

Nº 117  
2E1.

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**



FACULTAD DE INGENIERIA

DIVISION DE INGENIERIA CIVIL, TOPOGRAFICA  
Y GEODESICA

ANALISIS: UNA PROPUESTA DE SISTEMA EXPERTO  
PARA ANALISIS SISMICO DE PUENTES  
CARRETEROS

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
**I N G E N I E R O C I V I L**  
**P R E S E N T A I**  
**M A N U E L S U A S T E G U I S O L I S**



MEXICO, D. F.,  
**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

JUNIO DE 1992



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# ANALISIS: UNA PROPUESTA DE SISTEMA EXPERTO PARA ANALISIS SISMICO DE PUENTES CARRETEROS

---

## INDICE

---

### 1.- INTRODUCCIÓN.....Pág. 1

Antecedentes

Alcance de la tesis

### 2.- TECNOLOGIA DE SISTEMAS EXPERTOS.....Pág 4

Introducción

¿Qué son los SE's?

Arquitectura de un SE

¿Quiénes y Cómo hacen los SE's?

Etapas de desarrollo de un SE

Tipos de SE's

Representación del conocimiento

Manejo del conocimiento: Métodos de Inferencia

Estrategias de control

Niveles de desarrollo de un SE

Los SE's en la Ingeniería Estructural

Algunos SE's desarrollados en el área de Puentes

Comentarios

**3.- ANÁLISIS SÍSMICO DE PUENTES CARRETEROS.....P 23**

Introducción

Revisión de la práctica nacional

Modificaciones a las recomendaciones del Manual de Obras Civiles de la CFE en su parte de diseño sísmico (C.I.3).

Comentarios

**4.- ANASIS: Un asesor para la selección del Método de Análisis Sísmico de puentes carreteros.....P 40**

Introducción

Objetivos

Elección del shell

Funcionamiento de ANASIS

Arquitectura

Comentarios

**5.- CONCLUSIONES.....P 52****APENDICE A: BIBLIOGRAFIA.....P 54****APENDICE B: LISTADO DE LA BASE DE CONOCIMIENTO DE ANASIS.....P 57**

# CAPITULO I

---

## INTRODUCCION

---

### Antecedentes

Este trabajo surgió de la conjunción de dos proyectos de distintas coordinaciones del Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M.:

Por un lado, en la coordinación de Sistemas, en el Laboratorio de Inteligencia Artificial se trabajó en el proyecto "Sistemas Expertos aplicados a la Ingeniería" con el fin de dar a conocer los alcances de esta tecnología a la Ingeniería, ya que son poco conocidos en México y, en general, son aplicados solo a nivel de Investigación. Actualmente, el proyecto considera aplicaciones a Geotecnia y Estructuras dentro de la Ingeniería Civil, y a la productividad y el control de la calidad en la Ingeniería Industrial.

Por otro lado, en la coordinación de Mecánica Aplicada se desarrolla un proyecto para revisar el capítulo de Diseño por Sismo del Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad. Dentro de este capítulo se consideran diferentes tipos de estructuras. A la coordinación mencionada le correspondió la parte de diseño sísmico de puentes de este manual.

El diseño y la construcción de puentes en México son coordinados y supervisados por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Sin embargo, existe la problemática de que no se cuenta con una reglamentación nacional para el diseño y el análisis sísmico de puentes. Generalmente se recurre a normas editadas por la AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) o a las normas japonesas.

De esta manera se dieron las condiciones propicias para la realización de un Sistema Experto: El equipo computacional y los conocimientos de Inteligencia Artificial necesarios para el desarrollo del sistema son proporcionados por el laboratorio de Inteligencia Artificial de la coordinación de Sistemas;

el contacto directo con los investigadores de la coordinación de Mecánica Aplicada proporcionan el conocimiento experto necesario.

### **Alcance de la tesis**

Esta tesis pretende mostrar la aplicación de la tecnología de los Sistemas Expertos al manejo de los códigos de diseño, particularmente los utilizados en puentes carreteros. Para este fin, se presenta una propuesta de un prototipo de sistema experto que se utiliza como consulta sobre el método a aplicar y los pasos a seguir durante el análisis sísmico de un puente carretero. Se toman en cuenta las características estructurales y geométricas del puente, la zona de construcción y el proceso constructivo a seguir. El análisis quedará limitado a superestructuras de concreto presforzado por ser las de mayor uso en la práctica mexicana. Las recomendaciones hechas por el sistema experto están basadas en las del Manual de Obras Civiles, principalmente las de la versión de 1992 en la parte de puentes.

