobre la eficiencia del mismo.

Por lo anteriormente expuesto, el estado de conservación en que se encuentra el puente, se califica de la siguiente manera:

(A) Excelente.

(B) Aceptable.

(C) Regular.

(D) Deficiente.

Pudiéndose calificar cada una de estas condiciones como:

**Excelente:** El puente se encuentra incluido en un programa de mantenimiento. Ha sido estudiada su necesidad o no de reacondicionamiento sísmico y, en caso de requerir tratamiento, ha sido intervenido. Aparentemente, presenta un excelente estado en todos sus elementos. No hay indicios de socavación.

**Aceptable:** Puente que no está incluido en ningún programa de mantenimiento, o si está incluido, no ha sido tratado ni ha sido estudiado sísmicamente. Pero, aparentemente todo sus elementos se encuentra en buen estado.

**Regular:** A diferencia de la descripción anterior, el puente es cuestionable en alguno de sus elementos.

**Deficiente:** Puente en mal estado, bien sea en general o de alguno de los elementos estructurales (pilas, apoyos, estribos, cimientos y superestructura). Puente afectado por la socavación.

En esta última división, se pueden ubicar los puentes construidos sin los requerimientos sísmicos actuales (antes de 1986) y que no han sido mejorados sísmicamente.

### 1.3.16 Procedimiento constructivo de la superestructura (hormigón) ( $K_{16}$ )

Con este parámetro se pretende incluir la influencia que el procedimiento seguido en la construcción de la superestructura tiene en el comportamiento sísmico de un puente. Según el procedimiento constructivo de la superestructura, siempre y cuando ésta sea en hormigón, puede clasificarse de la siguiente manera:

- (A) Hormigonado “in situ”.
- (B) Vigas prefabricadas.
- (C) Dovelas prefabricadas con junta epóxica.
- (D) Dovelas prefabricadas con junta seca.

### 1.3.17 Procedimiento constructivo de las pilas (hormigón) ( $K_{17}$ )

De igual manera que en para la superestructura, el procedimiento constructivo de las pilas puede convertirse en un aspecto importante en el momento de la ocurrencia de un sismo a nivel de los puentes.

Según el procedimiento constructivo de las pilas se adopta la siguiente clasificación:

- (A) Hormigonadas “in situ”.
- (B) Prefabricadas de una pieza.
- (C) Dovelas prefabricadas.

### 1.3.18 Potencial de licuefacción ( $K_{18}$ )

Sí los puentes deben construirse en suelos con un elevado potencial de licuefacción, la primera de las alternativas sería evitarlo, si fuere posible, ya que las pérdidas de soporte, el potencial de esparcimiento lateral y las fuerzas de suelo licuefactable sobre la subestructura, durante el sismo, pueden llevarlo al colapso. Muchos estudios sobre el tema (Youd, 1998; Youd e Idriss, 1997; Hamada y O'Rourke, 1996; Hwang y Lee, 1991) coinciden en resaltar lo desfavorable que puede llegar a ser el efecto de la licuefacción del suelo. Por ello, en este estudio, este parámetro se considerará también considerado como uno de los más influyentes en la determinación de la vulnerabilidad sísmica de puentes.

Las investigaciones desarrolladas sobre la licuefacción producida por sismos, han demostrado que este efecto puede llegar a producir los siguientes daños: 1) asentamiento, ladeamiento y volcamiento de las estructuras, debido a la reducción de la capacidad de soporte del suelo, 2) ladeamiento o colapso de muros de retención debido al incremento de presión y a la reducción de capacidad cortante del suelo y 3) flotación de las estructuras enterradas, debido a su capacidad de flotar en el suelo licuefactable. Algunos sismos ocurridos en Japón y Estados Unidos, como los de San Francisco en 1906, el de Niigata en 1964, San

Fernando en 1971, Nihonkai-Chubu en 1983, Kobe en 1995, presentaron diferentes niveles de daño producidos en puentes por la licuefacción del suelo.

En Japón el sismo de Fukui de 1948 causó licuefacción a lo largo tanto del río Kuzuryu como de sus afluentes, el Takeda, Hyogo, Hino y Asuwa, afectando en forma crítica a varios puentes y carreteras. Siendo los más críticos la falla en las pilas del puente Nagaune, el colapso del puente Nakatsuo y el colapso del puente JNR. En el sismo de Niigata de 1964, el puente Showa fue el peor ejemplo de daño estructural provocado por la acción del sismo. Este puente, había sido terminado tan solo cinco meses antes del sismo. Cinco vigas simplemente apoyados entre las pilas P2 y P7, cada una de 28 m de longitud, cayeron sobre el agua. Las pilas, las cuales correspondían a sistemas de pila-pilotes no contaban con una conexión fija a la superestructura. Durante el sismo, la licuefacción del suelo provocó que una de las pilas permaneciera fija mientras que la otra se movía y, así, los tramos del tablero perdieron apoyo y cayeron. Otro puente afectado por licuefacción durante este sismo fue el Yachiyo, el cual registró daños en los estribos y en las pilas. En el sismo de Philippines de 1990 ocurrieron grandes desplazamientos laterales en las cercanías del puente Mágsaysay, causando serios daños. Este puente de hormigón armado, de siete vanos, sufrió el colapso de tres de ellos debido al vuelco inducido por la licuefacción bajo dos de sus pilas (Hamanda y O'Rourke, 1992).

Sin entrar en mayores detalles, que puedan dificultar la estimación del potencial de licuefacción del suelo sobre el cual está localizado el puente, para este parámetro se establecen las siguientes categorías:

- (A) No hay posibilidad de ser un suelo licuefactable.
- (B) No se puede conocer el potencial de licuefacción.
- (C) El suelo puede licuefactar.

### 1.3.19 Elementos no estructurales ( $K_{19}$ )

Cuando el puente constituye un medio de paso, no sólo de vehículos y personas, sino también de otros sistemas de líneas vitales como vías de comunicación, de electricidad, de transporte de aguas, etc. estos sistemas, en el momento de la ocurrencia de un sismo, pueden llegar a afectar la respuesta dinámica del puente. Incluso el daño que sobre ellas se puede originar, puede llegar a modificar la capacidad estructural del puente.

Este parámetro incluye los efectos que pueden tener elementos externos al puente u otras líneas vitales que se transportan a través del puente, como agua, luz, conductos de comunicación, etc.; los cuales al poder llegar a ser vulnerables harán vulnerable al puente.

- (A) No existen o si existen no afectan al comportamiento del puente.

- (B) Existen, pero no se puede garantizar que harán vulnerable el puente durante el sismo.
- (C) Existen y pueden afectar el comportamiento sísmico del puente.

## 1.4 Conclusiones

En este capítulo se ha analizado la influencia de las características estructurales de los puentes en cuanto a su vulnerabilidad sísmica, mediante la determinación de 19 parámetros. La determinación de estos parámetros, es la base del modelo de análisis de vulnerabilidad sísmica de puentes a gran escala.

Las conclusiones más relevantes son las siguientes:

1. Para el estudio del comportamiento sísmico de puentes proyectados y existentes se realizaron análisis de su respuesta dinámica frente a la acción del sismo mediante programas computacionales como SEISAB (Imbsen *et al.*, 1988), SAP-90 (Wilson y Habibullah, 1994), CAL-86 (Wilson, 1986). Cada puente se modeló buscando una idealización estructural lo más cercana posible a la estructura real y al tipo de acción impuesta, el sismo. De las respuestas obtenidas para cada uno de los puentes, se observó que el parámetro que marcó notoriamente su respuesta dinámica fue la continuidad de la superestructura; es decir la existencia de articulaciones internas en los puentes. El número de ellas y su ubicación fueron aspectos relevantes en la respuesta.
2. Los daños causados por sismo en los puentes, han motivado el estudio y profundización en el tema de la respuesta sísmica de puentes. Las observaciones y posteriores estudios teóricos, han servido para entender mejor la problemática sísmica de los puentes consiguiéndose, con ello, mejorar su comportamiento estructural ante la acción del sismo; buscando, a su vez, que los puentes sean cada vez menos vulnerables. Por ello, en esta investigación, se tiene en cuenta la experiencia basada en sismos pasados, tomándose como uno de los puntos a tener en cuenta en la selección de los parámetros de influencia en la vulnerabilidad sísmica de puentes. Los sismos seleccionados han sido los de San Fernando, Loma Prieta, Northridge y Kobe por ser los que han afectado fuertemente a los puentes. Sin embargo, no se ignoran los daños que han ocurrido durante otros sismos como el de Haicheng de 1975, China, donde el 84% de los puentes de carretera en la región oeste fueron dañados o el de Tangshan en 1976, China, donde el 40% de los puentes en la región afectada fueron dañados, (Xizhu *et al.*, 1996). De los cuatro sismos seleccionados, se han estudiado las causas principales de los daños, seleccionándose a partir de ellos algunos de los parámetros.
3. De los modelos existentes estudiados, se han escogido cinco como paso complementario en la selección de los parámetros: Kiremidjian y Basöz (1997), Seong Kim (Ren y Gaus, 1996), Dicleli y Bruneau (1996), Pezeshk *et al.*

- (1993) y ATC 6-2 (1983). La selección efectuada se basa en la sencillez y claridad con que estos modelos utilizan los parámetros más importantes de los puentes para la determinación de la vulnerabilidad sísmica de puentes. La mayoría de los modelos existentes seleccionados, giran alrededor de la determinación de los parámetros con una mayor influencia en el daño sísmico.
4. La búsqueda de opiniones de expertos ha sido una decisión muy acertada en el momento de concretar la definición de los parámetros a utilizar. Las opiniones, al provenir de distintos tipos de especialistas versados en la investigación, proyecto y construcción de puentes en España y América, corroboraron y complementaron los parámetros inicialmente seleccionados (17), para de esta manera, finalmente elegir como diecinueve (19) los parámetros de mayor influencia en la vulnerabilidad sísmica de puentes.
  5. No se ignora la influencia del espaciamiento de las pilas en la respuesta dinámica del puente ante la acción del sismo (Bayrak, 1996; Berrah y Kausel, 1992; Kiureghian y Neuenhofer, 1992). Sin embargo, no es un parámetro que se haya considerado en el desarrollo de los modelos de análisis de la vulnerabilidad existentes o que haya mostrado su influencia en los daños causados en puentes por sismos pasados. Por ello, este parámetro no fue tomado en cuenta dentro de los seleccionados para desarrollar el modelo.
  6. Además, de definir los parámetros que más influyen en la vulnerabilidad sísmica de puentes se establecieron las condiciones de calidad para cada uno de ellos. Estas condiciones se clasificaron en la mayoría de los casos entre la clase **A** y la **D**. Inicialmente, la subdivisión de cada uno de los parámetros se efectuó en base al estudio del comportamiento sísmico de puentes, al análisis comparativo de los métodos existentes de evaluación sísmica que involucran modelos de vulnerabilidad y a la experiencia recogida de sismos pasados. Posteriormente, tomando como base esta primera definición de las condiciones de calidad de cada parámetro se solicitó a los expertos su opinión en cuanto a su consideración y grado de vulnerabilidad de cada uno ellas. Finalmente, se estudiaron las respuestas de los especialistas y comparándolas con los estudios de la respuesta sísmica de los elementos de un puente, se definieron las condiciones de calidad correspondientes a cada uno de los parámetros.
  7. Los parámetros seleccionados no son excesivamente numerosos, ya que abarcaran, de la mejor forma posible todos los aspectos involucrados en los daños que un puente puede sufrir debido a la acción del sismo.
  8. Es importante citar el importante papel que ha jugado el estudio del estado del arte efectuado por Maldonado *et al.* (1998 c), en lo referente a la influencia de diversos parámetros de los puentes en la determinación de su vulnerabilidad sísmica.

## Descripción del modelo

### 2.1 Definición

El método propuesto constituye una descripción completa de la información necesaria para la obtención de una expresión cuantitativa de la vulnerabilidad sísmica de puentes denominada “*Índice de vulnerabilidad*”. El cálculo de este índice se basa en la identificación de un número de parámetros, considerados los más relevantes e influyentes en el daño que sufrirá un puente bajo la acción sísmica, y en la relación existente entre estos parámetros y sus valores de importancia.

En base a los estudios realizados sobre comportamiento sísmico de puentes, experiencias posterremoto, estudios de modelos existentes y opiniones de expertos, se realizó la selección de los parámetros. Cada parámetro se analizó detenidamente y calificado mediante una escala de condiciones de calidad de la *A* a la *D*.

Las calificaciones de las diferentes condiciones de calidad, en su mayoría cuatro, de los parámetros seleccionados y los valores de importancia de cada uno de los parámetros dentro de la determinación de la vulnerabilidad sísmica total del puente, se realizaron mediante las opiniones de expertos.

Dado que el modelo deviene de opiniones de expertos, que en algunos casos puede ser subjetiva e imprecisa, se utilizaron técnicas de conjuntos difusos. La aritmética difusa (Bandemer y Gottwald, 1995; Tee *et. al.*, 1988) se ha empleado para relacionar las calificaciones de cada parámetro y sus respectivos valores de importancia. El método tradicional de combinación de varias piezas de

información difusas, con desigual importancia o pesos, es el llamado "*peso promedio*" y es el utilizado para calcular el "*índice de vulnerabilidad sísmica de puentes*", expresándose como:

$$I.V._j = \frac{\sum_{i=1}^{19} W_i K_i}{\sum_{i=1}^{19} W_i} \quad (2.1)$$

Donde  $I.V._j$  es el índice de vulnerabilidad sísmica del puente  $j$ ,  $K_i$  es una medida del grado de vulnerabilidad de la categoría del parámetro  $i$ . Los valores  $W_i$  son una medida de la opinión de la importancia asociada al parámetro  $i$  respecto a los demás parámetros.

### 2.1.1 Algoritmo para el cálculo del índice de vulnerabilidad

El cálculo del peso promedio difuso para la evaluación del índice de vulnerabilidad sísmica de puentes se realizó de la siguiente forma:

- 1) Traslación de las variables de calificación de cada una de las condiciones de calidad de los diecinueve parámetros a conjuntos difusos, mediante la definición de las correspondientes funciones de pertenencia. Estas funciones se construyeron a partir de las opiniones de expertos. La forma cómo se construyeron estas funciones se expondrá más adelante.
- 2) Conversión de las variables de importancia de cada parámetro a conjuntos difusos mediante las funciones de pertenencia. De igual manera que en el punto anterior, estas funciones de pertenencia se elaboraron en base a la opinión de expertos.
- 3) Combinación de las variables de calificación y las variables de importancia difusas para obtener un conjunto difuso que represente el sistema completo, mediante la expresión 2.1. Esta combinación da como resultado un conjunto difuso llamado "*índice de vulnerabilidad*".
- 4) Transformación del conjunto difuso resultante, "*índice de vulnerabilidad*", a una expresión lingüística como "*nada*", "*poco*", "*medianamente*", "*muy*" y "*absolutamente*" vulnerable. La transformación de un conjunto difuso a una expresión lingüística natural es un proceso relativamente simple, el cual involucró la determinación de la distancia del conjunto difuso resultante a cada uno de los conjuntos difusos que representan las expresiones lingüísticas citadas. La mínima distancia entre el conjunto difuso resultante y los conjuntos difusos que representan las variables lingüísticas, es la expresión lingüística a la que se le asocia el índice de vulnerabilidad calculado (Tee *et al.*, 1988).

5) Asociación a la variable lingüística del índice de vulnerabilidad calculado de un valor numérico no difuso. Esto se ha hecho escogiendo como valor numérico de índice el máximo de la función de pertenencia resultante del cálculo del peso promedio difuso.

Los puntos 3, 4 y 5 descritos para el cálculo del grado de vulnerabilidad de un puente, han sido ejecutados mediante un programa de ordenador, desarrollado en este modelo; involucrando las funciones de pertenencia derivadas de las opiniones de los expertos (Maldonado *et al.*, 2000).

## 2.2 Variables lingüísticas utilizadas

En el algoritmo de desarrollo para el cálculo del índice de vulnerabilidad mediante la utilización de opiniones de expertos fue necesario definir adecuadamente las variables lingüísticas para describir los diferentes grados de vulnerabilidad.

Investigaciones sobre evaluación del daño de estructuras o evaluación del estado de estructuras afectadas por el sismo (Yao, 1980), en las cuales el uso de la forma lingüística se maneja mediante teoría difusa, han servido de base para la definición de las variables utilizadas en este modelo.

Estas variables lingüísticas han sido utilizadas para calificar cada una de las condiciones de calidad impuestas a cada parámetro. A su vez, se han empleado también para asociarle a cada función de pertenencia del índice de vulnerabilidad calculado un cierto grado de vulnerabilidad.

Así pues, las variables lingüísticas naturales seleccionadas para calificar los grados de vulnerabilidad son “*nada*”, “*poco*”, “*medianamente*”, “*muy*” y “*absolutamente*” vulnerable. Cada variable requirió la asignación de un valor numérico, escogiéndose arbitrariamente una escala comprendida entre 0 y 9 para identificar cada grado de vulnerabilidad.

Los valores numéricos asignados a cada variable para la materialización de las encuestas fueron:

<b>0</b>	<b>NADA</b> Vulnerable
<b>3</b>	<b>POCO</b> Vulnerable
<b>5</b>	<b>MEDIANAMENTE</b> Vulnerable
<b>7</b>	<b>MUY</b> Vulnerable
<b>9</b>	<b>ABSOLUTAMENTE</b> Vulnerable

Posteriormente, los valores citados se representaron por medio de conjuntos difusos compuestos de valores numéricos. En esta investigación, los conjuntos difusos que representan las variables relativas al grado de vulnerabilidad, se asumen como:

Nada	=	{ 110 , 010 }
Poco	=	{ 010 , 113 , 015 }
Medianamente	=	{ 013 , 115 , 017 }
Muy	=	{ 015 , 117 , 019 }
Absolutamente	=	{ 017 , 119 }

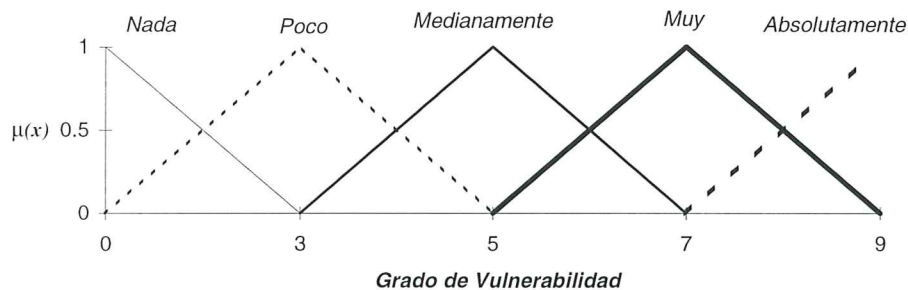
Siendo de la forma:

$$y = \{ m(x) \mid x \} \quad (2.2)$$

Donde  $m(x)$  denota el grado de pertenencia de  $x$ , definiendo  $x$  como el universo de la vulnerabilidad del puente en los conjuntos difusos.

Para la definición de las funciones de pertenencia de las variables que definen el grado de vulnerabilidad del puente se toma solamente el universo formado por los valores 0, 3, 5, 7 y 9. El involucrar más elementos en el universo ayudaría a representar mejor la cantidad de interés, no obstante, también involucraría una mayor manipulación aritmética en los cálculos. Por ello, se eligió tomar el conjunto difuso con sólo los cinco elementos citados.

La representación gráfica de las funciones de pertenencia de las variables lingüísticas utilizadas es la siguiente:



**Figura 2.1** Funciones de pertenencia de las variables lingüísticas “nada”, “poco”, “medianamente”, “muy” y “absolutamente” vulnerable.

## 2.3 Realización de encuestas a los expertos

Una vez identificados los diferentes parámetros que pueden influir en la vulnerabilidad de los puentes (expuesto en el capítulo 1) y los distintos aspectos a considerar dentro de cada parámetro, se continuó con la determinación de la calificación de cada parámetro. Para este fin se consideró la opinión de expertos en el tema.

Las opiniones fueron recopiladas mediante la realización de dos encuestas. La primera tenía como finalidad obtener las calificaciones de los parámetros y, la segunda, la determinación del valor de importancia de cada parámetro dentro de la determinación de la vulnerabilidad total del puente. Para las calificaciones de los parámetros, cada uno de ellos se dividió en tres o cuatro condiciones de calidad y,

de cada uno de ellos, se preguntó el grado de vulnerabilidad que se creía era el más conveniente.

Para la realización de las encuestas se tomó como base el estudio presentado en el capítulo uno. A su vez fue necesario la definición de las categorías de grado de vulnerabilidad que se debían determinar para que así los expertos pudieran responder a cada una de las preguntas de la primera encuesta. Debido a ello fue necesaria la determinación de variables lingüísticas como “*nada*”, “*poco*”, “*medianamente*”, “*muy*” y “*absolutamente*” vulnerable. La definición de estas variables esta expuesta en el apartado anterior.

Debido a que se deseaba contar con información de expertos, tanto europeos como americanos, a una encuesta base se le realizaron las debidas modificaciones, de acuerdo con la localización geográfica del experto.

### 2.3.1 Muestra tomada para realizar las encuestas

Con la finalidad de obtener información fiable en las respuestas de las encuestas, se buscaron ingenieros expertos en los temas de puentes y vulnerabilidad sísmica. No siendo tarea fácil, se decidió ampliar el ámbito de expertos fuera de España, enviando las encuestas a otros países de América como Colombia, México, Ecuador y Venezuela.

La elección de una muestra de expertos fue una tarea laboriosa y delicada, ya que se pretendía que los especialistas contaran con un buen conocimiento del tema, una adecuada experiencia en el campo de trabajo y disponibilidad en el momento de responder las encuestas.

La muestra total estuvo formada por cincuenta (50) expertos, el número de encuestas enviadas a cada uno de los cinco países fueron diferentes, dado que la base de datos de los expertos con la que se contaba en el momento de enviar las encuestas no era homogénea en cantidad de expertos por país. La muestra de los cincuenta expertos estuvo formada por especialistas de los cinco países mencionados, distribuidos de la siguiente manera y representada en la Figura 2.2:

Colombia :	42% de la muestra total enviada
Ecuador :	10% de la muestra total enviada
España :	16% de la muestra total enviada
México :	22% de la muestra total enviada
Venezuela :	10% de la muestra total enviada

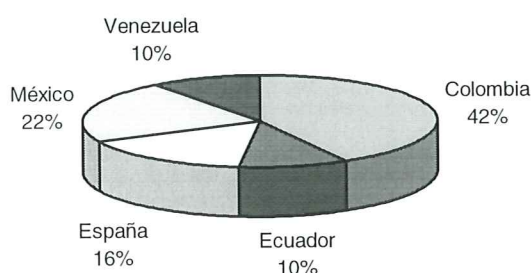


Figura 2.2 Distribución de la muestra total de expertos a los que se enviaron encuestas.

### 2.3.2 Forma de realizar las encuestas

Las encuestas fueron pensadas y elaboradas buscando que fueran breves, concisas y claras. Se construyeron en forma de tablas para facilitar la forma de respuesta y, al mismo tiempo, para organizar la información de tal manera que el encuestado no perdiera el sentido de la pregunta.

Las encuestas fueron, como se ha citado, dos: la primera tenía como finalidad el comparar el grado de vulnerabilidad (*"nada"*, *"poco"*, *"medianamente"*, *"muy"* y *"absolutamente"* vulnerable) de cada una de las clasificaciones (*A*, *B*, *C* y *D*) para un determinado parámetro  $K_i$  y asignar a cada división un grado de vulnerabilidad; la segunda, tenía como propósito el conocer la importancia relativa que existe entre los diferentes parámetros.

**PRIMERA ENCUESTA**

**PRÓPOSITO DEL CUESTIONARIO:** El propósito de este cuestionario es comparar el grado de vulnerabilidad de cada una de las clasificaciones (*A*, *B*, *C* y *D*) dentro del parámetro  $K_i$  respectivo.

**INSTRUCCIONES DE LLENADO:** A continuación se presenta una tabla la cual contiene los diecisiete (17) parámetros  $K_i$  que se cree influyen en la determinación de la vulnerabilidad sísmica de un puente, y sus correspondientes clasificaciones *A*, *B*, *C* y *D*. Cada una de estas clasificaciones deberá ser llenada de acuerdo a la siguiente escala de valores dado el grado de vulnerabilidad que considere para cada clasificación:

NADA Vulnerable	0
POCO Vulnerable	3
MEDIANAMENTE Vulnerable	5
MUY Vulnerable	7
ABSOLUTAMENTE Vulnerable	9

K <sub>1</sub> = AÑO DE PROYECTO Y CONSTRUCCIÓN DEL PUENTE	
A	Después de 1994.
B	Entre 1974 y 1994.
C	Entre 1968 y 1974.
D	Antes de 1968.

Figura 2.3 Modelo de la primera encuesta para el parámetro  $K_1$ .

**SEGUNDA ENCUESTA**

**PROPOSITO DEL CUESTIONARIO:** La finalidad de este cuestionario es conocer la importancia relativa que existen entre los diecisiete parámetros  $K_i$ .

**INSTRUCCIONES DE LLENADO:** A continuación se presenta una tabla con los diecisiete parámetros solamente. Se deberá llenar cada fila con el valor que crea conveniente de acuerdo a la importancia que considere tiene el parámetro en comparación con los restantes. La escala de calificación es de 0 a 10, pudiéndose llegar a parámetros que considere igualmente importantes y por lo tanto tendrán la misma calificación.

NADA Importante	0
MÁXIMA Importancia	10

$i$	PARÁMETRO	CALIFICACIÓN
1	Año de Proyecto y construcción	

Figura 2.4 Modelo de la segunda encuesta para el parámetro  $K_1$ .

