

Utilización de los conjuntos difusos en modelos de vulnerabilidad sísmica

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

Monografías de Ingeniería Sísmica

Edited by A.H. Barbat

Utilización de los conjuntos difusos en modelos de vulnerabilidad sísmica

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

UTILIZACIÓN DE LOS CONJUNTOS DIFUSOS
EN MODELOS DE VULNERABILIDAD SÍSMICA
Monografía CIMNE IS-39
© Los Autores

ISBN: 84-89925-61-5
Depósito Legal: B-18209-2000

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 TAP 1999-1079-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 presentan las bases teóricas de los conjuntos difusos necesarias para desarrollar un modelo de vulnerabilidad sísmica basado en opinión de expertos. Para ello, en una primera parte, se estudian los conceptos fundamentales como la definición de conjunto difuso, el concepto de función de pertenencia, el concepto de variable lingüística y las operaciones aritméticas. En la segunda parte, se presentan ejemplos de modelos de vulnerabilidad sísmica desarrollados en base a opinión de expertos, siendo el primero de ellos un claro ejemplo de la utilización de la teoría difusa para el tratamiento de las opiniones.

SUMMARY

In this work, we present the theoretical bases of the necessary fuzzy sets to develop a model of seismic vulnerability based on experts' opinion. For this, in a first part, we have studied the fundamental concepts of the diffuse groups as the definition of fuzzy set, the concept of membership function, the concept of linguistic variable and the arithmetic operations among fuzzy numbers. In the second part, models' of seismic vulnerability examples are presented developed based on experts' opinion, the first of these examples is a clear example of the use of the fuzzy theory in the treatment of the opinions of experts.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN

PRIMERA PARTE

CONCEPTOS BÁSICOS DE LOS CONJUNTOS DIFUSOS

1. Generalidades de la teoría difusa.....	1
2. Razón de su utilización en la Ingeniería Civil.....	3
3. Aplicación en Ingeniería Civil.....	7
4. Conjuntos difusos.....	11
4.1 Definición	11
4.2 Representación.....	13
4.3 Ejemplo de conjunto difuso.....	16
4.4 Conjunto difuso convexo	17
4.5 Conjunto difuso normal.....	17
4.6 α -nivel de nitidez.....	18
5. Funciones de pertenencia	21
5.1 Definición.....	21
5.2 Tipos de funciones de pertenencia.....	22
5.2.1 Función tipo trapezoidal.....	22
5.2.2 Función tipo triangular	23
5.2.3 Función tipo singleton	23
5.2.4 Función tipo S.....	23
5.2.5 Función tipo exponencial	24
5.2.6 Función tipo Π	24
5.3 Construcción de las funciones de pertenencia.....	25
5.4 Ejemplos de la construcción de las funciones de pertenencia	26
6. Variables lingüísticas.....	29
6.1 Concepto de variable lingüística	29
6.2 Determinación de la variable lingüística	30
7. Números difusos e intervalos difusos	31
7.1 Definición	31
7.2 Ejemplos	33
7.3 Construcción de un número difuso.....	34
8. Operaciones aritméticas con números e intervalos difusos	37
8.1 Definición	37
8.2 Ejemplos	38
9. Peso promedio difuso.....	41
10. Distancia entre conjuntos	43
11. El problema de la desfusificación	45
11.1 Procedimiento máximo	45
11.2 Centro de gravedad	46
11.3 Otros métodos	46
12. Resumen.....	49
Referencias	53

SEGUNDA PARTE

EJEMPLOS DE UTILIZACIÓN DE LA OPINIÓN DE EXPERTOS EN MODELOS DE VULNERABILIDAD SÍSMICA DE PUENTES

1. Modelo de evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes basado en “ <i>Conjuntos Difusos</i> ”	57
1.1 Determinación de los parámetros del modelo	57
1.1.1 <i>Parámetros seleccionados</i>	59
1.1.2 <i>Determinación del grado de vulnerabilidad de las condiciones de calidad de cada parámetro</i>	60
1.2 Descripción del modelo propuesto	61
1.3 Algoritmo para el cálculo del índice de vulnerabilidad	61
1.4 Variables lingüísticas utilizadas	62
1.5 Construcción de las funciones de pertenencia	62
1.6 Calibración del modelo	64
1.7 Ejemplo de aplicación del modelo	64
1.8 Conclusiones	66
2. Guía de clasificación sísmica de puentes del ATC-6-2.....	67
2.1 Clasificación preliminar de puentes	67
2.1.1 <i>Clasificación de la vulnerabilidad</i>	68
2.1.2 <i>Clasificación de la sismicidad</i>	69
2.1.3 <i>Clasificación de la importancia</i>	70
2.2 Evaluación detallada.....	70
2.2.1 <i>Evaluación cuantitativa de las componentes del puente</i>	70
2.2.2 <i>Cálculo total</i>	71
2.3 Comentarios	71
3. Evaluación de la vulnerabilidad de puentes propuesto por Pezeshk <i>et al.</i>	73
3.1 Parámetros del modelo.....	73
3.2 Desarrollo de la metodología.....	74
3.3 Aplicación a las ciudades de Memphis y Shelby	75
3.4 Comentarios	75
4. Funciones de vulnerabilidad propuestas por el ATC-25	77
4.1 Componentes de las funciones de vulnerabilidad	78
4.2 Metodología para obtener las funciones de vulnerabilidad	79
4.3 Ejemplos de funciones de vulnerabilidad para los puentes grandes de autopistas	80
4.4 Comentarios	81
5. Comentarios entre los diferentes modelos	83
6. Conclusiones generales	85
Referencias.....	87

INTRODUCCIÓN

El concepto de conjunto difuso lo introduce Zadeh en 1965 (Zadeh, 1965), como un intento de vencer la severidad de la teoría clásica de conjuntos y poder reunir proposiciones que, por la naturaleza de lo que representan, contienen incertidumbre, imprecisión, ambigüedad, generalidad, errores, aproximaciones, borrosidad. Visto desde otra perspectiva, los conjuntos difusos son una generalización de la teoría convencional de conjuntos los cuales Zadeh incorporó para representar la vaguedad de la vida diaria (Zadeh, 1996; Kosko, 1995; Bezdek, 1993; Tillas, 1986) y para poder, a través de ellos, realizar cálculos con palabras.

Estos “*conjuntos*” surgen al clasificar objetos de un universo conocido que corresponden a una determinada propiedad, de manera que no sólo la verifican o no la verifican, sino que la pueden verificar parcialmente; propiedad que se le da a los objetos en cuestión en cierto grado (Trillas y Gutiérrez, 1992).

Muchos de los razonamientos en ingeniería se realizan básicamente sobre predicados. Es en base a razonamientos, cómo se califican los niveles de daño sufridos por las estructuras después de ocurrido un sismo, cómo se controla la carga que debe soportar una viga en laboratorio, cómo se decide que estructuras deben ser rehabilitadas o reemplazadas, como se clasifican a las estructuras en bien ó mal construidas, cómo se determina la seguridad estructural, cómo se efectúan los diagnósticos estructurales; cómo se avanza en la investigación, etc. Y, con todo ello, se suele condicionar el futuro a partir de decisiones que se suponen en el presente y que se toman a partir de conclusiones obtenidas con premisas que reflejan un conocimiento que es inexacto, incompleto y no totalmente fiable.

Un aspecto fundamental de los conjuntos difusos es que, a diferencia de los conjuntos clásicos, tienen la capacidad de modelar formas de razonamiento no preciso, los cuales juegan un papel importante en la notable habilidad humana para tomar decisiones correctas en entornos de incertidumbre e imprecisión. Tal capacidad depende, a su vez, de la habilidad humana para inferir respuestas aproximadas a preguntas inexactas.

El objetivo de esta monografía es presentar los aspectos teóricos necesarios para la utilización de los “*conjuntos difusos*” en el desarrollo de una metodología para la “*evaluación de la vulnerabilidad sísmica*” basado en la opinión de expertos. Para ello, se inicia entendiendo el porqué de los conjuntos difusos, para así aceptar con mayor convicción su utilización en el campo de la ingeniería sísmica. A continuación, se expone de qué manera han sido aplicados en la ingeniería civil, se definen sus aspectos teóricos fundamentales, como la definición de la función de pertenencia, las variables lingüísticas, las operaciones aritméticas y otros aspectos más específicos. Finalmente, como segunda parte se presentan algunos modelos, desarrollados en base a opinión de expertos, uno de ellos fue hecho utilizando técnicas de conjuntos difusos.

PRIMERA PARTE

CONCEPTOS BÁSICOS DE LOS CONJUNTOS DIFUSOS

Generalidades de la teoría difusa

La teoría difusa es una teoría matemática, llamada difusa porque recoge un aspecto de incertidumbre. “Difuso” significa “poco preciso” y es la ambigüedad que puede ser encontrada en la definición de un concepto o en el significado de una palabra. Por ejemplo, la incertidumbre en las expresiones como: “puente levemente dañado”, “grieta considerable”, “estructura funcionalmente obsoleta”, “alta seguridad”, “pila resistente” ó “longitud de apoyo buena”, pueden ser llamadas difusas.

Hasta la década de los 60, la probabilidad había sido la única incertidumbre con la cual los ingenieros habían trabajado, la cual se relaciona con la ocurrencia de un fenómeno, simbolizado mediante el concepto de aleatoridad. Por ejemplo, “ocurrirá un sismo fuerte de magnitud 6”, “ensaya 100 probetas y la mitad fallarán”, presentan la incertidumbre de la ocurrencia fenomenológica.

La aleatoridad y la difusibilidad difieren en su naturaleza, ésto es, ellas son diferentes aspectos de la incertidumbre. Por ejemplo, la incertidumbre de “ocurrirá un sismo fuerte de magnitud 6” viene a causa de una predicción y ésto, solamente, será clarificado por el paso del tiempo. La incertidumbre en “ensaya 100 probetas y la mitad fallarán”, es también un hecho probable de que ocurra si realmente ensayamos las 100 probetas. Sin embargo, la incertidumbre encontrada en “puente levemente dañado” o “alta seguridad”, no se clarifica con el paso del tiempo o el ensayo, la ambigüedad está en el significado de las palabras.

La “teoría de la probabilidad”, se dice, se desarrolló en el siglo XVII y a lo largo de la historia se ha venido usando ampliamente. Al contrario, la “teoría difusa” tan sólo en 1965 Lofti Zadeh la da a conocer en su artículo sobre los “Fuzzy set” (Zadeh, 1965), y tienen que pasar 10 años para que se produzca una cierta expansión, ya que hasta 1975 sólo se habían publicado 2 libros sobre este tema. Hoy se estima que existen más de 10000 investigadores dedicados al estudio

y desarrollo de esta teoría, entre los que se destacan además de Zadeh, Bellman, Gottwald, Kandel, Negoita, Nguyen, Sugeno, Zhang y Zimmermann, Kaufman y Gil (Kaufman y Gil, 1986).

Es decir, la “*teoría difusa*” fue desarrollada hace aproximadamente 25 años aún no cuenta con un uso totalmente extendido, pero lo difuso expresa una incertidumbre mucho más cotidiana que la probabilidad. Esto es, a causa de que lo difuso considera la incertidumbre del significado de las palabras y éstas son inevitables en el pensamiento del humano.

Todas las personas piensan y transmiten sus pensamientos y la información por medio de palabras. Todo el mundo está involucrado en lo difuso y ésta es una incertidumbre que cualquiera puede entender. Si este tipo de incertidumbre puede ser tratado matemáticamente y la ingeniería puede hacer uso de él, los efectos serán inmedibles. Se dice que la diferencia entre los ordenadores, los cuales únicamente pueden procesar información de dos valores, y las personas es que las éstas pueden tratar la ambigüedad, pero ahora esta notable habilidad humana puede ser expresada por la teoría difusa, cedida a los ordenadores y aplicada a la ingeniería (Terano *et al.*, 1992; Dubois y Prade, 1980).

Aparte de las definiciones conceptuales y el significado de las palabras, algunos conciben lo difuso suficientemente amplio para incluir cosas tales como la incertidumbre de los juicios subjetivos. Esta amplia definición de lo difuso incluye la incertidumbre de tipo probabilidad como un caso particular de juicio incierto.

En términos generales, la “*teoría difusa*” comprende la teoría de conjuntos difusos, la lógica difusa y la teoría de la medición difusa. La teoría de los conjuntos difusos expresan lo difuso por medio del concepto de conjunto. La teoría de la medición difusa es una teoría que maneja la difusibilidad en el sentido más amplio. La lógica difusa es el concepto de conjunto difuso incorporado dentro del marco de la lógica multivalente. También existe la llamada “*matemática difusa*”, matemática estándar dentro de la cual han sido introducidos los conjuntos difusos y los principios de la medición difusa.

2

Razón de su utilización en la Ingeniería Civil

¿Qué son los conjuntos difusos?, ¿Porqué pueden los ingenieros civiles estar interesados en su utilización?, ¿Cómo utilizarlos?, son algunos de los interrogantes que surgen en el momento que sale a la luz el tema de los “*conjuntos difusos*”. Si a estos interrogantes le añadimos el aceptar que los procesos para manejar *información subjetiva, juicios e intuiciones* en la toma de decisiones en la ingeniería estructural es un tema de gran actualidad y controversia, se origina un cierto cuestionamiento acerca de la razón de su aplicación en la ingeniería civil.

La teoría de los conjuntos difusos es una parte de la matemática que se halla perfectamente adaptada a la utilización tanto de lo *subjetivo* como de lo *incierto*. Es una forma de manejar científicamente el subjetivismo y la imprecisión, de tal manera que todo problema situado en el ámbito de la incertidumbre sea susceptible de ser tratado a través de la teoría de los conjuntos difusos. A medida que se avanza en el tema, cada vez, resulta más factible introducir en los esquemas formales, mecanismos del pensamiento tales como los puntos de vista y las opiniones cualitativas.

De aquí que la razón de su utilización en la ingeniería civil sea tan amplia como múltiples han sido las aplicaciones en el área estructural y en la ingeniería sísmica en particular. Por ello, la justificación de la utilización de los conjuntos difusos en la ingeniería se puede explicar desde diferentes puntos de aplicación:

a) Después de la ocurrencia de un fuerte sismo, es recomendable evaluar el estado de las estructuras afectadas y no afectadas mediante estudios analíticos y experimentales. Las investigaciones analíticas consisten en la confrontación de los cálculos de diseño originales y planos, la revisión de las especificaciones del proyecto y de un análisis de la estructura usando, adicionalmente, observaciones de campo. Las investigaciones

experimentales incluyen la localización de los puntos dañados, la aplicación de técnicas de pruebas no destructivas, la búsqueda de defectos de mano de obra y detalles de construcción, y la prueba de muestras de los materiales de la estructura. De esta manera, al final de las investigaciones sobre las estructuras dañadas se cuenta con una cantidad voluminosa de información, con la que, después de analizada, fácilmente se puede llegar a conclusiones tan simples como *“esta estructura particular ha sido severamente dañada por el reciente sismo”*.

Para muchos ingenieros estructurales, los diferentes procedimientos experimentales y analíticos en una investigación dada pueden ser fácilmente comprendidos; sin embargo, los procesos de toma de decisiones resumen muchos de los resultados en una simple conclusión de conocimiento privilegiado y especializado por relativamente pocos, por ingenieros altamente cualificados. Luego, la transición de tal conocimiento a procesos de toma de decisiones para ingenieros con poca experiencia depende, primeramente, de muchos años de experiencia y de trabajos relacionados entre la experiencia del ingeniero y su aprendizaje. Es así como la *“teoría de conjuntos difusos”*, se presenta como una alternativa para realizar dicha transición de conocimiento y, a su vez, como una aproximación suplementaria para calcular el *estado de daño de las estructuras existentes*, una vez ocurrido un sismo (Yao, 1980).

b) Además, la evaluación del daño de estructuras, frecuentemente, se hace en forma lingüística, de tal manera que involucra el uso de adjetivos tales como *pequeño, moderado, grande*, etc., los cuales pueden tener significados que son inherentemente vagos. Esta vaguedad es una consecuencia de la incertidumbre acerca del grado con el cual un objeto ha de especificarse por un adjetivo particular (Souflis y Grivas, 1986; Blockey, 1978). El realizar evaluaciones lingüísticas que contienen incertidumbre y ambigüedad, ha motivado el uso de la *“teoría de los conjuntos difusos”* en la ingeniería civil, pudiéndose describir adecuadamente los adjetivos del lenguaje natural a partir de conjuntos difusos. De tal manera que a los adjetivos se les puede definir en un contexto numérico, y luego, las frases lingüísticas compuestas de tales adjetivos, pueden recibir también una representación numérica apropiada.

c) El daño de la infraestructura civil, particularmente pavimentos y puentes, está comúnmente caracterizada por la observación de varios daños que aparecen sobre la superficie de la estructura. Siendo estos daños manifestaciones de algunas causas tales como la excesiva carga de tráfico, las condiciones medioambientales, los defectos estructurales, los defectos de los materiales, la construcción inadecuada y otros factores que influyen en el comportamiento estructural. La habilidad para describir, de forma

objetiva y consistente, los daños que se presentan en puentes es un punto crítico para el correcto diagnóstico de las causas y de la selección del apropiado programa de mantenimiento y rehabilitación. Luego, un factor de fundamental importancia en la evaluación de la condición de la infraestructura es el establecimiento de una apropiada medida de daños y la consideración de las incertidumbres asociadas con estas medidas (Grivas *et al.*, 1995). Por esta razón, la utilización de los “*conjuntos difusos*” y la “*consideración de las magnitudes de los daños como variables lingüísticas*”, se presentan como una muy buena alternativa para considerar las incertidumbres y la subjetividad involucradas en la definición del daño.

d) Las incertidumbres y ambigüedades presentes en la descripción del comportamiento estructural, han sido tratadas con el uso de la teoría de la probabilidad. Sin embargo, las incertidumbres que no son de naturaleza aleatoria pueden jugar un papel importante en el cálculo de la seguridad de estructuras de ingeniería civil provocando que la teoría de rehabilitación basada en probabilidad puede llegar a ofrecer una solución diferente a la inferida de las estadísticas de accidentes estructurales. Esto, en buena parte, se debe a la exclusión de incertidumbres como fallas por errores, equivocaciones u omisiones, incorrecta modelización, errores de construcción, etc. Las cuales son llamadas “*incertidumbres subjetivas*”, debido a que ellas pueden ser evaluadas solamente por el juicio y experiencia de los expertos (Zhao *et al.*, 1995; Shiraishi y Furuta, 1983). De aquí, que para establecer un método racional para calcular la seguridad, las incertidumbres subjetivas pueden ser combinadas con incertidumbres objetivas de naturaleza aleatoria con consistencia lógica. La “*teoría de conjuntos difusos*” permite tratar factores de incertidumbre subjetiva de forma cuantificable, siendo especialmente útil el concepto de probabilidad difusa para encontrar un nuevo método de análisis en el cual la información subjetiva dada por ingenieros se introduce en el cálculo de la probabilidad de falla para evaluar la seguridad de la estructura.

e) La gran mayoría de los problemas de ingeniería estructural contienen información difusa, es decir información vaga, imprecisa, cualitativa o incompleta. Afirmaciones como “*la carga actuando sobre la viga es alrededor de 1000 kN*”, o “*el módulo de Young del hormigón es aproximadamente 40.000 MPa*”, o “*la condición de frontera esta cerca del soporte fijo*” son vagas y no pueden ser consideradas claramente en una investigación determinística. Similarmente, si se supone que la capacidad de carga calculada de cierta estructura es 20.000 kN, esto significa que: ¿Puede fallar a una carga de 20.001 kN?. Si se adopta una investigación determinística, la respuesta debe ser sí. Sin embargo, bajo una perspectiva

ingenieril realista, no existe diferencia significativa entre 20.001 y 20.000 kN. Pero ¿fallará la estructura a una carga de 20.100 o 21.000 kN? (Ali, 1998). Luego con la “*teoría de los conjuntos difusos*” cada uno de los parámetros vagos utilizados en los cálculos estructurales se pueden definir dentro de un intervalo difuso que represente su imprecisión.

3

Aplicación en Ingeniería Civil

La primera aplicación de los conjuntos difusos en ingeniería civil se produjo en la evaluación lingüística del daño en las estructuras durante un sismo (Brown y Yao, 1983; Yao, 1982 y 1980; Blockey, 1978) y, desde entonces, se han realizado numerosas investigaciones aplicando la teoría de los conjuntos difusos. Se espera que los trabajos recientes se enfoquen en el desarrollo de sistemas expertos, los cuales utilicen el conocimiento de expertos para determinar la integridad de las estructuras después de la ocurrencia de un sismo (Souflis y Grivas, 1986).

Para ilustrar mejor la aplicación de los conjuntos difusos en ingeniería civil se presentan algunas aplicaciones concretas:

Calculo del daño en estructuras existentes (Yao, 1980). Representa uno de los primeros trabajos en el tema y, en él, se hace un esfuerzo para explorar la aplicación de los conjuntos difusos como una alternativa para calcular el estado de daño de las estructuras existentes después de ocurrido un sismo.

Selección de cargas de diseño (Corotis *et al.*, 1981). La definición de cargas de diseño para códigos y normas requiere recolección de datos cuyo análisis utiliza modelos empíricos y físicos adecuados, así como un alto grado de juicio ingenieril.

Análisis de rehabilitación basados en probabilidad difusa (Shiraishi y Furuta, 1983). En este trabajo, los eventos de falla se definen en forma más flexible que de la manera usual mediante el uso de la teoría de los conjuntos difusos. Especialmente, a partir del concepto de probabilidad difusa, se propone un nuevo análisis de rehabilitación que incluye el calculo de opiniones subjetivas de los ingenieros.

Aproximación por conjuntos difusos para la determinación de las expresiones lingüísticas para la carga sísmica y evaluación de daño (Souflis y Grivas, 1986). Se desarrolla un esquema de trabajo en el cual las evaluaciones lingüísticas de la carga sísmica y el daño estructural pueden representarse mediante conjuntos difusos.