Cabe mencionar que este trabajo no busca hacer una crítica de la confiabilidad de ningún código de diseño ni de los métodos aquí descritos, sino resaltar la necesidad de éstos aplicados a puentes específicamente. Por otro lado, se presenta una herramienta que facilita la interpretación y aplicación de los códigos de diseño.

En el capítulo II se muestra un panorama general, sin tratar de ser exhaustivo, de las aplicaciones que los Sistemas Expertos han tenido en la Ingeniería Estructural, desde su incursión a este campo de la Ingeniería Civil en 1978 hasta la fecha, y las aplicaciones potenciales que éstos todavía tienen. En primer lugar se proporciona una breve presentación de los Sistemas Expertos para tener una idea básica, de así requerirlo, de lo que son éstos y para qué y por qué se utilizan.

En el capítulo III, a manera de planteamiento particular del problema, se presenta la problemática actual del diseño sísmico de puentes carreteros en México y las recomendaciones del Manual de

Obras Civiles de la CFE en la versión de 1992. Se plantea además la utilidad de los Sistemas Expertos en el manejo de códigos de diseño.

El modelo de conocimiento del Sistema Experto ANASIS, para la selección y aplicación de método de análisis sísmico de puentes carreteros se discute en el capítulo IV. Este prototipo podría conducir a otros sistemas aplicados a diferentes reglamentos y recomendaciones de diseño.

Para finalizar, en el capítulo V se muestran las conclusiones obtenidas de este trabajo de recopilación.

A manera de complemento, este trabajo cuenta con dos apéndices: En el apéndice A se encuentra la bibliografía utilizada para la elaboración tanto de la teoría para este trabajo escrito como del sistema experto; en el apéndice B se encuentra lo que a juicio del autor representa lo más importante de la base de conocimiento de ANASIS.

# CAPITULO II

---

## TECNOLOGIA DE SISTEMAS EXPERTOS

---

### Introducción

En el año de 1956 nace la Inteligencia Artificial [Lara y Gelman 89]. A partir de este momento surgen los dos enfoques de esta ciencia: El estructural y el funcional. Con el primero se pretende emular el cerebro humano (inclusive su estructura física); mientras que con el segundo se busca asimilar el comportamiento humano Inteligente (funciones cerebrales).

Algunas de las áreas más conocidas de la Inteligencia Artificial son: Comprensión del lenguaje natural, Máquinas de visión, Robótica y Sistemas Expertos (SE's).

Los SE's son el resultado de pretender simular o reproducir el comportamiento de un solucionador de problemas inteligentes en un programa de computadora. Los primeros intentos se dirigieron al desarrollo de solucionadores de problemas generales; más tarde se determinó que estos programas serían débiles, a menos que el conocimiento específico acerca del problema a solucionar se sumara a la guía para llegar a la solución.

Los SE's, a diferencia de los sistemas convencionales, pueden manejar los dos tipos de conocimiento [Pagnoni 85]:

- a) El formal: A este tipo de conocimiento se le puede acceder con relativa facilidad, ya que está integrado por definiciones, hechos, teoría de literatura, etc.
- b) El informal: También conocido como heurístico, es aquel conocimiento que abarca reglas de dedo desarrolladas por expertos a lo largo de su vida profesional para enfrentar con efectividad problemas complejos, vagamente definidos, y situaciones de incertidumbre que no se ajustan a un método riguroso.

Los SEs incluyen algunas estrategias generales para solución de problemas; asimismo, el conocimiento específico de la clase de problemas que el SE soluciona se usa para reproducir el comportamiento de un solucionador inteligente de problemas.

El éxito de los primeros SE's, antes de 1981, se debe a su capacidad para resolver problemas a nivel de un experto en su campo respectivo y a su facilidad para comunicarse con los usuarios novatos.