Las dos encuestas fueron elaboradas con el mismo esquema. Se inició describiendo el “*propósito*” de dicha encuesta, siguiendo con las “*instrucciones de llenado*” y finalizando con las preguntas. Cada encuesta, a su vez, contó con un espacio para observaciones y para alguna pregunta específica. Esto se realizó pensando en dar oportunidad al experto de expresar sus opiniones relativas a la forma en que se realizó la encuesta o de buscar su aportación al tema. En las Figuras 2.3 y 2.4 se presentan ejemplos de la primera y de la segunda encuestas para el primer parámetro.

En el momento de enviar las encuestas se contaba con 17 parámetros seleccionados, de tal forma que bajo este número se realizó y se recibieron observaciones de los expertos.

### 2.3.3 Análisis de la información

La buena aceptación de las encuestas por parte de los expertos se reflejó en el número de las recibidas y en las valiosas aportaciones que muchos de los especialistas anexaron como observaciones.

Durante algunos meses se estuvo a la espera de la respuesta y una vez recibidas las mínimas deseadas, se dio paso al procesamiento de los datos recibidos. Inicialmente se trató de forma estadística, aunque estos resultados no se utilizaron en el desarrollo del modelo del análisis de la vulnerabilidad sísmica de este estudio. Por esta razón tales resultados no son presentados.

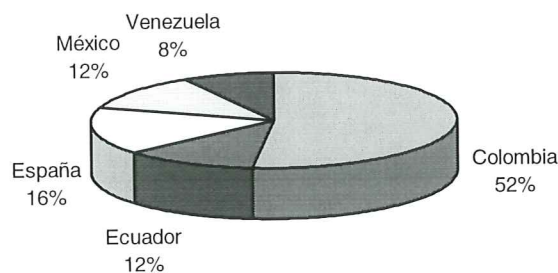
Los datos una vez adquiridos, se tomaron en su totalidad como aceptables, dada la fiabilidad de las respuestas por parte de los expertos. De esta manera, se utilizaron todas las respuestas para construir las funciones de pertenencia necesarias para el desarrollo del modelo.

### 2.3.3.1 Resultados

De los cincuenta expertos a los que se les envió las encuestas, correspondientes a cinco países, se obtuvo una buena cantidad de respuestas. Veinticinco expertos (50%) enviaron sus opiniones. El visto bueno de las encuestas fue aceptable en todos los países, pero dado el mayor número de encuestas enviadas a Colombia, fue de este país de donde se obtuvo la mayor cantidad de respuestas.

El porcentaje de respuestas obtenidas fue el siguiente :

Colombia :	52% de la muestra total enviada
Ecuador :	12% de la muestra total enviada
España :	16% de la muestra total enviada
México :	12% de la muestra total enviada
Venezuela :	8% de la muestra total enviada



**Figura 2.5** Distribución de muestra de opiniones de expertos recibidas.

Los resultados de las encuestas fueron utilizados en el desarrollo del método. Las variables de calificación de cada una de las condiciones de calidad de los 17 parámetros se trasladó a conjuntos difusos mediante el uso de las funciones de pertenencia, las cuales fueron precisamente construidas a partir de opiniones de expertos. Así mismo, las variables de importancia se transformaron en conjuntos difusos a través de las funciones de pertenencia construidas, a su vez, con opinión de expertos.

La subjetividad e incertidumbre encontrada en las respuestas era de esperar. Por ello, existen algunas calificaciones contradictorias dadas por los especialistas a una misma clasificación dentro de un parámetro. Sin embargo, se trataba de recopilar la mayor cantidad y calidad de opiniones para, posteriormente, analizarlas y encasillarlas en un modelo de cálculo de la vulnerabilidad sísmica de los puentes.

En general, las respuestas de las encuestas fueron buenas, por ello no se ignoró ninguna de ellas. Al contrario, todas se tuvieron en cuenta, con el mismo

peso para la construcción de las funciones de pertenencia. Por lo tanto, las respuestas de los expertos quedan directamente incluidas en las funciones de pertenencia utilizadas en el modelo.

## 2.4 Construcción de las funciones de pertenencia

Para la construcción de las funciones de pertenencia se aprovechó la información de las respuestas de las encuestas obtenidas de 25 expertos de cinco países: España, Colombia, Ecuador, Venezuela y México. Los valores de pertenencia se calcularon en base al número de respuestas favorables de cada clasificación particular (Tee *et al.*, 1988). A modo de ejemplo, se presenta a continuación la forma de obtención de la función de pertenencia del parámetro “longitud de apoyo en pilas” ( $K_{10}$ ).

Las funciones se construyeron, inicialmente, con los datos de las encuestas. La forma de estas funciones, en su mayoría, resultaron variar entre triangular y trapezoidal. A continuación, se presenta un ejemplo ilustrativo de la forma de construcción de las funciones de pertenencia; posteriormente, se exponen las debidas correcciones y ajustes hechos y, finalmente, se presentan las funciones incorporadas en el esquema de cálculo del índice de vulnerabilidad mediante conjuntos difusos.

### 2.4.1 Ejemplo de cálculo de la función de pertenencia

Para ilustrar la definición de las funciones de pertenencia, nos basaremos en el cálculo desarrollado para las clasificaciones *A*, *B*, *C* y *D* del parámetro  $K_{10}$  (“longitud de apoyo en las pilas”).

Recordemos que la variación del grado de vulnerabilidad se representa en una escala comprendida entre 0 y 9, indicando 0 “nada vulnerable” y 9 “absolutamente vulnerable”. La escala para el grado de vulnerabilidad en las funciones de pertenencia es la misma que la utilizada en las encuestas. Los encuestados tenían la posibilidad de responder entre valores diferentes de 0, 3, 5, 7 y 9, pero en general las respuestas tendieron a no salirse de los valores predefinidos. En principio, se tuvo también en cuenta el número de respuestas de los especialistas que respondieron 1 ó 2 ó 4 ó 6 u 8.

A continuación, en la Tabla 2.1 se presenta el número de respuestas favorables a las calificaciones de 0 a 9 correspondientes al parámetro en cuestión:

**Tabla 2.1** Número de respuestas favorables relativos al grado de vulnerabilidad 0 a 9 de las cuatro condiciones de calidad del parámetro “longitud de apoyo en pilas”.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	N. Total Encuestados
<i>A</i>	6	1	1	16	0	0	0	0	0	0	24
<i>B</i>	0	0	0	8	1	13	1	0	0	0	23
<i>C</i>	0	0	0	0	0	8	1	12	0	2	23
<i>D</i>	0	0	0	1	0	2	0	7	0	14	24

Los anteriores valores se ajustaron a una escala comprendida entre 0 a 1, dividiendo el número de respuestas favorables por el número total de encuestados. En la Tabla 2.2 se presentan los resultados obtenidos:

**Tabla 2.2** Número de respuestas favorables dividido por el número total de encuestados.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>A</i>	0.25	0.04	0.04	0.67	0	0	0	0	0	0
<i>B</i>	0	0	0	0.35	0.04	0.57	0.04	0	0	0
<i>C</i>	0	0	0	0	0	0.35	0.04	0.52	0.0	0.09
<i>D</i>	0	0	0	0.04	0.0	0.08	0.00	0.29	0.0	0.58

Posteriormente, los valores se normalizaron de tal manera que a cada clasificación (*A*, *B*, *C* y *D*), como mínimo uno de sus valores llegue a "1".

**Tabla 2.3** Valores normalizados a "1".

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>A</i>	0.38	0.06	0.06	1.0	0	0	0	0	0	0
<i>B</i>	0	0	0	0.62	0.08	1.0	0.08	0	0	0
<i>C</i>	0	0	0	0	0	0.67	0.08	1.0	0	0.17
<i>D</i>	0	0	0	0.07	0	0.14	0	.50	0	1.0

Hasta este punto se trabajó de forma independiente con los valores, sin considerar el concepto de curva (continuidad). En la clasificación *C*, por ejemplo, no existe un valor para 8. Por ello se debe dar solución a las escalas que faltan. Los valores que faltan se completaron interpolando entre los ya existentes.

**Tabla 2.4** Valores normalizados a "1", complementando los que faltan.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>A</i>	0.38	0.06	0.06	1.0	0	0	0	0	0	0
<i>B</i>	0	0	0	0.62	0.08	1.0	0.08	0	0	0
<i>C</i>	0	0	0	0	0	0.67	0.08	1.0	0.58	0.17
<i>D</i>	0	0	0	0.07	0.11	0.14	0.32	.50	0.75	1.0

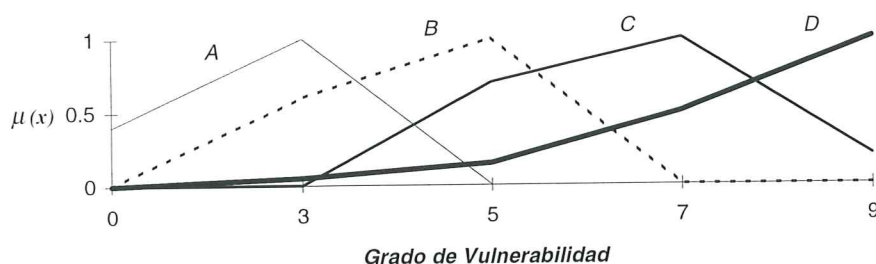
Dada la poca cantidad de respuesta en los valores diferentes de los predefinidos (0, 3, 5, 7 y 9), éstos no contribuían a la buena construcción de las funciones de pertenencia; por tal razón, tal información no se tuvo en cuenta.

Finalmente, se construyeron las funciones solamente con los valores 0, 3, 5, 7 y 9:

**Tabla 2.5** Valores para 0, 3, 5, 7 y 9.

	0	3	5	7	9
<i>A</i>	0.38	1.0	0	0	0
<i>B</i>	0	0.62	1.0	0	0
<i>C</i>	0	0	0.67	1.0	0.17
<i>D</i>	0	0.07	0.14	.50	1.0

A partir de estos valores se construyeron las funciones de pertenencia para las clasificaciones *A*, *B*, *C*, y *D* del parámetro  $K_{10}$ . Para efectuar la representación gráfica de dichas funciones, se unieron los puntos a través de rectas, tendiendo a formas triangulares. La Figura 2.6 presenta dichas funciones.



**Figura 2.6** Función de pertenencia para las clasificaciones *A*, *B*, *C* y *D* del parámetro  $K_{10}$ .

Como último paso en la definición de las funciones de pertenencia, se corrigieron las funciones con la condición que cumplieran la propiedad de convexidad (Bandermer y Gottwald, 1995).

Cada uno de los pasos desarrollados para definir las funciones de pertenencia para las clasificaciones del parámetro  $K_{10}$ , se ha requerido también construir todas las funciones de pertenencia de las clasificaciones de los restantes parámetros y de los valores de importancia. Las funciones de pertenencia, construidas con los datos originales y de la manera expuesta anteriormente, obedecieron a formas variables entre trapezoidal y triangular.

#### 2.4.2 Corrección de las funciones de pertenencia

Como se comentó anteriormente, dada la subjetividad y ambigüedad de las opiniones de los expertos, muchas de las respuestas estuvieron encasilladas en los grados de vulnerabilidad de “poco” a “medianamente” vulnerable. De ahí, que las funciones de pertenencia construidas de la forma expuesta anteriormente se corrigieron de acuerdo con la forma de cálculo de índice de vulnerabilidad propuesto. Corrección que involucro, a su vez, la comparación de las opiniones de los especialistas con las respuestas esperadas, de acuerdo a los estudios de comportamiento sísmico de los elementos de un puente, en cuanto al grado de vulnerabilidad de las condiciones de calidad de los parámetros. Esta comparación no se pudo realizar con todos los parámetros, pero si con los de mayor importancia en la definición de la vulnerabilidad sísmica. De esta forma, estos valores se replantearon para la construcción de las funciones de pertenencia.

Al mismo tiempo, las funciones se fueron corrigiendo en la medida que se utilizaban el cálculo del índice de vulnerabilidad, bien de puentes reales o hipotéticos.

A continuación se comentan brevemente las correcciones efectuadas.

#### 2.4.2.1 Funciones de pertenencia de las clasificaciones de los parámetros

Las funciones de pertenencia construidas con los datos recibidos, se corrigieron en un primer paso para disminuir la ambigüedad, eliminando las colas. Es decir, se despreció el número de respuestas favorables por debajo del 20%.

Posteriormente, se aplicaron otras correcciones asociadas a las modificaciones hechas a las clasificaciones a partir de las observaciones de los expertos.

Finalmente, se tomó una muestra de ocho puentes, siete de ellos colapsaron durante un sismo de 1994 y uno de ellos sufrió daños importantes sin llegar al colapso. De los resultados de esta primera muestra, se concluyó que las funciones aún se debían seguir corrigiendo, ya que los puentes calificados alrededor de "*medianamente*" a "*muy*" vulnerable tendían a ser puentes que finalmente su respuesta estaba entre "*poco*" y "*medianamente*" vulnerable. Esto se explica ya que las respuestas de los expertos tendieron a puntos medios, probablemente por no ser los especialistas drásticos en sus respuestas.

Debido a lo anterior se decidió reevaluar las respuestas de los expertos para así poder calificar con más realidad a los puentes que por sus características se situaban entre "*nada*" y "*poco*" vulnerables o entre "*muy*" y "*absolutamente*" vulnerables. Fue así, como las opiniones se compararon con los respuestas esperadas de los estudios de comportamiento sísmico de los elementos de un puente, con lo aprendido de las experiencias posterremoto y con modelos ya establecidos. Finalmente, las respuestas fueron replanteadas como resultado del estudio comparativo y, a su vez, se revisaron las funciones de pertenencia de cada una de las condiciones de calidad de los parámetros, evidentemente, donde fue posible realizar este tipo de análisis.

#### 2.4.2.2 Funciones de pertenencia de los valores de importancia

De igual forma que las funciones de pertenencia, para las calificaciones de las clasificaciones de los parámetros se construyeron con las opiniones de los expertos, las funciones de pertenencia para los valores de importancia de los parámetros también se definieron en base al número de respuestas favorables. Los valores **0** a **10** definen la importancia de los parámetros, **0** indica "*nada importante*" y **10** la "*máxima importancia*".

Las funciones de pertenencia al principio se tomaron, con todos los valores de respuesta de los expertos y, con ellas, se ejecutaron algunos ejemplos que hicieron ver la necesidad de hacer sucesivas correcciones a éstas. La primera corrección consistió en eliminar las colas de las funciones de pertenencia, despreciando las aportaciones por debajo del 20%. Luego, dado que las respuestas pico estaban sesgadas a valores entre **5** y **10**, se separaron tales valores para clarificar la diferencia de importancia entre los distintos parámetros.

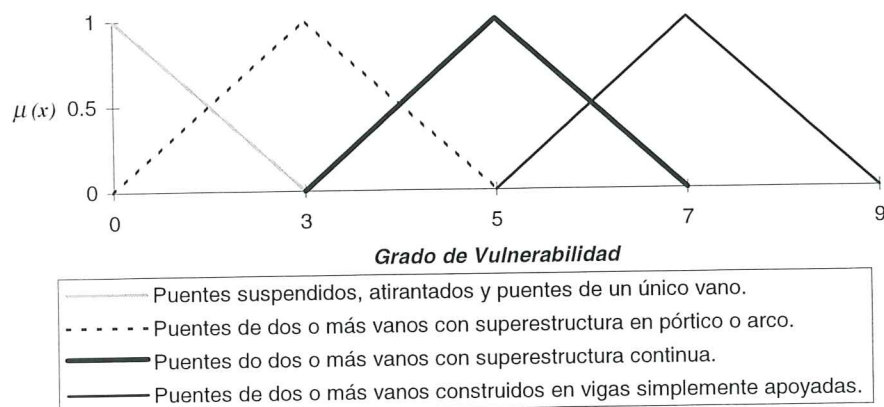
De esta manera, se construyeron prácticamente las funciones de pertenencia, tomando los valores máximos y aplicando sobre ellos una transformación a partir de una ecuación potencial, con la idea de transformar el cinco en 2 y el 10 dejarlo en su valor máximo y transformando los valores restantes, dentro del rango establecido, a intervalos que fuesen creciendo a medida que se iban acercando al valor máximo.

### 2.4.3 Funciones de pertenencia definitivas

Las funciones de pertenencia finales, una vez hechas las correcciones apuntadas, obedecen a formas triangulares. A continuación, se presentan las incorporadas en el cálculo del *índice de vulnerabilidad sísmica*.

#### 2.4.3.1 Funciones de pertenencia de las clasificaciones de los parámetros

Corregidas las funciones de pertenencia de las calificaciones, éstas se incorporaron dentro del algoritmo para el cálculo del índice de vulnerabilidad sísmica de puentes. Como ejemplo, a continuación se presentan las funciones de pertenencia para las clasificaciones de uno de los diecinueve parámetros, el  $K_2$  denominado “*tipo de superestructura*”.



**Figura 2.7** Función de pertenencia del grado de vulnerabilidad del parámetro “*tipo de superestructura*”.

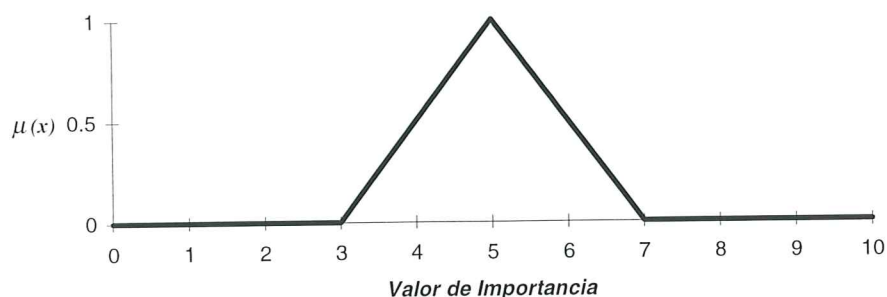
Las funciones de pertenencia de los dieciocho parámetros restantes encuentran en el Anexo 1.

#### 2.4.3.2 Funciones de pertenencia de los valores de importancia

Las funciones de pertenencia correspondientes a los pesos de los diecinueve parámetros que se influyen en la vulnerabilidad de los puentes, se corrigieron de la manera expuesta anteriormente y, finalmente, se incorporaron al

cálculo del índice de vulnerabilidad sísmica de puentes, tal como se muestran en el Anexo 1.

En la Figura 2.8 se presenta la correspondiente al parámetro  $K_2$  "tipo de superestructura":



**Figura 2.8** Función de pertenencia del valor de importancia para el parámetro "Tipo de superestructura".

## 2.5 Programa **INDICE** para la evaluación del índice de vulnerabilidad sísmica de puentes

Construidas las funciones de pertenencia para cada una de las tres o cuatro clasificaciones de cada uno de los parámetros y determinadas las funciones de pertenencia de los valores de importancia, se calculó el "índice de vulnerabilidad" utilizando la expresión de peso promedio difuso de la ecuación 2.1.

El cálculo de este índice involucra una serie de operaciones aritméticas con conjuntos difusos como la suma, el producto y la división. A su vez, en la transformación de los conjuntos difusos a una variable lingüística se incorpora el cálculo de la distancia mínima entre conjuntos difusos, todo ello sin obviar el control que se debe realizar a cada operación aritmética para que cumplan con la propiedad de convexidad y normalización. El programa **INDICE** se elaboró con el fin de incorporar todas las operaciones necesarias para el cálculo del peso promedio difuso definiendo el índice de vulnerabilidad. Las funciones de pertenencia, ya construidas, se convierten en la base de datos del programa y con la respuesta al formulario de levantamiento del puente, se escogen las funciones respectivas y se realiza el cálculo del índice.

### 2.5.1 Algoritmo del programa

El programa **INDICE** se estructura en tres módulos básicos y una base de datos (ver Figura 2.9). Los tres módulos son: **1)** Inicialización del análisis, **2)** Evaluación del índice de vulnerabilidad y **3)** Análisis de los resultados. Estos módulos se alimentan a partir de la base de datos que contiene los datos de los puentes y las funciones de pertenencia requeridas para el cálculo del índice de

vulnerabilidad. A continuación, se expone brevemente el algoritmo desarrollado a partir de estos tres módulos:

**1) Inicialización del análisis.** En este módulo se define la muestra de puentes.

**2) Evaluación del índice de vulnerabilidad para el puente  $P(j)$ .** El cálculo del índice de vulnerabilidad está incorporado en este módulo. Aquí se lee el formulario de levantamiento del puente  $P(j)$ , se hacen las respectivas operaciones aritméticas difusas necesarias para calcular el índice de vulnerabilidad. Efectuada cada operación, el programa **INDICE** controla que se cumplan las propiedades de convexidad y normalización. En caso de no cumplirse, corrige la función antes de continuar con los siguientes cálculos.

Este módulo está alimentado a partir de la base de datos que contiene los resultados del formulario de levantamiento de cada puente de la muestra, las funciones de pertenencia de cada una de las calificaciones de los diecinueve parámetros y las funciones de pertenencia de sus pesos.

En el momento que **INDICE** lee los datos del puente  $P(j)$ , selecciona las funciones de pertenencia respectivas a las calificaciones asignadas a cada parámetro. Las funciones de pertenencia de los pesos permanecen constantes a lo largo del cálculo del índice de toda la muestra de puentes.

**3) Análisis de resultados del puente  $P(j)$ .** Una vez se ha calculado el índice de vulnerabilidad sísmica del puente  $P(j)$  mediante la ecuación 2.1., éste corresponde a un conjunto difuso y se expresa mediante una función de pertenencia. Razón por la cual es interesante y necesario interpretar el resultado obtenido para que así sea de fácil manejo y uso posterior. Este proceso dentro de la teoría de los conjuntos difusos se llama *desfusificación* y se expuso en el Capítulo 5. El programa **INDICE** tiene dos opciones para realizar este proceso, una es transformar el conjunto difuso en una variable lingüística natural como “*nada*”, “*poco*”, “*medianamente*”, “*muy*” y “*absolutamente*” vulnerable. Esto se efectúa por medio de la mínima distancia entre el conjunto difuso de índice de vulnerabilidad y los conjuntos difusos de grados de vulnerabilidad. La segunda opción del programa **INDICE**, es asignarle un valor numérico al conjunto difuso calculado. Esto lo hace el programa escogiendo el valor máximo de la función de pertenencia, es decir el valor de abscisa que le corresponde una ordenada de valor 1. Este módulo requiere de la base de datos, la cual contiene las funciones de pertenencia de los diferentes grados de vulnerabilidad (“*nada*”, “*poco*”, “*medianamente*”, “*muy*” y “*absolutamente*” vulnerable).

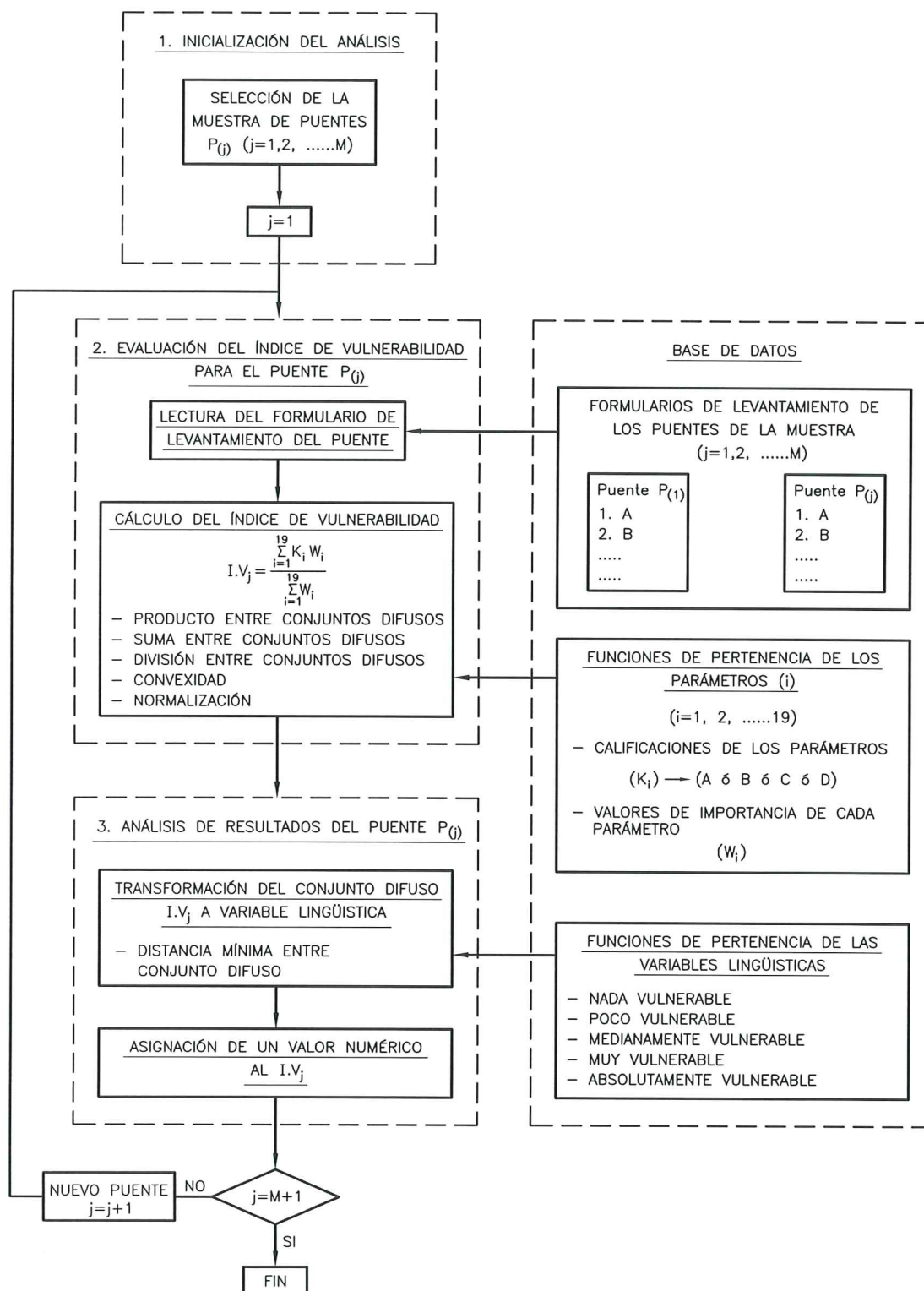


Figura 2.9 Algoritmo del programa *INDICE*.