Una aproximación matemática difusa para la evaluación del estado de puentes existentes (Tee et al., 1988). Se propone una solución óptima para la gestión de puentes, avalada por evaluaciones de puentes existentes, los cuales se basan en una elevada subjetividad y en procedimientos no uniformes que, usualmente, presentan imprecisiones y apreciaciones de tipo personal. Con el desarrollo de una aproximación aritmética difusa, la subjetividad humana y las imprecisiones son incluidas sistemáticamente en los procesos de toma de decisiones.

Evaluación de la resistencia estructural (Brown y Yao, 1983). Considera lo difuso de la información objetiva, cuando los resultados de las pruebas en probetas de hormigón se utilizan para determinar la resistencia real de elementos estructurales.

Metodologías del cálculo del daño para infraestructura civil (Grivas et al., 1995). En este trabajo, a partir de opiniones de expertos y del tratamiento con conjuntos difusos, se plantea una metodología para evaluar el estado de los pavimentos. Es así como las incertidumbres y la subjetividad, involucrada en el cálculo de las magnitudes observadas en las características de los daños, fueron las principales motivaciones para utilizar los conjuntos difusos.

Aplicación de la lógica difusa en la ingeniería de la rehabilitación (Boules y Peláez, 1995). Se aplican los conceptos fundamentales de la lógica difusa, aritmética difusa y variables lingüísticas para analizar los sistemas estructurales, las fallas, los eventos, la rehabilitación por la degeneración del sistema, y para calcular los sistemas críticos basados en la severidad de la falla y en su probabilidad de ocurrencia.

Utilización de lógica difusa para la evaluación sísmica de pilas de puentes (Ali, 1998). En este trabajo la lógica y la aritmética difusa, se utilizan para investigar la seguridad de una pila de puente en la cual las dimensiones, resistencia de los materiales y las leyes constitutivas de los materiales son inciertas e imprecisas.

La lógica difusa permite también realizar sistemas de control en situaciones donde las técnicas de control clásicas no dan soluciones adecuadas. Sistemas no lineales, variantes en el tiempo, mal definidos o difícilmente representables mediante técnicas de modelado convencional, son los casos más usuales donde la aplicación de sistemas de control difuso es apropiado (García, 1991). Por lo tanto las aplicaciones del control difuso en ingeniería civil no se ha hecho esperar y encontramos ejemplos de su utilización como el control de un proceso de depuración de aguas, el de un horno clinker (Tremosa, 1991), *controles de lógica difusa en puentes usando sistemas de aislamiento sísmico semi-activo inteligente* (Symans y Kelly, 1999).

No se puede ignorar a su vez que la ingeniería de transportes también se ha visto beneficiada con la teoría de los conjuntos difusos. Esto puede observarse en trabajos como: “*Sistemas de lógica difusa para ingeniería del transporte*”, donde se utiliza la lógica difusa para modelar procesos complejos de transporte y tráfico. La lógica difusa se presenta como una muy buena aproximación para modelar los procesos de tráfico y transporte caracterizados por la subjetividad, ambigüedad, incertidumbre e imprecisiones (Teodorovic, 1999). Otro trabajo desarrollado es “*Tratamiento de incertidumbres en estudios de transporte*” (Kikuchi y Pursula, 1998) donde se examina la naturaleza de la incertidumbre presente en la planificación del transporte y se explora un tratamiento matemático apropiado.

4

Conjuntos difusos

4.1 Definición

En general el lenguaje natural que usamos en ingeniería contiene gran cantidad de incertidumbre representada en la ambigüedad y la vaguedad de sus significados. La ambigüedad se asocia con la incertidumbre causada por la pobreza en la definición de las palabras y, la vaguedad se refiere a la incertidumbre originada por la pobreza de información acerca del tema que trata la palabra y, por tanto, en la multitud de significados que dicha palabra pueda tener (Kikushi y Pursula, 1998).

Los objetivos de los adjetivos que comúnmente utilizamos no son claramente especificados y, su significado, en muchos de los casos, resulta ambiguo en términos de la extensión del significado. Por ejemplo, si se habla de “*estructura vieja*”, en la cual su ambigüedad proviene del adjetivo “*vieja*”, no se puede determinar claramente que estructura es vieja y cual no lo es. Las palabras son usualmente cualitativas, pero los adjetivos o predicados, como “*viejo*”, están relacionados con la cantidad de edad. En ingeniería, especialmente, los adjetivos que describen los estados y condiciones de varias cosas están casi siempre relacionados con cantidades.

Tomando un ejemplo expuesto por Terano *et al.* (1992), en el que se estudia la ambigüedad del significado de “*viejo*”, en términos de la expresión de cantidad, con un rango de edad variando entre 20 y 80 años, el grado en el cual la edad x (años) puede ser llamada “*vieja*” es μ ; esto es, a la edad x le corresponde el grado μ el cual está entre 0 y 1 ($0 \leq \mu \leq 1$). Si el eje horizontal es x , y el eje vertical es μ , la gráfica se dibuja como en la Figura 1 y, en ella, se expresa la ambigüedad de “*viejo*” en términos de cantidad.

Edad	Grado μ
20	0
30	0.05
40	0.15
50	0.4
60	0.8
65	0.94
70	0.98
80	1

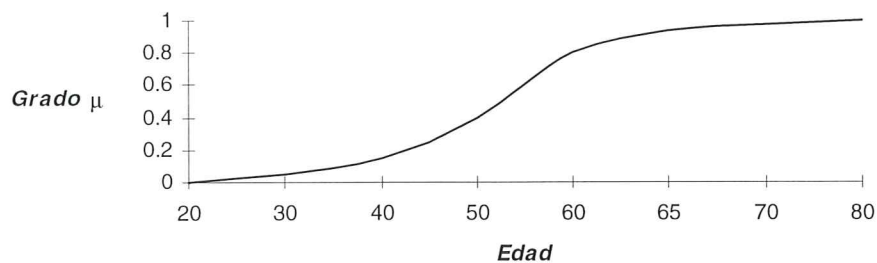


Figura 1 Grado de “viejo”.

La cantidad en el eje horizontal de la Figura 1, es la edad transcurrida en años, es decir, es la cuantificación de la palabra y, el eje vertical, muestra el grado en el que una persona puede ser etiquetada como “vieja”. En otras palabras, es la cuantificación del grado de ambigüedad. Esta clase de representación de una palabra se denomina *cuantificación del significado* (*quantification of meaning*). El gráfico suele ser llamado, algunas veces, *el significado cuantificado* (*quantified meaning*), es decir que el significado de la palabra se cuantifica sobre un rango específico; para la edad, en el caso del ejemplo, este rango es de 20 a 80 años.

Hablando en términos más simples, la “*Teoría de Conjuntos Difusos*” parte de la teoría clásica de conjuntos, añadiendo una *función de pertenencia* al conjunto, μ , generalmente definida como un número natural entre 0 y 1. Así, se introduce el concepto de conjunto difuso asociado a un determinado valor lingüístico, definido por una palabra, adjetivo o etiqueta lingüística A . Para cada conjunto difuso se define una función de pertenencia o inclusión $\mu_A(x)$, que representa el grado en que la variable x está incluida en el concepto representado por la etiqueta A .

Los conjuntos difusos permiten reunir objetos o sucesos por el valor de una cierta magnitud. Por ejemplo, las personas pueden ser reunidas por su edad. Así, si definimos el conjunto clásico de personas viejas como las que tienen más de 70 años, resulta que alguien de 69 años no sería vieja, pero otra de 71 sí que lo

sería, siendo la diferencia entre ellas de tan solo dos años. Por lo tanto, una descripción del conjunto de las personas viejas en términos de conjuntos difusos parece más adecuada en este tipo de casos.

La teoría de los conjuntos difusos trabaja con la cuantificación de los significados de las palabras en gráficas, dentro del marco de trabajo de la teoría de conjuntos. Es un intento de expresar “alto” o “viejo” por medio del concepto de conjuntos. Desde un punto de vista práctico, el concepto de conjunto no es necesario para la cuantificación de la ambigüedad, pero es posible aumentar el rango de utilidad trabajando dentro del marco de trabajo de la teoría de conjuntos. Esto se debe a que la teoría de conjuntos es un concepto muy básico y esta relacionada con todos los campos de las matemáticas contemporáneas.

4.2 Representación

Si X es una colección de objetos, denotados generalmente por x , $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, luego un subconjunto difuso A en X es un conjunto de pares ordenados:

$$A = \{\mu_A(x) | x, x \in X\} \quad (1)$$

Donde $\mu_A(x)$ es llamada la *función de pertenencia* o *grado de pertenencia* (también *grado de compatibilidad* o *grado de verdad*) de x en A , es decir $\mu_A(x)$ define el grado en el cual el elemento x del conjunto X esta incluido en el subconjunto A . Es así como la función de pertenencia es la que define el conjunto difuso.

El rango de la función de pertenencia puede ser un subconjunto de números reales no negativos, aunque sea de práctica general que la función de pertenencia esté definida entre 0 y 1 como $\mu_A(x) : X \rightarrow [1,0]$. Según Zimmermann (1996) los elementos que cuentan con cero como valor de pertenencia, normalmente, no son listados. No siendo ésto una regla general a aplicar.

El grado de inclusión, algunas veces, se denomina *la magnitud (extend)* o *el grado (grade)*. Por ejemplo, el grado de pertenencia del elemento x en el subconjunto A se expresa mediante:

$$\mu_A(x_1) = 1, \quad \mu_A(x_2) = 0.8, \quad \mu_A(x_3) = 0.3, \quad \mu_A(x_4) = 0$$

Donde μ es la función de pertenencia, proporcionando el grado de pertenencia, un valor que varía de 0 hasta 1 . El subíndice de μ , A , expresa que μ_A es la función de pertenencia de A .

Para simplificar el uso de la terminología, indistintamente al *subconjunto difuso* A se le llamará *conjunto difuso* A , ya que un conjunto difuso siempre está definido como un subconjunto de un conjunto general X , el prefijo “sub” se olvida, frecuentemente, y se habla sencillamente de un conjunto difuso.

Otro aspecto a considerar al hablar de conjuntos es la forma de simbología utilizada para representar los conjuntos difusos. Es frecuente encontrar en la bibliografía que a los conjuntos difusos se les denota como a los conjuntos clásicos, diferenciándolos con una $\sim$ colocada en la parte superior o en la parte inferior. La razón de esta forma de simbolizar los conjuntos difusos es precisamente porque los conjuntos difusos son considerados extensiones de los conjuntos clásicos. Sin embargo, en teoría difusa, los conjuntos clásicos son vistos como casos particulares de los conjuntos difusos; por lo tanto, la A con el símbolo arriba o debajo de ella se reemplaza, algunas veces, por una simple A .

Estudiando el concepto de conjunto difuso, es interesante estudiar las diferencias existentes con los conjuntos clásicos (también llamados *conjuntos "quebrados"* (*crisp sets*) o *conjuntos no difusos* (*nonfuzzy sets*)), siendo bueno empezar por revisar las diferencias en términos de las funciones de pertenencia. Si E es un subconjunto quebrado de X , la función:

$$C_E(x) = \begin{cases} 1 & x \in E \\ 0 & x \notin E \end{cases} \quad (2)$$

Se denomina la *función característica* de E , es decir que corresponde a la función de pertenencia de los conjuntos difusos, siendo su grado tan solo dos valores: 1 si x está incluido en E , y 0 si no lo está. En otras palabras, la función característica del conjunto quebrado se expresa mediante:

$$C_E: X \rightarrow \{0,1\} \quad (3)$$

Siendo el rango de valores $\{0,1\}$ tan sólo una parte del rango de valores de la función de pertenencia del conjunto difuso. Es decir, si miramos el ejemplo de *persona vieja*, una que tenga una edad mayor de 80 años será considerada vieja, y el valor de su función característica será igual a 1 ; mientras alguien con menos de 80 años no será viejo y el valor de su función característica será 0 .

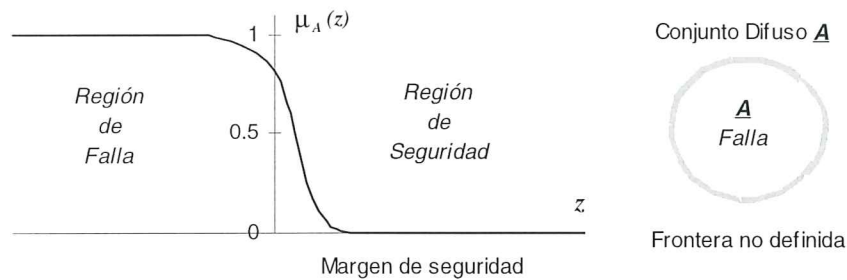
Tomando la definición de *evento de falla* en el trabajo presentado por Shiraishi y Furuta (1983), se puede ver a través de un ejemplo, en el contexto estructural, la diferencia existente entre un conjunto difuso y un conjunto quebrado.

Los autores parten de definir a $P(A)$ como la probabilidad de ocurrencia de la falla del evento A , el cual a su vez define la seguridad estructural. Expresando a A mediante un margen de seguridad Z , que es igual a:

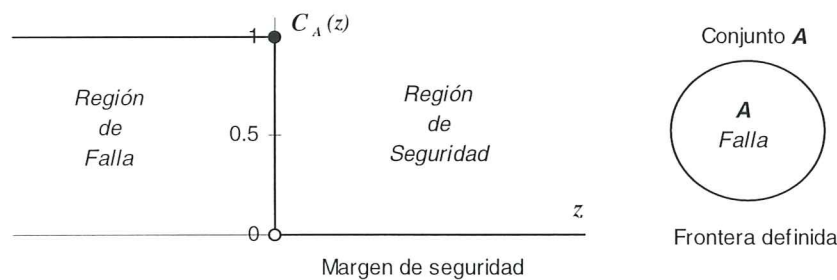
$$Z = (R-S) < 0 \quad (4)$$

En el cual R , es la resistencia estructural y S , es el efecto de carga. Ésto implica que la falla ocurre cuando Z es negativo; sin embargo, esta hipótesis es inexacta cuando existen varios tipos de incertidumbres (como por ejemplo, las subjetivas), las cuales no siguen las leyes de la probabilidad. Así pues para considerar estas incertidumbres es preferible definir el evento de falla mediante un conjunto difuso A , como el ilustrado en la Figura 2 a. Esta Figura indica que la posible falla ocurre si Z es negativo y que el grado de posibilidad de falla viene dado por el valor de la función de pertenencia, siendo esta definición de falla consistente con la realidad ya que la falla no aparece súbitamente sino de forma gradual.

De manera comparativa, se presenta en la Figura 2 b la definición del evento de falla mediante un conjunto clásico. En éste los límites del conjunto están bien definidos, la región de falla ocurre a partir de cualquier valor de Z negativo, siendo claramente el punto 0 el que separa la región de falla de la región segura. En este caso, a diferencia de la representación difusa, la falla se muestra que ocurre súbitamente, cosa que no concuerda con la realidad.



a) Conjunto Difuso.



b) Conjunto Clásico.

Figura 2 Definición del Evento de Falla.

4.3 Ejemplo de conjunto difuso

Para ilustrar mejor la definición de conjunto difuso en un contexto ingenieril, se presenta el caso de la evaluación de la probabilidad de falla de una viga de hormigón armado (Chou y Yuan, 1993). En este trabajo se planteó, en primer lugar, el mejorar el método de inspección mediante la complementación de datos como la medición del ancho de la grieta e identificación del sitio donde se producían dichas grietas. Sin embargo, el procedimiento resultaba muy costoso y no era económicamente factible, razón por la cual se planteó que lo más conveniente era asociar un adjetivo como “*menor*”, “*significante*” o “*mayor*” a cada grieta observada. “*Menor*” para las grietas cortas y pequeñas, “*significante*” para las grietas que podían afectar la capacidad de la viga y “*mayor*” para aquellas grietas que eran grandes y que, probablemente, reducirían la capacidad de la viga. Suponiendo que se calificaría como grieta “*menor*” a aquella que tenía un ancho entre 0 y 7 micrómetros, “*significante*” alrededor de 11 micrómetros y “*mayor*” cuando el ancho excediera los 12 micrómetros.

Así pues las funciones de pertenencia, utilizadas en estos tres tipos de ancho de grietas, se definieron como:

$$\mu_A(x) = 1 - x/7 \quad 0 \leq x \leq 7 \text{ micrómetros} \quad (5)$$

$$\mu_A(x) = 1/6 (x - 5) \quad 5 \leq x \leq 11 \text{ micrómetros} \quad (6)$$

$$\mu_A(x) = 1 - (x-11)/6 \quad 11 \leq x \leq 17 \text{ micrómetros} \quad (7)$$

$$\mu_A(x) = 1/8 (x - 12) \quad 12 \leq x \leq 20 \text{ micrómetros} \quad (8)$$

Y fueron presentadas como se muestra en la Figura 3:

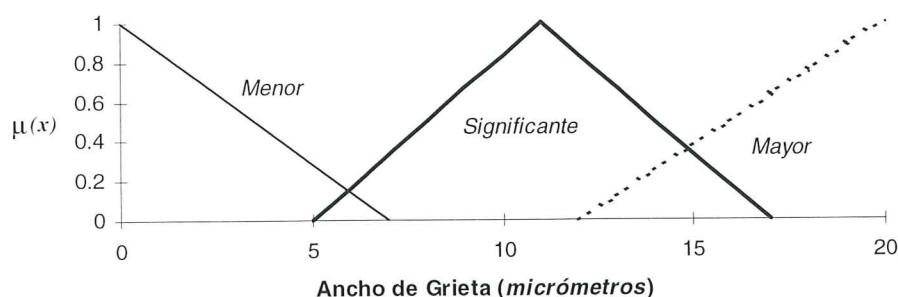


Figura 3 Representación de los conjuntos difusos ancho de grieta *menor*, *significante* y *mayor*.

Estas funciones de pertenencia se utilizaron, posteriormente, para determinar la probabilidad de falla por cortante y por flexión en la viga.

4.4 Conjunto difuso convexo

Tomando la definición expresada por Bandemer y Gottwald (1995), un conjunto difuso $A \in F(R)$ es llamado convexo, si todos los α -cortes fuertes de A son intervalos (ver apartado 4.6). Análogamente, un subconjunto difuso A de una línea real es convexo si para todo $a, b, c \in R$, se cumple que:

$$a \leq c \leq b \Rightarrow \mu_A(c) \geq \min\{\mu_A(a), \mu_A(b)\} \quad (9)$$

El concepto de convexidad caracterizado por la ecuación anterior para los subconjuntos difusos de R , se puede aplicar de igual manera a cualquier otro subconjunto $A \in F(X)$ de otros universos de discurso.

Expresando la convexidad, bajo la noción de intervalo $[a, b]$, con puntos extremos a, b , la ecuación anterior puede escribirse como:

$$c \in [a, b] \Rightarrow \mu_A(c) \geq \min\{\mu_A(a), \mu_A(b)\} \quad (10)$$

La diferencia característica entre un conjunto difuso convexo y uno no convexo de R se puede observar en la Figura 4, donde el conjunto A es un conjunto difuso convexo, no siéndolo B .

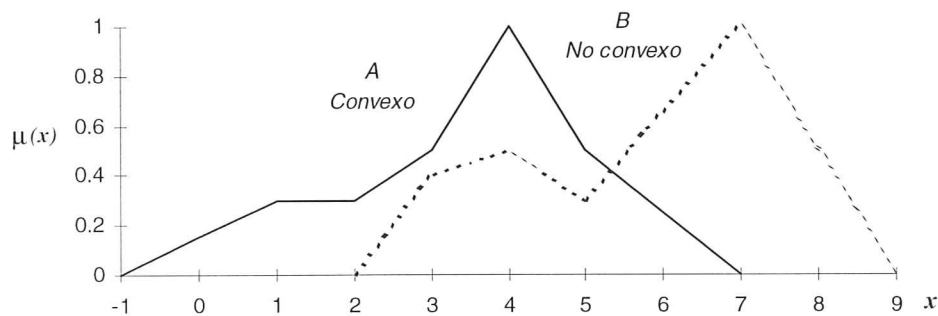


Figura 4 Conjunto difuso convexo y no convexo.

4.5 Conjunto difuso normal

Un conjunto difuso A es normal si existe un elemento x cuya función de pertenencia es igual a 1. En otras palabras:

$$A \text{ se llama "normal"} \leftrightarrow \max_{x \in X} \mu_A(x) = 1 \quad (II)$$

Todo conjunto difuso no normal puede normalizarse dividiendo todas sus ordenadas por el máximo grado de la función de pertenencia. En la Figura 5 se presenta un conjunto difuso normal y otro sin normalizar.

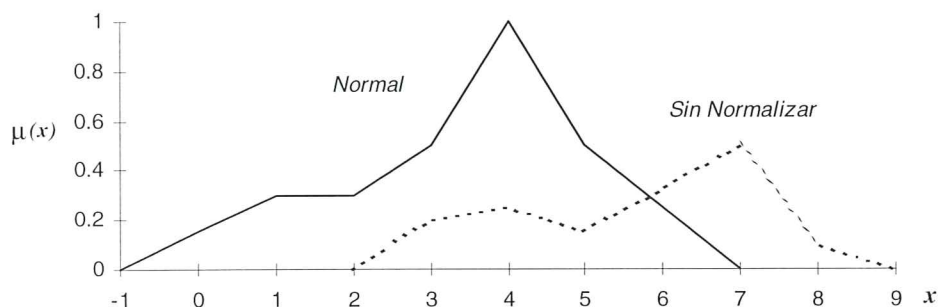


Figura 5 Conjunto difuso normal y no normal.