En la programación de SE's, se comenzó usando técnicas de programación convencionales por ser las únicas con las que se contaba, pero a raíz del desarrollo de MYCIN, para diagnóstico de enfermedades infecciosas, se desarrollaron otras nuevas técnicas con la experiencia lograda hasta entonces.

#### ¿Qué son los SE's?

También conocido como *Sistema Experto Basado en el Conocimiento*, un Sistema Experto es un programa de computadora que haciendo uso del conocimiento y la inferencia realiza una tarea difícil de algún campo en particular, que generalmente sólo puede llevar a cabo un experto humano, ya que la solución implica su pericia [Parsaye y Chignell 88]. El SE es interactivo ya que simula una consulta a un experto [Wijesundera y Harris 85] por lo que resulta muy complicado, o imposible, el querer programarlos algorítmicamente.

Los Sistemas Basados en el Conocimiento (SBC) usan representación explícita del conocimiento separando la base de conocimiento del mecanismo de inferencia. Los SE's pertenecen a los SBC's, con la capacidad de explicar y justificar su comportamiento. Es condición crucial para un SE tener una interfaz explicativa, ya que ésta sirve para que el usuario dé validez al razonamiento del sistema en una consulta. El sistema debe poder contestar (por lo menos) por qué hace ciertas preguntas y cómo llegó a algunas conclusiones [Kim y Connor 88].

En un comienzo los SE's se programaban con lenguajes procedurales. En la actualidad se han desarrollado los lenguajes llamados *shells* que son esqueletos de SE's listos para ser llenados de

conocimiento. La ventaja (y a la vez desventaja) de estos lenguajes es que fueron desarrollados para determinado tipo de conocimiento especializado.

TAREAS	PROGRAMAS CONVENCIONALES	SISTEMAS EXPERTOS
Representación y uso de	Datos	Conocimiento
Conocimiento y Control	Integrados	Separados
Proceso de solución	Algorítmico (repetitivo)	Heurístico (Inferencial)
Manipulación efectiva	Grandes bases de datos	Grandes bases de conocimiento
Programación	El programador garantiza que su respuesta es única y completa.	El Ingeniero del conocimiento proporciona restricciones únicas y completas.
Explicación	Imposible a media corrida	Se puede lograr
Orientación	Procesos numéricos	Proceso simbólico

*Tabla 1: Comparación de los Sistemas Expertos con programas procedurales*

### Arquitectura de un SE

La arquitectura o estructura de un SE imita parcialmente los actos de un experto humano. Está constituido por las partes que se muestran en la figura 1. A continuación se explican, haciendo una analogía con el experto humano [Maher 87a]:

l) BASE DE CONOCIMIENTO: El experto humano posee una extensa memoria de hechos, estructuras y reglas que representan el conocimiento acerca del dominio de su pericia. Así, la base de conocimiento del SE es el componente que contiene los hechos y la heurística asociados al dominio en el cual se aplicará dicho sistema. Es aconsejable que la base de conocimiento sea lo suficientemente transparente para que sea fácilmente modificada; ésto resulta de mucha ayuda en diseño de estructuras, ya que los reglamentos y normas cambian constantemente.