**Base de Datos.** En lo referente a la base de datos, el programa *INDICE* necesita de las respuesta de los formularios de levantamiento de cada uno de los puentes de la muestra (este formulario se comenta posteriormente). A su vez, el programa *INDICE* requiere leer las funciones de pertenencia tanto de las calificaciones de los parámetros como de sus valores de importancia. Las funciones de pertenencia de los pesos o valores de importancia permanecen constantes a lo largo del calculo del índice de vulnerabilidad de varios puentes. Las funciones de pertenencia de las calificaciones de los parámetros varían de acuerdo a la respuesta del formulario del puente en cuestión.

Los módulos 2 y 3 se aplican a cada uno de los puentes de la muestra.

En el apartado siguiente se describen las subrutinas incorporadas en los tres módulos principales.

### 2.5.2 Funcionamiento del programa

El cálculo del índice de vulnerabilidad se efectúa utilizando la expresión de promedio ponderado, entre funciones de pertenencia de las calificaciones de los parámetros y de las funciones de pertenencia del peso de cada uno de ellos. Esta operación se efectúa en tres fases de cálculos: el numerador que es la suma de los productos entre la calificación del parámetro y su peso, el denominador que es la suma de los pesos y finalmente el cálculo del índice que es la división entre el numerador y el denominador obtenidos. Al hacer la división se omiten los cálculos de las abscisas que involucran denominadores ceros, esto se hace para obviar el problema de la división por cero.

En el cálculo del índice de vulnerabilidad de las abscisas, tanto de las funciones de pertenencia de las calificaciones de los parámetros como de sus pesos, se tienen valores enteros, de aquí que la suma y la multiplicación generen abscisas enteras. Ello no ocurre con la división, donde se originan abscisas reales. Por esta razón, el programa *INDICE* cuenta con una subrutina donde se define el número de dígitos deseados en el cálculo de la división.

Durante la ejecución del programa se observó que los valores de la función de pertenencia del índice de vulnerabilidad, cuyas abscisas estaban fuera del intervalo en que se definen los parámetros (0 a 9) tienden a cero. Debido a ello, se estudió como influía en los resultados no considerar los cálculos de estas abscisas fuera del intervalo en que se definen las abscisas del parámetro. Finalmente, se decidió tomar como respuestas los valores desde 0 hasta 9, es decir el rango utilizado en las funciones de pertenencia de la base de datos (calificaciones de los parámetros y valores de importancia). El número de dígitos en las abscisas a los que se desea ver la respuesta, se elige por el usuario. Puede ser ninguno, uno o los deseados. Cuánto mayor cantidad de dígitos, mayor es al cantidad de valores en la respuesta pero, a su vez, también se puede ver claramente cual es el punto de valor de pertenencia mayor, es decir la abscisa cuya ordenada es uno. Ejecutados

numerosos ejemplos, se observó que una buena opción es obtener la función de pertenencia del índice solamente con valores correspondientes a abscisas enteras.

**INDICE** da la respuesta de diferentes maneras. De esta forma, la información resultante puede tratarse de acuerdo a la finalidad para la que va a ser utilizada. Es así, como **INDICE** expresa el índice de vulnerabilidad sísmica del puente como:

- 1) Un conjunto difuso expresado a través de una función de pertenencia convexa y normalizada.
- 2) Este conjunto difuso, el programa **INDICE** lo transforma en una variable lingüística y es así como el índice de un puente se puede expresar como "*nada*", "*poco*", "*medianamente*", "*muy*" y "*absolutamente*" vulnerable.
- 3) Además de contarse con la función de pertenencia del índice de vulnerabilidad de la variable lingüística, el programa **INDICE**, finalmente, asigna un valor numérico al índice de vulnerabilidad.

### 2.5.3 Ejecución del programa

Como paso previo al cálculo del índice de vulnerabilidad sísmica utilizando el programa **INDICE**, se debe contestar el formulario de levantamiento del o de los puentes en cuestión. Las respuestas se incorporan al programa bien a través de pantalla directamente o por lectura de un archivo predefinido.

El programa ejecuta los cálculos respectivos hasta lograr describir el puente como "*nada*", "*poco*", "*medianamente*", "*muy*" y "*absolutamente*" vulnerable, asociándole, a su vez, un valor numérico entre 0 y 9.

El programa está pensado y elaborado de tal manera que todas las preguntas posibles (dado el tipo de puente) del formulario de levantamiento del puente deben ser contestadas.

Sin embargo, no se descarta que, dado el tipo de puente, existan parámetros que no requieran respuesta por no ser aplicables. Por ejemplo, el caso de un puente continuo. La longitud de apoyo en pilas es un parámetro innecesario y, por lo tanto, el no dar respuesta a él, en este caso, no influye en la respuesta.

## 2.6 Conclusiones

En este capítulo se ha expuesto un modelo para calcular la vulnerabilidad sísmica de puentes a gran escala y se ha presentado el desarrollo de la metodología propuesta en todas sus facetas. Las principales observaciones y conclusiones son:

1. El método propuesto constituye una descripción completa de la información necesaria para obtener un cuantitativo de la vulnerabilidad sísmica de puentes llamado "*índice de vulnerabilidad*". El cálculo del índice se basa en la identificación de diecinueve parámetros, considerados los más relevantes e influyentes en el daño que sufrirá un puente bajo la acción del sismo.

Definiendo el “*índice de vulnerabilidad*” como la relación existente entre el grado de vulnerabilidad de cada parámetro y su respectivo valor de importancia.

2. Debido a que el modelo considera la opinión de expertos, para definir tanto el grado de vulnerabilidad de los diecinueve parámetros como el valor de importancia de cada parámetro, dentro del cálculo de la vulnerabilidad total del puente, se decidió trabajar con conjuntos difusos, los cuales consideran y manejan de la mejor forma posible la subjetividad e imprecisión de las respuestas de los especialistas. De esta manera, el “*índice de vulnerabilidad*” propuesto, se calcula a través de un peso promedio difuso, el cual relaciona la medida del grado de vulnerabilidad de cada parámetro y sus respectivos valores de importancia. Al provenir los resultados de las encuestas de opiniones de expertos, era de esperar que estos resultados fueran subjetivos y con incertidumbres y ambigüedades. En vista esto se tomó la decisión de manejar la información con técnicas de conjuntos difusos.
3. La opinión de los expertos se adquirió a partir de la realización de dos encuestas. En la primera, los expertos debían asignar a cada clasificación (*A*, *B*, *C* y *D*) del parámetro  $K_i$  el grado de vulnerabilidad que más se ajustará (*nada*, *poco*, *medianamente*, *muy* y *absolutamente*). Procedimiento que se debía repetir hasta completar los diecisiete parámetros (inicialmente seleccionados). En la segunda, encuesta los especialistas debían determinar el valor de importancia de cada parámetro dentro de la evaluación de la vulnerabilidad total del puente. Las encuestas fueron realizadas a cincuenta (50) expertos de cinco países, España, Colombia, Ecuador, Venezuela y México. Así, las variables de calificación de cada una de las condiciones de calidad de los parámetros fueron trasladadas a conjuntos difusos mediante el uso de las funciones de pertenencia, construidas a partir de las opiniones de los expertos. De igual modo, las variables de importancia se transformaron en conjuntos difusos a través de las funciones de pertenencia construidas también con la opinión de expertos.
4. El modelo busca ser de un ámbito de aplicación general; sin embargo, su utilización en España y América deben tener en cuenta condiciones de calidad particulares impuestas en unos pocos parámetros. Esto se ideó desde el principio y, por ello, al categorizar cada parámetro, se buscó que fuera factible su utilización en cualquier parte. Sin embargo, el primer parámetro definido “*año de especificación de proyecto y construcción*” del puente varía de acuerdo a la normativa del país donde corresponda dicho puente. Por esto, éste fue el único parámetro al que se le aplicaron dos tipos de clasificaciones, una para España y otra para los países de América en general.
5. Las funciones de pertenencia fueron construidas con las opiniones de los expertos, definiendo las abscisas en función del número de respuesta

favorables. Muy pocas de las funciones de pertenencia construidas originalmente para las calificaciones de los parámetros tuvieron que corregirse para que cumplieran con la propiedad de convexidad; realmente, tan solo una de ellas. Lo contrario sucedió con las funciones de pertenencia de los valores de importancia, las cuales inicialmente eran curvas que contaban con más de un punto máximo, por ello todas fueron corregidas y convertidas finalmente a funciones convexas. Esto, se debe a la posible ambigüedad que se presenta al analizar los juicios de los expertos, en cuanto a la importancia de cada uno de los parámetros. No obstante, posteriormente tuvieron que ser corregidas varias veces hasta que se ajustaran a las respuestas esperadas.

6. Al analizar las funciones de pertenencia de los valores de importancia de los parámetros en el momento de evaluar la vulnerabilidad global del puente, se pudo observar cómo en general todos los parámetros eran importantes, ya que no se registro ningún máximo por debajo de 5. Todas las funciones tuvieron máximos valores de pertenencia en el rango entre 5 y 10, siendo el promedio de 8. Los dos últimos parámetros, sistemas constructivos para el tablero y para las pilas, resultaron los de menor relevancia, ya que contaron con un máximo en 5. Estas funciones tuvieron que ser reconstruidas ya que al aplicar, en el modelo, las funciones originales, éstas no diferenciaban claramente la importancia de un parámetro respecto a los demás. Razón por la cual, se decidió mantener las de máxima importancia con un valor de 10 y, a partir de ello, separar los parámetros restantes, convirtiendo en 5 una calificación de 2 y, los restantes, en valores intermedios. De esta manera, se pudo calificar la importancia de los parámetros en una escala que resaltara numéricamente los diferentes grados de influencia de los parámetros en la vulnerabilidad sísmica del puente. Los parámetros considerados imprescindibles en el momento de la evaluación de la vulnerabilidad sísmica del puente, según las funciones de pertenencia, son el  $K_1$  (año de proyecto y construcción del puente),  $K_3$  (forma de la superestructura),  $K_4$  (existencia de articulaciones internas),  $K_9$  (irregularidad longitudinal en geometría o rigidez),  $K_{10}$  (longitud de apoyo en pilas),  $K_{11}$  (tipo de suelo),  $K_{13}$  (longitud de apoyos en estribos) y  $K_{15}$  (estado de conservación del puente).
7. El programa **INDICE** se incorporó en el desarrollo de este modelo para que incluyera todas las operaciones aritméticas con conjuntos difusos necesarias para el calculo del índice de vulnerabilidad sísmica de puentes.
8. Con el modelo, se obtiene un calificativo lingüístico y numérico del índice de vulnerabilidad de un puente además de contarse con la función de pertenencia de dicho índice. El modelo califica al puente entre *nada*, *poco*, *medianamente*, *muy* y *absolutamente* vulnerable. A su vez, le asigna un valor de 0 a 9 del índice de vulnerabilidad, además de la función de pertenencia.
9. Los resultados que se puedan obtener al aplicar el método a un área urbana o una región determinada, son una buena herramienta para incorporar en los

programas de planificación de sistemas de transporte o bien para programas de atención de emergencia en casos de terremoto; ya que el modelo ofrece un estudio preliminar de la vulnerabilidad sísmica de los puentes, definiendo que puentes corresponden a los más vulnerables.

- 10.El método presentado para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes cuenta con similitudes en su desarrollo con el método de índice de vulnerabilidad italiano para edificaciones de hormigón y mampostería. Éste comenzó a desarrollarse en Italia a partir de 1976, con motivo de los estudios post-terremoto realizados en ese país. En 1982 se presentó el método y comenzó su utilización (Benedetti *et al.*, 1988). Al mismo tiempo, el método italiano fue implementado para el desarrollo de una metodología de evaluación de la vulnerabilidad y del riesgo sísmico de estructuras de hormigón y mampostería (edificaciones), aplicando técnicas de simulación (Yépez, 1996 b), contando con una buena aceptación en la medida que se ha venido utilizando para estudios de vulnerabilidad y riesgo sísmico aplicados a la ciudad de Barcelona.



## Forma de aplicación del modelo

Para la aplicación del modelo es necesario contar con el inventario previo de la muestra de puentes. Este inventario se realiza mediante el “*formulario de levantamiento de la vulnerabilidad sísmica de puentes*”. El formulario contiene todos los parámetros necesarios para la determinación del índice de vulnerabilidad del puente respectivo, tan sólo se requiere que el evaluador asigne a cada parámetro su respectiva calificación. Una vez obtenidas todas las calificaciones (**A**, **B**, **C** y **D**) de cada uno de los diecinueve parámetros analizados del puente, se procede a incorporar estos datos al programa **INDICE**, mediante el cual cada una de las funciones de pertenencia de los parámetros son acumulados ponderadamente, dando mayor peso a los parámetros que se consideran más decisivos en la determinación del “*índice de vulnerabilidad*”, **I.V.**.

### 3.1 Formulario para la determinación de la vulnerabilidad

El formulario de levantamiento de la vulnerabilidad sísmica constituye una descripción completa de los datos necesarios para obtener el “*índice de vulnerabilidad*”. En base a la experiencia de los expertos y al estudio de los autores del método, como se expuso anteriormente, se han identificado diecinueve parámetros, considerados los más relevantes e influyentes en el daño que sufriría un puente sujeto a la acción sísmica. Alguno de estos parámetros son puramente subjetivos, mientras que los restantes se obtienen a partir de mediciones o cálculos simplificados que aseguran versatilidad y agilidad a la evaluación del índice de vulnerabilidad. Cada parámetro es clasificado en el formulario mediante una escala de **A** a **D** en forma decreciente, conforme la calidad del parámetro vaya también decreciendo. Para la construcción del formulario se tomó como base

algunos ya existentes para inventarios de puentes (Miller, 1995; Pezeshk *et al.*, 1993; ATC 6-2, 1983) y a partir de ellos y de los datos necesarios para el cálculo del índice de vulnerabilidad se construyó el formulario de levantamiento sísmico de puentes.

FORMULARIO DE LEVANTAMIENTO DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE PUENTES														
<b>DATOS GENERALES</b>														
<b>1. LOCALIZACIÓN</b>  Denominación _____ P.K. _____ Coordenadas      x      _____      y      _____  Término Municipal : _____ Provincia : _____ Población anterior : _____ Población posterior : _____  Propietario : _____														
<b>2. SINGULARIDAD QUE SALVA EL PUENTE</b>  <table style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;">Paso sobre:</td> <td style="width: 50%;">Paso bajo:</td> </tr> <tr> <td>Cauce (río, barranco, arroyo) [ ]</td> <td>Canal [ ]</td> </tr> <tr> <td>Canal [ ]</td> <td>Autopista, carretera o camino [ ]</td> </tr> <tr> <td>Embalse [ ]</td> <td>F.F.C.C. [ ]</td> </tr> <tr> <td>Autopista, carretera o camino [ ]</td> <td></td> </tr> <tr> <td>F.F.C.C. [ ]</td> <td></td> </tr> </table>			Paso sobre:	Paso bajo:	Cauce (río, barranco, arroyo) [ ]	Canal [ ]	Canal [ ]	Autopista, carretera o camino [ ]	Embalse [ ]	F.F.C.C. [ ]	Autopista, carretera o camino [ ]		F.F.C.C. [ ]	
Paso sobre:	Paso bajo:													
Cauce (río, barranco, arroyo) [ ]	Canal [ ]													
Canal [ ]	Autopista, carretera o camino [ ]													
Embalse [ ]	F.F.C.C. [ ]													
Autopista, carretera o camino [ ]														
F.F.C.C. [ ]														
<b>3. CARACTERÍSTICAS</b>  Longitud: _____ Número de vanos: _____ Ancho: _____  <table style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 33%;">Importancia del puente:</td> <td style="width: 33%;">Esencial [ ]</td> <td style="width: 33%;">No esencial [ ]</td> </tr> <tr> <td>Clasificación:</td> <td>Regular [ ]</td> <td>Irregular [ ]</td> </tr> </table> Tipología predominante: _____			Importancia del puente:	Esencial [ ]	No esencial [ ]	Clasificación:	Regular [ ]	Irregular [ ]						
Importancia del puente:	Esencial [ ]	No esencial [ ]												
Clasificación:	Regular [ ]	Irregular [ ]												
<b>4. REFERENCIAS</b>  Fecha proyecto de construcción: _____ Fecha proyecto de reparación: _____ Fecha proyecto de acondicionamiento sísmico: _____ Tipo de acondicionamiento sísmico: _____  Documentación existente:  <table style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 33%;">Memorias [ ]</td> <td style="width: 33%;">Planos [ ]</td> <td style="width: 33%;">Registro fotográfico [ ]</td> </tr> </table>			Memorias [ ]	Planos [ ]	Registro fotográfico [ ]									
Memorias [ ]	Planos [ ]	Registro fotográfico [ ]												

**Figura 3.1** Primera parte del formulario de levantamiento de la vulnerabilidad sísmica de puentes.

El formulario está formado por dos partes. En la primera se detalla la información general de los puentes, tales como su denominación, localización

geográfica, carretera soportada por el puente, carretera que cruza bajo el puente, propietario, tipo de paso, ensanches, ampliaciones y lo más importante, la calificación de los parámetros que influyen en su vulnerabilidad. La segunda parte del formulario corresponde a los “Comentarios”, y fue elaborado con la finalidad de servir de guía en la respuesta a las preguntas del formulario. Se intenta que el formulario sea fácil de rellenar, a partir de datos de inventarios existentes o de información que pueda adquirirse fácilmente de la inspección visual del puente. En la Figura 3.1 se presenta la primera parte del formulario de levantamiento de la vulnerabilidad sísmica de puentes.

A continuación se presenta la parte restante del formulario :

EVALUACIÓN PARÁMETROS ÍNDICE DE VULNERABILIDAD	
<b>1. AÑO DE PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN DEL PUENTE</b>	
A Después de 1995 .....	[ ]
B Entre 1975 y 1994.....	[ ]
C Entre 1968 y 1974.....	[ ]
D Antes de 1968.....	[ ]
<b>2. TIPO DE SUPERESTRUCTURA</b>	
A Puentes suspendidos, puente atirantados, puentes de un único vano .....	[ ]
B Puentes de dos o más vanos en sistema pórtico o arco .....	[ ]
C Puentes de dos o más vanos con superestructura continua .....	[ ]
D Puentes de dos o más vanos en vigas simplemente apoyadas, otros tipos .....	[ ]
<b>3. FORMA DE LA SUPERESTRUCTURA</b>	
A Puentes rectos (cero grados de esviaje) .....	[ ]
B Puentes esviados menos de veinte grados .....	[ ]
C Puentes esviados entre veinte y cuarenta y cinco grados .....	[ ]
D Puentes con ángulo de esviaje mayor a cuarenta y cinco grados. Puentes curvos. Puentes con forma irregular en planta .....	[ ]
<b>4. EXISTENCIA DE ARTICULACIONES INTERNAS</b>	
A No existen articulaciones internas en el puente .....	[ ]
B Existen articulaciones internas en el puente, con longitud de soporte mayor a la mínima longitud de soporte requerida, $N_d$ .....	[ ]
C Existen articulaciones internas, con una longitud de soporte entre 0,5 y 1,0 veces la mínima longitud de soporte requerida, $N_d$ .....	[ ]
D Existen articulaciones internas y alguna de ellas cuenta con una longitud de soporte menor a 0,5 veces la mínima longitud de soporte requerida, $N_d$ .....	[ ]
<b>5. MATERIAL DE LA SUPERESTRUCTURA</b>	
A Acero .....	[ ]
B Hormigón armado o pretensado .....	[ ]
C Madera .....	[ ]
D Mampostería y otros materiales .....	[ ]

<b>6. TIPO DE PILA</b>	
A Sin pilas, pilas pantalla o pórtico .....	[ ]
B Pilas pilotes .....	[ ]
C Columnas múltiples .....	[ ]
D Columnas individuales, pila martillo, otros sistemas .....	[ ]
<b>7. TIPO DE CIMENTACIÓN</b>	
A Pila pilotes .....	[ ]
B Cimentación de pilotes .....	[ ]
C Cimentación superficial (columnas múltiples) .....	[ ]
D Cuerpo de columna simple .....	[ ]
<b>8. MATERIAL DE LAS PILAS</b>	
A Acero .....	[ ]
B Hormigón armado o pretensado .....	[ ]
C Madera .....	[ ]
D Mampostería u otros .....	[ ]
<b>9. IRREGULARIDAD LONGITUDINAL EN GEOMETRÍA Y RIGIDEZ</b>	
A No existe .....	[ ]
B Dos pilas cualesquiera cuentan con una diferencia de altura mayor de 1,25 veces .....	[ ]
C Dos pilas adyacentes cuentan con una altura que difiere más de 1,25 veces .....	[ ]
D Dos pilas cualesquiera con alturas que difieren más de 1,5 veces. Puentes con cualquier tipo significativo de variación longitudinal en geometría o rigidez .....	[ ]
<b>10. LONGITUD DE APOYO EN PILAS</b>	
A Excelente .....	[ ]
B Aceptable .....	[ ]
C Regular .....	[ ]
D Deficiente .....	[ ]
<b>11. TIPO DE SUELO</b>	
A Roca .....	[ ]
B Suelo granular denso o arcillas proconsolidadas rígidas .....	[ ]
C Arenas de densidad media (limosas) .....	[ ]
D Arcillas medias a blandas .....	[ ]
<b>12. TIPO DE ESTRIBO</b>	
A Estribo cerrado (muro frontal, muro frontal y contrafuertes) .....	[ ]
B Estribo abierto .....	[ ]
C Estribo de tierra armada .....	[ ]
D Estribo flotante (cimiento sobre terraplén), muro de mampostería .....	[ ]
<b>13. LONGITUD DE APOYO EN ESTRIBO</b>	
A Excelente .....	[ ]
B Aceptable .....	[ ]
C Regular .....	[ ]
D Deficiente .....	[ ]

**14. TIPO DE APARATO DE APOYO**

- A Apoyo con dispositivos disipadores de energía o con aislamiento sísmico..... [ ]  
 B Apoyos elastoméricos ..... [ ]  
 C Apoyos de rodillos ..... [ ]  
 D Aparatos de apoyos metálicos que pueden ser fijos u oscilantes (rótula lineal y rótula lineal deslizante). Rótulas de hormigón ..... [ ]

**15. ESTADO DE CONSERVACIÓN DEL PUENTE**

- A Excelente ..... [ ]  
 B Aceptable ..... [ ]  
 C Regular ..... [ ]  
 D Deficiente ..... [ ]

**16. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DE LA SUPERESTRUCTURA**

- A Hormigonado en sitio ..... [ ]  
 B Vigas prefabricadas ..... [ ]  
 C Dovelas prefabricadas con junta epóxica ..... [ ]  
 D Dovelas prefabricadas con junta seca ..... [ ]

**17. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DE LAS PILAS**

- A Hormigonado en sitio ..... [ ]  
 B Prefabricado de una pieza ..... [ ]  
 C Dovelas prefabricadas ..... [ ]

**18. POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN**

- A No hay posibilidad de ser un suelo licuefactable ..... [ ]  
 B No se puede conocer el potencial de licuefacción ..... [ ]  
 C El suelo puede licuefactar ..... [ ]

**19. ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES**

- A No existen o si existen no afectan el comportamiento del puente ..... [ ]  
 B Existen, pero no se puede garantizar que harán vulnerable al puente ..... [ ]  
 C Existen y pueden afectar el comportamiento sísmico del puente ..... [ ]

En caso de utilizarse en América, el formulario debe ser modificado en su primer parámetro, de la siguiente forma:

**1. AÑO DE PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN DEL PUENTE**

- A Después de 1981 ..... [ ]  
 B Entre 1972 y 1980..... [ ]  
 C Entre 1940 y 1971..... [ ]  
 D Antes de 1940..... [ ]

## Comentarios

### COMENTARIOS

#### DATOS GENERALES

#### 3. CARACTERÍSTICAS

**Puente Esencial:** Estructura que después de ocurrido un terremoto es imprescindible su buen funcionamiento.

**Puente Regular:** Estructura sin cambio abrupto en geometría, masa y rigidez a lo largo de ella.

**Tipología predominante:** Clasificación del puente dentro de alguna tipología como atirantado, suspendido, en arco, en vigas-losa, en losa, en pórtico, puente cajón, otros.

#### 4. REFERENCIAS

**Fecha proyecto de acondicionamiento sísmico:** Si el puente ha sido sometido a algún proyecto de mejoramiento sísmico incluir la fecha de ejecución y el tipo de tratamiento dado.

#### EVALUACIÓN PARÁMETROS ÍNDICE DE VULNERABILIDAD

##### 1. Año de proyecto y construcción del puente.

Se refiere al año en que fue proyectado y construido el puente.