4.6 α -nivel de nitidez

Dado un conjunto difuso A , con una función de pertenencia $\mu_A(x) : X \rightarrow [0,1]$, para cada α en $[0,1]$, se llamara α -nivel de nitidez o α -corte de A al conjunto clásico A_α de X formado por todos los elementos x del universo X que son compatibles con A por lo menos al nivel α , es decir:

$$A_\alpha = \{x \in X; \mu_A(x) \geq \alpha\}; \quad \alpha \in [0,1] \quad (12)$$

Al 1-nivel de nitidez, A_1 , se le denomina la *parte clásica* de A (Trillas *et al.*, 1995). Por ejemplo, si es $X = \{x_1, x_2, \dots, x_8\}$ y

$$A = \{0.2|a_1, 0.4|a_2, 1|a_3, 0.4|a_4, 0.2|a_5\}$$

los subíndices de nitidez son 1, 0.4 y 0.2 con los que:

$$\begin{aligned} A_1 &= \{a_3\} \\ A_{0.4} &= \{a_2, a_3, a_4\} \\ A_{0.2} &= \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\} \end{aligned}$$

o expresado de otra manera, como lo hacen Terano *et al.* (1991) y Kaufman y Gil (1986):

$$\begin{aligned} A_I &= [a_3, a_3] \\ A_{0.4} &= [a_2, a_4] \\ A_{0.2} &= [a_1, a_5] \end{aligned}$$

La representación gráfica de $A_{0.4}$ se presenta en la Figura 6.

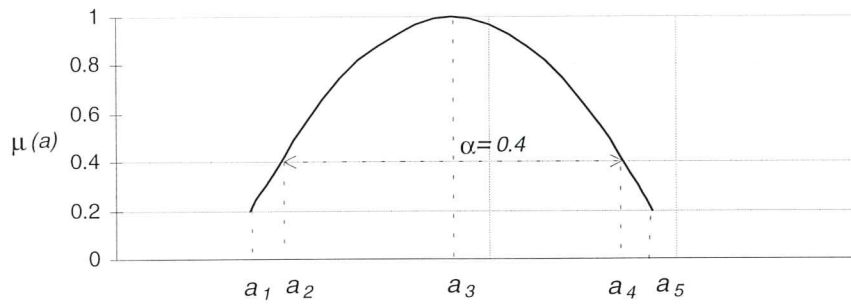


Figura 6 Representación gráfica de $A_{0.4}$.

Terano *et al.* (1992) citan dos clases de cortes- α , el “*corte- α débil*” y el “*corte- α fuerte*”, viniendo dados, respectivamente, por:

$$A_{\alpha} = \{x; \mu_A(x) > \alpha\} \quad \alpha \in [0,1] \quad (13)$$

$$A_{\alpha}^{-} = \{x; \mu_A(x) \geq \alpha\} \quad \alpha \in [0,1] \quad (14)$$

Donde la diferencia entre el fuerte y el débil es la presencia o ausencia del signo igual.

5

Funciones de pertenencia

5.1 Definición

La teoría de los conjuntos difusos define el grado en el cual el elemento x del conjunto X está incluido en el subconjunto A mediante la llamada *función de pertenencia* (*membership function*), $\mu_A(x)$. Dicha función es un conjunto de números ordenados si la variable es discreta, o una función continua si no lo es. Como se ha mencionado anteriormente, repetida veces, el valor $\mu_A(x)$ indica el grado en qué el valor x de la variable X está incluida en el concepto representado por la etiqueta A .

Tomando un ejemplo propuesto por Klir y Folger (1988), para explicar el concepto de conjunto difuso, tenemos una posible función de pertenencia para el conjunto difuso de números reales cercanos a 0 , expresada como:

$$\mu_A(x) = \frac{1}{1 + 10x^2} \quad (15)$$

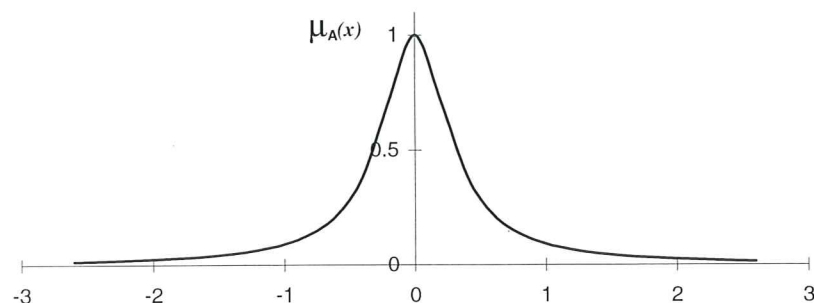


Figura 7 Posible función de pertenencia del conjunto difuso de números reales cercanos a 0 .

La representación gráfica de esta función se presenta en la Figura 7. Usando esta función, se puede determinar el grado de pertenencia de cada número real al conjunto difuso, lo que significa el grado en el cual esos números están cerca de 0. Por ejemplo, el número 3 tiene asignado un grado de 0.01, el número 1 tiene un grado de 0.09, el número 0.25 un grado de 0.62 y el número 0 un grado de 1.

Se puede, intuitivamente, esperar que mediante la realización de alguna operación sobre la función correspondiente al conjunto de números cercanos a 0, se siga obteniendo una función igualmente representativa del mismo conjunto; un ejemplo de esta posibilidad es el elevar al cuadrado la función anterior:

$$\mu_A(x) = \left(\frac{1}{1+10x^2} \right)^2 \quad (16)$$

5.2 Tipos de funciones de pertenencia

Como hemos visto en el apartado anterior, la función de pertenencia no es única y depende del contexto. Para su definición, se utilizan convencionalmente ciertas familias de formas estándar, debido a la coincidencia con el significado lingüístico de las etiquetas más utilizadas. Las más frecuentes son las funciones de tipo trapezoidal, singleton, triangular, S, exponencial y tipo II, las cuales se describen a continuación (Martín del Brio y Sanz, 1997):

5.2.1 Función tipo trapezoidal

Se define por cuatro puntos m , n , o y p . Es cero para valores menores de m y mayores de p , 1 entre n y o , y está entre 0 y 1 para valores de x entre m y n , y entre o y p . Se utiliza habitualmente en sistemas difusos sencillos, ya que permiten definir un conjunto difuso con pocos valores y calcular su función de pertenencia con pocos cálculos. Esta función, es adecuada para modelar propiedades que comprenden un rango de valores (adulto, normal, adecuada, etc.).

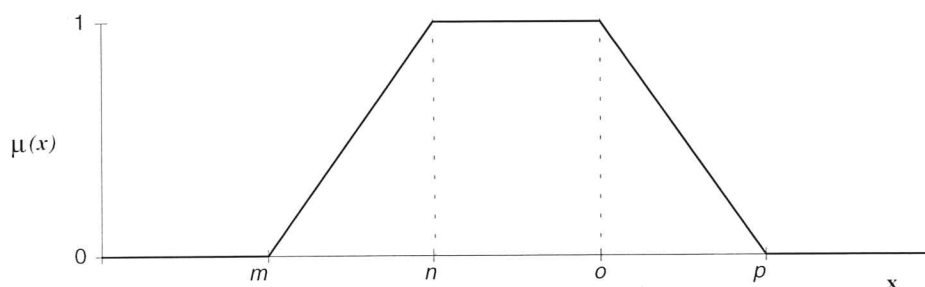


Figura 8 Función tipo trapezoidal

5.2.2. Función tipo triangular

Para construir una función triangular partiendo de una función trapezoidal se hace $n=0$. Esta función es adecuada para modelar propiedades con un valor de pertenencia distinto de cero para un rango de valores pequeño entorno a un punto n .

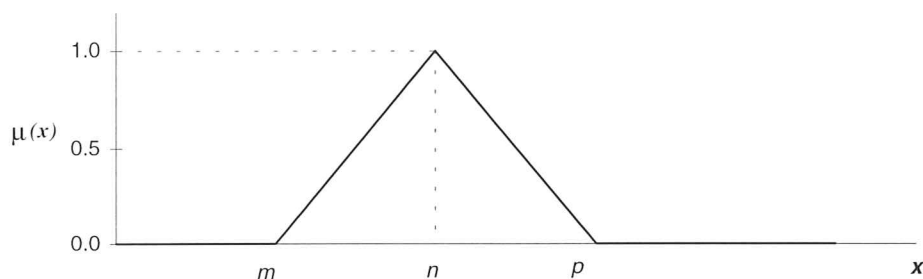


Figura 9 Función tipo triangular

5.2.3 Función tipo singleton

Esta función vale 1 para un solo punto y 0 para el resto.



Figura 10 Función tipo singleton

5.2.4 Función tipo S

Esta función es adecuada para modelar propiedades como grande, mucho, positivo, etc. Se caracteriza por tener un valor de pertenencia distinto de cero para un rango de valores por encima de cierto punto m , siendo 0 por debajo de m y 1 para valores mayores de p . Su punto de cruce (valor 0,5) es $x=(m+p)/2$; y entre los puntos m y p es de tipo cuadrático (suave).

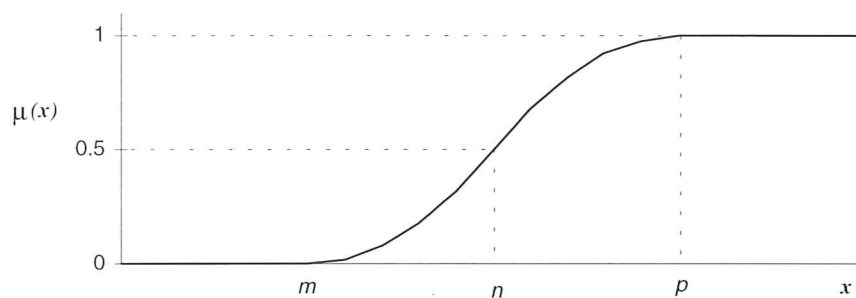


Figura 11 Función tipo S

5.2.5 Función tipo exponencial

Es una forma de definir la función de pertenencia tipo S, mediante un expresión exponencial.

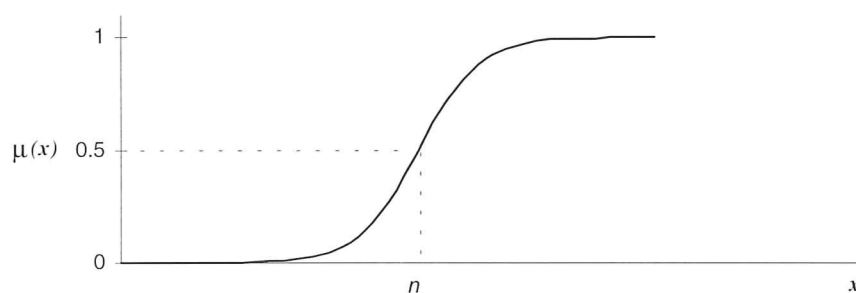


Figura 12 Función tipo exponencial

5.2.6 Función tipo II

Tiene forma de campana, y resulta adecuada para los conjuntos definidos alrededor de un valor n , como medio, normal, cero, etc. Pueden definirse también utilizando expresiones analíticas exponenciales o cuadráticas, como la campana de Gauss.

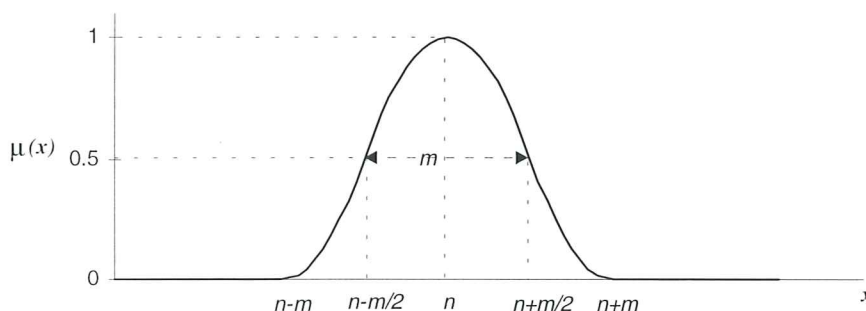


Figura 13 Función tipo II

5.3 Construcción de las funciones de pertenencia

La construcción de un conjunto difuso supone la construcción de su función de pertenencia. Ésta se puede determinar en base a criterios individuales (subjetivos u objetivos), criterios colectivos, procedimientos analíticos, procedimientos experimentales, etc. Esto implica que la construcción de un conjunto difuso requiere el usar técnicas interdisciplinarias como muestreo y cálculo frecuencial en el sentido clásico estadístico, teoría de la medición o de magnitudes, teoría de la información, teoría de los índices, teoría de la decisión, etc. (Trillas *et al.*, 1995).

A su vez, es de resaltar que un conjunto difuso concreto puede *depender tanto del universo en el que se considera como de los observadores que lo construyen*. (Trillas *et al.*, 1995). Así, al hablar del conjunto de puentes *bien conservados* en un universo con dos puentes, uno con pequeñas fisuras en la superestructura y otro sin ninguna muestra de daño visible, no se presenta vaguedad alguna; pero si se mira en una muestra de toda una población se encontrará cierta incertidumbre al clasificar algunos puentes como *bien conservados*.

En la práctica, la mayoría de los subconjuntos borrosos pueden considerarse basados en escalas. Así, podemos distinguir los casos de escalas nominales del caso de modelos difusos. En el primero, a los elementos de la población representados por nombres y etiquetas se les asignan grados de pertenencia y, en el segundo caso, directamente a la escala numérica se le asocia el subconjunto borroso y, en consecuencia, cualquier población a la que se pueda aplicar la escala numérica puede someterse a la evaluación difusa correspondiente. En este segundo caso, también hay que distinguir los casos en que la escala numérica es puramente aritmética, de los casos en que la escala se corresponde con unas magnitudes medibles.

Por lo tanto, en la construcción de las funciones de pertenencia, se pueden distinguir algunos procedimientos útiles (Trillas y Gutiérrez, 1992; Trillas *et al.*, 1995) que descritos a continuación:

a) *Proceso individual o colectivo de asignación directa.* Es el caso de evaluaciones curriculares, valoraciones de precios, etc., que pueden basarse en procesos más o menos complicados, pero que no se hacen explícitos en el momento de la asignación.

b) *Procesos estadísticos o probabilísticos.* Corresponden a los procedimientos clásicos frecuenciales de distribuciones (variable aleatoria, función de densidad, función de distribución, etc.). Es así como a partir de las frecuencias de las respuestas dadas por una muestra de especialistas que opinan sobre la competencia de los elementos del universo considerado para ser representativos del predicado vago, se va construyendo el conjunto difuso.

c) *Procesos de análisis de alternativas.* Es el caso de la teoría de los procesos jerárquicos analíticos, el cual constituye un buen ejemplo de cómo establecer un modelo razonable y útil para tratar problemas de toma de decisiones.

d) *Procesos de medición directa e indirecta.* Se basa en magnitudes elementales, tal es el caso de muchos ejemplos aritméticos o geométricos, donde combinando divisores, lados, diámetros, etc., pueden construirse conjuntos borrosos que representen a etiquetas tales como “*número grande*”, “*longitud de apoyo excelente*” o “*estado de conservación deficiente*”.

Finalmente, de cara a las aplicaciones es importante que la función de pertenencia sea lo más sencilla y lineal posible, así como describible por el mínimo número posible de parámetros numéricos.

5.4 Ejemplos de la construcción de las funciones de pertenencia

En el trabajo de Souflis y Grivas (1986), donde evalúan el daño y la carga sísmica mediante términos lingüísticos, las correspondientes funciones de pertenencia se establecen utilizando la aproximación paramétrica correspondiente a un proceso estadístico, el cual provee un buen método para considerar las evaluaciones de la experiencia de los ingenieros. En este método, se supone que un ingeniero puede definir el contexto de un adjetivo T mediante la designación de tres valores numéricos a , b , y c entre 0 y 1. Con a menor que b , y c mayor que b ; a y c simbolizan los valores mínimo y máximo, respectivamente, y b representan el valor de certeza. La función de pertenencia asociada con el adjetivo T se determina a continuación como una función bilineal $\mu_T(a,b,c)$ que recibe un valor igual a 1 en b y 0 en a y c construyéndose así la función de pertenencia de forma simple.

Con este procedimiento, se construyeron las funciones de pertenencia para las palabras asociadas tanto a la evaluación de la carga sísmica como a la del daño.

En el caso particular de la evaluación del daño sísmico, se establecieron cinco niveles de daño: *nada* (no daño), *leve* (pequeño), *moderado* (medio), *severo* (grande o considerable) y *total* (máximo). Siendo las abscisas valores entre 0 y 1 (en porcentaje entre 0 y 100%), correspondiendo a la relación del costo de reparación respecto al costo total de la sustitución de la estructura en el momento de tener que tomar la decisión de reparar o reemplazar debido a los efectos de la acción del sismo. Dichas funciones se presentan en la Figura 14.

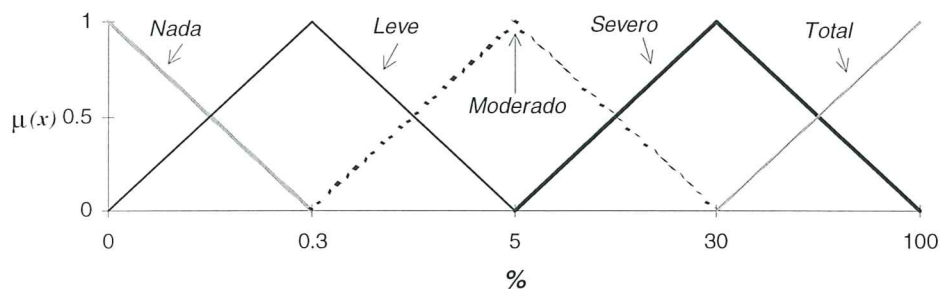


Figura 14 Funciones de pertenencia para cinco niveles de daño, “*nada*”, “*leve*”, “*moderado*”, “*severo*” y “*total*”.

Otro ejemplo de como construir funciones de pertenencia se presenta en el trabajo de Grivas *et al.* (1995), donde se propone un método para evaluar los daños ocasionados en estructuras civiles, ilustrados a través de su aplicación a pavimentos. De forma similar al ejemplo anterior, se utilizan cinco niveles de escala en términos de adjetivos como “*pequeño*”, “*moderado*” y “*grande*”, limitados a su vez por el mínimo “*ninguno*” y el máximo “*total*”. De igual modo, cada función de pertenencia se define como una función bilineal que requiere tres parámetros a , b y c . Con b menor que a y mayor que c .

Los tres parámetros a , b y c , utilizados para la construcción de cada una de las funciones de pertenencia se determinan a partir de las opiniones suministradas por expertos en el tema de mantenimiento. Estas opiniones se representan en histogramas y, posteriormente, se transforman a funciones de pertenencia. Es así, como el eje vertical de cada histograma representado por el “*número de respuestas*” correspondientes a una clasificación específica, se interpreta como la “*confianza*” correspondiente al valor de clasificación seleccionado. Los parámetros a y c (valor de pertenencia de 0), representan la clasificación con la confianza más baja y el parámetro b (con un valor de pertenencia de 1) representa la confianza máxima.

6

Variables lingüísticas

6.1 Concepto de variable lingüística

Se denomina variable lingüística a aquella que puede tomar por valor términos del lenguaje natural, como *edad*, *peso*, *altura*, *daño*, *capacidad*, *vulnerabilidad*.... *nada*, *poco*, *mucho*, *positivo*, *negativo*, *bueno*, *malo*, etc., las cuales a su vez son las que hacen el papel de etiquetas en un conjunto difuso.

Aun cuando la finalidad primordial de este concepto es expresar de manera formal el hecho de que pueda asignarse como valor de una variable palabras tomadas del lenguaje natural, no obstante, a una variable lingüística podrán asignarse valores numéricos. Así, en una expresión como el *daño estructural es severo*, la variable *daño estructural* debe ser entendida como una variable lingüística, pues se le asigna como valor el conjunto difuso *severo*, pero, además, esta variable puede también tomar valores numéricos como el *índice de daño es mayor de 1*.

De una manera más formal, una variable lingüística, se define mediante A , $T(A)$, U , G , M . Siendo A el nombre de la variable, $T(A)$ es el conjunto de términos que reciben los valores x que puede tomar A , valores que a su vez son conjuntos difusos en U . El conjunto de valores numéricos que puede tomar para una variable discreta, o el rango de valores posibles para una continua, es lo que se conoce como el universo de discurso de la variable x , y se nombra como U . Finalmente, G es una regla sintáctica para la generación de los nombres de los valores de x y M es una regla semántica para asociar un significado a cada valor.

Por medio del siguiente ejemplo se puede entender mejor el sentido de estos términos formales. *Vulnerabilidad* puede considerarse como una variable lingüística, de modo que $A = \text{Vulnerabilidad}$. $T(\text{vulnerabilidad})$ es el conjunto de todos los términos que pueden hacer referencia a la vulnerabilidad, como *nada*,

poco, medianamente, muy y absolutamente. El universo de discurso U de esta variable va, en general, desde el cero absoluto al infinito, pero en aplicaciones normales, puede restringirse al rango de índices de vulnerabilidad que pueden presentarse en ella.

Existen unas partículas lingüísticas llamadas “*modificadores lingüísticos*” que, antepuestas a un predicado vago, siguen originando un predicado vago y que, o bien, amplían su extensión, o bien la disminuyen. Dos de ellos, muy frecuentes son *muy* y *más o menos*. El primero antepuesto a un predicado vago, disminuye su extensión, y el segundo también llamado *moderadamente*, lo amplía.

6.2 Determinación de la variable lingüística

Otro ejemplo de variable lingüística es el presentado por Trillas *et al.* (1995) el cual obedece al mismo planteamiento hecho por Sobrino en su trabajo “Lógica borrosa y lingüística” (Trillas y Gutiérrez, 1992) y es:

Una variable lingüística se obtiene a partir de un predicado vago principal P , de un antónimo $Ant\ P$ y de una familia $\{M_1, M_2, \dots\}$ de modificadores lingüísticos aplicados a ellos. Con esto, se obtienen los valores lingüísticos principales de la variable y, a su vez, aplicando a éstos los conectivos lógicos ($'$ (**no**), $.$ (**o**), $+$ (**y**)) se obtienen los valores secundarios. Si P es de característica numérica, el nombre de ésta es el mismo que el de la variable lingüística (Holgado, 1995).