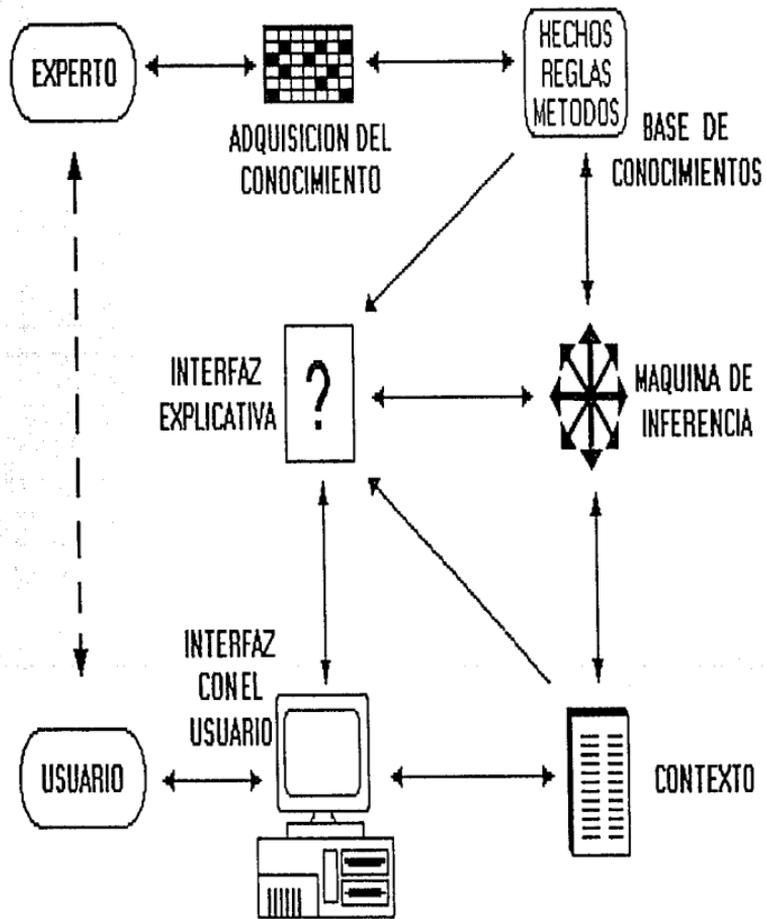


Figura 1: Arquitectura de un Sistema Experto

II) CONTEXTO: Dado un problema, el experto humano primero retiene los datos y los analiza para posteriormente utilizarlos en la solución de dicho problema. Igualmente, el SE contiene en su contexto la información del problema que se está resolviendo; inicialmente contiene la información que definen los parámetros del problema y conforme avanza la inferencia, el contexto se expande conteniendo la información generada por él mismo para llegar a la solución.

III) MÁQUINA DE INFERENCIA: La pericia humana se guía por un método de razonamiento para resolver problemas. Así, la máquina de inferencia contiene el control de la información y utiliza la base de conocimiento para expandir o modificar el contexto.

IV) INTERFAZ EXPLICATIVA: El experto humano requiere algunas veces de explicar sus decisiones o recomendaciones. Un SE también lo realiza con sus acciones, las que van desde una pista de ejecución (qué va realizando el sistema), hasta la habilidad de responder preguntas acerca del proceso del razonamiento usado para alcanzar una solución.

V) ADQUISICION DEL CONOCIMIENTO: El experto a través de su vida va adquiriendo su experiencia; este es el componente que facilita la entrada del conocimiento a su base actuando como un editor.

VI) INTERFAZ CON EL USUARIO: Un experto humano necesita medios de comunicación con sus fuentes de información y con sus clientes. Esta interfaz, además de permitirle al sistema ser interactivo, aquí se permite un diálogo transparente donde a manera de explicación indique el proceso de inferencia o razonamiento utilizado.

### ¿Quiénes y Cómo hacen los SE's?

El equipo esta formado principalmente por dos personas:

A) El Ingeniero del conocimiento, quien se encarga de investigar las técnicas de representación del conocimiento y las herramientas para implementarlas.

B) El experto, quien, con sus recursos, se encarga de proporcionar el conocimiento y la pericia. La *adquisición del conocimiento* es el proceso de extraer dicho conocimiento del experto y codificarlo en forma tal que pueda ser utilizado por el sistema. Esta transmisión y transformación de pericia para la solución de problemas de una fuente de conocimiento a un programa es el alma del proceso del desarrollo de un SE.

### **Etapas de desarrollo de un SE**

Las principales etapas de desarrollo de un SE son:

Identificación: Aquí se definen exactamente las características del problema (área del problema, alcance, necesidades, etc.);

Conceptualización: Búsqueda de conceptos para representar el conocimiento. Para esto se requiere identificar los principales aspectos del problema (conceptos clave, relaciones, características del flujo de información, estrategias de solución, limitantes, etc.);

Formalización: Diseño de estructuras para organizar el conocimiento (shell o lenguaje) de tal manera que haya una representación apropiada de éste.

Implementación: Formulación de reglas, métodos, etc., que incorporen el conocimiento (primer programa prototipo), con el objeto de definir una estructura para organizarlo.

Prueba: Validación de reglas que incorporen el conocimiento (evaluación conforme a estándares de excelencia definidos por expertos).

### **Tipos de SE's**

Las principales aplicaciones o tipos de SE's dentro de la Ingeniería se pueden dividir, de acuerdo a la tarea a desarrollar [Maher 87a], en:

Interpretación: Analiza datos para inferir significados de estados y situaciones.