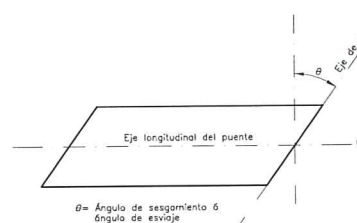
##### 2. Tipo de superestructura.

La información para este parámetro se genera a partir del tipo de estructura del vano principal del puente.

##### 3. Forma de la superestructura.

Este parámetro se usa para tomar en cuenta el efecto que puede tener la forma irregular de la superestructura y, para ello, se puede calificar de acuerdo al ángulo de esviaje. Sin embargo en puentes que cuentan con irregularidades significativas como diferentes ángulos de esviaje en sus extremos o con variación de ancho a lo largo de la superestructura, el puente puede ser calificado en la categoría **D**. También se incluye en esta categoría los puentes con bifurcación con conexión monolítica a la superestructura.

Definiendo el ángulo de esviaje como:

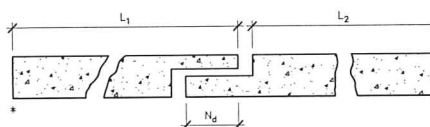


##### 4. Existencia de articulaciones internas.

En el cálculo de este parámetro es recomendable conocer tanto el número de articulaciones como la longitud de apoyo de dichas articulaciones, por ello se toma la longitud de soporte mínima (mm.),  $N_d$ , como:

$$N_d = 305 + 2.5 L + 10 H$$

$L$  es la suma de las longitudes  $L_1$  y  $L_2$ , es decir la distancia a cada lado de la articulación, dada en metros.  $H$  es la altura promedio de las dos pilas adyacentes, dada en metros.



\* Junta de expansión o extremo del tablero

#### 6. Tipo de pila.

Además de lo expuesto en el formulario, en la categoría **D** se encuentran los sistemas de pilas correspondiente a cualquier otro tipo de pila no expuesto en las divisiones **A**, **B** y **C**. Además, se hallan en la categoría **D** aquellos puentes que están constituidos por pilas con problemas de configuración, geometría o cuyos aspectos arquitectónicos no favorecen el buen comportamiento del puente ante el sismo.

#### 7. Tipo de cimentación.

Además de lo expuesto en el formulario, en la categoría **D** se encuentran los puentes que cuentan con columnas articuladas en sus puntos de unión con la cimentación y en las cuales no se puede garantizar que la unión esté proveyendo la suficiente capacidad para soportar las grandes demandas de fuerza cortante que se espera ocurrirán durante el sismo en este tipo de conexión.

#### 9. Irregularidad longitudinal en geometría y rigidez.

En la categoría **D** se clasifican, además, los puentes con cualquier tipo de irregularidad en rigidez, como la presencia de columnas cortas por causa de la existencia de otro tipo de estructura cerca a las pilas, variación del número de columnas por eje de pilas, etc.

#### 10. Longitud de apoyo en pilas.

Al calificar la longitud de apoyo se dice que:

**Excelente** corresponde a una longitud de apoyo mayor o igual a 1.5 veces la mínima longitud de apoyo requerido,  $N_d$ .

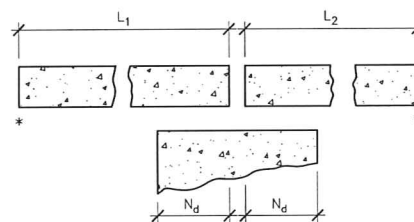
**Aceptable** es una longitud de apoyo mayor o igual a la mínima longitud de apoyo requerido y menor a 1.5 veces la mínima longitud de apoyo requerido,  $N_d$ .

**Regular** equivale a una longitud de apoyo real entre 0.5 y 1.0 veces la mínima longitud de apoyo requerido,  $N_d$ .

**Deficiente** es una longitud de apoyo real menor a la mitad de la mínima longitud de apoyo requerido,  $N_d$ .

Siendo la mínima longitud de soporte,  $N_d$  (mm.):

$$N_d = 305 + 2.5 L + 10 H$$



\* Junta de expansión o extremo del tablero

**L** la longitud de tablero del puente adyacente a la junta de expansión (suma de  $L_1$  y  $L_2$ ), dada en metros y, **H** la altura promedio de las dos pilas adyacentes, dada en metros.

#### 11. Tipo de suelo.

Este factor intenta evaluar, mediante una inspección a simple vista, la influencia del terreno sobre el cual se encuentra cimentado el puente.

#### 12. Tipo de estribo.

En caso de contarse con dos tipos de estribos se califica el más desfavorable.

### 13. Longitud de apoyo en estribo.

Al calificar la longitud de apoyo se dice que:

**Excelente** corresponde a una longitud de apoyo mayor o igual a 1.5 veces la mínima longitud de apoyo requerido,  $N_d$ .

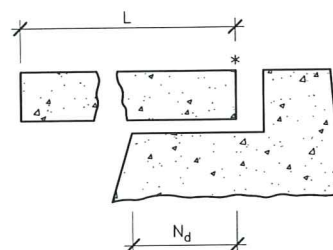
**Aceptable** es una longitud de apoyo mayor o igual a la mínima longitud de apoyo requerido y menor a 1.5 veces la mínima longitud de apoyo requerido,  $N_d$ .

**Regular** equivale a una longitud de apoyo real entre 0.5 y 1.0 veces la mínima longitud de apoyo requerido,  $N_d$ .

**Deficiente** es una longitud de apoyo real menor a la mitad de la mínima longitud de apoyo requerido,  $N_d$ .

Siendo la mínima longitud de soporte,  $N_d$  (mm.):

$$N_d = 305 + 2.5 L + 10 H$$



\* Junta de expansión o extremo del tablero

$L$  la longitud de tablero del puente a la junta de expansión o al extremo del puente, dada en metros y,  $H$  es la altura promedio de las dos pilas adyacentes, dada en metros.  $H$  es cero en puentes de un solo vano.

### 14. Tipo de apoyo.

Si existen diferentes tipos de dispositivos se califican aquí el más desfavorable sísmicamente.

### 15. Estado de conservación del puente.

El estado de conservación en que se encuentra el puente se clasifica de la siguiente manera:

**Excelente.** El puente se encuentra incluido en un programa de mantenimiento. Ha sido estudiada su necesidad o no de reacondicionamiento sísmico y, en caso de requerir tratamiento, ha sido intervenido. Aparentemente presenta un excelente estado en todos sus elementos. No hay indicios de socavación.

**Aceptable.** Puente que no está incluido en ningún programa de mantenimiento, o si está incluido no ha sido tratado, ni ha sido estudiado sísmicamente. Pero, aparentemente, todos sus elementos se encuentran en buen estado.

**Regular.** A diferencia de la anterior descripción, el puente es cuestionable en alguno de sus elementos.

**Deficiente.** Puente en mal estado, bien sea general o de alguno de los elementos estructurales (pilas, apoyos, estribos, cimientos y superestructura). Puente afectado por la socavación.

En esta última división se pueden ubicar los puentes construidos sin los requerimientos sísmicos actuales (antes de 1986) y los cuales no han sido mejorados sísmicamente.

### 16. Procedimiento constructivo de la superestructura (hormigón).

En casos de corresponder a una superestructura de material diferente al hormigón, este parámetro no se considera.

### 17. Procedimiento constructivo de las pilas (hormigón).

En casos de corresponder a una subestructura de material diferente al hormigón, este parámetro no se considera.

### 19. Elementos no estructurales.

Con este parámetro se intenta estudiar el efecto que pueden tener otros elementos u otras líneas vitales que pasan por el puente, como agua, luz, conductos de comunicación, etc; los cuales al poder llegar a ser vulnerables harán, a su vez, vulnerable al puente.

## 3.2 Conclusiones

Las principales observaciones y conclusiones son:

1. El modelo requiere que para su aplicación, previamente se realice el inventario de los puentes a analizar. El inventario consiste en dar respuesta a un formulario llamado en este caso “*formulario de levantamiento de la vulnerabilidad sísmica de puentes*” de los puentes en cuestión, dicho formulario contiene los 19 parámetros claramente definidos por las cuatro condiciones de calidad impuestas. Un inspector debe responder a dicho formulario ubicando al puente en cada parámetro en la clasificación **A**, **B**, **C** ó **D** que más se acomode. El formulario debe ser llenado por un inspector debidamente preparado o, si es posible, por ingenieros especialistas en puentes.
2. El modelo de análisis de la vulnerabilidad sísmica de puentes fue hecho de tal manera que a todos los parámetros se les debe determinar una condición de calidad entre **A** y **D**. Dentro del formulario de levantamiento de cada puente, en caso de no poderse definir el sistema constructivo utilizado en la superestructura y/o subestructura, este puede ser omitido o en el mejor de los casos dar como respuesta el que se crea fue el utilizado. La razón de poderse omitir puede hacerse debido a la baja importancia con el que cuenta este parámetro dentro del cálculo del índice de vulnerabilidad total del puente. Esto fue confirmado una vez se calibró el modelo y se realizó un estudio de sensibilidad analizando un número de puentes con diferentes características y a su vez modificando algunas de ellas para generar más modelos y para estudiar la influencia de cada parámetro.



## Calibración del modelo

Al Noroeste de la ciudad de Los Angeles, aproximadamente a las 4:30 a.m. del lunes 17 de Enero de 1994, ocurrió un sismo de magnitud 6,8 en la región de Northridge (California), causando grandes daños en una amplia área de la región. Uno de los daños más significativos y dramáticos de los ocurridos fue en los puentes de carretera y autopista, esto sin desconocer que igualmente numerosas edificaciones fueron gravemente afectadas. Hasta tal punto que algunos llaman al sismo de Northridge como el “*sismo de los puentes*”.

Dada la importancia que significó este sismo para el desarrollo de la ingeniería sísmica aplicada a puentes, por las buenas enseñanzas que dejó, los valiosos estudios que se generaron a partir de su ocurrencia, y los innumerables observaciones y datos que se pudieron recopilar después de su acción, Northridge ha sido escogido, en esta investigación, como el sismo para realizar la calibración del método propuesto. A partir de la inmejorable información existente, de este sismo, en lo referente tanto a datos sismológicos como a informes de puentes afectados y no afectados, una muestra de 13 puentes, con grados de daños desde pequeños hasta incluso el colapso de algunos de ellos, fueron seleccionados para desarrollar dicha calibración.

Siete de los trece puentes de la muestra, los cuales fueron severamente dañados, fueron visitados por un equipo de especialistas encabezado por Priestley (Priestley *et al.*, 1994) inmediatamente después del sismo. En esta visita, los daños documentados fueron analizados posteriormente, tanto para comparar lo observado con lo esperado, como para estimar el nivel aproximado de excitación sísmica; de tal manera que se llegara a encontrar una explicación analítica a los tipos de daños ocurridos. Fue así como, se concluyó que en cuatro puentes, la falla se atribuyó al resultado de un inadecuado refuerzo a cortante de las columnas, el

cual provocó que el daño se ubicara en las pilas, donde las columnas eran más resistentes a flexión y donde a su vez se concentraban fuerzas cortantes elevadas. En otro de los puentes, la pérdida de apoyo en una junta de movimiento de la superestructura, la cual a su vez contaba con un elevado ángulo de esviaje, fue la causa de la falla. En otros dos puentes, los mejor diseñados sísmicamente, la falla se debió a la aparición de articulaciones plásticas localizadas donde las longitudes efectivas de las columnas eran más cortas por razones bien fuera arquitectónicas (acampanamiento de columnas) o por efecto de construcciones anexas a las columnas (por ejemplo muro de un canal).

Otro informe publicado por la NCEER (Buckle, 1994) presenta los anteriores siete puentes más uno en que los daños fueron menores a pesar de encontrarse muy cerca de los que colapsaron. El interés de incluir este puente (sin daños significativos) surgió precisamente para que sirviera de punto de comparación con las restantes estructuras.

Además de los estudios anteriores, se obtuvo información del comportamiento sísmico de cinco puentes mixtos hormigón-acero (Astaneh-Als *et al.*, 1994 a y b) afectados por el mismo sismo. Estos puentes sufrieron niveles de daño entre leves y moderados, a pesar de encontrarse dentro de la zona que sufrió mayores daños.

Así pues, los 13 puentes seleccionados para realizar la calibración, abarcan estructuras de hormigón y de hormigón-acero, construidas entre los años 60 y 70, de dos ó más vanos, rectos o curvos o sesgados, con articulaciones internas y sin ellas, con diferentes tipologías de pilas (entre columnas simples y múltiple columnas), con cimentación en pilotes o con zapatas aisladas y en diversos tipos de suelo. En resumen, la muestra cuenta con una buena variedad de propiedades. Así mismo, son puentes que durante el sismo de Northridge sufrieron distintos niveles de daño, ya que muchos colapsaron y otros fueron clasificados entre puentes que sufrieron daños menores a daños mayores.

Algunos de los puentes de la muestra se encontraban ubicados en un área muy cercana al epicentro del sismo, es decir en la zona más afectada, y otros estaban a casi 25 km. De tal manera que estudiando las intensidades de cada uno de los sitios de ubicación de los puentes, se encontraron siete de ellos afectados por una intensidad de **VIII** y seis de ellos por una intensidad de **IX**.

Es así, como en base a esta gama de puentes, de daños y de intensidades se llegó a construir dos curvas de daño en función de la vulnerabilidad, una para cada intensidad; viéndose claramente que las estructuras más vulnerables fueron las que alcanzaron mayores niveles de daño, poniendo de manifiesto la validación del método de *evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes*, presentado en esta monografía.

#### 4.1 Método elegido para la calibración

En toda investigación donde se proponga un método es necesario que ésta contemple el estudio de su validación o calibración. Solamente se podrá garantizar la veracidad de las respuestas, obtenidas de la aplicación de un modelo, en el

momento que éste sea validado. Aunque, no se debe desconocer la dificultad que en muchos de los casos esto representa; bien por no poderse contar con la suficiente información con la que se pueda hacer un estudio de validación o bien, porque solamente a lo largo de los años el modelo propuesto pondrá de manifiesto su fiabilidad.

Al realizar la calibración o validación de la metodología se pensó en dos posibles caminos a tomar. Primero, hacerla a partir de datos reales de puentes que hubieren registrado daños durante acciones sísmicas pasadas y segundo, utilizar un método de simulación de daño en puentes, bien sea puente reales o simulados. Finalmente en el presente estudio se decidió tomar la primera alternativa y para ello, se seleccionó una muestra de trece puentes de hormigón y de acero-hormigón, anteriormente citada.

Así pues, para efectuar la calibración a partir de la primera alternativa, es decir partiendo de datos de puentes que hubieren sufrido y registrado diferentes niveles de daños, se desarrollaron los siguientes pasos:

1. Selección de la muestra de puentes.
2. Cálculo del índice de vulnerabilidad de la muestra con la metodología propuesta.
3. Estudio de informes de daño y definición del nivel de daño de cada uno de los puentes de la muestra.
4. Estudio de informes sismológicos con los cuales se determinó la intensidad en cada uno de los sitios de ubicación de los puentes de la muestra.
5. Construcción de las curvas de daño en función del índice de vulnerabilidad, de acuerdo a las intensidades de la muestra.

A continuación se expone brevemente la manera en que se desarrollo cada uno de los anteriores pasos:

*1) Selección de la muestra de puentes.* La base de datos necesaria requería una buena documentación de las características estructurales de los puentes, del registro de daños y a su vez, de la respuesta del terreno en cada uno de los sitios donde se localizaban los puentes. Por lo anterior, la mejor y más completa documentación disponible fue la de puentes dañados por el sismo de Northridge, ocurrido el 17 de Enero de 1994 en California, Estados Unidos.

Basados en la excelente documentación encontrada (Hall, 1995; Astaneh-Als *et al.*, 1994 a y b; Buckle 1994; Priestley *et al.*, 1994), se seleccionaron trece puentes, ocho de hormigón y cinco mixtos de acero-hormigón.

*2) Cálculo del índice de vulnerabilidad de cada puente.* Para cada uno de los puentes, se realizó el inventario utilizando el formulario de levantamiento de vulnerabilidad sísmica y, posteriormente, se le integraron los datos al programa **INDICE**, obteniéndose los índices de vulnerabilidad sísmica de cada uno de los puentes de la muestra.

3) *Definición del nivel de daño de cada puente.* A partir de los informes de los daños del sismo de Northridge, para cada uno de los puentes se definió un nivel de daño entre: *nada, menor, moderado, mayor y colapso* (Hall, 1995; Buckle, 1994). Posteriormente, los niveles de daño se transformaron a rangos de índices de daño (Park y Ang, 1985).

4) *Determinación de la intensidad.* A partir de los informes sismológicos se puede definir la aceleración máxima del terreno o la intensidad correspondiente a cada uno de los sitios donde estaban localizados los puentes seleccionados. Los datos que se refieren a la intensidad o a la aceleración máxima de un sismo, son imprescindibles para poder construir las funciones vulnerabilidad-daño para cada grado de intensidad o de aceleración máxima (o cualquier otro parámetro que cuantifique el tamaño del sismo).

En esta investigación, la determinación de las intensidades se realizó inicialmente a partir de los informes existentes relativos a los valores de aceleraciones máximas registradas en los sitios donde se localizaban los puentes (Priestley *et al.*, 1994) y, posterior y definitivamente, se realizó directamente del mapa de intensidades del sismo de Northridge, elaborado por Dewey *et al.* (1994).

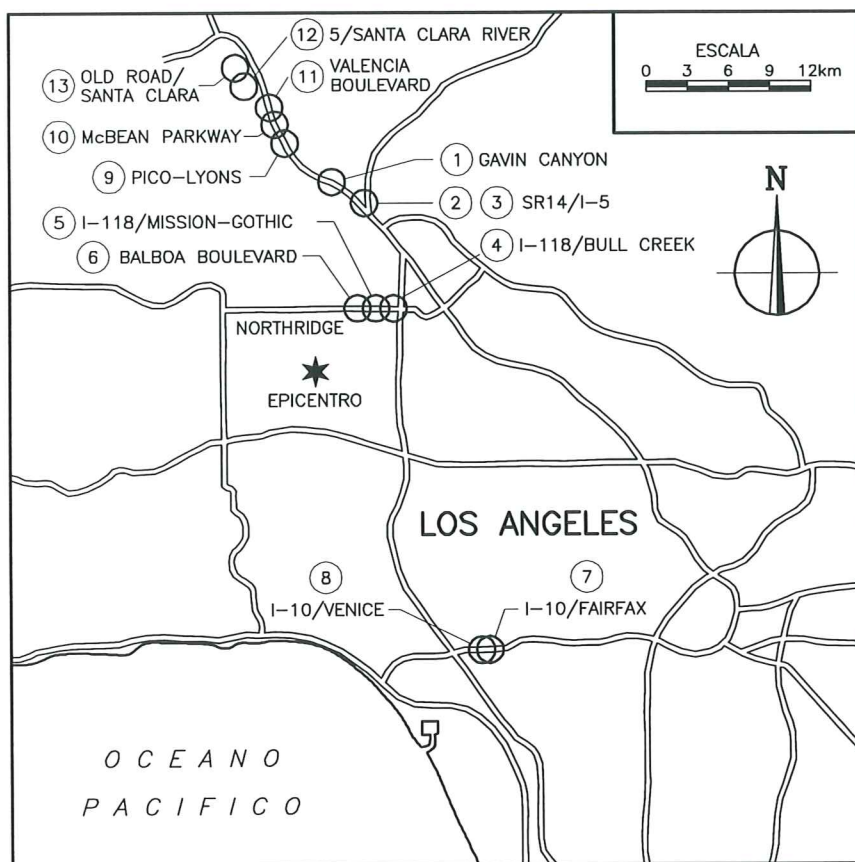
5) *Construcción de curvas de daño contra índice de vulnerabilidad en función de la intensidad.* Definido el nivel de daño de cada puente y calculado su correspondiente índice de vulnerabilidad, se construyeron las curvas de daño-índice de vulnerabilidad para las intensidades correspondientes a las localizaciones de los puentes.

A continuación, se comentan, detalladamente, cada uno de los puntos anteriormente expuestos.

## 4.2 Descripción de la muestra tomada para la calibración

Como se ha mencionado antes, los puentes de la muestra de calibración corresponden a estructuras de hormigón y de acero-hormigón, construidos entre los años sesenta y setenta. Algunos de ellos, habían sido intervenidos estructuralmente para mejorar su comportamiento sísmico a lo largo de su vida útil. Sin embargo, corresponden a estructuras que ante el sismo de Northridge del 17 de Enero de 1994, presentaron algún nivel de daño (desde leve a colapso).

Estos puentes estaban ubicados a distancias comprendidas entre 7 y 25 km del epicentro del sismo, localizados sobre las carreteras Interestatales I-5, I-118 e I-10. La Figura 4.1 muestra la localización de los puentes estudiados y el epicentro del terremoto.



**Figura 4.1** Mapa de localización de los puentes de la muestra.

Los puentes de la muestra utilizados para la calibración son:

1. Gavin Canyon Undercrossing
2. Ruta SR-14/I-5 Separation and Overhead
3. Ruta SR-14/I-5 North Connector Overcrossing
4. Bull Creek Canyon Channel
5. Mission-Gothic Undercrossing
6. Balboa Boulevard Overcrossing
7. Fairfax-Washington Undercrossing
8. La Cienega-Venice Undercrossing
9. Pico-Lyons Overcrossing
10. McBean Parkway Overcrossing
11. Valencia Boulevard Overcrossing
12. Santa Clara River
13. Old Road

### 4.3 Cálculo del índice de vulnerabilidad

A partir de los informes del sismo de Northridge, en cuanto a estructuras afectadas, se pudo realizar el inventario de cada uno de los puentes de la muestra. Cada puente se inventarió por medio del *formulario de levantamiento de la vulnerabilidad sísmica de puentes*.

Posteriormente, las respuestas de los formularios se incorporaron al programa **INDICE** y, con ellas, se calculó el índice de vulnerabilidad de cada uno de los puentes según la metodología descrita en el capítulo 2. Los resultados obtenidos se expresan en variables lingüísticas (*grados de vulnerabilidad*) y valores numéricos (*índices de vulnerabilidad*), los cuales se resumen en la Tabla 4.1. A su vez, las funciones de pertenencia de cada uno de los índices de vulnerabilidad de cada puente se presentan en el Anexo 5 de Maldonado *et al.* (2000).

**Tabla 4.1** Índices de vulnerabilidad sísmica de la muestra.

#	NOMBRE	GRADO DE VULNERABILIDAD	I.V.
1	Gavin Canyon Undercrossing	Medianamente vulnerable	5,55
2	SR-14/I-5 Southbound	Muy vulnerable	5,85
3	SR-14/I-5 North Connector	Muy vulnerable	5,95
4	Bull-Creek Canyon Chanel	Medianamente vulnerable	4,85
5	Mission Gothic Undercrossing	Medianamente vulnerable	5,35
6	Balboa Boulevard Overcrossing	Poco vulnerable	2,95
7	Fairfax-Washington Undercrossing	Muy vulnerable	6,40
8	Cienega-Venice Undercrossing	Muy vulnerable	6,30
9	Pico Lyons Overcrossing	Medianamente vulnerable	4,95
10	McBean Parkway	Poco vulnerable	3,55
11	Valencia Boulevard	Medianamente vulnerable	4,15
12	Santa Clara River	Medianamente vulnerable	4,75
13	Old Road	Medianamente vulnerable	4,95

### 4.4 Determinación del daño

La determinación del nivel de daño de cada uno de los puentes se realizó a partir del estudio de los informes de daño existentes en la bibliografía, la cual es amplia y tiene un nivel suficiente para realizar la calibración del modelo propuesto. De tal manera que de acuerdo a la descripción y clasificación de daños realizada por el equipo de Priestley *et al.* (1994), de los estudios de Astaneh-Als *et al.* (1994 a y b) y de los trabajos presentados por Buckle (1994) y Hall (1995), a los niveles de daño se les asoció un calificativo representativo como *nada*, *menor*, *moderado*, *mayor* y *colapso*. Esta labor comprendió tanto el estudio de las descripciones y análisis presentados en los informes mencionados, como la

unificación de los criterios en el momento de elegir el nivel de daño que más se acomodara a cada puente. Esto a su vez, requirió la confrontación de las opiniones en el momento de elegir el nivel de daño adecuado, ya que por citar un ejemplo, el daño *moderado* en un informe puede presentarse como daño *mayor* en otro.

En la Tabla 4.2, se presentan los puentes, con su nivel de daño, definidos para su utilización en las curvas de daño-índice de vulnerabilidad. En la Tabla se adjunta la fuente bibliográfica de donde se adquirió la información relativa al nivel de daño.

**Tabla 4.2** Nivel de daño sísmico de la muestra.

#	NOMBRE	NIVEL DE DAÑO	FUENTE
1	Gavin Canyon Undercrossing	Colapso	(1)
2	SR-14/I-5 Southbound	Colapso	(1)
3	SR-14/I-5 North Connector	Colapso	(1)
4	Bull-Creek Canyon Chanel	Mayor	(1)
5	Mission Gothic Undercrossing	Colapso	(1)
6	Balboa Boulevard Overcrossing	Menor	(1)
7	Fairfax-Washington Undercrossing	Colapso	(1)
8	Cienega-Venice Undercrossing	Colapso	(1)
9	Pico Lyons Overcrossing	Moderado	(2)
10	McBean Parkway	Menor	(2)
11	Valencia Boulevard	Moderado	(2)
12	Santa Clara River	Moderado	(1)
13	Old Road	Moderado	(2)

(1) SPECTRA/abril de 1995, Suplemento C, volumen II (Hall, 1995)

(2) UCB/CE-STEEL 94-01 (Astaneh-Als *et al.*, 1994 b)

Identificados los niveles de daño de cada uno de los puentes, fue necesario asociar a cada nivel un valor numérico. Para ello se trabajó con los niveles de daño de Park y Wang (1985) y Park *et al.* (1955) utilizados para edificaciones. Estos valores se presentan en la Tabla 4.3.