Por ejemplo, si $P=J=Joven$, que es de característica numérica $Edad \rightarrow [0,120]$, entonces los “valores” lingüísticos de la variable lingüística $Edad$ con la familia de modificadores {muy, más o menos, bastante, etc.}, se obtienen a partir de los $J=Joven$, $Ant\ J=Viejo=V$, $MJ=Muy\ joven$, $\pm J=Más\ o\ menos\ joven$, $MV=Muy\ viejo$, $\pm V= Más\ o\ menos\ Viejo$, los cuales a su vez pueden combinarse usando los conectivos lógicos del modo siguiente:

$$\begin{aligned} J' &= No\ Joven, \\ (MV)' &= No\ muy\ Viejo, \\ J' + V &= No\ Joven\ o\ Viejo, \\ \pm J . (MV)' &= Más\ o\ menos\ Joven\ y\ no\ muy\ Viejo. \end{aligned}$$

Trillas *et al.* (1995) argumentan que, según algunos estudios, los seres humanos tienen la habilidad de graduar, en el lenguaje ordinario, los predicados que son variables lingüísticas. Sin embargo, esta habilidad está limitada a un número entre 5 y 9 graduaciones, es decir ± 7 . Así, por ejemplo, en el caso de la variable lingüística *edad* es frecuente considerar 8 graduaciones como: *niño, adolescente, joven, de edad media, mayor, viejo, muy viejo, viejísimo*.

7

Números difusos e intervalos difusos

7.1 Definición

La idea básica de un *número difuso* es que debe representar algún valor numérico, el cual ha sido definido imprecisamente (Bandemer y Gottwald, 1995). El principio de “desfusificación” de Goguen establece que una *cantidad difusa* es cualquier subconjunto difuso de la recta real R , es decir, cualquier elemento de $F(R)$ (Trillas *et al.*, 1995). Sin embargo, siendo más específicos, se debe definir a los números e intervalos difusos como:

Un número difuso A es una *cantidad difusa* $\mu_A : R \rightarrow [0,1]$ que satisface las siguientes condiciones :

a) A debe ser *convexo*. Una idea básica conectada con que un *número difuso* debe representar algún valor numérico determinado imprecisamente es que la función de pertenencia de un número difuso no debe tener distintos puntos máximos, es decir que los números difusos deben ser “*convexos*”.

b) μ_A está *normalizado*. Existe un x que pertenece a los R con $\mu_A(x)=1$ (Este punto x según Zimmermann (1996), se denomina “*valor medio*” de A)

Esta definición implica que los números difusos son simplemente conjuntos difusos reales A , para los cuales los α -cortes $A_\alpha = \{x \in X ; \mu_A(x) \geq \alpha\}$ son intervalos cerrados y acotados de la recta real.

Según algunos autores como Kaufmann y Gil (1993 y 1986), de entre todos los números difusos el que ofrece mayor facilidad en su utilización es el

número difuso triangular. Su singularidad consiste en que se halla definido por tres cantidades, una por debajo de la cual no va a descenderse, otra en que por encima no será posible llegar, y finalmente, aquella que representa el máximo nivel de presunción.

En la Figura 15 se presentan dos ejemplos de números difusos (Kacprzyk, 1997), el número difuso triangular “*alrededor de 4*” y el número difuso trapezoidal “*más o menos entre 5 y 7*”. El número trapezoidal se describe de mejor manera, por algunos autores, como un “*intervalo difuso*”; es el caso de Bandermer y Gottwald (1995) que expone la diferencia entre número e intervalo difuso.

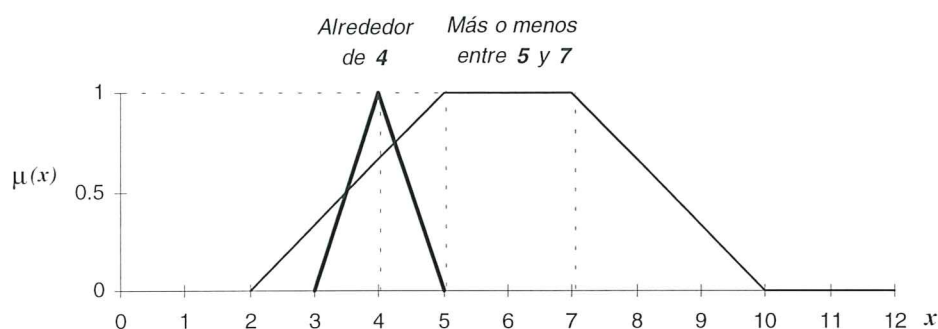


Figura 15 Número difuso triangular “*alrededor de 4*” y el número difuso trapezoidal (intervalo difuso) “*más o menos entre 5 y 7*”.

Bandermer y Gottwald (1996) describen el concepto de *intervalo difuso*, estableciendo la diferencia con el del *número difuso*, manifestando que un conjunto difuso $A \in F(R)$ se llama número (real) difuso, si A es convexo y si existe **exactamente** un número real a con $\mu_A(a)=1$. En el caso que A sea solamente convexo y normal, A se denomina *intervalo difuso*. Luego, cada número difuso es también un conjunto difuso unimodal y los intervalos difusos unimodales son exactamente los números difusos. Además, argumentan que los intervalos difusos generalizan la idea principal de intervalo aritmético basándose en decir que los intervalos quebrados (clásicos) han de tener, precisamente, puntos extremos fijos, pero que para los conjuntos e intervalos difusos se tiene una cierta imprecisión concerniente a la veracidad de sus puntos extremos.

Estudiando otros ejemplos de números difusos que no obedecen a formas triangulares y trapezoidales, Klir y Folger (1988) presentan un caso en que se generaliza a partir de la función de pertenencia de un “*número real cercano a 0*” (presentado en la **ecuación 15**) a una familia de funciones de pertenencia, representativas del conjunto de números cercanos a un número dado a como:

$$\mu_A(x) = \frac{1}{1 + 10(x-a)^2} \quad (17)$$

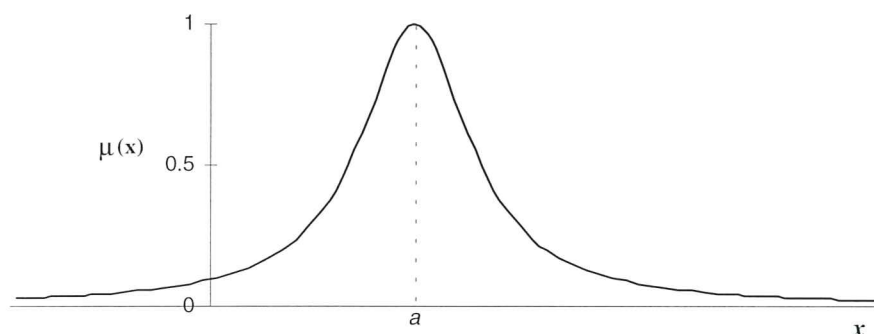


Figura 16 Número difuso “a”.

7.2 Ejemplos

Dado que en el ámbito de la ingeniería sísmica, se estudian problemas cuyas magnitudes se proyectan hacia el futuro, éstas no exigen, frecuentemente, una extrema precisión sino la mayor adaptación posible a la realidad. La definición de un nivel de daño en una estructura, después de ocurrido un sismo, no precisa de una gran exactitud sino que basta que refleje lo que sucedió en la realidad con una buena “*aproximación*”. Una estimación de pérdidas, después de ocurrido un sismo, no puede realizarse de una manera totalmente rígida, pues hay demasiados elementos que influyen en ella. De ahí, el interés en la utilización de los números difusos, en general, y de los triangulares, en particular.

Algunos ejemplos más prácticos en el campo estructural se encuentran en el trabajo de Ali (1998), el primero se refiere al cálculo de la capacidad de carga de una pila (el cual según análisis previos da un valor cercano a 20.000 kN). Como a efectos prácticos ingenieriles, un valor ligeramente cercano, por encima al calculado, no indicará necesariamente la falla de la pila, por ello se decide representar la incertidumbre de la capacidad de carga de la viga mediante un número difuso triangular, como el representado en la Figura 17:

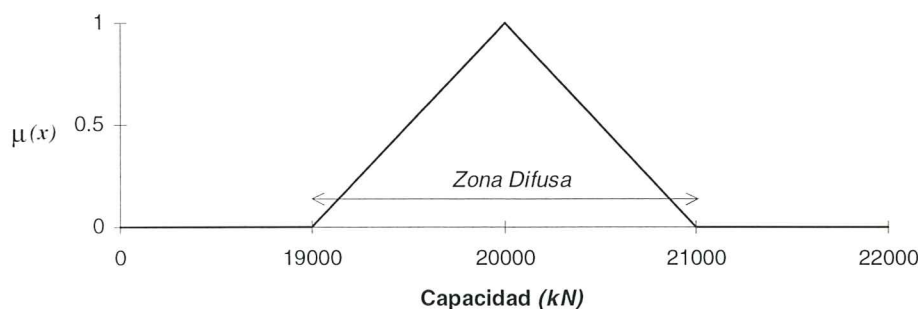


Figura 17 Representación de la capacidad de carga de una pila mediante un número difuso triangular.

La Figura citada indica que la región difusa de capacidad de carga calculada de la pila está comprendida entre 19.000 y 21.000 kN, siendo el valor más probable 20.000kN, el menos probable 19.000 kN no siendo permisible un valor mayor de 21.000 kN.

El segundo ejemplo consiste en la representación del amortiguamiento mediante un número difuso triangular como se muestra en la Figura 18, dado que se considera como una cantidad incierta (Ali, 1998):

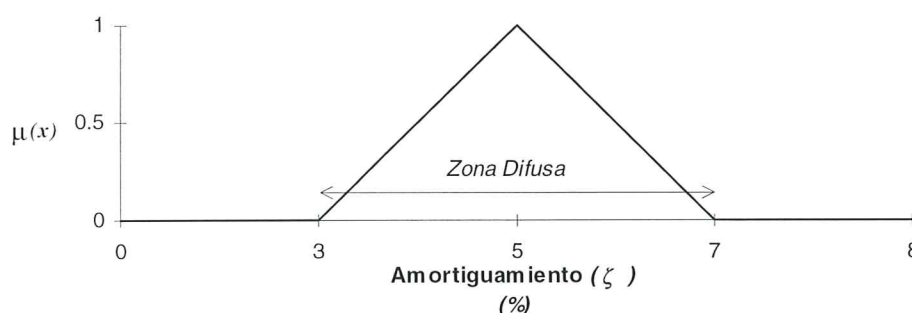


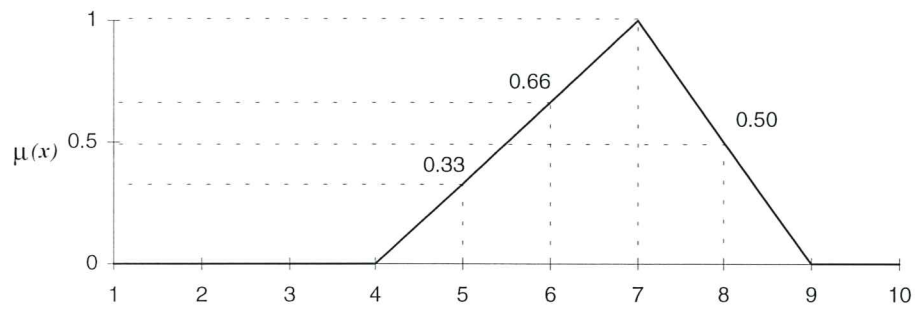
Figura 18 Representación del amortiguamiento mediante un número difuso triangular.

7.3 Construcción de un número difuso

Para ilustrar la construcción de un número difuso, se toma un ejemplo presentado por Bignoli (1997). En él, se expone que puede llegarse a tener una *idea clara* de lo que expresan los números, por ejemplo entre 0 y 10 [0,10], en el momento que se desea realizar algún tipo de evaluación cualificativa. Sin embargo, difícilmente se encontrarán, lo que Bignoli llama “*entes reales*” que respondan exactamente a nuestros conceptos, por lo cual se termina diciendo que el valor preferido para determinada evaluación es por ejemplo 7 “*menos que grande*”, aceptándose como máximo 9 “*muy grande*” y como mínimo 4 “*casi mediano*”.

Si se llama $\mu(x)$ al grado de aceptación de los valores $x=1,2,\dots,10$, y se establece que $0 \leq \mu(x) \leq 1$, se obtiene el número borroso $A(x)$ de la Figura 19, en el que se designa:

- Valor preferido, $x^* = 7$
- Valor mínimo, $x(\text{mín}) = 4$
- Valor máximo, $x(\text{máx}) = 9$
- Semirango inferior = $x^* - x(\text{mín})$
- Semirango superior = $x(\text{máx}) - x^*$
- Rango = $x(\text{máx}) - x(\text{mín})$

**Figura 19** Número difuso “7”.

con valores de pertenencia de:

$$\mu_A(4) = 0$$

$$\mu_A(7) = 1$$

$$\mu_A(9) = 0$$

8

Operaciones aritméticas con números e intervalos difusos

8.1. Definición

Además de la aritmética conectiva y de la aritmética ponderada (Trillas *et al.*, 1995), existe un tercer tipo de aritmética ligada a las cantidades o a los números borrosos.

Para calcular con números e intervalos difusos, primero se necesita la definición de las operaciones aritméticas básicas para ellos. Para ello, se aplica el principio de extensión (Zadeh, 1965). Luego la suma, multiplicación y la división de dos números o intervalos difusos se determinan como:

A partir de la definición de los conjuntos A y B como:

$$A = \{\mu(i) \mid i\} \quad (18)$$

$$B = \{\mu(j) \mid j\} \quad (19)$$

Donde $\mu(i)$ y $\mu(j)$ son los grados de pertenencia de los elementos i y j , respectivamente.

Las operaciones citadas se expresan como:

a) Adición

$$A + B = \max\{\min(\mu_A(i), \mu_B(j)) \mid [i + j]\} \quad (20)$$

b) Producto

$$A \cdot B = \max\{\min(\mu_A(i), \mu_B(j)) | [i \cdot j]\} \quad (21)$$

c) División

$$A \oplus B = \max\{\min(\mu_A(i), \mu_B(j)) | [i \oplus j]\} \quad (22)$$

Los conjuntos difusos resultantes de estas definiciones, son siempre intervalos difusos si A y B son intervalos, y son números difusos si A y B son números difusos.

Estas operaciones aritméticas para números e intervalos difusos, generalizan las operaciones aritméticas usuales para los números reales y también las operaciones de los intervalos aritméticos. Muchas de las leyes que se cumplen para la aritmética de números reales, se generalizan a estas operaciones para intervalos difusos, aunque no todas ellas. Para la adición y la multiplicación de intervalos difusos, se aplica la ley conmutativa y la asociativa (Bandemer y Gottwald, 1995).

Con los números difusos triangulares, se realizan las mismas operaciones habituales que las correspondientes a los números ordinarios, tales como sumas, restas, etc.. Cuando se realizan productos y divisiones, los resultados constituyen una aproximación triangular, dado que el número difuso resultante queda deformado. A medida que se van realizando operaciones con números difusos, tales como sumas, restas, etc., los números difusos se van ensanchando en términos absolutos, aunque no se produce un aumento de la desviación relativa (Kacprzyk, 1997).

8.2 Ejemplos

Para ilustrar mejor las operaciones aritméticas difusas, se presenta un ejemplo con los conjuntos difusos A y B :

$$A = \{0|1, 0|2, 0.5|3, 1|4\}$$

$$B = \{0|1, 1|2, 0.5|3, 0|4\}$$

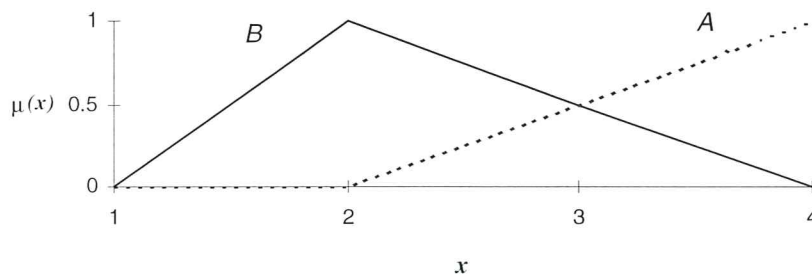
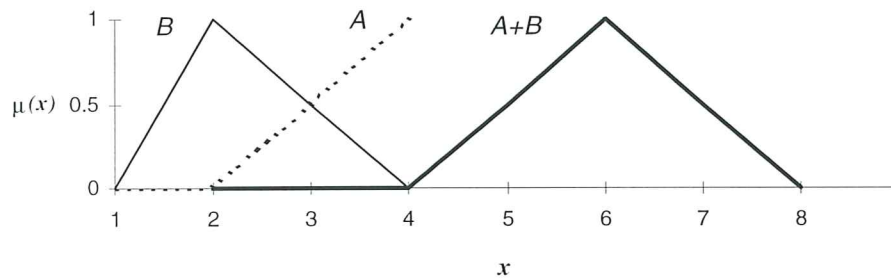


Figura 20 Representación de los conjuntos difusos A y B .

a) Adición

$$\begin{aligned}
 (A+B) = & \max\{\min(0,0)\backslash[1+1]\} \\
 & \max\{\min(0,1)\backslash[1+2], \min(0,0)\backslash[2+1]\} \\
 & \max\{\min(0,0.5)\backslash[1+3], \min(0,1)\backslash[2+2], \min(0.5,0)\backslash[3+1]\} \\
 & \max\{\min(0,0)\backslash[1+4], \min(0,0.5)\backslash[2+3], \min(1,0)\backslash[4+1], \\
 & \min(0.5,1)\backslash[3+2]\} \\
 & \max\{\min(0,0)\backslash[2+4], \min(1,1)\backslash[4+2], \min(0.5,0.5)\backslash[3+3]\} \\
 & \max\{\min(0.5,0)\backslash[3+4], \min(1,0.5)\backslash[4+3]\} \\
 & \max\{\min(1,0)\backslash[4+4]\}
 \end{aligned}$$

$$(A+B) = \{0\backslash2, 0\backslash3, 0\backslash4, 0.5\backslash5, 1\backslash6, 0.5\backslash7, 0\backslash8\}$$

**Figura 21** Representación del conjunto difuso resultante de $A + B$.**b) Producto**

$$\begin{aligned}
 (A \cdot B) = & \max\{\min(0,0)\backslash[1 \cdot 1]\} \\
 & \max\{\min(0,1)\backslash[1 \cdot 2], \min(0,0)\backslash[2 \cdot 1]\} \\
 & \max\{\min(0,0.5)\backslash[1 \cdot 3], \min(0.5,0)\backslash[3 \cdot 1]\} \\
 & \max\{\min(0,0)\backslash[1 \cdot 4], \min(0,1)\backslash[2 \cdot 2], \min(1,0)\backslash[4 \cdot 1]\} \\
 & \max\{\min(0,0.5)\backslash[2 \cdot 3], \min(0.5,1)\backslash[3 \cdot 2]\} \\
 & \max\{\min(0,0)\backslash[2 \cdot 4], \min(1,1)\backslash[4 \cdot 2]\} \\
 & \max\{\min(0.5,0.5)\backslash[3 \cdot 3]\} \\
 & \max\{\min(0.5,0)\backslash[3 \cdot 4], \min(1,0.5)\backslash[4 \cdot 3]\} \\
 & \max\{\min(1,0)\backslash[4 \cdot 4]\}
 \end{aligned}$$

$$(A \cdot B) = \{0\backslash1, 0\backslash2, 0\backslash3, 0\backslash4, 0.5\backslash6, 1\backslash8, 0.5\backslash9, 0.5\backslash12, 0\backslash16\}$$

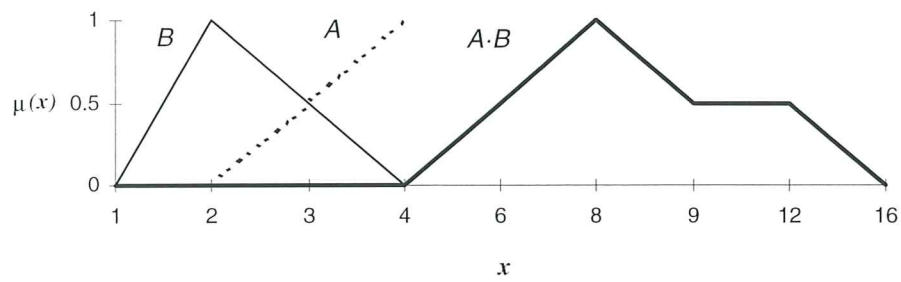


Figura 22 Representación del conjunto difuso resultante de $A \cdot B$.

c) División

$$(A \oplus B) = \begin{aligned} & \max\{\min(0,0)\backslash[1/1], \min(0,1)\backslash[2/2], \min(0.5,0.5)\backslash[3/3], \min(1,0)\backslash[4/4]\} \\ & \max\{\min(0,0)\backslash[2/1], \min(1,1)\backslash[4/2]\} \\ & \max\{\min(0.5,0)\backslash[3/1]\} \\ & \max\{\min(1,0)\backslash[4/1]\} \end{aligned}$$

$$(A \oplus B) = \{0.5\backslash 1, 1\backslash 2, 0\backslash 3, 0\backslash 4\}$$

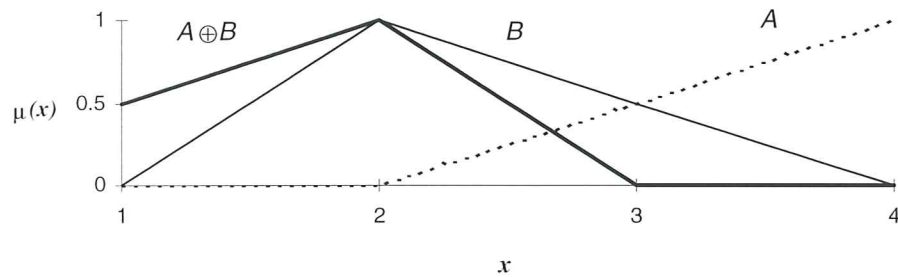


Figura 23 Representación del conjunto resultante de $A \oplus B$.

9

Peso promedio difuso

El método tradicional de combinar varias piezas de información no difusa con pesos desiguales, se denomina peso promedio. Éste se define como:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n W_i r_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (23)$$

donde R es el promedio de la secuencia de números, r_i es una secuencia de números, W_i es la secuencia de pesos y n es el número de elementos a considerar.