**Diagnóstico:** Infiere defectos en un sistema, partiendo de la interpretación de signos potencialmente interferidos.

**Monitoreo:** Analiza el comportamiento de un sistema para detectar sus posibles desviaciones con respecto a una norma para tomar medidas preventivas.

**Predicción:** Pronostica probables consecuencias (futuro) de una situación dada con base en modelos.

**Planeación:** Diseña un programa de acciones a realizar para llegar a una meta dada.

**Diseño:** Maneja especificaciones para crear y configurar objetos que satisfagan requisitos particulares.

**Depuración:** Proporciona soluciones para corregir condiciones anómalas dentro de un sistema.

**Reparación:** Desarrolla y ejecuta planes para corregir fallas dentro de un sistema.

**Instrucción:** Apoya el aprendizaje del alumno, lo diagnostica para localizar deficiencias en él, y las corrige oportunamente.

**Control:** Interpreta la situación actual del sistema, compara con la norma, detecta desviaciones, formula el plan de corrección y monitorea su ejecución.

### **Representación del conocimiento**

La función principal del conocimiento es que pueda ser usado en el proceso de inferencia. Para esto, un SE puede representar el conocimiento en las siguientes formas [Lara y Gelman 89]:

**Reglas:** Estas se dividen en dos estructuras fundamentalmente:

**Hechos:** Piezas elementales y generales de conocimiento formadas por un concepto sujeto y otro llamado predicado.

**Reglas lógicas:** Constituidas por la relación de uno o más hechos (premisa) que concluyen en otro más (conclusión).

La estructura general de una regla es:

SI premisa

ENTONCES conclusión

**Estructuras o Frames:** Paquetes de conocimiento que contienen la información relevante con respecto a un objeto, estructurada en un formato preciso. Consta de cuatro elementos:

**El nombre del objeto;**

El **padre del objeto**, que es otro frame cuyo dominio contiene a este último;

Las **calidades del objeto** (slots) con sus respectivos valores específicos, los cuales heredan a sus especies lógicas o descendientes (hijos).

**Condiciones o llaves** para acceder a la información del objeto y codificarla, si así se desea.

**Redes de inferencia:** Conjunto de proposiciones (nodos) interconectadas mediante funciones lógicas que expresan las dependencias de verdad de los consecuentes en términos de sus antecedentes inmediatos.

Sean las proposiciones P y Q; se dice que P es un antecedente lógico de Q (consecuente lógico) en un discurso lógico dado, si cierto valor de verdad de P es una condición necesaria para que Q sea verdadera.

Los antecedentes inmediatos, con respecto a un consecuente dado, son aquellos que lo determinan en forma directa, sin la necesidad de otro antecedente como intermediario.

Las funciones lógicas son aquellas que expresan la dependencia de verdad de un consecuente en términos de los valores de verdad de sus antecedentes inmediatos.

Todas estas estructuras forman la base de conocimiento, la cual es utilizada por la máquina de inferencia.

#### **Manejo del conocimiento: Métodos de inferencia**

Existen dos métodos de inferencia principalmente (Maier 87a):

**Derivación:** Parte de un estado conocido, y mediante lógica deductiva llega a una solución conocida. De una lista de soluciones predefinidas en la base de conocimiento deriva la solución más apropiada para el problema en cuestión. Este método implica que las soluciones pueden ser numeradas y cada una puede ser justificada por las especificaciones de un problema dado. Generalmente, su implementación va precedida por el desarrollo de una red de inferencia, que representa las conexiones entre las soluciones predefinidas y los datos de entrada que especifican el problema.

Este método es aplicable a la Ingeniería Civil en problemas de diagnóstico y de clasificación (mencionados anteriormente). Las estrategias de control que más funcionan con este método son los tres tipos de encadenamiento.

**Formación:** Forma una solución de componentes de solución elegible almacenados en la base de conocimiento. Se usa cuando las posibles soluciones son tantas que no pueden ser numeradas y almacenadas en la base de conocimiento. Su implementación involucra la identificación de las partes de la solución y una estrategia y heurística para combinarlas. Generalmente, las partes de la solución son ordenadas en categorías que representan una jerarquía de decisiones o subsistemas. Estas categorías se consideran individualmente.