**Tabla 4.3** Escala numérica de niveles de daño.

ESTADO DE DAÑO	RANGO DE ÍNDICE
Nada	< 0,1
Menor	0,1 - 0,2
Moderado	0,2 - 0,5
Mayor	0,5 - 1,0
Colapso	> 1,0

Dado que se requería un valor exacto de daño para cada puente, se decidió asignar a un puente con *daño menor* un valor de 0,1, con *daño moderado* 0,2, con *daño mayor* 0,5 y a *colapso* 1. De esta forma, los puentes de la muestra contaban con un valor de índice de vulnerabilidad sísmica y de un valor de daño y, así el paso que faltaba era la cuantificación de la acción sísmica. En este caso, la medida de la intensidad del sismo, para poder pasar a construir las curvas daño-índice de vulnerabilidad para la intensidad sísmica.

#### 4.5 Definición de la intensidad correspondiente a la localización de cada uno de los puentes

Una vez calculados los índices de vulnerabilidad sísmica de cada uno de los puentes de la muestra e identificados los respectivos niveles de daño, era necesario contar con una medida correspondiente al movimiento sísmico del terreno durante el sismo en cuestión, para así poder organizar la información y sacar las conclusiones pertinentes a la aplicabilidad y fiabilidad del método propuesto.

Al ser la intensidad una buena primera aproximación a la medida del movimiento sísmico, se escogió este parámetro para fines de la calibración del modelo, es decir, para poder construir las curvas de daño-índice de vulnerabilidad.

Para el desarrollo de la determinación de la intensidad, para cada uno de los lugares de ubicación de los puentes, fue necesario recurrir a los informes sismológicos del sismo de Northridge y buscar el mejor camino para estimar los valores de intensidad. Existen informes que cuentan con las curvas de aceleraciones máximas del terreno (Stewart *et al.*, 1994), otros con mapas de intensidad directamente (Dewey *et al.*, 1994) y otros con curvas de atenuación (Priestley *et al.*, 1994). A pesar de la buena cantidad y calidad de información disponible, las diferencias en los valores de aceleraciones como en las intensidades, determinados por medio de una referencia u otra, eran notorios. Esto en parte se debía al hecho de que los puentes se encontraban en sitios donde no existían valores medidos sino interpolados y, a su vez, por que los valores obtenidos presentaban mucha dispersión.

En principio, se trabajó con la curva de atenuación obtenida en Priestley *et al.* (1994) la cual se obtuvo a partir de datos de aceleraciones máximo del terreno (PGA) y de acelerogramas proporcionados por el Departamento de Minas y Geología de California (Priestley *et al.*, 1994). La curva representa la media del log (PGA), basado en el supuesto que la PGA es una distribución log-normal. A pesar de enfatizarse en la fuente bibliográfica que esto solamente puede ser utilizable como información preliminar, no pudiendo considerarse como definitiva. Como primera aproximación se decidió tomar esta curva de atenuación para definir los valores de PGA de cada sitio de puente, para así, por medio de la relación intensidad-aceleración máxima del terreno de Trifunac y Brady (1975), determinar la intensidad correspondiente. Sin embargo, los valores de intensidad obtenidos de esta forma comparados con los leídos en los mapas de intensidades o con los extraídos de los informes de daños, fueron bastantes diferentes. Por ello,

finalmente, se decidió definir la intensidad de cada uno de los sitios de ubicación de los puentes a partir del mapa de intensidades de Dewey *et al.* (1994).

Del mapa de intensidades del sismo de Northridge, se definieron las intensidades de cada uno de los sitios de ubicación de los puentes como se muestra en la Tabla 4.4.

Finalmente, la muestra de los trece puentes se pudo agrupar considerando dos intensidades la **VIII** y la **IX**. Seis puentes se asociaron a una intensidad de **IX** y los siete restantes, a **VIII**. Definidas las intensidades, se paso a la construcción de dos curvas de vulnerabilidad, una para la intensidad **VIII** y la otra, para **IX**.

**Tabla 4.4** Intensidad en cada sitio de ubicación de los puentes.

#	NOMBRE	I Intensidad
1	Gavin Canyon Undercrossing	IX
2	SR-14/I-5 Southbound	IX
3	SR-14/I-5 North Connector	IX
4	Bull-Creek Canyon Chanel	IX
5	Mission Gothic Undercrossing	IX
6	Balboa Boulevard Overcrossing	IX
7	Fairfax-Washington Undercrossing	VIII
8	Cienega-Venice Undercrossing	VIII
9	Pico Lyons Overcrossing	VIII
10	McBean Parkway	VIII
11	Valencia Boulevard	VIII
12	Santa Clara River	VIII
13	Old Road	VIII

#### 4.6 Construcción de las curvas de daño - índice de vulnerabilidad

Calculados los índices de vulnerabilidad sísmica de los puentes de la muestra, definido el nivel de daño de cada uno de ellos durante el sismo de Northridge y determinadas las dos intensidades asociadas a los trece puentes durante el sismo en cuestión, se construyen a continuación las curvas de daño respecto al índice de vulnerabilidad.

No obstante, inicialmente se organizan los datos necesarios para la construcción de las curvas, como se muestra en la Tabla 4.5.

**Tabla 4.5** Nivel de daño sísmico, grado e índice de vulnerabilidad sísmica, e intensidad.

#	NOMBRE	NIVEL DE DAÑO	Vulnerabilidad		I
			Grado	I.V.	
1	Gavin Canyon Undercrossing	Colapso	Medianam.	5,55	IX
2	S14/I-5 Southbound	Colapso	Muy	5,85	IX
3	S14/I-5 North Connector	Colapso	Muy	5,95	IX
4	Bull-Creek Canyon Chanel	Mayor	Medianam.	4,85	IX
5	Mission Gothic Undercrossing	Colapso	Medianam.	5,35	IX
6	Balboa Boulevard Overcrossing	Menor	Poco	2,95	IX
7	Fairfax-Washington Undercrossing	Colapso	Muy	6,40	VIII
8	Cienega-Venice Undercrossing	Colapso	Muy	6,30	VIII
9	Pico Lyons Overcrossing	Moderado	Medianam.	4,95	VIII
10	McBean Parkway	Menor	Poco	3,55	VIII
11	Valencia Boulevard	Moderado	Medianam.	4,15	VIII
12	Santa Clara River	Moderado	Medianam.	4,75	VIII
13	Old Road	Moderado	Medianam.	4,95	VIII

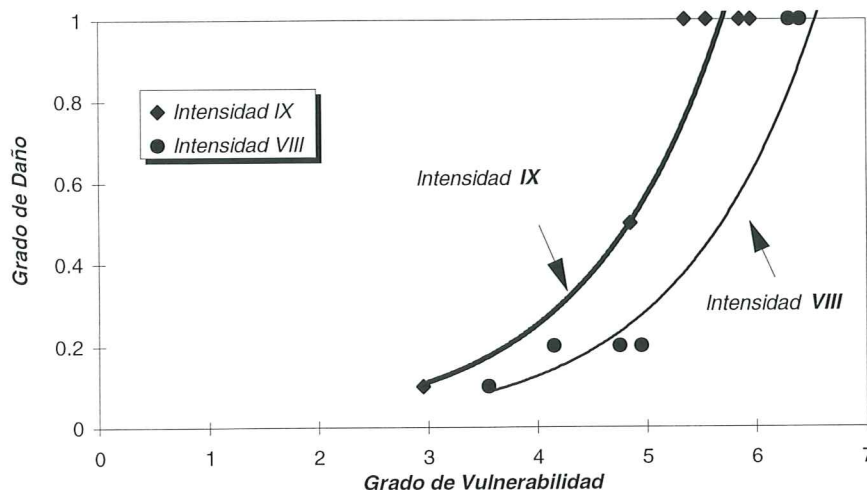
Específicamente, observando estos resultados, se pueden sacar las siguientes conclusiones:

1. Analizando los valores para una misma intensidad, a medida que los puentes cuentan con mayor *índice de vulnerabilidad* el *nivel de daño* alcanzado, igualmente, va aumentando.
2. De los seis puentes de la muestra que colapsaron durante el sismo, los que cuentan con mayor índice de vulnerabilidad son precisamente aquéllos que se encuentran en el área de menor intensidad (puentes 7 y 8) y, por lo tanto, éstos son los que tienen asociado el mayor índice de vulnerabilidad de toda la muestra (6,4 y 6,3).
3. Comparando los resultados de los puentes 4 y 9, los cuales tienen valores de vulnerabilidad semejantes, se observa que el mayor nivel de daño lo alcanza precisamente el puente que se encuentra en la zona de mayor intensidad sísmica.
4. Analizando los puentes 6 y 10, los cuales sufrieron el mismo nivel de daño (*menor*) durante el sismo de Northridge, vemos como el puente con menor índice de vulnerabilidad es precisamente el que se encuentra en la zona de mayor intensidad sísmica.

Estas observaciones corroboran, que para una cierta vulnerabilidad sísmica, los niveles de daño son mayores a medida que la estructura se encuentra en un área

con mayor intensidad sísmica. A su vez, que a igual nivel de daño, las estructuras más vulnerables son aquellas ubicadas en las zonas con menor intensidad sísmica.

Todas estas observaciones son materializadas al construir, con los datos de la Tabla 4.5, las dos curvas, una correspondiendo a una intensidad **VIII** y, la otra, a una de **IX** (ver Figura 4.2).



**Figura 4.2** Curvas de calibración.

De esta forma, aplicando el modelo propuesto a una muestra de puentes, en los que se conoce el nivel de daño alcanzado durante un terremoto real, se puede observar que los resultados obtenidos son congruentes, garantizando, de alguna forma, que el método funciona. No obstante, a medida que se pueda contar con una mayor cantidad de puentes y con más intensidades, se podrá realizar una calibración más completa del modelo.

Luego, mediante la construcción de estas curvas con los datos disponibles, se pone de manifiesto la fiabilidad del método propuesto, ya que para un mismo nivel de daño la vulnerabilidad aumenta a medida que disminuye la intensidad y para igual valor de vulnerabilidad, el daño es mayor cuanto mayor es la intensidad.

## 4.7 Resumen y conclusiones

Una vez desarrollado el modelo de *evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes*, en este capítulo se ha estudiado su viabilidad y consistencia. Como resumen y conclusiones parciales, se pueden citar las siguientes:

1. La calibración o validación del modelo se ha realizado a partir de datos reales de daños en puentes, ocurridos durante el sismo de Northridge del 17 de Enero de 1994. Por ello, inicialmente, se seleccionó una muestra de puentes y se calculó el índice de vulnerabilidad de dicha muestra a partir de la metodología propuesta. Se identificó el nivel de daño de cada uno de los puentes y se

determinaron las intensidades en cada una de las ubicaciones de los puentes de la muestra. Finalmente, se construyeron las curvas de *daño* en función del *índice de vulnerabilidad* para las intensidades **VIII** y **IX**.

2. Al ser el sismo de Northridge uno de los más recientes movimientos sísmicos que han afectado significativamente a estructuras como los puentes; y al poderse obtener a partir de él una valiosa información y numerosos e interesantes estudios, este sismo ha sido seleccionado como fuente de información para extraer la documentación sismológica y estructural necesaria para realizar la validación del modelo de evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes presentado.
3. La muestra para la calibración está compuesta de 13 puentes, los cuales abarcan una amplia variedad de las propiedades que influyen en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes. Siete de los puentes fueron construidos entre 1960 y 1970, uno antes de los 60, y los cinco restantes después de 1970 pero antes de 1980. Ocho tienen una tipología pórtico de los cuales sólo cinco de ellos cuentan con articulaciones internas (variando el número de ellas por puente, desde 1 a 4 articulaciones), dos puentes son de tipología viga continua, y tres, de viga simplemente apoyada. En lo referente a la forma de la superestructura ocho son esviados, dos curvos y los tres restantes rectos; cinco tienen pilas de columnas aisladas, seis múltiples columnas; y dos, pilas tipo pantalla. La mayoría de los sistemas de cimentación consisten en pilotes (10 de ellos), con tan solo dos casos utilizando zapatas y uno con pila-pilotes. En cuanto a la irregularidad longitudinal, existe una gran variedad de casos ya que ocho puentes tienen diferente altura de columnas, en dos el número de columnas varía por pila, en dos existen estructuras externas (como muros) que modifican la rigidez de las pilas y tan sólo uno de los puentes no es irregular longitudinalmente. La gran mayoría de estribos tendieron a ser cerrados, cambiando la condición de unión a la superestructura. Los tipos de apoyos se distribuían entre apoyos elastoméricos y rodillos. El tipo de suelo de los puentes variaba entre materiales cohesivos y arenosos. El estado de conservación de todos los puentes se calificó como aceptable y, finalmente, el sistema constructivo de la superestructura y pilas no presentó mayor variación, pilas hormigonadas "in situ" y tableros entre prefabricados y construidos "in situ".

A su vez, los puentes de la muestra se encontraban ubicados a distancias aproximadas de 7, 14, 16 y 25 km del epicentro del sismo de Northridge.

4. Para cada uno de los puentes de la muestra, se evaluó su vulnerabilidad por medio del *modelo de evaluación de la vulnerabilidad sísmica en puentes* propuesto en esta investigación. Fue así, como inicialmente a cada estructura se le realizó el inventario por medio del formulario de evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes, y posteriormente se le calculó la vulnerabilidad utilizando el programa **INDICE**. Las respuestas para cada

puente, se expresaron no solo por medio de funciones de pertenencia, sino mediante un calificativo que expresa el *grado de vulnerabilidad* y con un valor numérico que indica el *índice de vulnerabilidad*.

De los resultados obtenidos, se pudo concluir que cuatro de los puentes eran *muy vulnerables*, con índices de vulnerabilidad comprendidos entre 5,85 y 6,40; siete estaban calificados como *medianamente vulnerables*, con índices entre 5,55 y 4,15; y dos eran *poco vulnerables*, con índices comprendidos entre 2,95 y 3,55.

Los puentes calificados como más vulnerables son aquéllos con irregularidades en la forma de la superestructura, irregularidad longitudinal de la estructura, deficiencia en longitud de apoyos y malas condiciones de los suelos de cimentación. De forma contraria, los menos vulnerables eran los asociados a puentes regulares, es decir rectos, con igualdad en altura y forma de las columnas y buenas longitudes de apoyo. Es también interesante resaltar que, dentro de la muestra, comparando los puentes de hormigón con los mixtos hormigón-acero, estos últimos resultaron ser los menos vulnerables.

5. La determinación del nivel de daño de cada uno de los puentes de la muestra se realizó a partir de los informes de daño observados en estos puentes durante el sismo de Northridge existentes en la bibliografía. Seis de los puentes *colapsaron* durante el sismo, uno sufrió daño *mayor*, cuatro daños *moderados* y los dos restantes daños *menores*.  
Estos niveles de daño, a su vez, se transformaron a valores numéricos a través de la escala numérica de Park y Wang (1985), utilizada normalmente para edificaciones pero que también puede ser aplicada a puentes. Así lo hace Barenberg y Foutch (1988) en su evaluación de los procedimientos de diseño sísmico para puentes.
6. Una vez calculados los índices de vulnerabilidad sísmica de cada uno de los puentes de la muestra e identificados los respectivos niveles de daño, era necesario saber con que medida del tamaño del terremoto era preciso trabajar. Al ser la intensidad una buena aproximación a dicha medida ésta se escogió con la finalidad de calibrar el modelo. Este parámetro se utilizó para construir las curvas de daño-índice de vulnerabilidad.  
Las intensidades definidas en los sitios de ubicación de los trece puentes como consecuencia del sismo de Northridge, indican que seis de los puentes de la muestra estuvieron sometidos a una intensidad de **IX** y los siete restantes a una intensidad de **VIII**. Estas intensidades están identificadas en el mapa de intensidades de Dewey *et al.* (1994).
7. Con los índices de vulnerabilidad calculados para cada uno de los puentes de la muestra, los niveles de daño identificados y las intensidad definidas, se construyeron dos curvas de daño vulnerabilidad, una para la intensidad de **VIII** y, otra, para la de **IX**.

8. De la aplicación del modelo a la muestra de puentes afectados por el sismo de Northridge, se puede observar que los resultados son congruentes. Es así como al construir las curvas de vulnerabilidad, se corroboró que para una cierta vulnerabilidad sísmica, el daño es mayor a medida que aumenta la intensidad sísmica y, para un mismo nivel de daño, la vulnerabilidad aumenta conforme la intensidad sísmica disminuye. Esto pone de manifiesto la fiabilidad y consistencia de la metodología planteada relativa a la obtención del índice de vulnerabilidad.

Más detalladamente, de los seis puentes de la muestra que colapsaron durante el sismo, los que cuentan con mayor índice de vulnerabilidad son precisamente aquéllos que se encuentran en el área de menor intensidad y, por lo tanto, éstos son los que tienen asociado el mayor grado de vulnerabilidad de toda la muestra (*muy vulnerables*). Comparando los resultados de los puentes que tienen valores de vulnerabilidad semejantes, se observa que el mayor nivel de daño lo alcanza precisamente el puente que se encuentra en la zona de mayor intensidad sísmica. Luego, analizando los puentes que estuvieron sometidos al mismo nivel de daño durante el sismo de Northridge, se observa que el puente con menor índice de vulnerabilidad es el que se encuentra en la zona de mayor intensidad sísmica.

9. El estudio detallado de una muestra de puentes situados en zonas correspondientes a las intensidades **VIII** y **IX** de un sismo, ha puesto de manifiesto la fiabilidad del método propuesto y su aplicabilidad para predicción de daño en futuras crisis sísmicas. En el futuro, cuando se cuente con mayor información de puentes correspondientes a una buena diversidad de intensidades, se podrá realizar una mayor validación del método.

## Aplicación del modelo

Para estudiar la aplicabilidad del método de evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes, se realizó el levantamiento de una pequeña, aunque representativa, muestra de puentes gestionados por la Dirección General de Carreteras de la Generalitat de Catalunya y, a partir de ella, se efectuó la aplicación de la metodología utilizando datos obtenidos de oficina. Esta muestra de puentes se seleccionó dada la cercanía y facilidad en la adquisición de su información. A continuación, se comenta la forma en que se recopiló la información necesaria y los resultados obtenidos al aplicar el método.

A partir de los 1270 puentes inventariados por el Departament de Política Territorial i Obres Públiques de la Generalitat de Catalunya, se escogió una muestra del 2% de los puentes, correspondientes a las autopistas A-16, A-17, A-18, A-19 y a las carreteras nacionales N II, N150 y N152. La muestra total comprende veinticuatro puentes, ocho de los cuales se encuentran en las autopistas y 16 en las carreteras nacionales. Los puentes seleccionados corresponden a las tipologías de puentes más representativas de las vías escogidas.

La información se tomó del inventario de puentes de 1996, donde se encontraba la descripción del estado de cada uno de los elementos y el esquema de cada puente en alzado y en planta. A su vez, se contaba con el registro fotográfico de cada uno de ellos. Esta información se obtuvo gracias a la colaboración de la Dirección General de Carreteras de la Generalitat de Catalunya.

Basados en esta información, se cumplimentó cada uno de los formularios y así, posteriormente, se procedió al cálculo del índice de vulnerabilidad de cada uno de los puentes de la muestra. En las Tablas 5.1 y 5.2, se resumen las características más importantes de los puentes.

**Tabla 5.1** Características de una muestra de puentes de autopista de la provincia de Barcelona.

Puente	Autopista	Longitud (m)	Número vanos	Año Construcción	Tipo de Superestructura
1	A-16	59,00	4	1996	Viga cajón - no continua
2	A-17	78,40	4	1964	Vigas - simplemente apoyadas
3	A-18	680,00	16	1968	Vigas cajón - continuas
4	A-18	64,00	4	1971-1975	Vigas en T - simplemente apoyadas
5	A-18	48,00	3	1974-1994	Losa
6	A-18	8,00	1	1974-1994	Losa
7	A-19	60,40	4	1965-1966	Vigas T
8	A-19	12,00	1	1968-1974	Vigas

**Tabla 5.2** Características de una muestra de puentes de carreteras nacionales de la provincia de Barcelona.

Puente	Carretera Nacional	Longitud (m)	Número vanos	Año Construcción	Tipo de Superestructura
9	N II	54,70	2	1992	Losa hormigón pretensada
10	N II	146,00	5	Antes 1968	Viga cajón - continua
11	N II	14,00	2	Antes 1968	Arco de piedra y ladrillo
12	N - 150	46,00	3	Antes 1968*	Vigas sección PI - simple. apoyadas
13	N - 150	97,00	4	1974 -1994	Losa
14	N - 150	71,50	4	1974 - 1994	Losa
15	N - 150	58,00	3	Después 1994	Vigas metálicas - simple. apoyadas
16	N - 150	132,20	5	Después 1994	Viga metálica - continua
17	N - 150	347,00	11	Después 1994	Vigas cajón - simple. apoyadas
18	N - 150	50,00	3	1974 - 1994	Vigas cajón - continuas
19	N - 152	89,65	6	Antes 1968	Arco mampostería
20	N - 152	22,20	1	Después 1994	Vigas
21	N - 152	243,32	10	1974 - 1994	Vigas - simple. apoyadas
22	N - 152	55,00	3	1974 - 1994	Viga cajón - continua
23	N - 152	12,57	1	1968 - 1974	Vigas
24	N - 152	30,00	1	Antes 1968	Arco hormigón

\* puente reconstruido entre 1968 y 1974

Efectuado el cálculo del índice de vulnerabilidad de la muestra de veinticuatro puentes, se encontró que tan solo tres de ellos podían calificarse como *poco* vulnerables, cuatro como *"muy"* vulnerables y los restante como *"medianamente"* vulnerables. Ninguno de los puentes posee las características ideales para poder ser calificados como *nada* vulnerables, pero, de igual manera, ninguno de los puentes presenta aspectos tan desfavorables que los hagan *absolutamente* vulnerable. La mayoría de los puentes tal, como se representa en la Figura 5.1 se pueden calificar como *"medianamente"* vulnerables.

Los resultados expresados en la forma de *grado* de vulnerabilidad, *índice* de vulnerabilidad y en *funciones de pertenencia* se presentan en la Tabla 5.3.

De los veinticuatro puentes de la muestra en la provincia de Barcelona, los tres calificados como “*poco*” vulnerables poseen índices de vulnerabilidad comprendidos entre 3,20 y 3,55. Los “*medianamente*” vulnerables cuentan con valores del índice comprendidos entre 3,70 y 5,40 y los “*muy*” vulnerables entre 5,75 y 6,15.

Las funciones de pertenencia de los índices de vulnerabilidad como se puede observar en la Tabla 5.3, representan la ambigüedad de la respuesta. A medida que aumenta el rango de abscisas de la función, la ambigüedad del índice es mayor. De las veinticuatro funciones de pertenencia de los índices resultantes, cuatro son de forma trapezoidal y las restantes son triangulares.