La definición de peso promedio puede extenderse para proveer un cálculo similar donde las dos entidades W_i y r_i son cantidades difusas (Tee *et al.*, 1988). De tal manera que el peso promedio con cantidades difusas requiere la adición, la multiplicación y la división difusas. Este modelo, a su vez, se analiza en un trabajo de toma de decisiones de multi - criterios en un ambiente con valores difusos y no difusos (Jones *et al.*, 1986).

El concepto de peso promedio difuso, o promedio ponderado difuso, se introduce en este capítulo dado que el *índice de vulnerabilidad sísmica* propuesto para *evaluar la vulnerabilidad sísmica de los puentes* obedece precisamente a un promedio entre las calificaciones de cada uno de los 19 parámetros seleccionados (expuestos en el capítulo 4) y los valores de importancia de cada uno de ellos. En el capítulo siguiente, se presentan mayores detalles de los cálculos seguidos para desarrollar y aplicar este tipo de promedio.

Igualmente, este peso promedio difuso ha sido utilizado para evaluar un índice de daño en pavimentos (Grivas *et al.*, 1995) a partir de los conjuntos difusos de varios niveles de daños individuales y de los valores de peso, que

representan la importancia relativa de cada componente del pavimento en la condición total de la estructura. A su vez, Tee *et al.* (1988) incorporan en su modelo de inspección de puentes, la expresión de *peso promedio difuso* para evaluar la condición o estado del puente. En ella, el valor r_i de la **ecuación 23** corresponde a la opinión de la condición del elemento i suministrada por el inspector de campo y, los valores w_i son los valores de la importancia estructural asociados con la clasificación del elemento i respecto a la clasificación total del puente.

10

Distancia entre conjuntos

Una vez calculado el peso promedio difuso, mediante operaciones como la suma, multiplicación y la división difusas se obtiene un conjunto difuso. De tal manera que para interpretar mejor lo obtenido, generalmente, se requiere transformar el conjunto difuso resultante a una expresión del lenguaje natural. Dicha transformación puede ser un proceso relativamente simple si se involucra la determinación de la distancia entre un conjunto difuso dado (resultante) y los conjuntos que representan cada una de las posibles expresiones del lenguaje natural (variables lingüísticas).

En general, la distancia entre dos conjuntos difusos A y C se puede definir utilizando diversas medidas, siendo las más frecuentes las siguientes (Martín del Brío y Sanz, 1997; Zimmermann, 1996; Klir y Folger, 1988). Las expresiones que la regulan son las siguientes:

a) Hamming

$$Distancia (A, C) = \sum_x^n (\mu_A(x) - \mu_C(x)) \quad (24)$$

b) Euclídea

$$Distancia (A, C) = \left[\sum_x^n (\mu_A(x) - \mu_C(x))^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (25)$$

c) Minkowski

$$Distancia (A, C) = \left[\sum_x^n (\mu_A(x) - \mu_C(x))^w \right]^{\frac{1}{w}} \quad \text{con } w \in [1, \infty] \quad (26)$$

Para visualizar mejor la aplicación del concepto de *distancia entre conjuntos difusos* se presenta un ejemplo de Tee *et al.* (1988), donde se transforma un conjunto difuso R a una variable lingüística en el rango de “bueno”, “normal” o “pobre”.

La necesidad de esta transformación surge, debido, a que después de haber realizado la inspección de la condición de cada uno de los elementos del tablero, la superestructura y subestructura de un puente, se evalúa la condición final de toda la estructura mediante operaciones difusas, dando como resultado un conjunto difuso R , resultado que se presenta mediante una expresión lingüística identificando la condición de puente como *bueno*, *normal* o *pobre*.

Es así, que para ilustrar el ejemplo, R es el conjunto difuso resultante de evaluar la condición de un puente, y B , J y P son los conjuntos difusos que representan a las variables lingüísticas “bueno”, “normal” y “pobre”, respectivamente, correspondiendo a:

$$R = \{0|1, 0|2, 1|3, 0.6|4, 0|5\}$$

$$B = \{0|1, 0|2, 0|3, 0.5|4, 1|5\}$$

$$N = \{0|1, 0|2, 1|3, 0.5|4, 0|5\}$$

$$P = \{0|1, 1|2, 0|3, 0|4, 0|5\}$$

De ello, la distancia entre el conjunto difuso resultante R y la variable lingüística “pobre”, P , puede calcularse mediante la distancia Euclídea, como:

$$Distancia(R, P) = \left[\sum_i^n (\mu_R(i) - \mu_P(i))^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (27)$$

$$Distancia(R, P) = 1.5362$$

Repitiendo este cálculo para los otros dos conjuntos difusos, B y N , se llega a determinar los dos valores de distancias entre conjuntos (R, B) y (R, N) faltantes:

$$Distancia(R, B) = 1.4177$$

$$Distancia(R, N) = 0.1000$$

Al comparar las distancias entre el conjunto R y los conjuntos B , N y P , la mínima distancia se encuentra entre los conjuntos (R, N), con lo cual se puede concluir que el puente en cuestión se puede clasificar con una condición “normal”. Es decir, la mínima distancia entre el conjunto difuso dado y los conjuntos que representan las variables lingüísticas consideradas, es la expresión lingüística que se puede dar como resultado.

11

El problema de la defusificación

Los sistemas basados en sistemas difusos, generalmente, originan resultados apoyados en sus reglas lingüísticas, que corresponden a conjuntos difusos. Pero en muchas de las aplicaciones, los resultados que se requieren son precisamente los “no difusos”. Para transformar los resultados difusos en no difusos, se ha desarrollado la *defusificación*. Siendo el defusificador la función que transforma un conjunto difuso, el cual normalmente corresponde a la salida de un dispositivo de inferencia difusa, en un valor no difuso. Para esta tarea existen diversos métodos, que se pueden resumir en los procedimientos siguientes (Bandemer y Gottwald, 1995; Runkler, 1997):

11.1 Procedimiento máximo

La forma más simple es el llamado *procedimiento-máximo*. En él, se supone que la función de pertenencia μ_B de la salida difusa B tiene un punto máximo simple, tomando a continuación el valor de defusificación ($y_0(B)$) el argumento (abscisa) en este punto máximo:

$$y_0(B) = \arg \max \{ \mu_B(y) \mid y \in Y \} \quad (28)$$

No obstante, esta presunción es poco específica. Si μ_B tiene varios valores máximos, se tendrá más de un punto máximo. En estos casos, se puede empezar el proceso con el conjunto B_{max} de todos los argumentos de puntos máximos de μ_B

$$B_{max} = \{ y \in Y \mid \mu(y) = \max_{z \in Y} \mu_B(z) \} \quad (29)$$

La idea es que B_{max} es el conjunto de decisiones óptimas. Debiéndose, finalmente, escoger uno de ellos.

Una de las formas de escoger una decisión final es el seleccionar un elemento de B_{max} aleatoriamente, de tal forma que se presupone que todos los elementos de B_{max} corresponden a decisiones igualmente buenas. La interpretación de que los puntos que están fuera de B_{max} no son óptimos se entiende, frecuentemente, como una indicación de que $y_0(B)$ no debe corresponder a la región del borde de B_{max} , preferiblemente de la mitad de ella.

Si se supone, adicionalmente, que el universo del discurso Y de la variable de salida v , es un conjunto de números, $Y \subseteq R$, otra propuesta es tomar el valor medio de B_{max} . En el caso de que B_{max} sea un conjunto finito, el valor medio vendrá dado por:

$$y_0(B) = \frac{1}{N} \sum_{y \in B_{max}} y \quad (30)$$

Siendo N , el número de elementos de B_{max} (cardinal).

Pero se debe tener cuidado aquí, ya que un valor medio de B_{max} puede ser una decisión preferible en el caso que B_{max} sea un intervalo en Y , pero siempre se debe reflexionar sobre la decisión finalmente tomada.

11.2 Centro de gravedad

Otra desventaja de cualquier tipo de procedimiento máximo es que se ignora toda la información concerniente a la función de pertenencia μ_B fuera de B_{max} . Una forma de considerar toda la función de pertenencia es utilizar el procedimiento del *centro de gravedad (COG)*, el cual corresponde a una estrategia de valor medio. Éste valor, que determina $y_0(B)$, se toma como la media de los pesos de todo el $supp(B)$ (los argumentos del conjunto difuso cuyas funciones de pertenencia son mayores que cero) como:

$$y_0(B) = \frac{1}{card(B)} \sum_{y \in B_{max}} y \mu_B(y) \quad (31)$$

Siendo $card(B)$ la suma de las funciones de pertenencia $\mu_B(y)$.

11.3 Otros métodos

Se puede utilizar otros métodos como el centroide aproximado, el centro de área y operadores paramétricos (Runkler, 1997), demostrándose que los métodos de defusificación estándar fallan en algunas de sus aplicaciones, debido a que el

desfusificador no se selecciona apropiadamente. De aquí, la importancia de seleccionar el método de desfusificación dependiendo de la aplicación.

Para la selección del *método de desfusificación* apropiado, se han realizado varios trabajos como los de Runkler (1997), donde se exponen algunos de los métodos más importantes (como los descritos anteriormente) y, a su vez, se ilustra cómo seleccionar apropiadamente el desfusificador usando las propiedades específicas de aplicación.

El concepto de “desfusificador”, se ha introducido en este capítulo, con la finalidad de estudiar la forma de transformar la función de pertenencia resultante del cálculo de promedio ponderado difuso (con el cual se define el índice de vulnerabilidad sísmica de los puentes) a un valor numérico. Esto se realiza para, posteriormente, ser utilizado en procesos donde se requiere comparar los índices de vulnerabilidad de una muestra de puentes, o para relacionarlos con los respectivos niveles de daño ante un evento específico.

12

Resumen

Mediante el estudio teórico de las bases formales requeridas para desarrollar un modelo de “*evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes*”, basado en conjuntos difusos, se llega a las siguientes consideraciones:

1. La teoría difusa es una teoría matemática que abarca un aspecto de incertidumbre. Lo difuso es la ambigüedad que se puede encontrar en la definición de un concepto o en el significado de una palabra. Por ejemplo, las expresiones como: “*pila severamente dañada*”, “*fisura pequeña*”, “*estructura funcionalmente obsoleta*”, “*baja seguridad*”, “*viga medianamente resistente*”, “*suelo altamente licuefactable*”, pueden llamarse difusas.
2. Una variable lingüística, es aquella cuyos valores son palabras o sentencias del lenguaje natural, como la *edad*, *peso*, *altura*, *daño*, *capacidad*, *vulnerabilidad* *nada*, *poco*, *mucho*, *positivo*, *negativo*, *bueno*, *malo*, etc.
3. La teoría de conjuntos difusos parte de la teoría clásica de conjuntos, añadiendo una función de pertenencia al conjunto, definida como un número real entre 0 y 1. Así, se introduce el concepto de conjunto difuso asociado a un determinado valor lingüístico, definido por una palabra, adjetivo o etiqueta lingüística. Los conjuntos difusos permiten agrupar objetos o sucesos de acuerdo al valor de una cierta magnitud. Por ejemplo, los puentes pueden estar agrupadas de acuerdo a su edad. De tal manera que si definimos el *conjunto clásico (no difuso)* de los puentes viejos como los construidos antes de 1965, resulta que un puente construido en 1964 es viejo, mientras que uno de 1966 no lo es. Debido a que la diferencia entre las dos estructuras en edad es tan solo de dos años, la definición de puente viejo y no viejo, según la teoría clásica de

conjuntos, no es satisfactoria. Por ello, una descripción en términos de conjuntos difusos resulta más adecuada; por ejemplo, podrían introducirse los términos *viejo*, *medio* y *joven* y definirse mediante funciones de pertenencia, las cuales al variar de forma continua en el rango de 0 a 1 indicarán que un puente es viejo cuando se acerca a un valor de pertenencia de 1.

4. La función de pertenencia no es única y depende tanto del universo sobre el que se considera como de los observadores que la constituyen. Para su definición, se utilizan convencionalmente, ciertas familias de forma estándar, siendo las más frecuentes: la función de tipo trapezoidal, la singleton, la triangular, la S, la exponencial y la tipo π . Su construcción requiere usar técnicas interdisciplinarias como muestreo y cálculo frecuencial, en el sentido clásico estadístico, teoría de la medición o de magnitudes, teoría de los índices y teoría de la decisión. Es importante, de cara a las aplicaciones, que la función de pertenencia sea lo más sencilla posible y describible mediante la mínima cantidad de números.
5. El concepto de peso promedio difuso, o promedio ponderado difuso, se incorpora en este trabajo ya que existen modelos, como el expuesto en la segunda parte de la monografía, que involucran un *índice de vulnerabilidad sísmica* para *evaluar la vulnerabilidad sísmica de los puentes*, obedeciendo precisamente a la combinación de varias piezas de información difusa (grados de vulnerabilidad de los parámetros) con pesos desiguales (valores de importancia de cada parámetro).
6. La idea básica de un número difuso, es que debe representar algún valor numérico el cual ha sido definido imprecisamente. Éste es el caso de los valores de los grados de vulnerabilidad de cada uno de los parámetros y de sus valores de importancia.
La manera más sencilla de representar un número difuso, es mediante una función de pertenencia triangular, que requiera solamente tres parámetros numéricos, a , b y c , siendo b menor que a y mayor que c . Los tres valores pueden determinarse a partir de opiniones de especialistas, las cuales se representan en un histograma y, posteriormente, se transforman en funciones de pertenencia. Es así, como el eje vertical de cada histograma, representado por el "número de respuestas" correspondientes a una clasificación específica, se interpreta como la "confianza" acerca del valor de clasificación seleccionado. De tal manera, que los parámetros a y c (valor de pertenencia igual a 0) representan los valores de confianza más baja, y el parámetro b (con un valor de pertenencia de 1) representa el de máxima confianza.
1. Las operaciones con números difusos, como es el caso del promedio ponderado difuso, proporcionan como resultado una función de pertenencia que debe ser

interpretada y, para ello, es necesario transformarla, o bien a una expresión del lenguaje natural, o a un valor numérico.

La transformación a una expresión lingüística puede ser un proceso relativamente simple si se involucra la determinación de la distancia entre el conjunto difuso resultante y los conjuntos que representan a cada una de las posibles expresiones del lenguaje natural. Es decir, la mínima distancia entre el conjunto difuso resultante y los conjuntos que representan las variables lingüísticas consideradas, representará la expresión lingüística que se puede dar como solución.

Así pues, el paso del conjunto difuso a un valor no difuso se puede realizar mediante el proceso de “desfusificación”, existiendo diferentes métodos para ello, como el procedimiento máximo, el centro de gravedad y el centro de área entre otros. El más sencillo de todos es el *procedimiento máximo*, en el cual se supone como valor no difuso de respuesta el argumento (abscisa) del punto máximo de la función de pertenencia. En caso de existir más de un punto máximo, se toma el valor promedio entre los diferentes máximos, si éstos están en un intervalo.

REFERENCIAS

- Ali, M.A. (1998). "Utilizing fuzzy logic for the seismic assessment of bridge piers", *11th European Conference on Earthquake Engineering*, Paris, abstract 571.
- Bandemer, H. y Gottwald, S. (1995). *Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, Fuzzy Methods with Applications*, John Wiley & Sons, England, 239 pg.
- Bezdek, J. (1993). "Fuzzy Models-What Are They, and why ?", *Transactions on Fuzzy Systems*, IEEE, **1(1)**, 1-5.
- Bignoli, A. J. (1997). "Lógica borrosa "Naïve". Aplicaciones a problemas estructurales", *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, **13(1)**, 33-55.
- Blockey, (1978). "Analysis of Subjective Assessments of Structural Failures", *International Journal of Man-Machine Studies*, **10**, 185-195.
- Boules, J. B. y Peláez, C. E. (1995). "Application of Fuzzy Logic to Reliability Engineering", *Proceedings of the IEEE*, **83(3)**, 435-449.
- Brown, C., Yao y James T.P. (1983). "Fuzzy Sets and Structural Engineering", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, **109(5)**, 1211-1225.
- Chou, K.C. y Yuan, J. (1993). "Fuzzy-Bayesian Approach to Reliability of Existing Structures", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, **119(11)**, 3276-3290.
- Corotis, R. B., Fox, R. R. y Harris, J. C. (1981). "Delphi Methods: Theory and Design Load Application", *Journal of the Structural Division*, ASCE, **106 (ST6)**, 1095-1105.
- Dubois, D. y Prade, H. (1980). *Fuzzy Sets and Systems (Theory and Applications)*, Academic Press, Mathematics in Science and Engineering, **144**.
- García, Alfonso (1991). "Aplicaciones actuales de la lógica borrosa", *Automática e Instrumentación*, **216**, 113-119.

- Grivas, D.A., Shen, Y.C. y Schultz, B.C. (1995). "Damage assessment methodologies for civil infrastructure", *Applications of Statistics and Probability*, Lemaire, Favre & Mérbarki (eds), Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5410563 1, 747-752.
- Jones, A., Kaufmann, A. y Zimmermann, H.J. (editores) (1986). "Fuzzy Sets Theory and Applications", *D.Reidel Publishing Company y NATO ASI Series*, Series C: Mathematical and Physical Sciences, **177**, 403 pg.
- Kacprzyk, J. (1997). *Multistage Fuzzy Control, A model-based approach to fuzzy control and decision making*, John Wiley & Sons, England, 327 pg.
- Kaufmann, A. y Gil Aluja, J. (1993). *Técnicas especiales para la gestión de expertos*, Editorial Milladoiro, Vigo, 376 pg.
- Kaufmann, A. y Gil Aluja, J. (1986). *Introducción de la teoría de los subconjuntos borrosos a la gestión de las empresas*, Editorial Milladoiro, Santiago de Compostela, 245 pg.
- Kikuchi, S. y Pursula, M. (1998). "Treatment of Uncertainty in Study of Transportation: Fuzzy Set Theory and Evidence Theory", *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, **124(1)**, 1-8.
- Klir, G. y Folger, T.A. (1988). *Fuzzy sets, uncertainty, and information*, Prentice Hall P T R, New Jersey, 355 pg.
- Kosko, B. (1995). *Pensamiento Borroso*, Crítica, Barcelona, 301 pg.
- Martín del Brio, B. y Sanz, A. (1997). *Redes neuronales y sistemas borrosos. Introducción teórica y práctica*, Rama editorial, Madrid, 387 pg.
- Manton, K. G., Woodbury, M. A. y Tolley, H. D. (1994). *Statistical applications using fuzzy sets*, John Wiley & Sons, inc., New York, 312 pg.
- Runkler, T. A. (1997). "Selection of Appropriate Defuzzification Methods Using Application Specific Properties", *Transactions on Fuzzy Systems*, IEEE, **5(1)**, 72-79.
- Shiraishi, N. y Furuta, H. (1983). "Reliability Analysis Based on Fuzzy Probability", *Journal of Engineering Mechanics*, **109(6)**, 1446-1459.

- Souflis, C. y Grivas, D. A. (1986). "Fuzzy Set Approach to Linguistic Seismic Load and Damage Assessments", *Journal of Engineering Mechanics*, **112**(6), 605-518.
- Symans, M. D. y Kelly, S. W. (1999). "Fuzzy logic control of bridge structures using intelligent semi-active seismic isolation systems", *Earthquake Engineering and Dynamic Structural*, **28**, 37-60.
- 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.
- Teodorovic, D. (1999). "Fuzzy logic systems for transportation engineering: the state of the art", *Transportation Research Part A* **33**, 337-364.
- Terano, T., Asai, K. y Sugeno, M. (1992). *Fuzzy Systems Theory and Its Applications*, Academic Press, Boston, 268 pg.
- Tremosa, L. (1991). "Control difuso: aplicaciones muy diversas", *Automática e Instrumentación*, **218**, 80-81.
- Trillas, E., Alsina, C. y Terricabras, J. (1995). *Introducción a la lógica borrosa*, Editorial Ariel, Barcelona, 226 pg.
- Trillas, E., Gutiérrez, J. (1992). *Aplicaciones de la lógica borrosa*, editores Enric Trillas y Julio Gutiérrez, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, C.S.I.C., Madrid, 226 pg.
- Trillas, E. (1980). *Conjuntos borrosos*, primera edición, editorial Vicens-Vives, Barcelona, 181 pg.
- Yao, J.T.P. (1980). "Damage Assessment of Existing Structures", *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, **106 (EM4)**, 785-799.
- Yao, J.T.P. (1982). "Probabilistic Methods for the Evaluation of Seismic Damage of Existing Structures", *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, **1**, 130-135.
- Zadeh, L. (1996). "Fuzzy Logic=Computing with Words", *Transactions on Fuzzy Systems*, IEEE, **4**(2), 103-111.
- Zadeh, L. (1965). "Fuzzy Sets", *Information and Control*, **8**, 338-353.
- Zhao, G., Yungui, L. Y Wang, H. (1995). "Application of fuzzy-random

probability theory to structural reliability”, Lemaire, Favre y Mébarki (eds), Balkema, Rotterdam, 747-752.

Zimmermann, H.J. (1996). *Fuzzy set theory and its Applications*, third edition, Kluwer Academic Publishers, Boston, 435 pg.

SEGUNDA PARTE

EJEMPLOS DE UTILIZACIÓN DE LA OPINIÓN DE EXPERTOS EN MODELOS DE VULNERABILIDAD SÍSMICA DE PUENTES

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

Esta metodología ofrece un modelo rápido y sencillo de evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes a escala regional (Maldonado *et al.*, 2000 c). 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 de cinco países. Debido a las impresiones 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*”. Finalmente el método fue calibrado mediante una muestra de trece puentes, los cuales resultaron afectados en distintas escalas de daño, durante el sismo de Northridge del 17 de enero de 1994.