Este método se utiliza en la solución de problemas de Ingeniería Civil relacionados con diseño y planeación; siendo sus estrategias de control la reducción del problema, el plan-genera-prueba y la agenda de control.

## Estrategias de control

Las estrategias de control mencionadas anteriormente son [Maher 87a]:

Encadenamiento hacia atrás (Backward chaining): Recibe este nombre porque en el proceso se toma una meta o hipótesis y se razona en sentido inverso a través de una cadena de razonamiento enfocada a evidenciar la meta. Una cadena de razonamiento puede consistir de una serie de reglas, métodos, etc.

Esta estrategia de Inferencia se utiliza para aplicaciones de tipo diagnóstico y problemas de clasificación, donde las posibles soluciones se conocen, no así los datos requeridos.

Encadenamiento hacia adelante (Forward chaining): En esta estrategia la máquina de inferencia comienza con hechos o condiciones conocidos e infiere los valores de nuevos hechos basado en la información obtenida en el contexto de la sesión. El proceso continúa hasta que no se pueden deducir más conclusiones de los datos iniciales o modificados. Ya que el proceso es iniciado por un grupo inicial de eventos, también se le conoce como razonamiento dirigido por datos o por eventos.

Este tipo de Inferencia se usa en problemas donde las posibles soluciones no se pueden predecir. Se usa más en situaciones de muchas hipótesis (soluciones) y pocos datos de entrada. Su principal desventaja es que puede requerir como datos de entrada todos los posibles hechos para todas las condiciones, y en muchos casos no todos los posibles hechos son conocidos o relevantes.

Encadenamiento mixto: Combina las dos anteriores, el sistema comienza con el estado inicial de hechos conocidos para asignar una probabilidad a cada uno de los estados de meta potenciales. Posteriormente, el sistema trata de mantener el estado de meta con la mayor probabilidad formulando nuevas submetas y pidiendo información adicional de el usuario si lo amerita. La ventaja estriba en que el usuario sólo proporciona datos importantes para el problema en turno y, si una hipótesis inicial no se aprueba, la próxima suposición se hará de acuerdo con la última información.

**Reducción del problema:** Descompone el problema original en subproblemas más pequeños. Esta descomposición se representa mediante un árbol Y/O. El nodo 'Y' tiene varios arcos apuntando a un cierto número de nodos sucesores, que deben ser resueltos para que el nodo Y sea verdadero. Por su parte, un nodo 'O' requiere que únicamente un nodo sucesor sea resuelto. Se usa mucho para resolver problemas grandes y complejos.

**Plan-Genera-Prueba:** En su forma pura, genera todas las posibles soluciones de los componentes de la base de conocimiento y prueba cada solución hasta encontrar una que satisfaga las especificaciones de la meta. La secuencia de este método restringe el número de posibles soluciones generadas por medio de una reducción de soluciones inconsistentes.

**Agenda de control:** Asigna un rango de prioridad de ejecución a cada tarea en una agenda. Se utiliza con tareas complejas que requieren enfocar su atención a ciertas partes del problema, también pueden ser usadas en sistemas que requieren varias fuentes independientes de pericia con comunicación entre ellos.

#### **Niveles de desarrollo de un SE**

Dependiendo de la etapa de desarrollo en la que se encuentren, los SE's [Allen 87, Maher 87] pueden ser clasificados en:

**Comerciales:** Han sido desarrollados, validados e implementados en un ambiente comercial, pero sobre todo, ya tienen un uso práctico. Son en realidad muy pocos los SE's que han alcanzado este nivel en Ingeniería Civil.

**Operacionales:** Fueron desarrollados, pero aún no han sido validados (o no del todo). Sin embargo, están en operación aunque no comercialmente. La importancia de este tipo de SE estriba en que tan pronto como sean validados se comercializarán o, en caso contrario, no se busca comercializarlos sino que fueron desarrollados con fines de investigación. Por su naturaleza, sólo son utilizados por un grupo reducido, al que generalmente no pertenecen los ingenieros de la práctica.