**Tabla 5.3** Respuestas para la muestra de puentes en Barcelona.

#	Grado Vulnerabilidad	I.V.	Funciones de Pertenencia									
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Poco	3.45			.00	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	.00				
2	Median.	3.90			.00	.50	<b>1.00</b>	.50	.00			
3	Muy	6.15					.00	.50	<b>1.00</b>	.64	.00	
4	Median.	4.75				.00	.64	<b>1.00</b>	.50	.00		
5	Median.	5.00				.00	.50	<b>1.00</b>	.56	.00		
6	Poco	3.55			.00	.83	<b>1.00</b>	.00				
7	Muy	5.85				.00	.00	.50	<b>1.00</b>	.50	.00	
8	Median.	3.80			.00	.50	<b>1.00</b>	.50	.00			
9	Median.	4.15			.00	.50	<b>1.00</b>	.60	.00			
10	Muy	6.15					.00	.50	<b>1.00</b>	.60	.00	
11	Median.	5.40					.00	<b>1.00</b>	.93	.00		
12	Muy	5.75					.00	.50	<b>1.00</b>	.50	.00	
13	Median.	4.25			.00	.50	<b>1.00</b>	.80	.00			
14	Median.	4.05			.00	.50	<b>1.00</b>	.50	.00			
15	Median.	4.40				.00	<b>1.00</b>	.93	.00			
16	Median.	4.45				.00	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	.00			
17	Median.	4.45				.00	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	.50	.00		
18	Median.	5.35					.00	<b>1.00</b>	.93	.50	.00	
19	Median.	5.10				.00	.50	<b>1.00</b>	.50	.00		
20	Median.	3.70			.00	.50	<b>1.00</b>	.50	.00			
21	Median.	5.15				.00	.50	<b>1.00</b>	.67	.00		
22	Median.	4.45				.00	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	.00			
23	Poco	3.20			.00	<b>1.00</b>	.64	.00				
24	Median.	3.85			.00	.50	<b>1.00</b>	.50	.00			

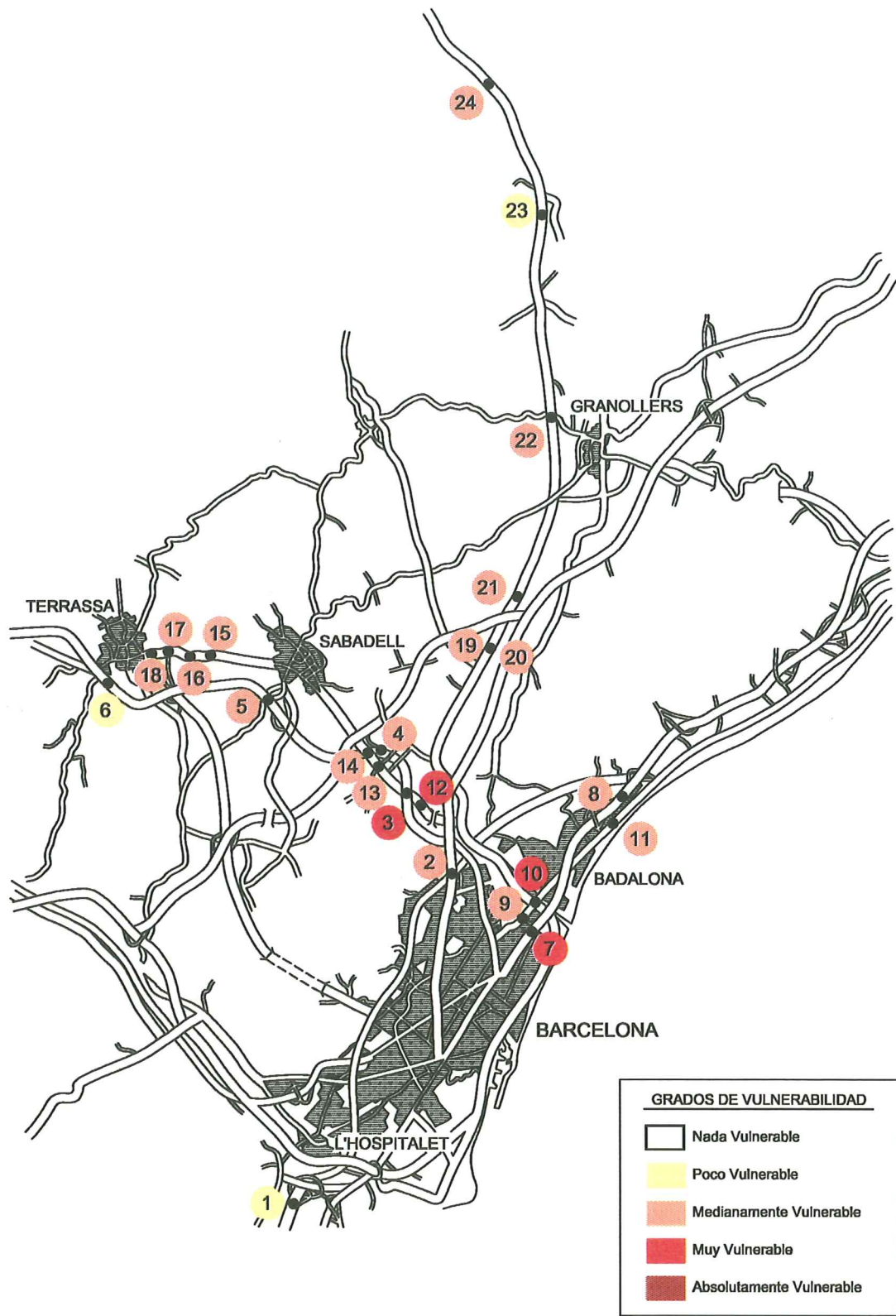


Figura 5.1 Grados de vulnerabilidad de una muestra de puentes en Barcelona.

## Conclusiones

En esta monografía, se ha expuesto un modelo para calcular la vulnerabilidad sísmica de puentes a gran escala, y se ha presentado el desarrollo de la metodología propuesta en todas sus facetas. Las principales observaciones y conclusiones son:

1. Por medio de este estudio se ha desarrollado una *metodología de evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes*, aplicable a una gran muestra de puentes de una amplia gama de tipologías, con tan sólo dar respuesta a un formulario, que contiene diecinueve parámetros claramente definidos. Estas respuestas son muy fáciles de obtener a partir de los datos de inventarios utilizados para la gestión y mantenimiento normal de los puentes, como de inspecciones visuales en los mismos. El modelo consiste en la definición de un “**índice de vulnerabilidad**”, relacionando el grado de vulnerabilidad de cada uno de los 19 parámetros, fijados en el modelo y su valor de importancia. Mediante el modelo propuesto, se obtiene una calificación lingüística y numérica del índice de vulnerabilidad de un puente, además de la función de pertenencia de dicho índice. Es decir que, por medio del modelo, no solamente se califica al puente como “*nada*”, “*poco*”, “*medianamente*”, “*muy*” y “*absolutamente*” vulnerable, sino que a su vez, se le asigna un valor comprendido entre 0 y 9 de índice de vulnerabilidad y, además, una representación de la ambigüedad de la respuesta mediante una función de pertenencia del índice. A su vez, el modelo propuesto ofrece el programa **INDICE**, como una herramienta de computo para, de esta manera, sistematizar el cálculo del índice de una gran muestra de puentes.

puentes en cualquier zona, sin tener que recurrir a información obtenida en otras regiones distintas a la estudiada. La riqueza del modelo propuesto es amplia, ya que permite estudiar las tipologías de puentes más comunes de una forma rápida, a partir de poca información.

2. El modelo propone obtener el inventario de los datos de los puentes de una región, a través de dar respuesta a un formato denominado "*formulario de levantamiento de la vulnerabilidad sísmica de puentes*". Dicho formulario, ofrece una forma sencilla y clara de responder a las condiciones de calidad reales de cada uno de los 19 parámetros. Éste contiene los parámetros, del modelo, claramente definidos por las cuatro condiciones de calidad impuestas. Un inspector debe dar respuesta a dicho formulario ubicando el puente en cada parámetro de la serie **A**, **B**, **C** o **D** en la clasificación, que más se acomode. El formulario debe ser cumplimentado por un inspector adiestrado o, preferiblemente, por ingenieros civiles especialistas en el campo de los puentes.
3. En la mayoría de los casos los datos necesarios para completar el formulario pueden obtenerse de los inventarios existentes en las Administraciones de Carreteras, como ha sido el caso de la aplicación a los puentes del área Metropolitana de Barcelona. Es así, como el objetivo de este trabajo de desarrollar un modelo de fácil aplicación, requiriendo el mínimo de información se ha cumplido. Este objetivo es fundamental, puesto que en muchos de los casos la documentación completa (cantidad y detalle de colocación de armadura, etc.) no se encuentra disponible, sobre todo en puentes antiguos.
4. El método presentado ofrece el primer paso en la construcción de las funciones o matrices de vulnerabilidad. Una vez, calculado el índice de vulnerabilidad sísmica, por medio de modelo propuesto, éste se puede relacionar con un índice de daño calculado para diferentes escenarios sísmicos, construyéndose así las respectivas funciones de vulnerabilidad. Con ellas se puede estimar el grado de pérdidas sísmicas, pudiéndose de esta forma realizar estudios de riesgo sísmico. Es así como, este estudio es una contribución a la evaluación del riesgo sísmico de líneas vitales. Los resultados obtenidos, de la metodología propuesta, se han integrado en un sistema de información geográfica y se aplicarán, próximamente, a la evaluación del riesgo sísmico de puentes en Cataluña.

Las anteriores conclusiones de pueden desglosarse en los siguientes aspectos :

1. Del estudio de las metodologías existentes de evaluación sísmica que involucran modelos de vulnerabilidad sísmica de puentes, se puede concluir que un método eficiente y sencillo de solventar el problema consiste en identificar los parámetros que mejor definen la vulnerabilidad sísmica de los puentes, determinando un *índice de vulnerabilidad*, resultante de la relación entre la calificación de cada uno de los parámetros y su valor de importancia en

la contribución a la vulnerabilidad total. Además, se puede ver que las opiniones de expertos son una buena solución cuando no se cuenta con datos de daños para realizar los estudios de vulnerabilidad. De este modo, se decidió en este estudio definir los grados de vulnerabilidad de cada uno de los parámetros y sus valores de importancia a partir de opiniones de expertos, recopilando las opiniones de especialistas de cinco países.

2. Al estudio de las características más influyentes en la determinación del daño que puede sufrir un puente ante la acción del sismo, se identifican, inicialmente, 17 parámetros y se definen las diferentes condiciones de calidad de cada uno de ellos. Estos parámetros definen el modelo de evaluación de vulnerabilidad sísmica propuesto. En la selección de estos parámetros, igualmente, el estudio de las metodologías existentes y la experiencia de sismos pasados, jugaron un papel importante.
3. La búsqueda de opiniones de expertos fue una decisión acertada en el momento de concretar la definición de los parámetros. Sus opiniones provenientes de diferentes medios, como la investigación, proyecto y construcción de puentes en España y América Latina, corroboraron y complementaron los parámetros inicialmente seleccionados (17), ampliando a 19 el número de parámetros de mayor influencia en la vulnerabilidad sísmica de puentes.
4. El método elegido para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes, se basa en la relación del grado de vulnerabilidad de cada uno de los 19 parámetros seleccionados y en sus valores de importancia. No obstante, la determinación del grado de vulnerabilidad y del valor de importancia de cada parámetro, involucra definiciones vagas, imprecisas y cualitativas. Por esta razón, la utilización de la teoría de los conjuntos difusos y la consideración de las magnitudes de los grados de vulnerabilidad como variables lingüísticas, son una buena alternativa para considerar las incertidumbres y la subjetividades involucradas en las definiciones de los grados de vulnerabilidad de los parámetros y en la determinación de sus valores de importancia.
5. Del estudio de calibración, es decir, de la aplicación del modelo propuesto a la muestra de puentes afectados por el sismo de Northridge, se pudo observar que los resultados obtenidos son congruentes. Es así, como al construir las curvas de daño - vulnerabilidad para las intensidades correspondientes a **VIII** y **IV**, se corroboró que, para una misma vulnerabilidad sísmica, el daño es mayor a medida que aumenta la intensidad sísmica y, para un mismo nivel de daño, la vulnerabilidad es mayor a medida que disminuye la intensidad sísmica. Se concluye que los puentes calificados como más vulnerables son aquéllos con irregularidades en la forma de la superestructura que lo alejan de la planta recta, irregularidad longitudinal de la estructura, deficiente longitud de apoyos y malas condiciones de los suelos de cimentación. Los menos vulnerables, son los puentes regulares, es decir rectos, con igualdad en altura y forma de las

columnas y buenas longitudes de apoyo. De esta forma, el estudio detallado de una muestra de puentes situados en una zona en que se produjo un sismo de intensidad hasta **IX**, ha puesto de manifiesto la fiabilidad y consistencia del método propuesto relativo a la obtención del índice de vulnerabilidad. Lamentablemente, no se cuenta en la actualidad con muchos informes de daños post-terremoto que contengan toda la información necesaria para su correcta utilización en la calibración del modelo. Es de esperar que en el futuro, cuando se cuente con mayor información de puentes correspondientes a una mayor diversidad de intensidades, se podrá realizar una validación más amplia.

6. De los resultados que se obtienen al aplicar el modelo propuesto de "*evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes*", se puede tener una primera aproximación de la vulnerabilidad sísmica de los puentes de un área urbana o de una región determinada y, de esta manera, los resultados pueden ser utilizados para identificar los puentes más necesitados de atención inmediata (reparación, refuerzo, etc). A su vez, se puede estimar qué puentes requieren un estudio más detallado para identificar exactamente el tipo de tratamiento que requieren. Los resultados obtenidos, constituyen una herramienta excelente de fácil incorporación a programas de planificación de sistemas de transporte, o bien a programas de atención de emergencia en casos de terremoto. Este modelo ofrece un estudio general, pero no específico de lo que sucede en cada puente, ya que el modelo se pensó y desarrolló para estudios a gran escala, como una primera estimación de la vulnerabilidad sísmica de una muestra de puentes.
7. La metodología propuesta puede resolver los problemas originados, debidos a la falta de información en lo referente a los daños provocados por terremotos pasados en los puentes de la región de estudio. La falta de información es un problema común, tanto en regiones de moderada como de alta peligrosidad sísmica, siendo la principal razón por la que ciertos estudios de riesgo sísmico en puentes, realizados en varias ciudades del mundo, no son totalmente fiables, ya que tales estudios han recurrido a la utilización de información de daños en estructuras recopiladas en otras regiones.
8. Otra conclusión a destacar es que el modelo propuesto involucra factores que distinguen un puente de otro, incluso si pertenecen a la misma tipología; siendo ésta otra de las grandes ventajas que ofrece el método propuesto.
9. Por último, para concluir, el modelo propuesto identifica los puentes más vulnerables en una región. De esta forma, los resultados correspondientes a la aplicación del modelo en el área metropolitana de Barcelona, pueden utilizarse para identificar los puentes más necesitados de atención inmediata. Al mismo tiempo, los resultados pueden ser importantes para el establecimiento de: programas de mejora y mantenimiento de puentes y sistemas de transporte,

## *CONCLUSIONES*

estimación de pérdidas sísmicas, reducción del riesgo sísmico, y organización de los planes de emergencia y atención post-terremoto.



## Referencias

- AASHTO (1996). Standard Design Specifications for Highway Bridges, *American Association of State Highway and Transportation Officials*, Washington D.C.
- AASHTO (1994). LRFD Bridge Design Specifications, SI Units First Edition, *American Association of State Highway and Transportation Officials*, Washington D.C.
- Alarcón, E. (1998). *Sismos en estructuras (Puentes, Edificación)*, Seminario, Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid, Código 401/97.
- Arenas, J. y Aparicio, A. (1987). *Aparatos de Apoyo para Puentes y Estructuras*, Departamento de Tecnología de las Estructuras, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Santander, España.
- Arenas, J. y Aparicio, A. (1984). *Estribos de Puente de Tramo Recto: concepción, diseño, cálculo*, Departamento de Tecnología de las Estructuras, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Santander, España.
- Arenas, J. y Aparicio, A. (1981). *Pilas de Puentes de Tramo Recto*, Universidad de Santander E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, publicación número **TE-3-1981**.
- Astaneh-Als, A., Bolt, B., McMullin, K.M. y Cho, S. (1994) (a). "Seismic Performance of Steel Bridges during the 1994 Northridge Earthquake", *Restructuring: America and Beyond, Proceedings of Structures Congress XIII*, Boston, Massachusetts, 1515-1527.
- Astaneh-Als, A., Bolt, B., McMullin, K.M., Donikian, R.R., Modjtahedi, D. Y Cho, S. (1994) (b). Seismic Performance of Steel Bridges during the Northridge Earthquake, *Department of Civil Engineering College of Engineering University of California at Berkeley*, **UCB/CE-STEEL-94/01**.
- ATC-6-2 (1985). Seismic Retrofitting Guidelines for Highway Bridges, *Applied Technology Council*.
- ATC-6 (1986). Seismic Design Guidelines for Highway Bridges, *Applied Technology Council*.

- Bandemer, H. y Gottwald, S. (1995). *Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, Fuzzy Methods with Applications*, John Wiley & Sons, England, 239 pg.
- Barenberg, M.E. y Foutch, D.A. (1988). "Evaluation of seismic design procedures for highway bridges", *Journal of Structural Division*, ASCE, **114**(7), 1588-1605.
- Bayrak, O. (1995). PHASE, Computer Program for Dynamic Analysis of Bridges, Versión 1.
- Benedetti, D., G. Benzoni y Parisi, M. (1988), "Seismic vulnerability and risk evaluation for old urban nuclei", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **16**, 183-201.
- Benuska, L. (editor) (1990). Loma Prieta Earthquake, Reconnaissance Report, *Earthquake Spectra*, suplemento del volumen **6**.
- Berrah, M. y Kausel, E. (1992). "Response Spectrum Analysis of Structures Subjected to Spatially Varying Motions", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **21**, 491-470.
- Bertero, V.V. (1992). Lessons Learned From Recent Catastrophic Earthquakes and Associated Research, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, ICCET, *Primera Conferencia Internacional Torroja 1989*, Monografía **410-411**, Madrid.
- Buckle, I.G. (1995). "Report from the Hansin-Aiwji Earthquake Overview of Performance of Highway Bridges", *Boletín NCEER*, **9**(2), 1-5.
- Buckle, I.G. (editor) (1994). The Northridge, California Earthquake of January 17, 1994: Performance of Highway Bridges, *Technical Report NCEER-94-0008*, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo.
- CEE (1994). Eurocode 8, Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures, Part 2: Bridges, ENV1998-2, *Comité Europeen de Normalization*, Bélgica.
- CFE (1993). Manual de Diseño de Obras Civiles. Diseño por Sismo, *Comisión Federal de Electricidad, Instituto de Investigaciones Eléctricas*, México D.F.
- Committee on Highway Bridge Damage Caused by the Hyogo-Ken Nanbu Earthquake, (1995). Report on Highway Bridge Damage Caused by the Hyogo-Ken Nanbu Earthquake of 1995.

- Dewey, J.W., Reagor, B.G. y Dengler, L. (1994). "Ioseismal map of the Northridge, California, earthquake of January 17, 1994", Poster presentado en *89th Annual Meeting of the Seismological Society of America*, Pasadena, California, abstract **24** en Program for Northridge Abstracts.
- Dunker, K.F. y Rabbat, B.G. (1995). "Assessing Infrastructure Deficiencies : The Case of Highway Bridges", *Journal of Infrastructure Systems*, ASCE, **1(2)**, 110-120.
- Dunker, K.F. y Rabbat, B.G. (1990). "Highway Bridge Type and Performance Patterns", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, ASCE, **4(3)**, 161-173.
- EUROCODIGO 8, Capítulo XIV. "Disposiciones para el proyecto de estructuras sismorresistentes", Parte 2, Puentes.
- Hall, J. F. (editor) (1995). Northridge Earthquake of January 17, 1994 Reconnaissance Report, *Earthquake Spectra*, Suplemento C del volumen **11**.
- Hamada, M. y O'Rourke, T.D. (1996) (editor). Proceedings from the Sixth Japan-U.S. Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures Against Soil Liquefaction, *Report NCEER-96-0012*, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo.
- Hamada, M. y O'Rourke, T.D. (1992) (editor). Case Studies of Liquefaction and Lifeline Performance During Post Earthquake, *Report NCEER-92-0001*, volumen **1**, Japanese Case Studies, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo.
- Hao, H. (1998). "A Parametric Study of the Required Seating Length for Bridge Decks During Earthquake", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **27**, 91-103.
- Hristovski, V. y Ristic, D. (1996). "New Integrated Concept Diagnosis of the State of RC Bridges under Service and Earthquake Loads Based on Progressive Failure Prediction", *Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*, 11 WCEE, México, **918**.
- Hwang, H.H.M. y Lee, C.S. (1991). Probabilistic Evaluation of Liquefaction Potential, *Report NCEER-91-0025*, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo.

- Imbsen, R.A., Lea, J., Kaliakim, V.N., Perano, K. J., Gates, J.H., Perano, S.L. (1988). SEISAB-I User Manual, versión 1.3.3., *Engineering Computer Corporation*.
- Iverson, J.K. y Hawkins, N.M. (1994). "Performance of Precast/Prestressed Concrete Building Structures During Northridge Earthquake", Special Report, *PCI Journal*, 38-55.
- Kiremidjian, A.A. y Basöz, N. (1997). "Evaluation of bridge damage data from recent earthquakes". *Bulletin NCEER*, **11(2)**, 1-7.
- Kiureghian, A.D. y Neuenhofer, A. (1992). "Response Spectrum Method for Multi-Support Seismic Excitations", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **21**, 713-740.
- Leonhardt, F. (1987). *Bases para la construcción de puentes monolíticos*, Tomo VI, Estructuras de Hormigón Armado, El Ateneo, Buenos Aires.
- Leonhardt, F. (1986). *Ponts (L'esthétique des ponts)/ Puentes (Estética y Diseño)*, Presses Polytechniques Romandes, Lausanne, Suisse, 308 pg.
- Maldonado, E., Casas, J.R. y Canas, J.A. (1998) (a). "Comportamiento sísmico de puentes regulares". *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, **3(1)**, 1-18.
- Maldonado, E., Casas, J. R., Canas, J. A. y Pujades, L.G. (1998) (b). *Respuesta de puentes frente a acciones sísmicas*, Monografía CIMNE IS-27, Barcelona, 107 pg.
- Maldonado, E., Casas, J.R. y Canas, J.A. (1998) (c). *Estudio de parámetros en la vulnerabilidad sísmica de puentes*, Monografía CIMNE IS-28, Barcelona, 97 pg.
- Maldonado, E. (2000). *Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica en puentes*, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, España, Barcelona.
- Mander, J.B., Mahmmodzadegan, B., Bhadra, S. y Chen, S.S. (1996). Seismic Evaluation of a 30 Year Old Non-Ductile Highway Bridge Pier and Its Retrofit, *Report NCEER-96-0008*, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo.
- Mander, J.B. y Chen, S.S. (1992). "Seismic Performance of Highway Bridges in the Eastern United States", *Bulletin NCEER*, National Center for

- Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, volumen **6(2)**.
- McCallen, D.B., Romstad, M. (1994). "Dynamic Analyses of a Skewed Short-span, Box-girder Overpass", *Earthquake Spectra*, Earthquake Engineering Research Center University of California, **10**.
- Miller, M.D. (1995), "Durability survey of segmental concrete bridges", *PCI Journal*, mayo, 110-123.
- Mireles, V.R. y Reinoso, E. (1997). "Diseño Sísmico de Puentes", Memoria del XI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Veracruz, México, 1007-1016.
- National Oceanic and Atmospheric Administration Washington (1973). *San Fernando, California Earthquake of February 9, 1971*, volumen **II**.
- Park, Y.J. y Ang, A. (1985). "Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, **111 (4)**, 722-739.
- Park, Y.J., Ang, A. y Wen, Y.K. (1985). "Seismic Damage Analysis of Reinforced Concrete Building", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, **111 (4)**, 740-757.
- Penzien, J., Imbsen, R.A. y Liu, W.D. (1981). Nonlinear Earthquake Analysis of Bridges Systems, User Instructions, *Earthquake Engineering Research Center*, University of California, Berkeley.
- Pezeshk, S., Chang, M., Yiak, K.C. y Kung, H.T. (1993). "Seismic Vulnerability Evaluation of Bridges in Memphis Shelby County, Tennessee", *Earthquake Spectra*, **9(4)**, 803-816.
- Priestley, M.J., Seible, F. y Calvi, G.M. (1996). *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, John Wiley & Sons, Inc, 686 pg.
- Priestley, M.J., Seible, F. y Uang, C.M. (1994). "The Northridge Earthquake of January 17, 1994, Damage Analysis of Selected Freeway Bridges", *Report No. SSRP-94/06*, University of California, San Diego, Structural Systems Research Project.
- Ren, S. y Gaus, M.P. (1996). "GIS Tool for Regional Bridge Seismic Risk Assessment", *Reporte técnico del Departamento de Ingeniería Civil GIS-2*, Departamento de Ingeniería Civil, State University of New York at Buffalo, Buffalo, 2-22.

- Shinosuka, M. (editor) (1995). "The Hanshin-Awaji Earthquake of January 17, 1995 Performance of Lifelines", *Technical Report NCEER-95-0015*, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo
- Steward, A., Huang, M., y Darragh, R. (1994). "Some implications of strong-motion record from the 1994 Northridge earthquake. Proceedings of Seminar on Seismological and Engineering Implications of Recent Strong-Motion Data, California Division of Mines and Geology, 1-20.
- Tee, A.B. , Bowman, M.D. y Sinha, K.C. (1988). "A fuzzy mathematical approach for bridge condition evaluation", *Civil Engineering System*, **5**, 17-24.
- Thiel, C.C. (editor) (1990). Competing Against Time, *The Governor 's Board of Inquiry on the 1989 Loma Prieta Earthquake*, California.
- Trifunac, M.D. y Brady, A.G. (1975). "On the Correlation of Seismic Intensity with Peaks of Recorded Strong Ground Motion", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **65** (1).
- USGS (1994). *US Geological Survey*, Open-File Report 94-197, Menlo Park, California.
- Wakefield, R.R., Nazmy, A. S. Y Billington, D.P. (1992). "Analysis of Seismic Failure in Skew RC Bridge", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, **117**(3), 972-986.
- Wilson, E.L. y Habibullah, A. (1994). SAP90, A Series of Computer Programs for the Finite Element Analysis of Structures, Bridge Analysis Users Manual, *Computers & Structures INC*.
- Wilson, E.L. (1986). CAL-86 Computer Assisted Learning Structural Analysis and the CAL/SAP Development System, *Universidad de California*, Berkeley.
- Woodward-Clyde Federal Services (WCKS) (1995). *Contoured Ground Motion Parameter for the 1994 Northridge Event*, ASCII files.
- XiZhu, X., Chen, X. y Rong, Z. (1996). "Seismic Behavior of Diaphragms in RC Bridges", *Eleven World Conference on Earthquake Engineering*, 11 WCEE, México, **118**.
- Yao, J.T.P. (1982). " Probabilistic Methods for the Evaluation of Seismic Damage of Existing Structures", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **1**, 130-135.

- Yao, J.T.P. (1980). "Damage Assessment of Existing Structures", *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, **106(EM4)**, 785-799.
- Youd, T.L. (1998). "Screening Guide for Liquefaction Hazard at Highway Bridge Sites", *Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research State University of New York at Buffalo*, MCEER, **11(2)**, 1-3.
- Youd, T.L. y Idriss, I.M. (1997) (editor). Proceeding of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, *Report NCEER-97-0022*, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo.