1.1 Determinación de los parámetros del modelo

Basados en estudios realizados sobre el comportamiento sísmico de puentes (Maldonado *et al.*, 1998 a y b), experiencias posterremotos, estudios de modelos existentes (Maldonado *et al.*, 1998 c); Kiremidjian y Băsoz, 1996; Ren y Gaus, 1996; Pezeshk *et al.*, 1993 y ATC 6-2, 1983) y opiniones de expertos se ha realizado la selección de diecinueve parámetros considerados como los que más influyen en la determinación de la vulnerabilidad sísmica de los puentes:

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 a y b), se estudian las principales características estructurales de los puentes que definen su respuesta ante la acción sísmica. Para plasmar las conclusiones obtenidas, se toma una pequeña pero representativa muestra de puentes, y con ella se definen algunos de los parámetros que influyeron 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 sobre los que se sacaron algunos parámetros esta compuesta de seis puentes. Los cuatro primeros corresponden a estructuras que en el momento de realizar su estudio estaban muy próximas a su construcción y, las dos últimas, eran estructuras existentes. Por ello sobre las estructuras proyectadas se pudo realizar un análisis más completo de tal manera que las conclusiones sirvieran para las decisiones finales en su diseño y construcción. En las estructuras existentes se evaluó el comportamiento de la estructura, realizando análisis dinámicos utilizando herramientas computacionales existentes (Wilson, 1986; Imbsen *et al.*, 1988 y Wilson y Habibullah, 1994) y sobre ellos se pudo ver la forma de influencia en la respuesta de sus elementos como pilas, apoyos y juntas. Como conclusiones finales se obtuvieron como parámetros de mayor influencia en la respuesta ante el sismo los siguientes: existencia de articulaciones internas, tipo de pilas, tipo de fundación, sistema de apoyo superestructura a subestructura, forma de la superestructura, regularidad longitudinal del puente.

2. Estudios sobre metodologías existentes de evaluación sísmica de puentes. De las diferentes metodologías existentes de evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes se escogieron cuatro modelos, Kiremidjian y Basöz (1997), Ren y Gaus (1996), Pezeshk *et al.* (1993), ATC 6-2 (1983). Se realizó un estudio comparativo en lo referente a los parámetros que ellos consideran en su modelo y como conclusiones se sacaron aquellos que se estiman en más de un modelo, siendo estos: tipo de estribo, tipo de superestructura, tipo de subestructura, forma de la superestructura (ángulo de esviaje), tipo de fundación en pilas y estribos, historia de reforzamiento sísmico del puente, año de diseño, reforzamiento 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.

3. Experiencias posterremotos. De las lecciones de sismos pasados, en lo referente a puentes, se puede extraer las características que los hicieron vulnerables a la acción sísmica. Por esto se han escogido cuatro sismos: el de San Fernando en 1971 (National Oceanic and Atmospheric Administration Washington, 1973), el de Loma Prieta en 1989 (Bertero, 1992 y Benuska, 1990), el de Northridge en 1994 (Hall, 1995; Astanesh-Asl *et al.*, 1994; Buckle, 1994; Priestley *et al.*, 1994) y el de Kobe en 1995 (Shinosuka, 1995; Committee on Highway Bridge Damage Caused by the Hyogo-Ken Nanbu Earthquake, 1995),

para complementar el estudio de la influencia de las características estructurales de los puentes en su vulnerabilidad sísmica.

Al comparar los daños causados por cada uno de los cuatro anteriores sismos en los puentes, se determinaron las características (parámetros) que hicieron a estas estructuras más vulnerables a la acción del sismo, siendo éstas: refuerzo en pilas, especificaciones de diseño, tipo de estribo, forma de la superestructura (ángulo de esviaje), detalle de uniones, existencia de articulaciones internas, longitud de apoyos, tipo de pilas, asentamiento del terreno de relleno de estribos, revisión técnica entre diseño y construcción, potencial de licuefacción.

4. Opinión de expertos. En base al estudio de los tres numerales anteriores se realizó una primera selección de 17 parámetros, los cuales se dividieron a su vez en varias categorías, y de esta manera se pidió a 50 expertos sus opiniones acerca tanto de su consideración, como de su grado de vulnerabilidad. De los cincuenta expertos se recibió respuesta de veinticinco, y con sus aportes se redefinieron los parámetros a considerar, quedando finalmente 19 parámetros (Maldonado *et al.*, 2000 a).

Los expertos, en sus opiniones, consideraron otros parámetros de más como importantes en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de un puente, estos fueron analizados y reconsiderados en los ya propuestos, pero algunos de ellos si fueron finalmente considerados.

1.1.1 Parámetros seleccionados

En base a los cuatro estudios realizados se escogieron los parámetros de mayor influencia en la vulnerabilidad sísmica de puentes. Los parámetros seleccionados son los siguientes:

- 1) Año de proyecto y construcción del puente
- 2) Tipo de superestructura
- 3) Forma de la superestructura
- 4) Existencia de articulaciones internas
- 5) Material de la superestructura
- 6) Tipo de pila
- 7) Tipo de cimentación
- 8) Material de las pilas
- 9) Irregularidad longitudinal en geometría o rigidez
- 10) Longitud de apoyo en pilas
- 11) Tipo de suelo
- 12) Tipo de estribo
- 13) Longitud de apoyo en estribos
- 14) Tipo de aparato de apoyo
- 15) Estado de conservación del puente
- 16) Procedimiento constructivo de la superestructura (hormigón)

17) Procedimiento constructivo de las pilas (hormigón)

18) Potencial de licuefacción

19) Elementos no estructurales

1.1.2 Determinación del grado de vulnerabilidad de las condiciones de calidad de cada parámetro

Una vez identificados los diferentes parámetros que pueden influir en la vulnerabilidad de los puentes y definido 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 tuvo como finalidad el 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 fue dividido en tres a cuatro condiciones de calidad (**A**, **B**, **C** y **D**) y, sobre cada uno de ellos se preguntó el grado de vulnerabilidad que se creía era el más conveniente.

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

Se exponen a continuación, el primer parámetro, con sus correspondientes categorías, la **A** equivale a la de *menor vulnerabilidad* y a la **D** se le asigna el *mayor grado de vulnerabilidad sísmica*.

1. Año de proyecto y construcción. El año de proyecto y construcción de un puente nos puede decir que especificaciones de proyecto fueron empleadas en su realización, incluso podemos saber si fue proyectado bajo normativas sísmicas o no. Las categorías para estos parámetros son:

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:

A : Después de 1995

B : Entre 1975 y 1994

C : Entre 1968 y 1974

D : Antes de 1968

1.2 Descripción del modelo propuesto

El método propuesto constituye una descripción completa de la información necesaria para obtener una expresión cuantitativa de la vulnerabilidad sísmica de puentes llamado “*Índice de vulnerabilidad*”. El cálculo del índice de vulnerabilidad se basa en la relación del grado de vulnerabilidad de cada uno de los 19 parámetros con sus respectivos valores de importancia. Dado que el modelo esta basado en opiniones de expertos, la cual cuenta con información subjetiva e imprecisa, se utilizó técnicas de conjuntos difusos. La aritmética difusa (Bandemer y Gottwald, 1995) se utilizó 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 peso o importancia es el llamado “*peso promedio*” y, fue el utilizado en esta investigación para calcular el “*índice de vulnerabilidad sísmica de puentes*”, el cual se expresa como:

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

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 con el parámetro i con respecto a los demás parámetros.

1.3 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 a través de los siguientes pasos:

- 1) Traslación de las variables de calificación de cada una de las condiciones de calidad de los diecinueve parámetros a conjuntos difusos mediante el uso de las funciones de pertenencia,
- 2) Conversión de las variables de importancia de cada parámetro a conjuntos difusos mediante las funciones de pertenencia,
- 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 ecuación 1,

- 4) Transformación del conjunto difuso resultante, “índice de vulnerabilidad” a una expresión lingüística como “nada”, “poco”, “medianamente”, “muy” y “absolutamente” vulnerable,
- 5) Asociación a la variable lingüística del índice de vulnerabilidad calculado de un valor numérico no difuso.

Para ejecutar los pasos anteriores en el cálculo del grado de vulnerabilidad de un puente se desarrolló un programa, **INDICE** (Maldonado, 2000 c), que involucra las funciones de pertenencia de acuerdo a las opiniones de los expertos ya obtenidas y desarrolla básicamente los pasos 3, 4 y 5 expuestos en el algoritmo anterior.

1.4 Variables lingüísticas utilizadas

Dentro del algoritmo de desarrollo del índice de vulnerabilidad mediante la utilización de opiniones de expertos fue necesario definir las variables lingüísticas (“nada”, “poco”, “medianamente”, “muy” y “absolutamente” vulnerable) para describir los diferentes grados de vulnerabilidad. La representación gráfica de las funciones de pertenencia de las variables lingüísticas utilizadas en este estudio es:

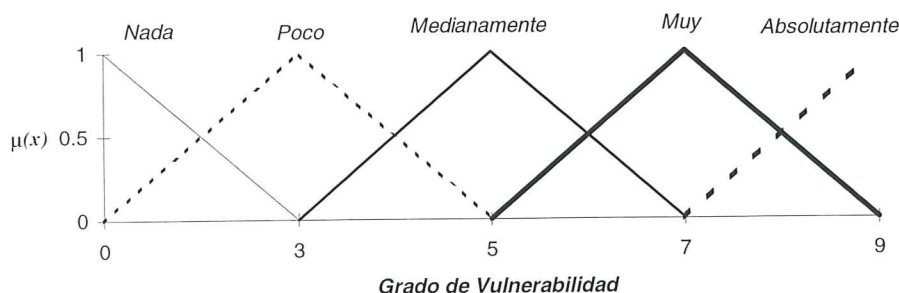


Figura 1. Funciones de pertenencia de las variables lingüísticas.

1.5 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 los cinco países. Los valores de pertenencia se calcularon en base al número de respuestas favorables de cada clasificación particular (Tee *et al.*, 1988). Un paso importante en la definición de las funciones de pertenencia fue la corrección de dichas funciones de tal manera que se cumpliera en cada una de ellas la propiedad de convexidad y normalización (Bandemer y Gottwald, 1995). A su vez, dada la subjetividad y ambigüedad de las opiniones de los expertos, muchas de las respuestas estuvieron encasilladas dentro de los grados de vulnerabilidad de poco

a medianamente vulnerable. De aquí que las funciones de pertenencia construidas originalmente fueran corregidas de acorde con la forma de cálculo de índice de vulnerabilidad propuesto.

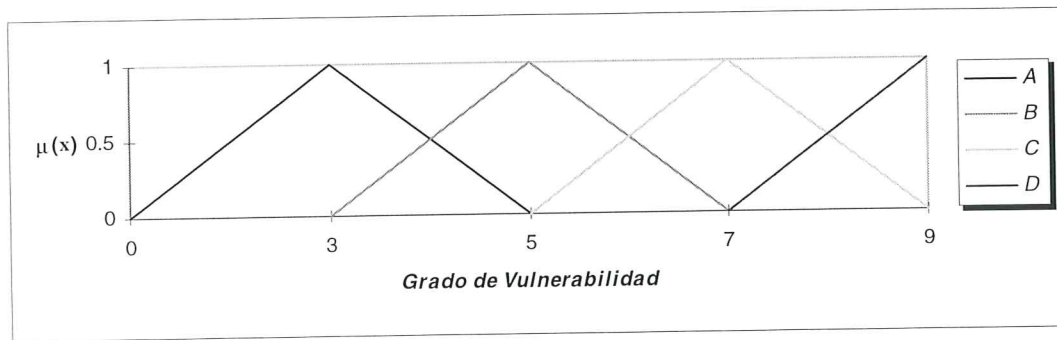
Finalmente se obtuvieron las cuatro funciones de pertenencia de cada uno de los diecinueve parámetros y las funciones de pertenencia de los respectivos pesos. A manera de ilustración se presentan en la figura 2 las funciones de pertenencia para el parámetro K_I , "Año de proyecto y construcción del puente", correspondiendo 0 a *nada vulnerable* y 9 a *absolutamente vulnerable* en la Figura a y siendo 0 como *nada importante* y 10 como *máxima importancia*, en la Figura b.

$$A = \{0|0, 1|3, 0|5, 0|7, 0|9\}$$

$$B = \{0|0, 0|3, 1|5, 0|7, 0|9\}$$

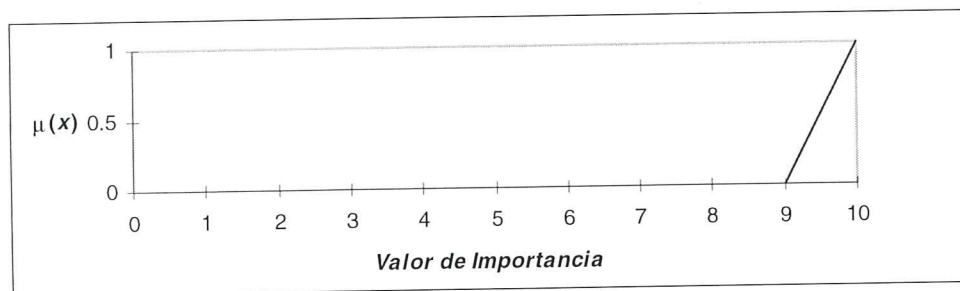
$$C = \{0|0, 0|3, 0|5, 1|7, 0|9\}$$

$$D = \{0|0, 0|3, 0|5, 0|7, 1|9\}$$



a. Funciones de pertenencia del grado de vulnerabilidad de las condiciones de calidad del parámetro K_I .

$$E = \{0|0, 0|1, 0|2, 0|3, 0|4, 0|5, 0|6, 0|7, 0|8, 0|9, 1|10\}$$



b. Funciones de pertenencia del valor de importancia del parámetro K_I .

Figura 2. Funciones de pertenencia del parámetro K_I .

1.6 Calibración del modelo

Para estudiar la fiabilidad del método propuesto se realizó su calibración a partir de una muestra de trece puentes los cuales alcanzaron algún nivel de daño durante el sismo de Northridge de 1994 en California. Los puentes escogidos obedecen a estructuras bien documentadas antes y después del sismo, en las que se abarca tanto puentes en hormigón como puentes mixtos (hormigón-acero). Algunos sufrieron daños que llegaron al colapso y otros tan solo pequeños daños. Los datos necesarios para la calibración requerían 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 encontraban los puentes. Por lo anterior, la mejor documentación encontrada fue la de puentes dañados por el sismo de Northridge (Hall, 1995; Astanesh-Als *et al.*, 1994 a y b; Buckle, 1994 y Priestley *et al.*, 1994).

1.7 Ejemplo de aplicación del modelo

El modelo requiere que, para su ejecución, previamente se realice el inventario de los puentes a analizar. El inventario consiste en dar respuesta a un formulario de levantamiento de los puentes en cuestión, dicho formulario contiene los 19 parámetros claramente definidos por las cuatro condiciones de calidad impuestas. El inspector debe responder a dicho formulario ubicando al puente en cada parámetro en la calificación **A**, **B**, **C** ó **D** que más se acomode. Por ejemplo para el parámetro referente al año de construcción en la Figura 2 se describe cada una de las cuatro condiciones de calidad de dicho parámetro, el inspector ha de responder alguna de las cuatro divisiones entre **A** (después de 1994) y **D** (antes de 1950) de acuerdo al año de proyecto y construcción del puente.

Hecho el inventario de los puentes, se le incorporan estos datos al programa **INDICE** y este realiza los cálculos respectivos.

Como ejemplo se presenta la aplicación del método al puente Old Road localizado sobre el río Santa Clara cerca a la ciudad de Newhall al noroeste de Los Angeles (Maldonado *et al.*, 1999 b). Este puente fue diseñado en 1928 y terminado de construir en 1930. Esta conformado por cinco luces simplemente apoyadas de hormigón-acero soportadas en pilas pantalla de hormigón armado, ver figura 3.

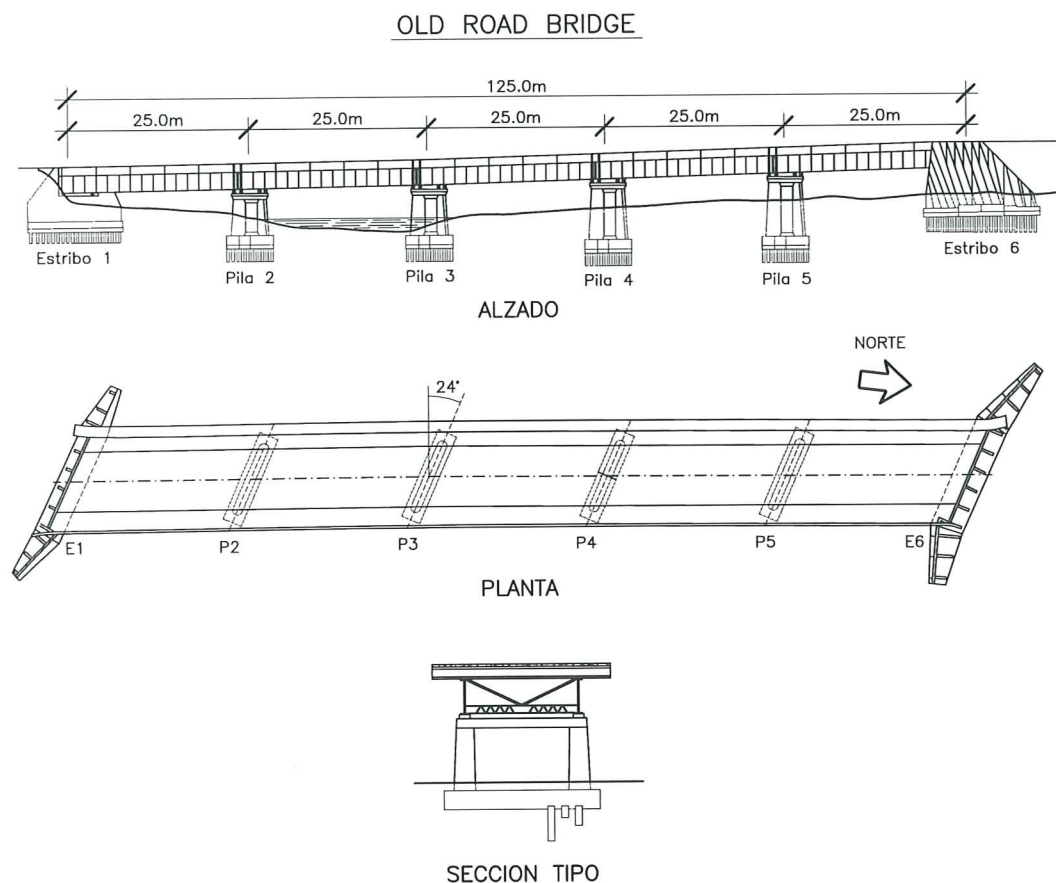


Figura 3. Alzado y planta del puente ejemplo.

Hecho el inventario por medio de levantamientos existentes del puente (Astanesh-Als *et al.*, 1994 a y b) se procedió a su análisis de la vulnerabilidad resultando **Medianamente Vulnerable** con **índice de vulnerabilidad** igual a **4,95**. Este grado de vulnerabilidad se corrobora con el nivel de daño presentado durante el sismo de Northridge, en el cual el puente sufrió un nivel de daño clasificado como moderado (Astanesh-Als *et al.*, 1994 a).

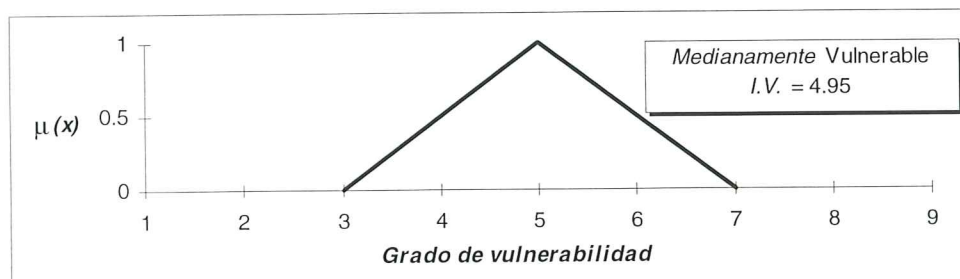


Figura 4. Función de pertenencia del grado de vulnerabilidad del puente Old Road.

1.8 Conclusiones

Al estudiar el anterior modelo se puede concluir:

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 un número de parámetros, considerados los más relevantes e influyentes en el daño que sufrirá un puente bajo la acción del sismo y, en la relación de estos parámetros con sus valores de importancia.
2. Con el modelo propuesto se obtiene un calificativo lingüístico y numérico del índice de vulnerabilidad de un puente además de poderse contar 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** de índice de vulnerabilidad, siendo **0** "*nada vulnerable*" y **9** igual a "*absolutamente vulnerable*".
3. El modelo propuesto es una buena herramienta para utilizarse a escala regional. Con los resultados del modelo se puede obtener una primera aproximación de la vulnerabilidad de los puentes de una región y, de esta manera se pueden identificar los puentes más necesitados de atención inmediata. A su vez, permite estimar que puentes requieren un estudio más detallado para definir exactamente el tipo de tratamiento que requieren.
4. Los resultados que se puedan obtener de aplicar este modelo en una área urbana o una región determinada son una buena herramienta a incorporar en los programas de planificación de sistemas de transporte o bien para programas de atención de emergencia en casos de terremoto (líneas vitales), como ha sido el caso de su aplicación en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes de la provincia de Barcelona (Maldonado *et al.*, 1998 d y 2000 b).
5. El siguiente modelo es un buen ejemplo de la aplicación de los conceptos básicos de conjuntos difusos estudiados en la primera parte de esta monografía. La metodología expuesta ofrece un modelo de vulnerabilidad sísmica de puentes, el cual se ha planteado basado en la opinión de expertos.

2

Guía de clasificación sísmica de puentes del ATC-6-2

La guía del ATC-6-2 (1983) ofrece un procedimiento para evaluar y mejorar la resistencia sísmica de puentes existentes. Para ello propone, básicamente, tres puntos: primero un proceso preliminar de clasificación para identificar los puentes que necesitan ser estudiados para ser mejorados sísmicamente; segundo, una metodología para evaluar cuantitativamente la capacidad sísmica y la efectividad total; y tercero, un esquema de mejora sísmica y requerimientos de diseño para incrementar la resistencia sísmica de los puentes existentes.

Se presentarán a continuación los aspectos más importantes en lo concerniente a la clasificación preliminar y, también algunos aspectos de la evaluación detallada. Con ello, se pretende estudiar las metodologías de análisis de la vulnerabilidad sísmica de puentes presentadas por las normativas del Applied Technology Council.