De desarrollo (o demostración): No tienen la suficiente pericia (experiencia) para ser comerciales, lo cual implica un bajo valor comercial en la práctica; además, les falta una adecuada interfaz con el usuario, por lo que su operación se limita a un grupo más reducido que los anteriores; tienen un conocimiento tan limitado que no pueden ser usado por un gran número de gentes; se pretende que sirvan de modelos para desarrollos posteriores de sistemas.

### **Los SE's en la Ingeniería Estructural**

A continuación se analiza la forma en que los SE's pueden ser (o ya lo han sido) introducidos a la Ingeniería Estructural:

El término Ingeniería Estructural se usa, en general, para hablar del proceso de análisis y diseño estructural [Allen 87]. El análisis implica, dependiendo de la complejidad de la estructura, su forma estática y dinámica (pudiendo usarse en ambos casos el método del elemento finito (MEF) o algún método simplificado). En el proceso de diseño se abarcan todas las actividades comprendidas desde la definición de la necesidad de resistir ciertas cargas hasta la construcción de la estructura resultante (que satisface dichas necesidades) [Maher 87a]. Pero lo más común es que se hable del diseño como las actividades comprendidas entre la definición de una configuración estructural y las especificaciones detalladas de la estructura a ser construida.

El proceso Diseño/Análisis es un ciclo iterativo, el cual tiende a converger más rápido a mayor experiencia del Ingeniero Estructuralista. El resultado final de este proceso son las especificaciones detalladas de una configuración estructural capaz de transmitir al terreno las cargas (de diseño) que recibe la estructura con los niveles apropiados de seguridad y funcionalidad en cuanto a servicio [Maher 87a].

El diseño de una estructura bien puede dividirse en tres etapas: **El diseño preliminar, el análisis y el diseño detallado.**

En el diseño preliminar se buscan todas las soluciones posibles a la pregunta ¿Cómo transmitir a cimentación todas las cargas que se me puedan presentar? La respuesta está en función de muchas variables: disponibilidad del material, economía, condiciones de la zona, uso de la estructura, etc.. Definida la estructuración, se procede a dar una primera aproximación en cuanto a las dimensiones que los elementos estructurales deberán tener. Al realizar la estructuración, intervienen tantos factores que en ocasiones resulta complicado satisfacer todos los requisitos que un buen diseño debe cumplir. Generalmente, se recurre a soluciones ya conocidas, aunque éstas no sean las óptimas. Aquí puede pensarse en un SE que pueda ayudar al estructurista, no en la toma de decisión de cuál sistema elegir, sino en el planteamiento de alternativas de solución que cumplan con las características planteada por el estructurista. Tal es el caso de HI-RISE [Maher 87], un SE que realiza el diseño preliminar de edificios comerciales o residenciales de planta rectangular (limitado de 5 a 15 pisos).

Para la etapa de análisis podemos observar cuatro pasos:

- i) **La modelación:** Consiste en proponer un modelo matemático que describa la estructura física que estamos analizando. Cuando la estructura es compleja, la modelación lo es más. Una persona sin experiencia en este campo podría hacer un mal modelo y todo lo que ello implica. Para ayudar a Ingenieros novatos a modelar sus problemas de diseño se desarrolló el SE SACON [Maher 87a, Allen 87], siendo el primero en aparecer aplicado a Ingeniería Estructural (1978). Este sistema ayuda al usuario del programa MARC, de elemento finito, a preparar los datos de entrada además de proporcionar consulta del mejor método de modelación para problemas de análisis. Es importante mencionar que SACON no tiene interfaz con MARC.
- ii) **La estimación de cargas de diseño:** Por lo general, las cargas son proporcionadas por reglamentos o normas de diseño, pero algunas veces puede suceder que la norma no contemple el caso en estudio, o que las normas sean complicadas de seguir. Para el primer caso se necesita aplicar criterio Ingenieril (que sólo la experiencia proporciona), y en el segundo se corre el riesgo de confusión o de no cumplir con algún punto. Para estos dos casos se desarrollaron los SE's WISER [Maher, 87a] y SNOW LOAD

ESTIMATION SYSTEM [Fazio, 87], el primero guía al Ingeniero en la estimación de los efectos de la carga dinámica por viento en edificios con nueva estructuración y materiales, se basa en experimentaciones hechas en túnel de viento almacenadas en una base de datos y consideraciones de tipo teórico (en esta etapa del diseño no es factible económicamente un estudio de túnel de viento). El segundo estima las cargas debidas a la nieve en los techos de las construcciones de acuerdo con el Código Nacional de Construcción de Canadá (el cual utiliza una serie de factores de ajuste).