## Anexo 1

# Funciones de Pertenencia del Modelo Propuesto

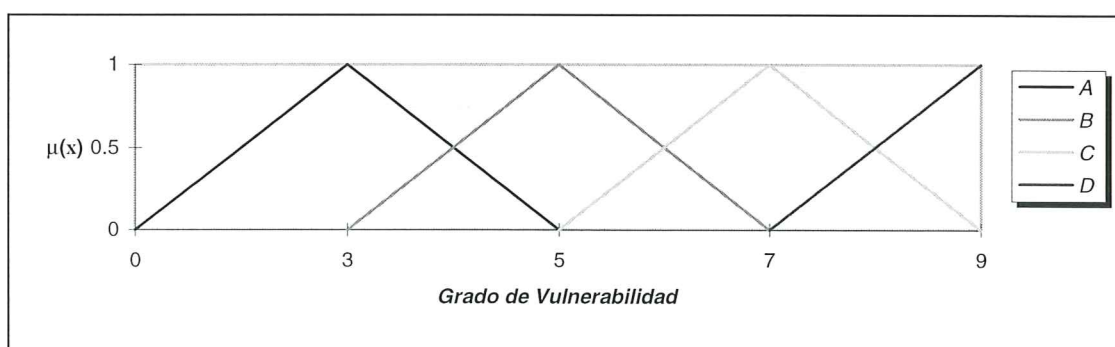
En este anexo se presentan las funciones de pertenencia de los 19 parámetros que definen el modelo. Estas funciones corresponden tanto a los condiciones de calidad de cada uno de ellos como a sus valores de importancia.

Las funciones de pertenencia presentadas en este anexo, corresponden a las funciones construidas a partir de opiniones de expertos, corregidas según el procedimiento expuesto en el Capítulo 6. Las funciones originales no se presentan.

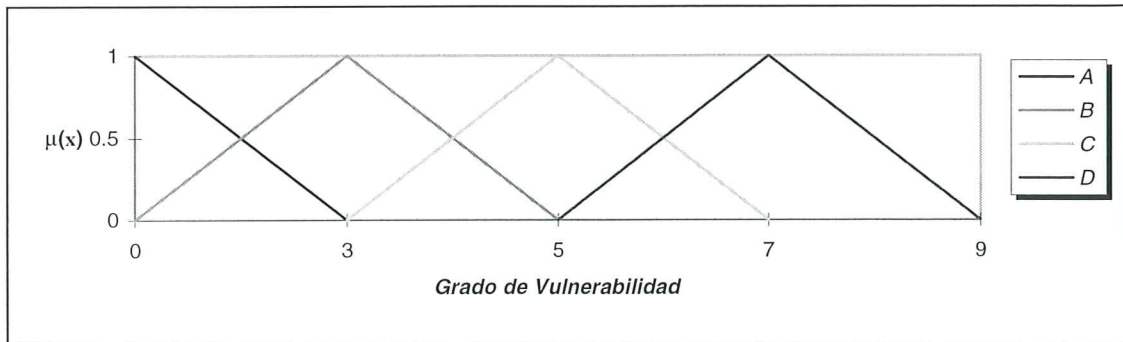
Las descripciones detalladas de las condiciones de calidad impuestas a cada uno de los parámetros (*A*, *B*, *C* y *D*) se presentan en el Capítulo 4.

### A1.1 Grados de vulnerabilidad de las categorías de los parámetros

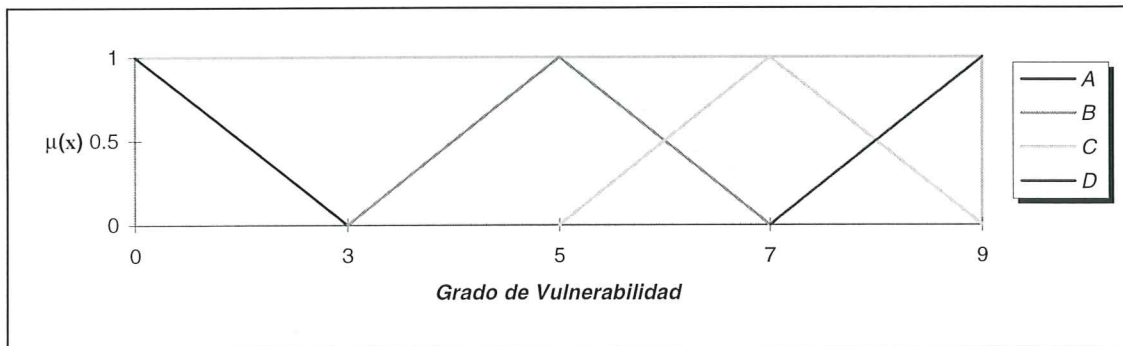
Año de proyecto y construcción del puente ( $K_I$ ).



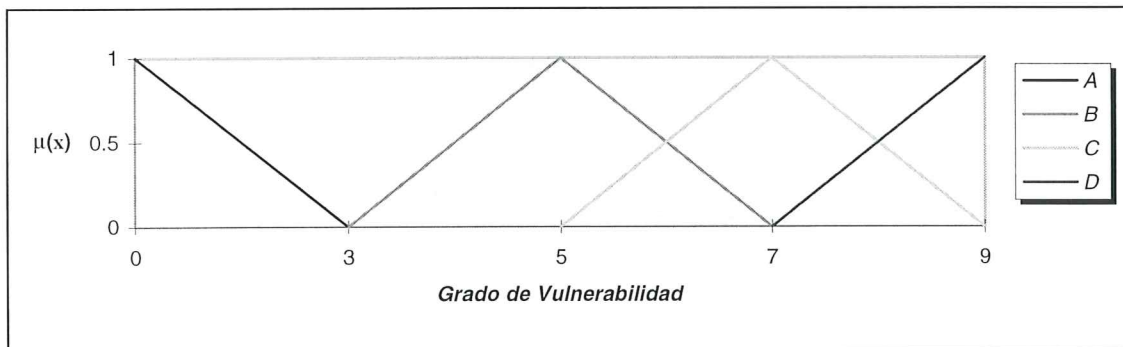
**Tipo de superestructura ( $K_2$ ).**



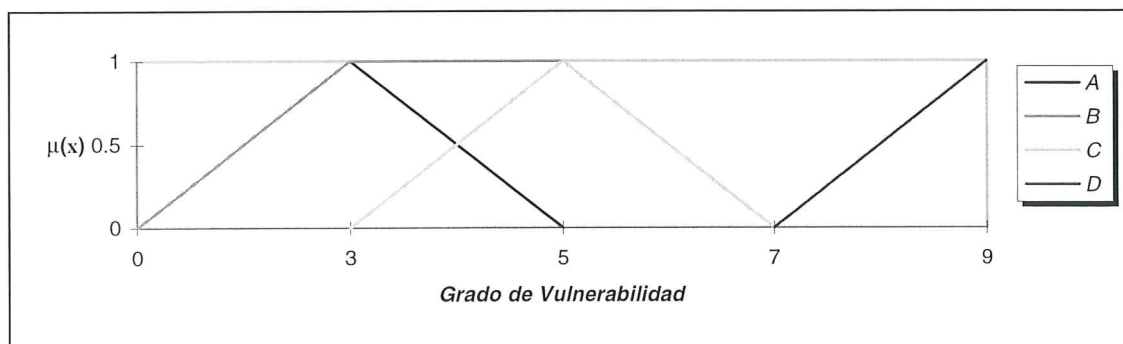
**Forma de la superestructura ( $K_3$ ).**

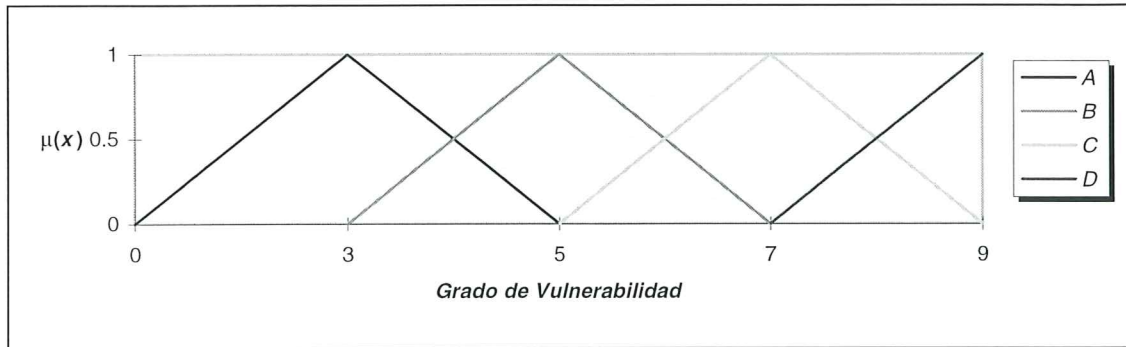
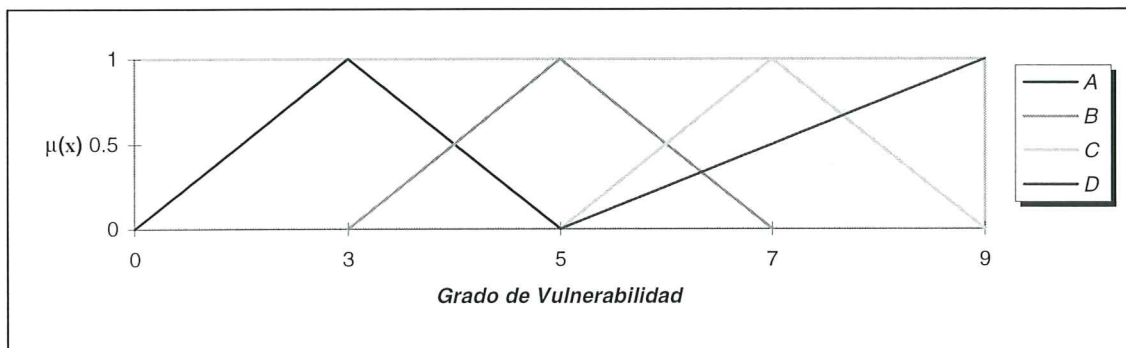
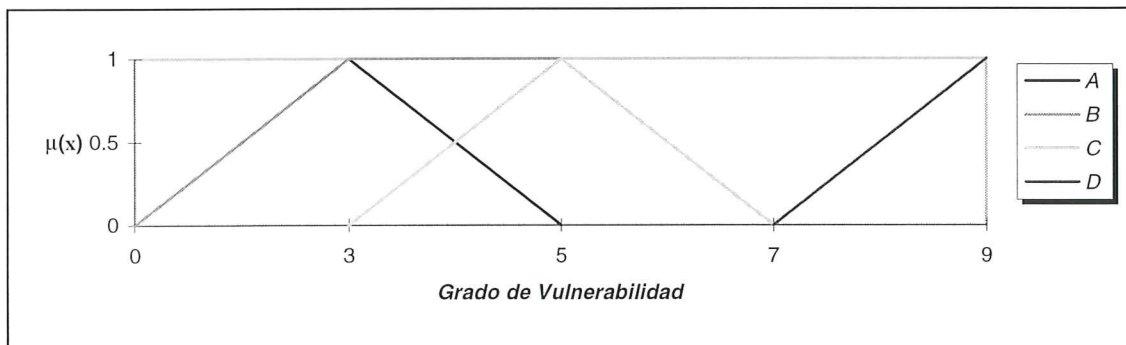
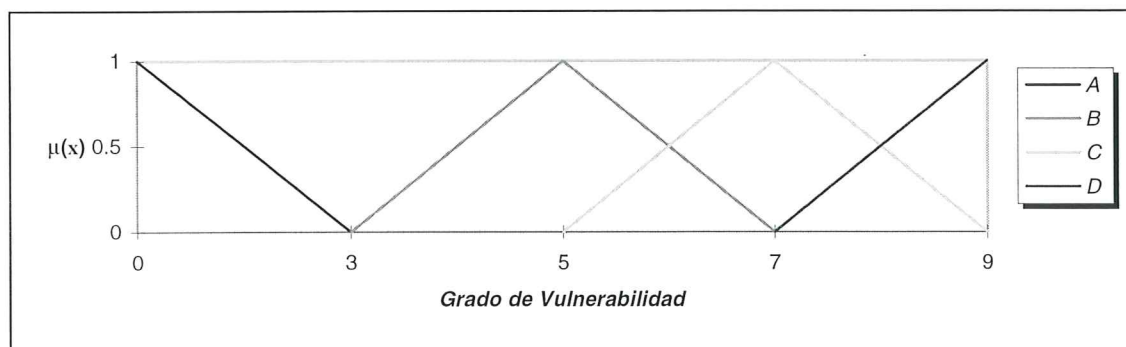


**Existencia de articulaciones internas ( $K_4$ ).**

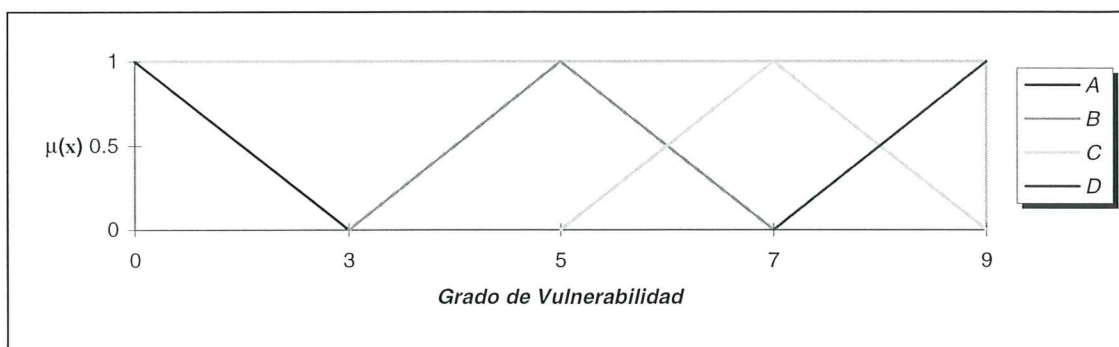


**Material de la superestructura ( $K_5$ ).**

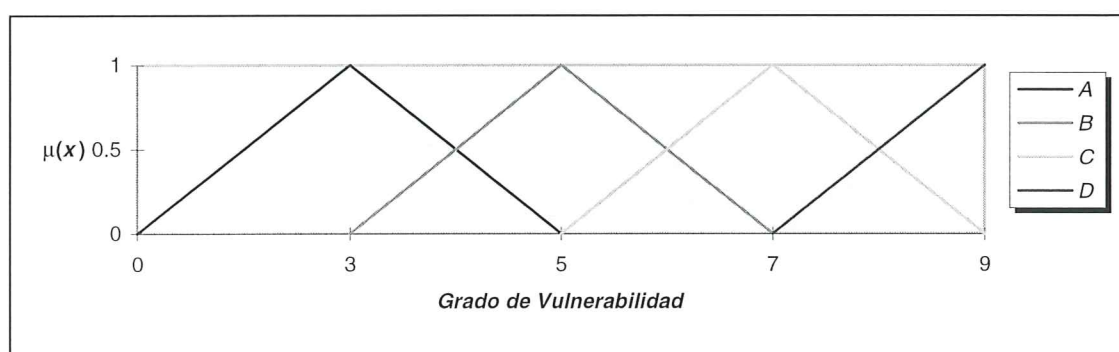


**Tipo de pila ( $K_6$ ).****Tipo de cimentación ( $K_7$ ).****Material de las pilas ( $K_8$ ).****Irregularidad longitudinal en geometría o rigidez ( $K_9$ ).**

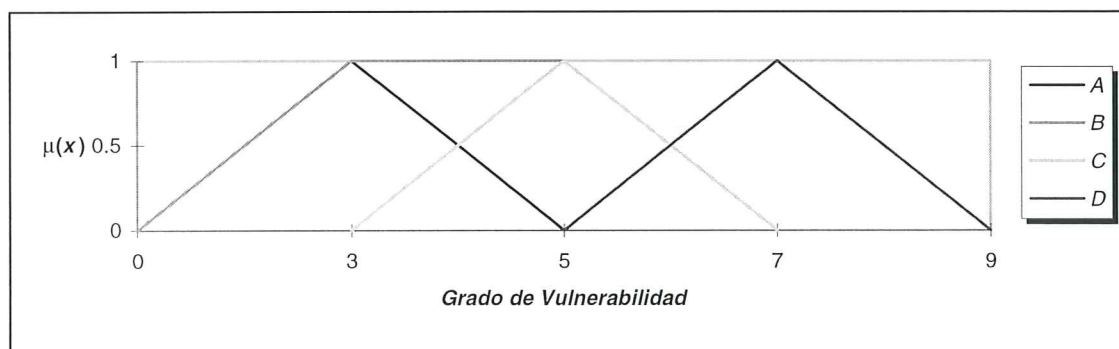
### Longitud de apoyo en pilas ( $K_{I0}$ ).



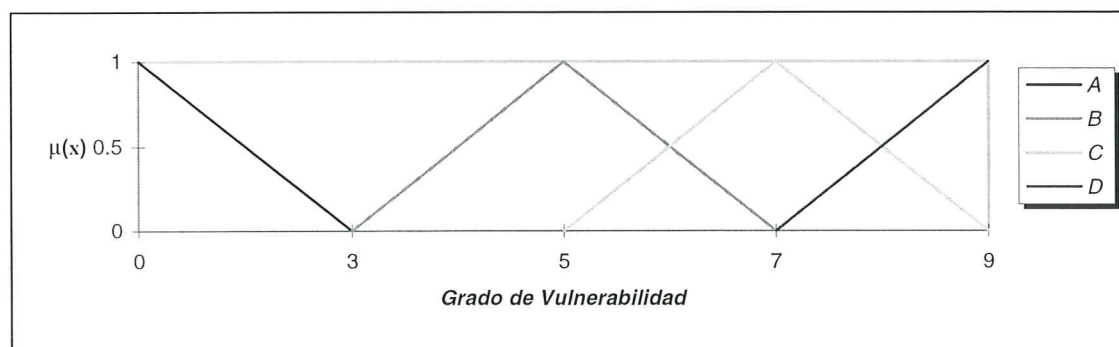
### Tipo de suelo ( $K_{I1}$ ).

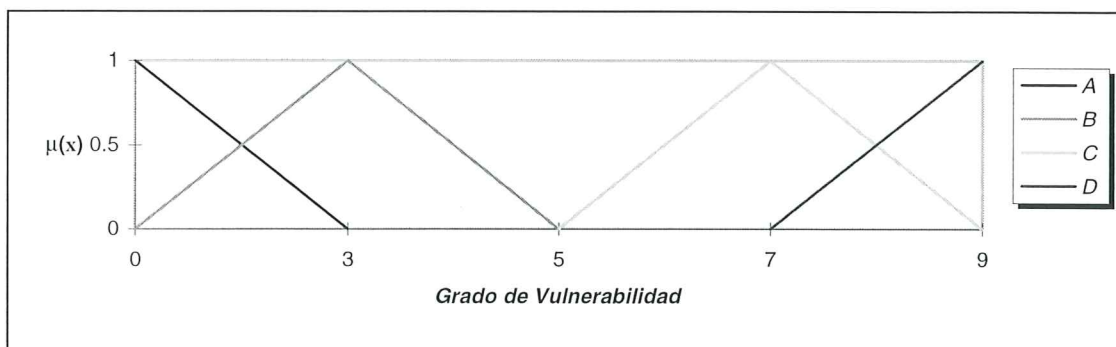
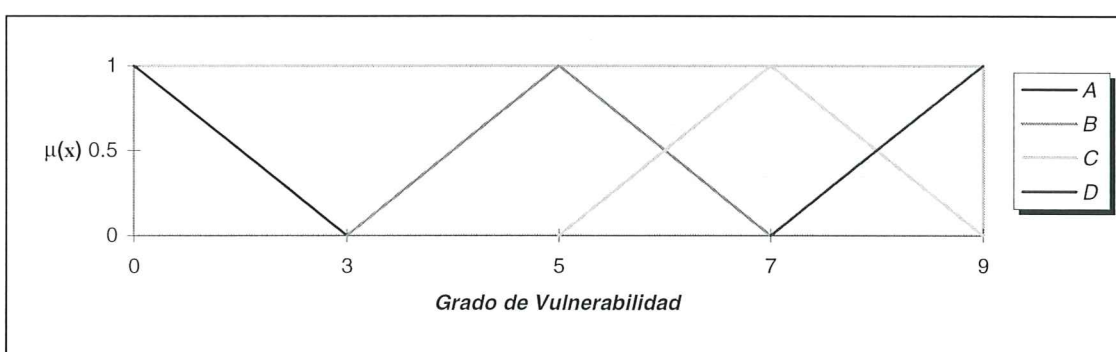
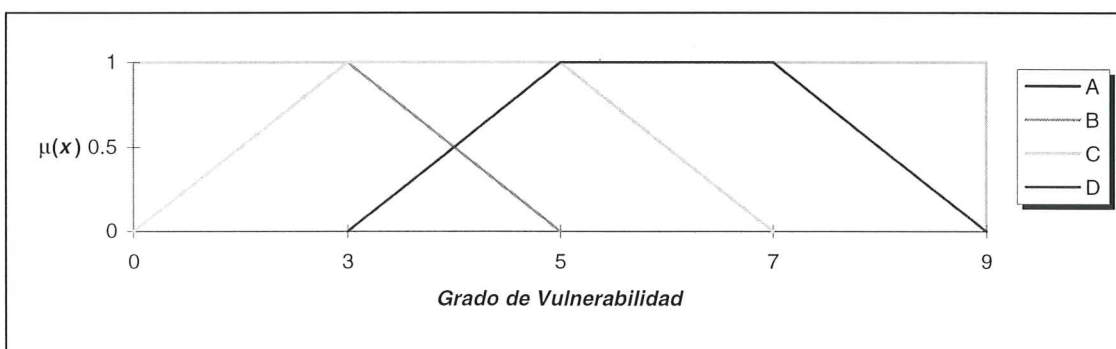
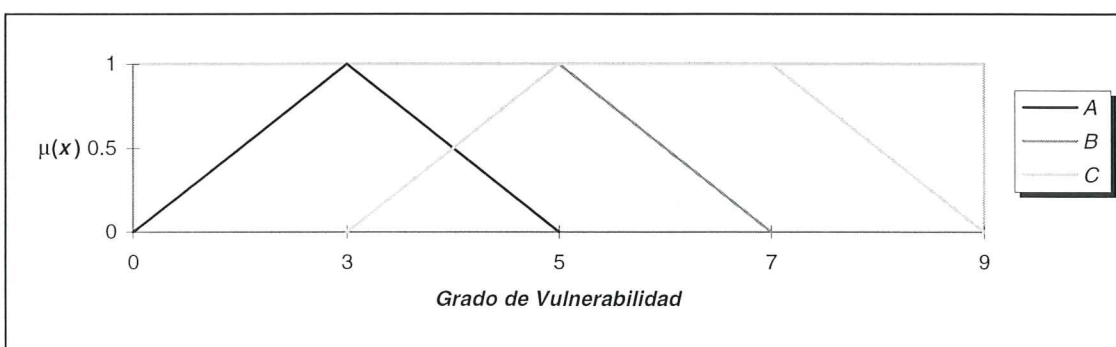


### Tipo de estribo ( $K_{I2}$ ).

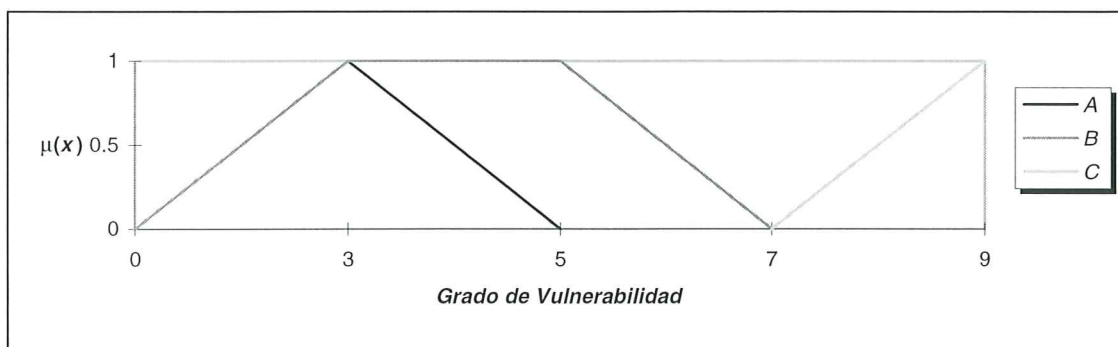


### Longitud de apoyo en estribos ( $K_{I3}$ ).

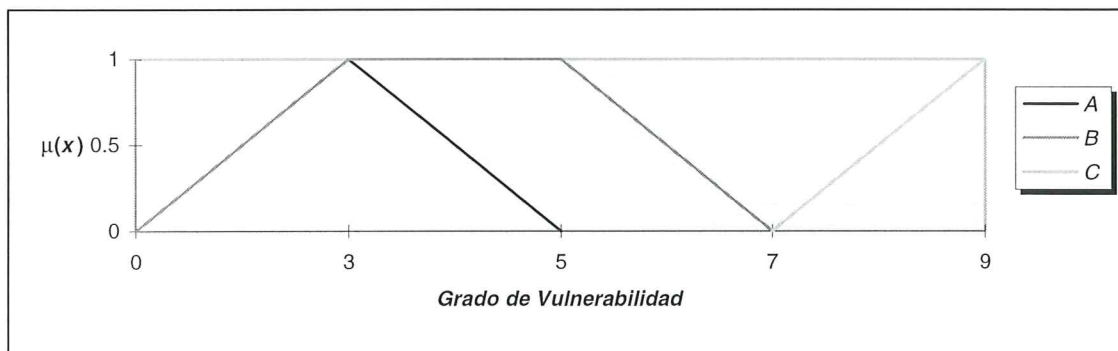


**Tipo de aparato de apoyo ( $K_{14}$ ).****Estado de conservación del puente ( $K_{15}$ ).****Procedimiento constructivo de la superestructura (hormigón) ( $K_{16}$ ).****Procedimiento constructivo de las pilas (hormigón) ( $K_{17}$ ).**

### Potencial de licuefacción ( $K_{18}$ ).

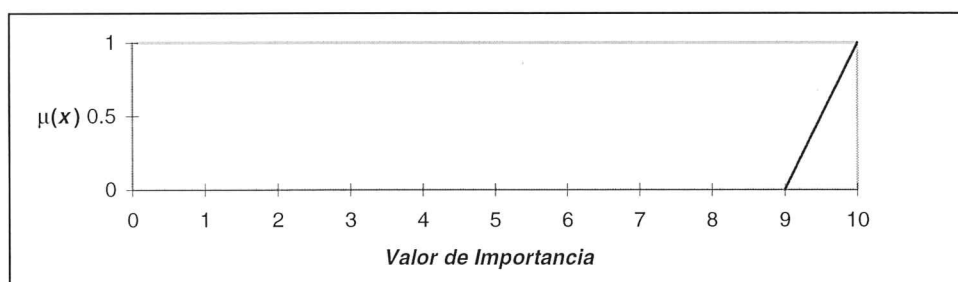


### Elementos no estructurales ( $K_{19}$ ).

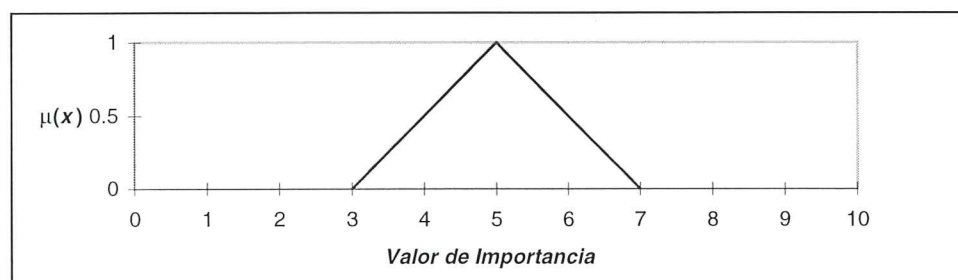


## A1.2 Valores de importancia de los parámetros

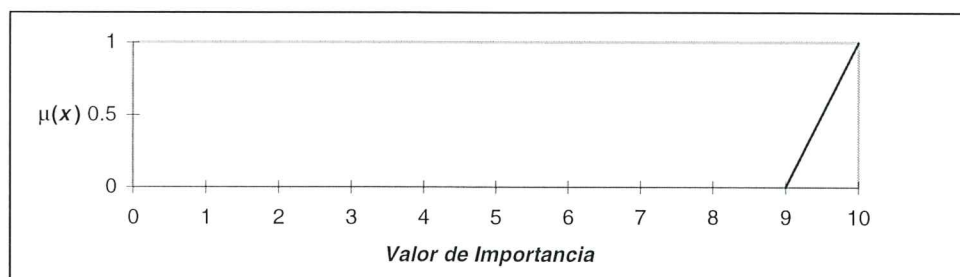
### Año de proyecto y construcción del puente ( $K_I$ ).