2.1 Clasificación preliminar de puentes

Dentro de un buen programa de mejora sísmica se requiere que las estructuras puedan clasificarse adecuadamente mediante un Sistema de Clasificación Preliminar que tenga en cuenta solamente aspectos técnicos y no incluya consideraciones administrativas, económicas o políticas. En general, el sistema de clasificación sísmico de puentes se utiliza como base para la selección de las estructuras que deben ser evaluados posteriormente en forma más detallada.

El primer paso en la aplicación del Sistema de Clasificación Preliminar Sísmica es el inventario de los puentes, ya que a partir de él se dispondrá de la información que permita su caracterización estructural.

Aunque la clasificación numérica, basada en pocos parámetros seleccionados, es, raramente, una medida totalmente satisfactoria para determinar las necesidades prioritarias, dichos parámetros proveen una forma sistemática en la consideración de las variables importantes involucradas en cualquier decisión.

En el caso del Sistema de Clasificación Sísmica propuesto para el estudio de la mejora sísmica de puentes, existen tres grandes variables a considerar. Éstas incluyen la *vulnerabilidad del sistema estructural*, la *sismicidad en el sitio* del puente, y la *importancia* del puente. A cada puente en cada una de estas tres áreas se le asigna una clasificación, peso y puntuación; acumulándose las puntuaciones para llegar a una clasificación sísmica total, de acuerdo con el siguiente procedimiento:

$$\begin{array}{ll}
 \text{Clasificación de la vulnerabilidad (rango entre 0 a 10) } \times \text{ Peso} & = \text{puntuación} \\
 \text{Clasificación de la sismicidad (rango entre 0 a 10) } \times \text{ Peso} & = \text{puntuación} \\
 \text{Clasificación de importancia (rango entre 0 a 10) } \times \text{ Peso} & = \text{puntuación} \\
 \\
 \text{Clasificación sísmica (100 máximo)} & = \text{puntu. total}
 \end{array}$$

La asignación de los pesos es subjetiva, sin embargo la normativa aconseja que todos sean iguales a 3,33.

Una vez sumados las tres puntuaciones, se obtiene un valor de Clasificación Preliminar Sísmica, correspondiendo las puntuaciones más altas a los puentes que necesitan ser estudiados detalladamente para, posteriormente, mejorarlos sísmicamente.

2.1.1 Clasificación de la vulnerabilidad

A la vulnerabilidad se le puede asignar un valor entre **0** y **10**, correspondiendo **0** a una baja vulnerabilidad, **5** a una vulnerabilidad moderada a colapso o a una alta vulnerabilidad para pérdidas de acceso y **10** significa una alta vulnerabilidad a colapso.

Aunque el comportamiento de un puente se base en la interacción de todos los elementos, sismos pasados han demostrado que ciertas componentes de puentes son más vulnerables al daño que otras; éstas son los apoyos, las columnas, las pilas, la cimentación, los estribos y el daño por licuefacción. De entre todos, los apoyos, han mostrado ser los más afectados sísmicamente. Por esta razón, la Clasificación de la Vulnerabilidad Sísmica se determina mediante el examen de los apoyos, separadamente del resto de la estructura. La clasificación de la vulnerabilidad de la estructura restante se obtiene como el mayor valor entre los valores de vulnerabilidad de cada uno de estos componentes, los cuales se consideran como los más vulnerables a la falla.

Es así como, para su definición, se debe determinar la vulnerabilidad sísmica de los apoyos, las restricciones en las juntas y la longitud de soporte separada de la vulnerabilidad del resto de la estructura, incluyendo ésta última a las columnas, las pilas, la cimentación, los estribos y la vulnerabilidad debido a la licuefacción del terreno.

Se debe asignar un valor entre **0** y **10** de Clasificación de Vulnerabilidad Sísmica a cada una de estas dos áreas, siendo la clasificación total del puente el mayor valor de las dos clasificaciones mencionadas. De tal manera que, al

comparar los dos rangos de vulnerabilidad, se puede obtener un indicador del tipo de intervención sísmica necesaria. Si el rango de vulnerabilidad para los apoyos es igual o menor que el rango de vulnerabilidad de las otras componentes, una mejora sísmica simple de solamente los apoyos es insuficiente. Recíprocamente, si el rango de los apoyos es grande, el puente se puede mejorar sísmicamente mediante únicamente la mejora de los apoyos. Sin embargo, una comparación de estos dos rangos durante un proceso de clasificación preliminar puede ser útil en la planificación del tipo de programa de mejoramiento necesario, pero no puede servir como sustituto de una evaluación detallada de puentes individuales.

A continuación, brevemente, se comentarán los aspectos que se deben tener en cuenta en el momento de calificar la vulnerabilidad de los apoyos y del resto de elementos que influyen en la Clasificación de la Vulnerabilidad Sísmica Total del puente:

A. Apoyos. La guía del ATC-6-2 (1983) permite evaluar la vulnerabilidad de los apoyos, básicamente, en función del tipo de apoyo y de la longitud de apoyo. A su vez, considera que el ángulo de esviaje en los apoyos tiene un gran efecto sobre su comportamiento, ya que un ángulo elevado puede hacer volcar los dispositivos de apoyo, pudiendo incluso ocasionar la falla de los vanos del puente.

B. Columnas, pilas y cimentaciones. La vulnerabilidad de las columnas se determina en base en la longitud efectiva de las columnas, el porcentaje de refuerzo de acero, el tipo de columna (pila multi-columna o pila de columna simple) y su dimensión transversal.

C. Estribos. Dado que uno de los mayores problemas observados en sismos pasados ha sido el asentamiento de los rellenos de los estribos, su vulnerabilidad se determina en función de la altura de éstos.

D. Licuefacción. A pesar de que existen diferentes tipos de posibles inestabilidades del terreno que pueden dañar el puente durante el sismo, la inestabilidad del terreno debido a la licuefacción es la más importante. El rango de vulnerabilidad para el suelo de cimentación se basa en: *a)* la evaluación cuantitativa de la susceptibilidad a la licuefacción, *b)* la magnitud del coeficiente de aceleración y *c)* la evaluación de la susceptibilidad de la estructura del puente al daño resultante del movimiento del terreno inducido por licuefacción.

2.1.2 Clasificación de la sismicidad

El rango de sismicidad debe ser tomado como 25 veces *A*, siendo *A* el coeficiente de aceleración tomado de los mapas de Coeficientes de Aceleración de los Estados Unidos y del mapa de Coeficientes de Aceleración de Alaska, Hawai y Puerto Rico (ATC-6-2, 1983).

2.1.3 Clasificación de la importancia

El rango de importancia se basa en la Clasificación de Importancia, IC , del puente el cual se discute en los comentarios y en la guía de diseño sísmico (ATC-6, 1983). Se define Clasificación de Importancia, $IC=I$ para los puentes definidos como esenciales y los restantes $IC=II$. La clasificación de importancia puede variar de 0 a 10, dependiendo de la importancia relativa de la estructura dentro cada clasificación de importancia, es así como a los puentes de Clasificación de Importancia, $IC=I$, el rango de importancia debe estar entre 6 y 10 puntos y para el $IC=II$ entre 0 y 5.

2.2 Evaluación detallada

Una vez los puentes han sido seleccionados por el Sistema de Clasificación Preliminar, anteriormente expuesto (como estructuras ha ser tratadas sísmicamente), éstos deben seguir una *Evaluación Detallada*. Esta evaluación incluye la determinación de las relaciones *capacidad/demanda* para las componentes de los puentes.

El procedimiento a seguir en la evaluación detallada requiere la recopilación de toda la información disponible en planos de diseño, en memorias de cálculo, en especificaciones, en informes de construcción, en registros de mantenimiento, en informes de la resistencia de los materiales y de las condiciones de la cimentación.

Posteriormente, es necesario ejecutar una inspección de campo para verificar la información ya recopilada y para obtener datos actualizados como: el movimiento lateral inusual bajo carga de tráfico, el desplazamiento en las juntas de expansión, el estado de los apoyos dañados o en mal funcionamiento, el daño o deterioro de miembros estructurales secundarios o principales, la carga muerta extra que no se muestra en los planos, la erosión, los aspectos no estructurales que no se ilustran en los planos y los movimientos en los estribos, columnas o pilas.

2.2.1 Evaluación cuantitativa de las componentes del puente

Las componentes que tienen el potencial de ser dañados durante un sismo fuerte deben ser evaluadas, cuantitativamente para determinar su habilidad para resistir el sismo de diseño. Esto puede hacerse calculando la relación *capacidad/demanda* para cada uno de los modos potenciales de la falla para las siguientes componentes: *a*) las juntas de expansión y apoyos (la longitud de soporte y las fuerzas), *b*) las columnas de las pilas y la cimentación (el armado de las columnas de hormigón, los anclajes, los empalmes, el cortante, el confinamiento y la rotación de la cimentación), *c*) los estribos (los desplazamientos) y *d*) la licuefacción.

En general, la demanda sísmica se determina mediante un análisis espectral elástico usando el sismo de diseño; a su vez, en alguna ocasión se

utilizan las fuerzas en los apoyos y las longitudes de apoyo mínimas especificadas en los códigos.

De las capacidades sísmicas se calculan sus valores nominales últimos, sin factores de reducción de la capacidad. En el caso de las columnas de hormigón reforzado, donde el comportamiento post-elástico es aceptable, las relaciones capacidad/demanda se modifican mediante indicadores de ductilidad para reflejar la precisión de la capacidad de las columnas para soportar la fluencia.

2.2.2 Cálculo total

Las relaciones capacidad/demanda, calculadas de acuerdo a los procedimientos de la guía, ATC-6-2, indican los niveles de reducción de carga en los cuales las componentes individuales pueden fallar. Valores mayores a **1** indican que no es probable que la componente falle durante el sismo de diseño, mientras valores menores que **1** indican una posible falla. Luego, las consecuencias de las fallas de las componentes sobre la falla total de la estructura deben ser estudiadas, empezando con los valores más bajos de la relación capacidad/demanda.

Por lo tanto, la falla de la componente es siempre considerada inaceptable si da como resultado el colapso de la estructura o si dicha falla provoca la pérdida de acceso o de funcionalidad a una línea de transporte importante. Si la falla de la componente no conduce a una consecuencia inaceptable, la mejora sísmica no está suficientemente justificada por la componente analizada.

2.3 Comentarios

Analizando los métodos expuestos por el ATC-6-2 para la clasificación sísmica de puentes se puede decir que:

1. Los dos métodos expuestos, tanto el preliminar como el detallado, se proponen con la finalidad de seleccionar los puentes que requieren ser mejorados sísmicamente para que posteriormente se determine la atención correspondiente. Por lo tanto, dentro de su desarrollo incluyen la evaluación de la vulnerabilidad sísmica. Esto queda muy claro en el método Preliminar de Clasificación Sísmica, donde una de sus áreas de cálculo es la clasificación de la vulnerabilidad.
2. El método Preliminar de Clasificación Sísmica comprende tres áreas de clasificación, una de la vulnerabilidad estructural, otra de la sismicidad y finalmente la calificación de la importancia. Cada una de ellas se mueva en el rango comprendido entre **0** y **10** tomando un peso específico (generalmente 3,33) con la consiguiente puntuación. La suma de las puntuaciones parciales proporciona la puntuación total de la clasificación. De esta manera en forma sencilla, se definen los puentes más críticos como aquellos que tienen mayor puntuación.

3. De la forma expuesta, el método preliminar resulta ser sencillo y práctico para fines de una primera clasificación. A su vez, hablando específicamente de la evaluación de la vulnerabilidad, ésta se determina a partir de la calificación de los elementos que se consideran más vulnerables ante la acción del sismo; es decir, los apoyos, las columnas y la cimentación. El cálculo parte de evaluar por separado los apoyos (longitud de apoyos y tipos de apoyos) y el resto de elementos (columnas, estribos, cimentación y efecto de la licuefacción). Comparando los valores obtenidos, se escoge el mayor de ellos como el valor de la vulnerabilidad estructural.
4. Analizando el método detallado, es obviamente más completo y específico ya que involucra la evaluación de la relación capacidad/demanda de fuerzas y desplazamientos en elementos como los apoyos, las columnas y los cimientos. Al ser más completo, a su vez, requiere una mayor cantidad de información y un nivel de análisis más elevado, por ello finalmente puede resultar costoso en tiempo y en dinero. De aquí, que sea muy útil cuando se aplica a puentes donde, preliminarmente, se conoce su deficiencia sísmica y que, por lo tanto, requieren un programa de mejora sísmica.

3

Evaluación de la vulnerabilidad de puentes propuesto por Pezeshk *et al.*

La investigación realizada por Pezeshk *et al.* (1993) desarrolla un *procedimiento preliminar de clasificación sísmica* que pueda ser usado para calcular la vulnerabilidad sísmica de puentes en el estado norteamericano de Tennessee, específicamente en las ciudades de Memphis y Shelby.

Para su desarrollo fue necesario el conocimiento y experiencia de un comité de investigadores, ingenieros consultores y constructores que ejercen en el área del comportamiento sísmico de puentes, los cuales definieron el criterio del modelo iniciando el trabajo con la revisión de los esquemas de clasificación existentes. Después de numerosas reuniones, se propuso la metodología de clasificación preliminar tomando solamente consideraciones técnicas del problema, no incluyendo aspectos políticos, económicos y administrativos.

3.1 Parámetros del modelo

Aunque el comportamiento de puentes está basado en la interacción de todos sus elementos, se ha observado que en sismos pasados ciertas componentes son más vulnerables al daño. Éstas son los apoyos, las pilas y columnas, la cimentación y los estribos; resultando ser los apoyos los más intervenidos sísmicamente. Además de la relevancia de tomar en cuenta el comportamiento sísmico de los elementos estructurales en un programa de clasificación sísmica preliminar, no se debe olvidar el papel que juega en la toma de decisiones la importancia del puente.

El modelo de evaluación sísmica de Pezeshk *et al.* (1993) se basa en tres partes principales: *a)* estructura, *b)* importancia, y *c)* cimentación y sitio de ubicación del puente, las cuales abarcan (14) parámetros. Éstos son: la continuidad o discontinuidad de la superestructura, el número de juntas de dilatación, el tipo de apoyos, el alineamiento del puente, el año de construcción, el mejoramiento sísmico (grado de atención sísmica), la clasificación del puente en lo referente a su regularidad en rigidez, la altura de pilas y columnas, la longitud de soporte

mínimo, la longitud de desvío, el tráfico promedio diario, el perfil del suelo, el potencial de licuefacción y la altura del estribo.

Cada uno de estos parámetros se subdividen en 2, 3 o 4 categorías, de acuerdo al grado de vulnerabilidad sísmica involucrado. Por ejemplo, el parámetro “*superestructura*” se divide en dos categorías: puentes con superestructura continua y no continua.

3.2 Desarrollo de la metodología

Pezeshk *et al.* (1993) proponen un modelo de evaluación sísmica basado en un formulario detallado, el cual consta de las tres partes ya comentadas: *a)* estructura, *b)* importancia y *c)* cimentación y sitio de ubicación del puente. Por medio de este formulario preliminar se valora la vulnerabilidad de un puente sobre un máximo de 100 puntos; 50 distribuidos en diferentes parámetros estructurales, 20 para los parámetros que definen la importancia del puente y 30 para los aspectos concernientes a la cimentación. Los índices de puntuación de cada criterio fueron definidos sobre la base de su relación con el efecto de daño sísmico ocasionado por un terremoto moderado, estos índices se describen de forma detallada en la Tabla 1.

Tabla 1 Índices de puntuación para puentes según modelo de Pezeshk *et al.*, 1993.

ESTRUCTURAL	50 puntos
Superestructura	5
Número de juntas de expansión	5
Tipo de apoyos	5
Alineamiento del puente	5
Año de construcción	10
Mejoramiento sísmico	5
Clasificación	5
Altura de pilas y columnas	5
Longitud de soporte mínimo	10
IMPORTANCIA	20 Puntos
Longitud de desvío	10
Tráfico promedio diario	10
CIMENTACIÓN	30 puntos
Tipo de perfil de suelo	10
Potencial de licuefacción	10
Altura de los estribos	10

A cada subdivisión de los parámetros se les asignó una puntuación parcial. El valor de la puntuación parcial de cada una de las categorías de cada parámetro no debe superar la puntuación asignada al respectivo parámetro. A manera de

ejemplo se muestra lo citado en la Tabla 2, para en el parámetro *I* (superestructura).

Tabla 2 Parámetro *I* del Modelo de Pezeshk *et al.*, 1993.

Parámetro	Puntuación Parcial	Puntuación Total
<i>I</i> Superestructura	5 : Continua 0 : No continua	5

A continuación, el modelo propone como índice de daño la suma de los valores para cada parámetro. Un puente con **100** puntos representará un puente idealmente perfecto y aquel con **0** puntos será un puente sin resistencia sísmica.

3.3 Aplicación a las ciudades de Memphis y Shelby

El modelo fue desarrollado sobre una muestra de cuarenta y cuatro (44) puentes localizados en las ciudades de Memphis y Shelby, todos ellos correspondiendo a pasos sobre río. Ninguno de los puentes había sido diseñado y construido con normativas sísmicas; ni habían sido intervenidos para ser mejorados sísmicamente.

Antes de la visita a los sitios se realizó una clasificación preliminar de los puentes, utilizando toda la información ya recopilada en los departamentos de transportes (DOT). Seguidamente, durante la evaluación en campo, la información coleccionada fue revisada y complementada a lo largo de varios meses. Durante la evaluación del sitio, la puntuación correspondiente a cada criterio de evaluación fue documentada para que se reflejaran las condiciones reales de las estructuras en términos de su resistencia sísmica.

La puntuación total de evaluación fue determinada sumando las puntuaciones parciales de cada uno de los tres componentes: 1) estructura con un total de 50 puntos, 2) importancia con un total de 20 puntos y 3) cimentación con un total de 30 puntos. Del estudio realizado la mejor puntuación encontrada correspondió a un 73% y la más baja a 24%, siendo la puntuación promedio del 48%.

De ello, se obtuvo que la condición total de los puentes era de *pobre a mala* en cuanto a la resistencia sísmica; justificando la razón de esta condición el hecho de que ninguno de los puentes de la zona estaban diseñados antisísmicamente o habían sido mejorados para soportar cargas sísmicas durante su vida útil.

3.4 Comentarios

El estudio de vulnerabilidad sísmica de puentes hecho por Pezeshk *et al.* (1993) se realizó con la finalidad de desarrollar un procedimiento preliminar de clasificación para obtener información y para calcular así la vulnerabilidad sísmica de los puentes localizados en la zona de New Madrid (NMSZ), de tal manera, que

dicho método sirviera para identificar los puentes con amenaza potencial, que requirieran una evaluación posterior detallada o una mejora sísmica inmediata. Estudiando esta investigación, surgen comentarios, tales como los siguientes :

1. Pezeshk *et al.* (1993) proponen un método de evaluación sísmica preliminar basado en la valoración de tres áreas principales: estructura, importancia y cimentación. Por medio de un formulario, se califica la vulnerabilidad de un puente sobre un máximo de 100 puntos, 50 distribuidos entre diferentes parámetros estructurales, 20 en función de su importancia y 30 para la cimentación y el sitio del puente.
2. El modelo ofrece un método sencillo de estudiar la vulnerabilidad sísmica de los puentes de una región. Se elaboro con las metodologías existentes y en base a la experiencia y conocimientos de un buen equipo formado por investigadores e ingenieros en ejercicio. Por ello, se puede pensar en un modelo aplicable a otras zonas fuera de la de interés del estudio.
3. Una de las deficiencias del modelo es no establecer a partir de la puntuación categorías o grados de vulnerabilidad. Es obvio que **0** corresponde a *absolutamente vulnerable* y **100** a *nada vulnerable*, pero ¿qué sucede con los valores intermedios?. El modelo se deja al buen juicio de las personas encargadas de tomar las decisiones finales, aunque sería interesante contar con una pauta para establecer los grados de vulnerabilidad.
4. Basados en la aplicación realizada sobre cuarenta y cuatro puentes del estado de Tennessee, se encontró que de los catorce parámetros, cinco son los de mayor influencia. Éstos son, la discontinuidad de la superestructura, el tipo de apoyo, el haber sido construido bajo normativa sísmica o haber sido intervenido para su mejora, la clasificación en puente regular o irregular y la longitud de soporte en los apoyos.
5. Los resultados de la aplicación de estudio son esenciales para reducir el riesgo sísmico y para posiblemente salvar vidas en las ciudades de Memphis y Shelby, área fuertemente afectada por la acción sísmica ya que se encuentra dentro de la zona sísmica de New Madrid. La información obtenida sirve para el futuro del diseño sísmico de puentes en la región. Además, mediante consideraciones económicas, sociales y administrativas puede diseñarse un esquema de mejora sísmica para los puentes más vulnerables en el área de estudio.

4

Funciones de vulnerabilidad propuestas por el ATC-25

Un estudio de vulnerabilidad sísmica e impacto de la rotura de líneas vitales en los Estados Unidos se presenta en el ATC-25 (1991), con la finalidad de calcular la extensión y distribución de las líneas vitales, su relación con el riesgo sísmico para identificar las más críticas y plantear así, las medidas de mitigación pertinentes.

En el contexto de Ingeniería Sísmica, se define las líneas vitales como los sistemas requeridos para la vida humana y para la función urbana, sin los cuales los grandes centros urbanos (metropolitanos) no podrían existir; y para los cuales su rotura podría conducir a grandes pérdidas económicas, deterioro del centro de la población y, eventualmente la migración, de la población. Dentro de las líneas vitales, se encuentran los sistemas de transporte y entre éstos, las estructuras como los puentes desarrollan un papel importante.

Las funciones de vulnerabilidad en las líneas vitales usadas para este proyecto se basan en opiniones de expertos obtenidas en el proyecto del ATC-13 (Datos de evaluación del daño sísmico para California, ATC-13, 1985). En él, los daños directos se presentan en forma de Matrices de Probabilidad de Daño (DPMs) siendo aplicables a construcciones estándar en California, pudiendo ser modificadas por procedimientos sintetizados por el mismo ATC-13, los cuales mueven las curvas una o dos unidades de intensidades hacia abajo para construcciones especiales y una o dos unidades de intensidad hacia arriba para construcciones no estándar.

Las construcciones *estándar*, según el ATC-13, corresponden a todas las estructuras excepto aquellas diseñadas como especiales y no estándar. Las *especiales* se refieren a las instalaciones que tienen características de control de daño sísmico especiales. Las *no estándar* son instalaciones más susceptibles al daño sísmico que aquellas construcciones estándar. Es así, como las instalaciones

antiguas diseñadas antes de la existencia de los códigos sísmicos de diseño moderno o aquellas diseñadas después de introducir los requerimientos sísmicos actuales, pero que no se han beneficiado de ellos, son calificadas como *no estándar*. En casos excepcionales, las instalaciones más viejas pueden haber tenido una atención especial para soportar las fuerzas sísmicas y por ello pueden calificarse como construcciones *estándar*. En el ATC-25, se le da el nombre de estructura *especial* a aquéllas que tienen sistemas de control más las diseñadas de acuerdo a los requerimientos sísmicos más modernos y de *estándar* para representar instalaciones existentes en California.

El ATC-25 presenta las funciones de vulnerabilidad de dos formas: 1) daño directo, en términos de costo de reparación como fracción del valor total, en función de la Intensidad Modificada de Mercalli y 2) fracción de la capacidad inicial (restaurada o reparada) en función del tiempo de reparación que transcurre desde el sismo, para una intensidad dada MMI, definidas a su vez como curvas de restauración.

Con respecto a la práctica del diseño sísmico regional en los Estados Unidos, el consenso general parece ser que, con pocos casos excepcionales, solamente en California y una porción de Alaska y la región del Puget Sound cuentan con requerimientos sísmicos incorporados dentro del diseño de las instalaciones locales de líneas vitales. Es así como para el resto del país se supone que las instalaciones tienen una resistencia sísmica menor o igual (dependiendo del tipo de servicio) que la equivalente a la misma instalación en California. Por tal razón, al elaborar las funciones de vulnerabilidad se dividió a los Estados Unidos en tres regiones y para cada una de ellas se construyeron las respectivas funciones. Siendo éstas: a) California NEHRP Mapa área 7, que es el foco general del ATC-13, b) California NEHRP Mapa área 3-6, No California Mapa área 7 (parte de Alaska, Nevada, Idaho, Montana y Wyoming) y Puget Sound NEHRP Mapa área 5 y c) todas las otras partes de los Estados Unidos, en las cuales se supone que no existe historia de diseño sísmico importante.

4.1 Componentes de las funciones de vulnerabilidad

Las funciones de vulnerabilidad, para cada línea vital, están formadas por las siguientes componentes:

1. Información *general*, la cual consta de: 1) una descripción de la estructura y de sus principales componentes, 2) *daño sísmico típico* en términos cualitativos y 3) características del *diseño sísmicamente resistente* de las estructuras y de sus componentes. Esta información es necesaria para estimar las características estructurales y para definir el comportamiento esperado de la estructura.
2. Información de *daño directo*, el cual consiste en: 1) una descripción en términos del tipo estructural y de la calidad de la construcción (grado de resistencia sísmica), 2) estimaciones estándar de la calidad de la construcción para las condiciones reales y las correspondientes curvas movimiento-daño, 3)

estimaciones estándar de la calidad de la construcción para las condiciones mejoradas y 4) curvas de tiempo de restauración. Todas estas curvas se elaboran en base a los datos desarrollados por el ATC-13.

4.2 Metodología para obtener las funciones de vulnerabilidad

A continuación se describe la metodología general utilizada para desarrollar las relaciones cuantitativas para cada uno de los tipos de función de vulnerabilidad (*Daño directo en función de la Intensidad Modificada de Mercalli* y *Capacidad Residual en función de la Intensidad Modificada de Mercalli*).

Paso 1. Obtener la relación entre el daño sísmico (DMG) y la intensidad (MMI), mediante la regresión obtenida del apéndice G del ATC-13:

$$DMG = \exp(a) MMI^b \quad (2)$$

Donde a y b corresponde a los coeficientes de la regresión obtenidos para cada clase de instalación (FC) correspondiente a una línea vital.

Paso 2. Obtener una relación entre el estado de daño y el correspondiente tiempo necesario para su restauración, a partir de los datos relativos al tiempo necesario para restaurar diferentes clases de funciones sociales (SF), las cuales son tipos de instalaciones definidas en términos de la clasificación industrial estándar proveída por el ATC-13:

$$T_R = \exp(c) DMG^d \quad (3)$$

Donde T_R , es el tiempo de restauración, en días, DMG es el factor de daño central (CDF) para cada estado de daño (DS) y c, d son los coeficiente de la regresión. Estas regresiones se desarrollaron para cada una de las clases de funciones sociales sobre un tiempo de restauración del 30%, 60% y 100%.

Paso 3. Construir las curvas de restauración de cada una de las componentes de las líneas vitales, para cada intensidad (MMI), mediante un ajuste lineal a través de los tres puntos correspondientes al 30%, 60% y 100% del tiempo de restauración. Dicha línea tiene la siguiente forma:

$$R = f + (g) (T_R) \quad (4)$$

Donde R es el % restaurado, T_R el tiempo de restauración, en días y f, g corresponden a los coeficientes de la regresión. Los tres puntos usados para ajustar una línea recta mediante la regresión (4) se obtienen de la forma que se describe en la sección 3.3 del ATC-25.

4.3 Ejemplos de funciones de vulnerabilidad para los puentes grandes de autopistas

A manera de presentar un ejemplo de las funciones de vulnerabilidad para puentes, se ha tomado del ATC-25 las correspondientes curvas para puentes grandes sobre autopistas. Estos incluyen todos los puentes con luces individuales mayores a los 152,5 m, comprendiendo tanto a puentes en acero (suspendidos, atirantados o en celosía) como a puentes en arco de hormigón armado o de segmentos de hormigón pretensado. Las componentes principales son: las pilas y los sistemas de cimentación (comúnmente pilas, pilotes o caissons) y la superestructura (losa del puente, las vigas, las viguetas, miembros de la celosía y los cables).

Los puentes principales, o grandes, son estructuras generalmente bien proyectadas y diseñadas para cargas laterales. En su diseño sismo-resistente, se incluyen análisis dinámicos, que consideran la interacción suelo-estructura en el contorno. Las cimentaciones pueden ser diseñadas y detalladas para resistir cualquier falla del suelo que sea esperada debido a las condiciones inestables de éste. Es preciso, no obstante, citar que las cargas sísmicas no se consideraban antes de los sesenta.

Las curvas de daño para puentes grandes de autopista se basan en los datos del ATC-13 para FC 30, asumiéndose que para el área de California 7 no existe ninguna modificación. Para la zona comprendida por California 3-6, Puget Sound 5 y No California 7 se aumenta una intensidad y para las restantes áreas, se mueven dentro del esquema de dos unidades de intensidad. Las curvas de daño-movimiento modificadas para los puentes principales se representan en la Figura 5 y fueron desarrolladas mediante el paso 1 descrito en el apartado 4.2.

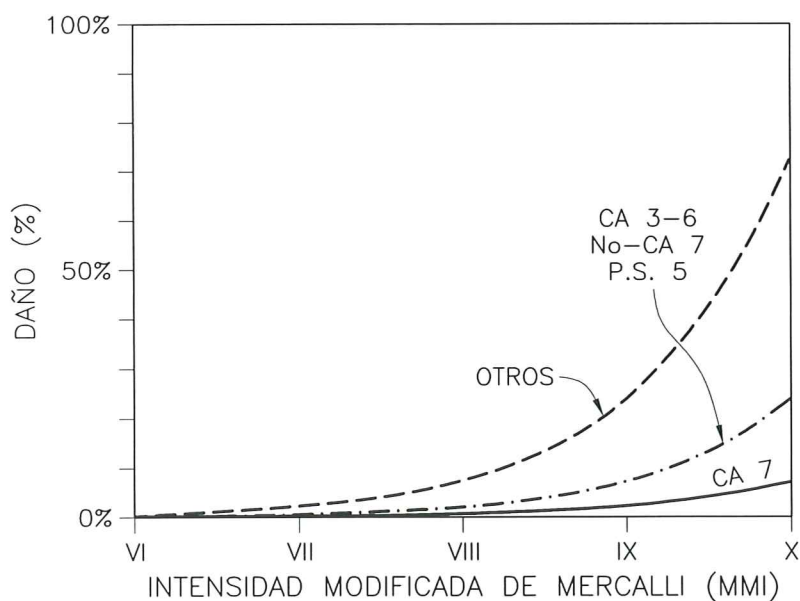


Figura 5 Curva de daño en función de la intensidad para puentes grandes.

En base a lo expuesto en el apartado 3.5.2, se llega a la segunda forma de expresión de las funciones de vulnerabilidad que corresponde a las *curvas de tiempo de restauración*. Éstas se representan en las Figuras B-2 a B-4 (ATC-25, 1991) del Apéndice B. En la Figura 6, se muestran solamente las curvas correspondientes a la segunda zona (NEHRP Mapa Área California 3-6, No California 7 y Puget Sound 5).

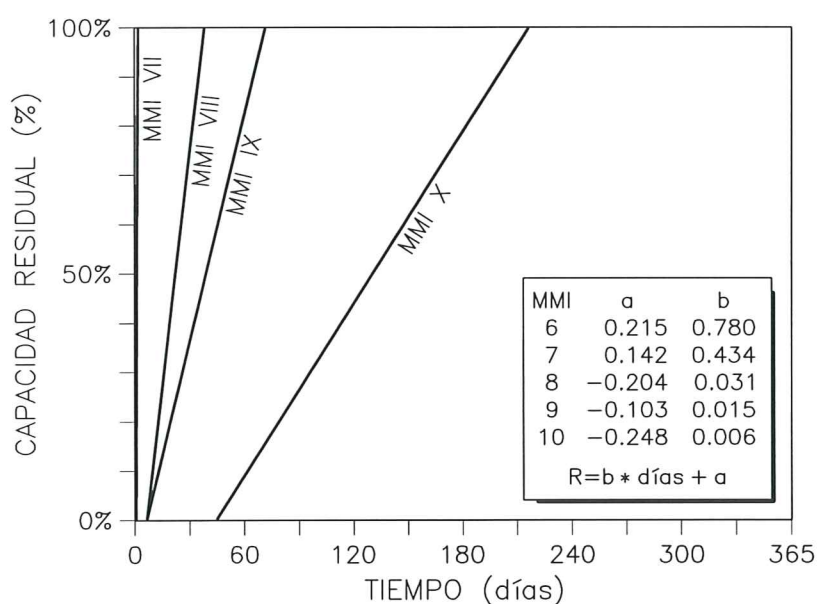


Figura 6 Curva de capacidad residual para puentes grandes (NEHRP Mapa Área California 3-6, No California 7 y Puget Sound 5).

4.4 Comentarios

En lo referente a las funciones de vulnerabilidad propuestas por el ATC-25 para los puentes se puede decir:

1. Los resultados del ATC-25 están dirigidos a la obtención de los costos probables directos e indirectos de los sistemas sometidos a diferentes escenarios sísmicos. Para la obtención de éstos, fue necesario reunir los inventarios de datos más completos posibles, estimándose las matrices de probabilidad de daño. Se construyeron las funciones de vulnerabilidad de cada sistema y se caracterizaron las funciones continuas de capacidad residual, a nivel estructural y dentro del ámbito de la línea vital.
2. En la construcción de las funciones de vulnerabilidad del ATC-25 no se definieron las matrices de probabilidad de daño de las estructuras ya que fueron

tomadas del ATC-13 (1985). Estas matrices, se obtuvieron a partir de análisis estadísticos de la opinión de expertos sobre el comportamiento estructural ante acciones sísmicas. Dichas matrices de probabilidad de daño, fueron construidas para todas las tipologías estructurales de California, para lo cual, a todas las estructuras les fue asignado un número de clasificación, de acuerdo a su comportamiento y función. De tal manera, que para los puentes convencionales (luz menor a 150 metros) de vanos simples múltiples le corresponde el 24, para puentes convencionales de vanos continuos / monolíticos es de 25 y en puentes grandes (luz mayor a 150 metros) es de 30.

3. En cuanto a la pérdida de función y tiempo de restauración, éstas fueron tomadas de la investigación desarrollada por el ATC-13, el cual las definió a partir de estudios estadísticos de opiniones de expertos, es decir bajo una metodología similar a la utilizada para las matrices de probabilidad de daño.
4. Las funciones de vulnerabilidad, propuestas por el ATC-25, se basaron en las matrices de probabilidad de daño y en las matrices de pérdidas de función y tiempos de restauración del ATC-13, para puentes de autopista, de carretera y de ferrocarril, y para cada escenario sísmico. Estas funciones, se presentan de dos maneras diferentes para las tres zonas en que se ha dividido Estados Unidos; una expresada como daño directo, en términos de costo de reparación, en fracción del valor total contra Intensidad Modificada de Mercalli y la otra función, como la curva de restauración en función del tiempo que transcurre desde el momento del sismo, para una intensidad dada MMI. Es decir, con las funciones de vulnerabilidad se puede describir el comportamiento sísmico esperado de cada línea vital así como también el tiempo requerido para reparar el daño.
5. Es de resaltar nuevamente que en el proyecto del ATC-25 mediante factores como el estudio de la amenaza sísmica, el inventario de líneas vitales y las funciones de vulnerabilidad se cuantifica la vulnerabilidad sísmica y el impacto de la interrupción en términos del daño directo, de las pérdidas económicas y de las pérdidas de función. De esta forma, se estiman los costos directos e indirectos. Se define el costo directo como el daño provocado por el movimiento sísmico y por las consecuencias por él inducidas, como el efecto de licuefacción o movimientos del suelo. El primero, se obtiene de las funciones de vulnerabilidad y de las matrices de probabilidad de daño y el segundo, mediante probabilidades de ocurrencia en una determinada región. Así pues el costo total directo es la suma de los dos costos. Los costos indirectos son los efectos económicos debidos a la interrupción de las actividades después del sismo. El ATC-25 estima estas pérdidas basándose en el tiempo de interrupción de las líneas vitales por daño directo y en las pérdidas económicas resultantes de esta interrupción.

5

Comparación entre los diferentes modelos

Los modelos expuestos en esta segunda parte de la monografía corresponden básicamente a estudios de evaluación sísmica y evaluación de daño en puentes basados en opiniones de expertos; los cuales, tienen, generalmente, como finalidad última diagnosticar el estado del puente, para definir el sistema óptimo de rehabilitación y para la distribución de fondos para programas de rehabilitación y sustitución. Sin embargo, todos ellos de manera directa o indirecta, involucran en su desarrollo y aplicación modelos de *evaluación de la vulnerabilidad sísmica*.

La propuesta presentada por Maldonado *et al.* (2000 c) equivale a un claro ejemplo de la utilización de las técnicas de los conjuntos difusos para el tratamiento de la información proveniente de opinión de expertos. Por medio del modelo se determina un *índice de vulnerabilidad* en función del grado de vulnerabilidad y valor de importancia de diecinueve parámetros.

Los modelos de clasificación de la vulnerabilidad sísmica de Maldonado *et al.* (2000 c) y Pezeshk *et al.* (1993) se asemejan al procedimiento preliminar de clasificación sísmica del ATC-6-2, es decir, se fundamentan en la calificación de un número de parámetros, considerados como los de mayor influencia en el daño que sufrirá un puente durante el sismo. El primero de éstos considera diecinueve parámetros. El de Pezeshk *et al.* (1993) tiene en cuenta catorce, agrupados en tres aspectos: estructural, importancia del puente y cimentación. El modelo del ATC-6-2 se fundamenta en la clasificación de la vulnerabilidad de los apoyos, columnas, estribos y cimentación.

La diferencia entre éstos tres modelos está en que el de Pezeshk *et al.* (1993) define la vulnerabilidad sísmica de los puentes mediante la suma de las calificaciones de cada uno de los parámetros. El de Maldonado *et al.* 2000 c, calcula un *índice de vulnerabilidad* mediante el promedio ponderado de las calificaciones de los parámetros. El método del ATC-6-2 define la clasificación de la vulnerabilidad como el máximo valor de las calificaciones asignadas a cada uno

de los parámetros; éste valor de clasificación de la vulnerabilidad, posteriormente multiplicado por un valor de peso, se acumula a dos índices más (importancia y sismicidad) para determinar, finalmente, un índice de clasificación sísmica preliminar.

En función del tipo de análisis desarrollado al proponer cada uno de los tres modelos anteriores (Pezeshk *et al.*, 1993; Maldonado *et al.*, 2000 c y ATC-6-2), el primero se basa en estudios comparativos de los métodos existentes y en el conocimiento de expertos; el segundo es un estudio fundamentado en opiniones de expertos. Finalmente, el tercero es un método desarrollado mediante opiniones de expertos, claro está, en lo referente a la definición del método de clasificación preliminar, ya que el método detallado del ATC-6-2 es una aplicación de técnicas híbridas (mezcla de métodos empíricos y analíticos).

El último modelo expuesto, el del ATC-25, determina relaciones entre el tamaño del sismo y el posible daño que puede sufrir el puente ante el sismo. Esto se materializa mediante la construcción de funciones de vulnerabilidad o de fragilidad y, por medio, de matrices de vulnerabilidad. En las curvas del ATC-25 la Intensidad define la acción sísmica. Las matrices y curvas se realizaron en base a las matrices de daño del ATC-13, las cuales corresponden a análisis estadísticos de la opinión de expertos.

6

Conclusiones generales

Del estudio de las metodologías existentes de análisis de la vulnerabilidad sísmica de puentes basadas en opinión de expertos, se puede concluir que un método eficiente y sencillo de manejar el problema es el que se obtiene a partir de la identificación de los parámetros que mejor definen la vulnerabilidad sísmica de los puentes, para luego determinar el *índice de vulnerabilidad* resultante de la relación entre la calificación de cada uno de los parámetros y el de su valor de importancia en la vulnerabilidad total.

Además se resaltan los siguientes aspectos:

1. Los estudios de comportamiento sísmico de puentes son un tema importante al desarrollar un modelo de vulnerabilidad sísmica, ya que a partir de ellos se puede conocer la respuesta de cada una de las componentes de la estructura ante la acción del sismo. De tal forma que conocida la respuesta se defina su influencia en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica del puente.
2. Lo aprendido de sismos pasados es otro aspecto de gran interés al plantear una metodología de evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes. De las experiencias vividas, en particular en este tipo de estructuras, se pueden definir las componentes que los hicieron más vulnerables sísmicamente. A su vez, la valiosa información recopilada después de la ocurrencia de un sismo es una enorme fuente de datos tanto para proponer modelos de vulnerabilidad como para estudiar la viabilidad de los propuestos a partir de datos no observados.
3. En casos que se desee proponer un modelo donde no se cuenta con datos de daños en puentes, los modelos existentes de evaluación sísmica expuestos ponen de manifiesto la buena aceptación de utilizar la opinión de los especialistas en el tema para definir tanto los parámetros del modelo como sus

grados de vulnerabilidad. No desconociendo con ello, las incertidumbres que dicha información puede contener. 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 las subjetividades involucradas en las opiniones de los especialistas.

REFERENCIAS

- 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 (1983). Seismic Retrofitting Guidelines for Highway Bridges, *Applied Technology Council*.
- ATC-13 (1985). Earthquake Damage Evaluation Damage for California, *Applied Technology Council*.
- ATC-6 (1986). Seismic Design Guidelines for Highway Bridges, *Applied Technology Council*.
- ATC-25 (1991). Seismic Vulnerability and Impact of Disruption of Lifelines in the Conterminous United States, *Applied Technology Council*, California.
- Bandemer, H. y Gottwald, S. (1995). *Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, Fuzzy Methods with Applications*, John Wiley & Sons, England, 239 pg.
- Benuska, L. (editor) (1990). Loma Prieta Earthquake, Reconnaissance Report, *Earthquake Spectra*, suplemento del volumen 6.
- 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.

- 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.
- Hall, J. F. (editor) (1995). Northridge Earthquake of January 17, 1994 Reconnaissance Report, *Earthquake Spectra*, Suplemento C del volumen **11**.
- 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*.
- Kiremidjian, A.A. y Basöz, N. (1997). "Evaluation of bridge damage data from recent earthquakes". *Bulletin NCEER*, **11**(2), 1-7.
- 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., Casas, J.R. y Canas, J.A. (1998) (d). "Propuesta de un estudio de la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes en la ciudad de Barcelona". *Primera Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica*, p.g. 217, Almería, España.
- Maldonado, E., Casas, J.R. y Canas, J.A. (1999) (a). "Influencia de las características estructurales de los puentes en la determinación de su vulnerabilidad sísmica", *Primer Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Murcia, España, Tomo Ib, 471-479.
- Maldonado, E., Casas, J.R., Canas, J.A. y Pujades, L. (1999) (b). "Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes existentes", *Primer Congreso de la Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural. Congreso de Puentes y Estructuras*, Sevilla, España, Tomo I, 377-388.
- Maldonado, E., Casas, J.R. y Canas, J.A. (2000) (a). "Aplicación de los Conjuntos Difusos en la Evaluación de los Parámetros de la Vulnerabilidad Sísmica

- de Puentes”. 2^a Assembleia Luso Espanhola de Geodesia e Geofísica, Lagos, Portugal, 227-228.
- Maldonado, E., Casas, J.R. y Canas, J.A. (2000) (b). “Evaluación de Vulnerabilidad Sísmica de Puentes en Barcelona”. 2^a Assembleia Luso Espanhola de Geodesia e Geofísica, Lagos, Portugal, 239-240.
- Maldonado, E. (2000) (c). *Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica en puentes*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Departamento de Ingeniería del Terreno y Cartográfica, Barcelona, España.
- National Oceanic and Atmospheric Administration Washington (1973). *San Fernando, California Earthquake of February 9, 1971*, volumen II.
- 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 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
- 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.
- 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.

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

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