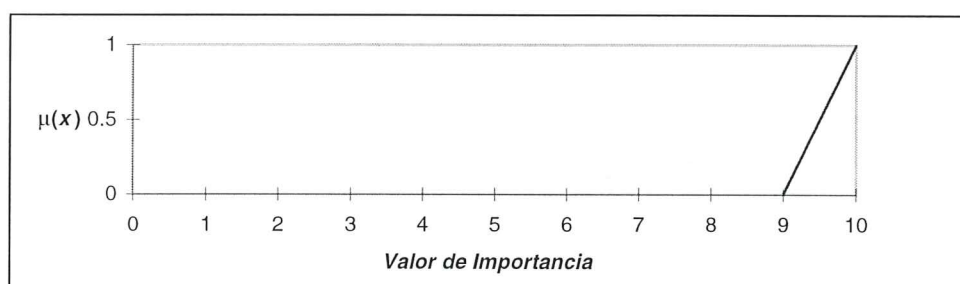
### Tipo de superestructura ( $K_2$ ).



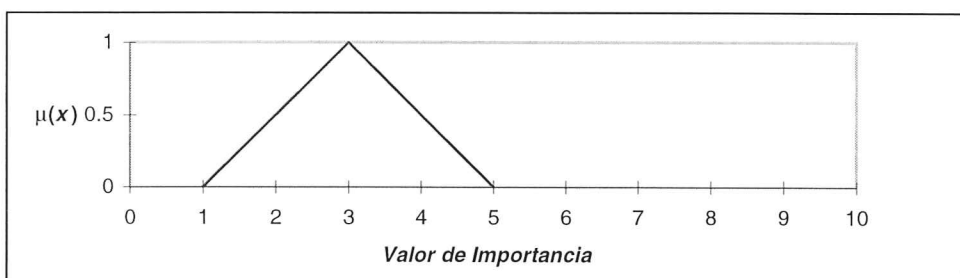
Forma de la superestructura ( $K_3$ ).



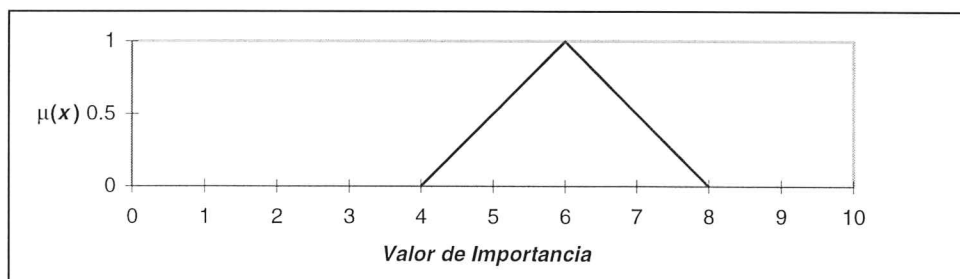
Existencia de articulaciones internas ( $K_4$ ).



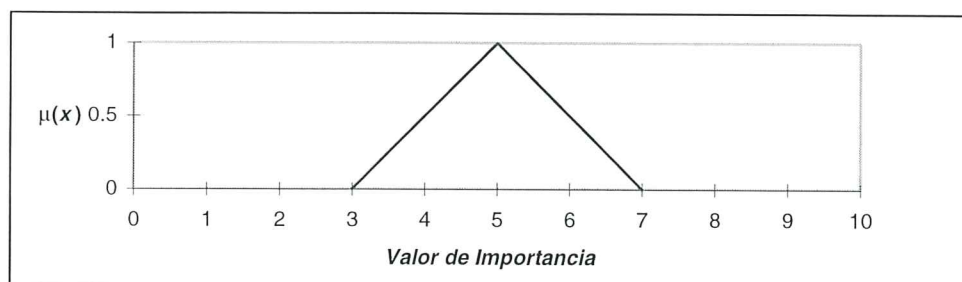
Material de la superestructura ( $K_5$ ).



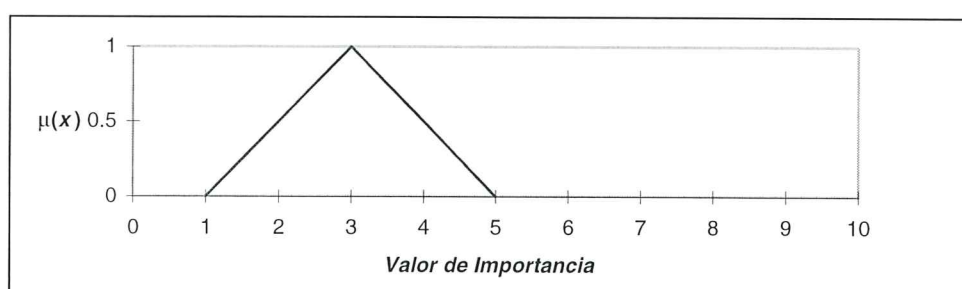
Tipo de pila ( $K_6$ ).



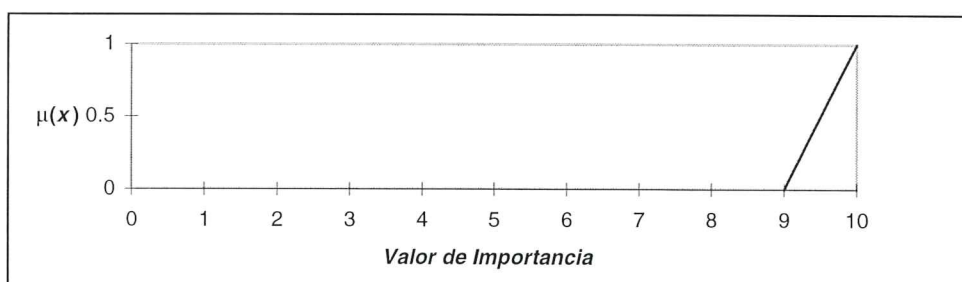
**Tipo de cimentación ( $K_7$ ).**



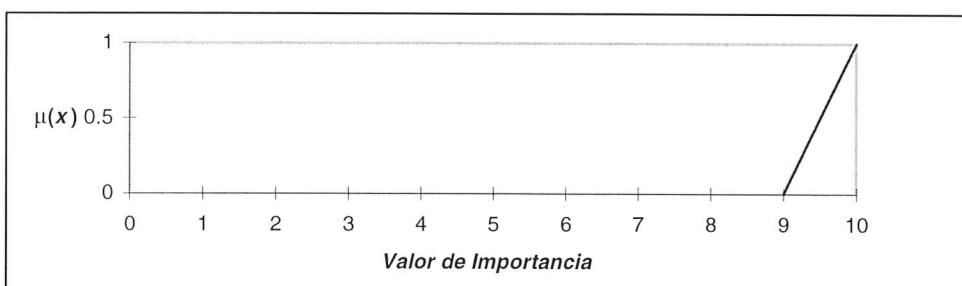
**Material de las pilas ( $K_8$ ).**



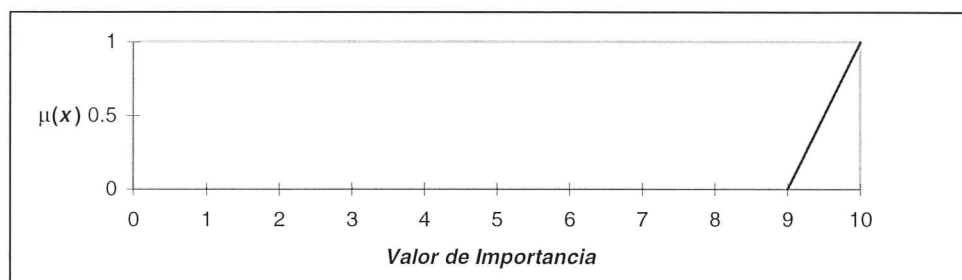
**Irregularidad longitudinal en geometría o rigidez ( $K_9$ ).**



**Longitud de apoyo en pilas ( $K_{10}$ ).**



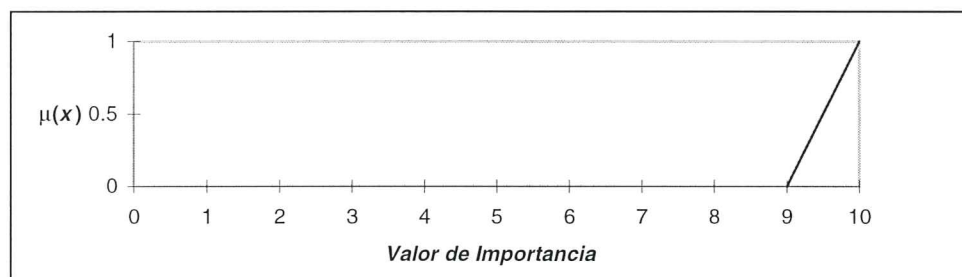
**Tipo de suelo ( $K_{I1}$ ).**



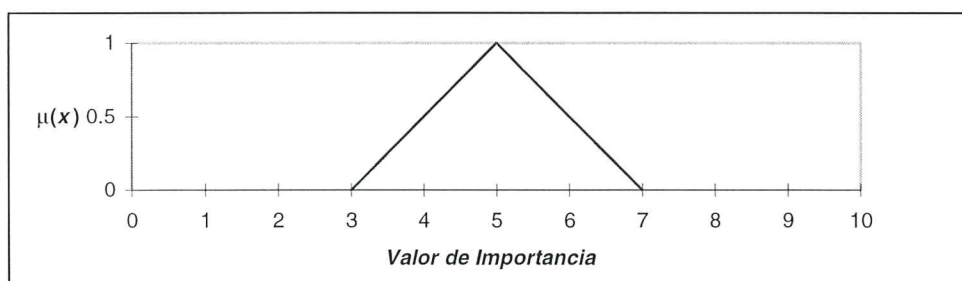
**Tipo de estribo ( $K_{I2}$ ).**



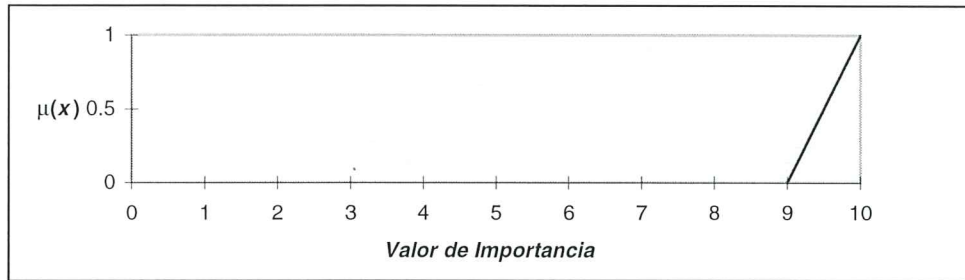
**Longitud de apoyo en estribos ( $K_{I3}$ ).**



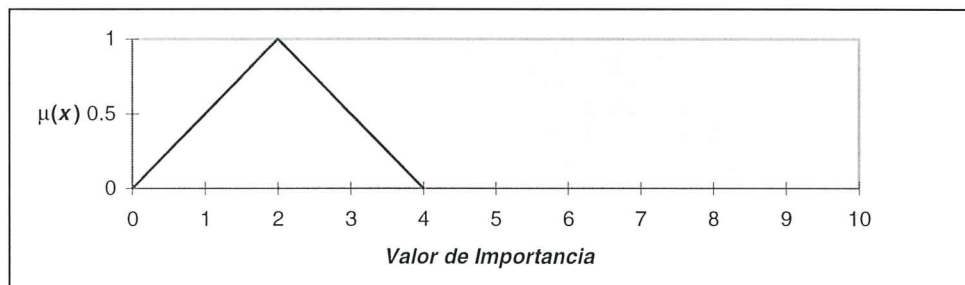
**Tipo de aparato de apoyo ( $K_{I4}$ ).**



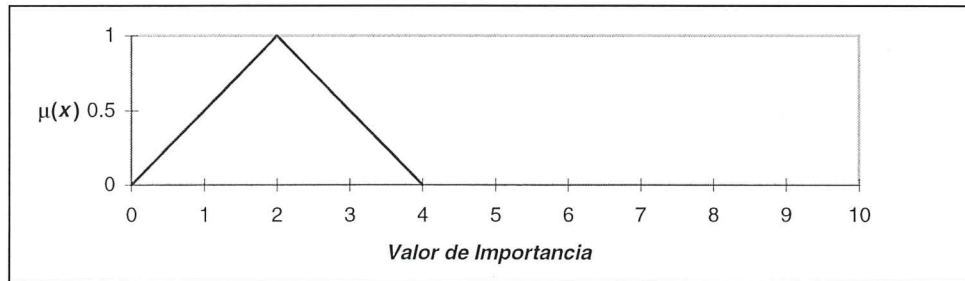
**Estado de conservación del puente ( $K_{15}$ ).**



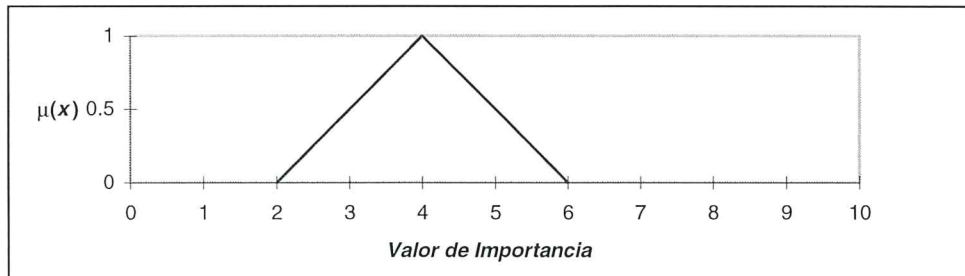
**Procedimiento constructivo de la superestructura (hormigón) ( $K_{16}$ ).**

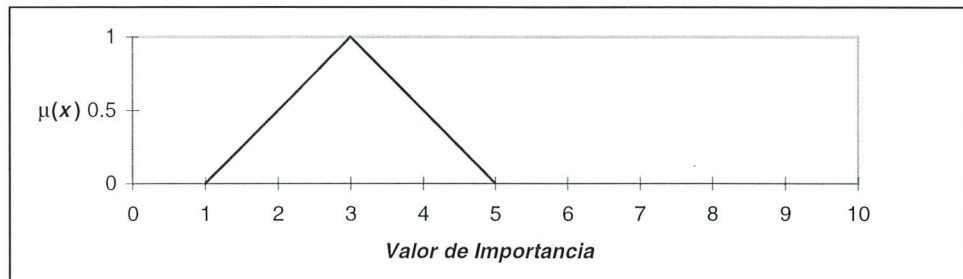


**Procedimiento constructivo de las pilas (hormigón) ( $K_{17}$ ).**



**Potencial de licuefacción ( $K_{18}$ ).**



**Elementos no estructurales ( $K_{I9}$ ).**



## CENTRO INTERNACIONAL DE METODOS NUMERICOS EN INGENIERIA

### Lista de monografías publicadas en la Serie de Ingeniería Sísmica

Las monografías pueden adquirirse dirigiéndose al Departamento de Publicaciones del Centro Internacional de Métodos Numericos en Ingeniería, Edificio C1, Campus Norte UPC, c/ Gran Capitán s/n, 08034 Barcelona, teléfono: 93-401.60.37, Fax: 93-401-65-17.

- IS-1      *Qualitative Reasoning for Earthquake Resistant Buildings*, Luís M. Bozzo, 149 pp., ISBN 84-87867-36-7, 1993.
- IS-2      *Control predictivo en sistemas de protección sísmica de estructuras*, R. Andrade Cascante, J. Rodellar, F. López Almasa, 143 pp., ISBN 84-87867-37-5, 1993.
- IS-3      *Simulación numérica del comportamiento no lineal de presas de hormigón ante acciones sísmicas*, M. Galindo, J. Oliver, M. Cervera, 255 pp., ISBN 84-87867-38-3, 1994.
- IS-4      *Simulación del daño sísmico en edificios de hormigón armado*, A. Hanganu, A.H. Barbat, S. Oller, E. Oñate, 96 pp., ISBN 84-87867-40-5, 1994.
- IS-5      *Edificios con aislamiento de base no lineal*, N. Molinares, A.H. Barbat, 96 pp., ISBN: 84-87867-41-3, 1994.
- IS-6      *Vulnerabilidad sísmica de edificios*, C. Caicedo, A.H. Barbat, J.A. Canas, R. Aguiar 100 pp., ISBN 84-87867-43-X, 1994.
- IS-7      *Análisis de terremotos históricos por sus efectos*, J. R. Arango Gonzalez, 119 pp., ISBN 84-87867-44-8, 1994.
- IS-8      *Control activo no lineal de edificios con aislamiento de base*, A.H. Barbat, N. Molinares, J. Rodellar, 124 pp., ISBN 84-87867-46-4, 1994.
- IS-9      *Análise estocástica da resposta sísmica nao-linear de estruturas*, A.M. F. Cunha, 199 pp., ISBN: 84-87867-47-2, 1994
- IS-10     *Definición de la acción sísmica*, A.H. Barbat, L. Orosco, J.E. Hurtado, M. Galindo, 122 pp., ISBN: 84-87867-448-0, 1994
- IS-11     *Sismología y peligrosidad sísmica*, J.A. Canas Torres, C. Pujades Beneit, E. Banda Tarradellas, 87 pp., ISBN: 84-87867-49-9, 1994
- IS-12     *Riesgo, peligrosidad y vulnerabilidad sísmica de edificios de mampostería*, F. Yépez, A.H. Barbat, J.A. Canas, 104 pp., ISBN: 84-87867-50-2, 1995
- IS-13     *Estudios de ingeniería sismológica y sísmica*, J.A. Canas, ISBN: 84-87867-57-X, 13 pp., 1995
- IS-14     *Simulación de escenarios de daño para estudios de riesgo sísmico*, F. Yépez, A.H. Barbat y J.A. Canas, ISBN: 84-87867-58-8, 103 pp., 1995

- IS-15 *Diseño sismorresistente de edificios de hormigón armado*, L. Bozzo, A.H. Barbat, ISBN: 84-87867-59-6, 185 pp., 1995
- IS-16 *Modelo tridimensional de atenuación anelástica de las ondas sísmicas en la Península Ibérica*, J.O. Caselles, J. A. Canas, Ll. G. Pujades, R.B. Herrmann, ISBN: 84-87867-60-X, 119 pp., 1995
- IS-17 *Índices de daño sísmico en edificios de hormigón armado*, R. Aguiar ISBN: 84-87867-43-X, 99 pp., 1996
- IS-18 *Experimental study of a reduced scale model seismically base isolated with Rubber-Layer Roller Bearings (RLRB)*, D. Foti, J.M. Kelly ISBN: 84-87867-82-0, 112 pp., 1996
- IS-19 *Modelos de evaluación del comportamiento sísmico no lineal de estructuras de hormigón armado*, F. Yépez Moya ISBN: 84-87867-80-4., 96pp., 1996
- IS-20 *Evaluación probabilista de la vulnerabilidad y riesgo sísmico de estructuras de hormigón armado por medio de simulación*, F. Yépez Moya, A.H. Barbat, J.A. Canas, ISBN: 84-87867-81-2, 1996
- IS-21 *Modelización de la peligrosidad sísmica. Aplicación a Cataluña*, J.A. Canas, J.J. Egozcue, J. Miquel Canet y A.H. Barbat, ISBN: 84-87867-83-9, 101pp., 1996
- IS-22 *Evaluación del daño sísmico global en edificios porticados de hormigón armado*, R. Aguiar, A.H. Barbat and J. Canas, ISBN: 84-87867-96-0, 173pp., 1997
- IS-23 *Daño sísmico global en edificios con muros de cortante*, R. Aguiar, ISBN: 84-89925-00-3, 101 pp., 1997
- IS-24 *Conceptos de cálculo de estructuras en las normativas de diseño sismorresistente*, A.H. Barbat y S. Oller, ISBN: 84-89925-10-0, 107pp., 1997
- IS-25 *Stochastic dynamics of hysteretic structures*, J.E. Hurtado, ISBN: 84-89925-09-7, 205pp., 1998
- IS-26 *Análisis de los acelerogramas de la serie de Adra (Almería). Diciembre 1993 a Enero 1994*, R. Blázquez, A. Suárez, E. Carreño y A.J. Martín, ISBN: 84-89925-11-9, 91pp., 1998
- IS-27 *Respuesta de puentes frente a acciones sísmicas*, E. Maldonado, J.A. Canas, J.R. Casas, L.G. Pujades, ISBN: 84-89925-23-2, 107pp., 1998
- IS-28 *Estudio de parámetros en la vulnerabilidad sísmica de puentes*, E. Maldonado, J.A. Canas y J.R. Casas, ISBN: 84-89925-16-X, 97pp., 1998
- IS-29 *Metodologias para o cálculo sísmico não-linear de barragens de betão*, R. Faria ISBN: 84-89925-25-9, 113pp., 1998
- IS-30 *Acciones para el diseño sísmico de estructuras*, R. Aguiar, ISBN: 84-89925-27-5, 122pp., 1998
- IS-31 *Avaliação do comportamento sísmico de barragens de betão*, R. Faria, ISBN: 84-89925-28-3, 88pp., 1998
- IS-32 *Vulnerabilidad sísmica de hospitales. Fundamentos para ingenieros y arquitectos*, O.D. Cardona, ISBN:84-89925-33-X, 165pp., 1999

- IS-33      *Modelación estocástica de la acción sísmica*, J. E. Hurtado, ISBN:84-8925-34-8, 93pp., 1999
- IS-34      *Earthquake simulator testing of a steel model seismically protected with friction energy dissipators*, D. Foti and J. Canas, ISBN: 84-89925-40-2, 110pp., 1999
- IS-35      *Plasticidad y fractura en estructuras aporticadas*, J. Flórez López, ISBN: 84-89925-46-1, 90pp., 1999
- IS-36      *Estimación de efectos locales con movimientos sísmicos y microtemblores*, V. Giraldo, A. Alfaro, L. G. Pujades, J. A. Canas, ISBN: 84-89925-54-2, 83pp., 1999
- IS-37      *Modelo numérico de elastómeros multi-fase y su aplicación al análisis de estructuras con aislamiento sísmico*, O. Salomón, S. Oller y A. H. Barbat, ISBN: 84-89925-54-2, 239pp.,1999
- IS-38      *Dinámica de estructuras. Aplicaciones a la Ingeniería Sísmica*, J.E. Hurtado, ISBN:84-89925-59-3,177pp., 2000
- IS-39      *Utilización de los conjuntos difusos en modelos de vulnerabilidad sísmica*, E. Maldonado Rondón, J.R. Casas Rius y J.A. Canas, ISBN:84-89925-61-5, 89pp, 2000

Los autores interesados en publicar monografías en esta serie deben contactar con el editor para concretar las normas de preparación del texto.