iii) Obtención de elementos mecánicos: En este proceso, se aplican al modelo matemático las cargas obtenidas en el inciso anterior y se obtienen los elementos mecánicos en cada una de las partes del sistema estructural. Esta actividad se realiza generalmente con un paquete comercial de análisis (o desarrollado dentro de la misma empresa). Ante la proliferación de este tipo de paquetes, dentro de la competencia, cada vez se busca realizar mayor número de actividades, lo que implica programas más complejos de entender y de seguir en el transcurso de una sesión. Sólo una persona con mucho tiempo de haber estudiado y utilizado un mismo paquete sabe aprovechar sus recursos al 100%. Los SE's que han aparecido en esta área, guían al usuario del paquete de análisis a introducir los datos que le solicite. Tal es el caso de PRETAP, un SE que sirve como preprocesador para el paquete TAP-86, un programa de análisis tridimensional de estructuras de edificios altos. El diseñador puede crear un archivo de datos de entrada sin tomar en cuenta el formato (usualmente necesario para programas convencionales de análisis).

iv) Revisión de secciones propuestas: Con los elementos mecánicos obtenidos, se revisan las secciones propuestas bajo las normas técnicas del reglamento de construcciones. Los problemas que se pueden presentar son los mismos que para la estimación de cargas, y la aplicación de los SE's se ve mejor reflejada en la siguiente etapa.

Para la etapa de dimensionamiento final, se recurre a las normas técnicas para saber si un elemento es lo "suficientemente" seguro para aceptarse su diseño. En el caso de secciones de concreto sólo se ha logrado dar el diseño final para un solo tipo de elemento; por ejemplo, el SE RUBHY [Jones, 88], que

realiza el diseño detallado de marcos planos con las siguientes simplificaciones: Vigas rectangulares simplemente armadas que sólo son diseñadas por flexión, solamente proporciona el diseño de columnas cuadradas con acero en los extremos.

Cuando se trata de secciones de acero, se forma una base de datos que contenga todas las secciones comerciales con todas sus propiedades geométricas y mecánicas (a manera de manual) que son utilizadas para satisfacer las restricciones de las normas de diseño de acero. Tal es el caso del SE STEEL BEAM DESIGNER [Malasri, 88], que sólo revisa si la sección cumple con todas las restricciones del reglamento después de haberle proporcionado los momentos a que está sujeta.

La confiabilidad estructural es la seguridad que tenemos de la estructura en condiciones de Incertidumbre. Además de que las estructuras están expuestas a riesgos naturales, los materiales no están exentos de deterioro y aplicación repetida de cargas no consideradas. El SE RAISE-1 [Chen y Liu 88] evalúa la confiabilidad de marcos de concreto reforzado ya existentes a través de razonamiento difuso.

Para la evaluación y reparación de daños se necesita, nuevamente, experiencia, para la evaluación de los daños sufridos por una estructura, y después criterio para la decisión de restaurar la estructura o demolerla. Esta es la función de SE's como SPERIL 1 y 2 [Maher 87a y Allen 87], los cuales diagnostican las estructuras que permanecen de pie después de un sismo de gran magnitud. Para manejar la Incertidumbre de la apreciación de los daños (transmisión usuario-máquina) este tipo de sistemas utilizan en todo su proceso de inferencia valores de certeza (conocida como lógica difusa).

En análisis de estructuras dañadas, uno de los métodos más explotados en esta rama de la Ingeniería Estructural es el de razonamiento difuso; debido a la incertidumbre en el momento de manejar datos (ya que todos son proporcionados con apreciación del usuario), de aplicación de las reglas y durante la inferencia [Shiraishi 89]. Una de las principales preocupaciones ha sido en el campo de la evaluación de estructuras dañadas por sismos, y la seguridad (o riesgo) que éstas ofrecen posteriormente. Estos sistemas se clasifican como de interpretación y diagnóstico.

El uso de los SE's en el diseño depende de la complejidad del problema a resolver:

- Cuando el número de alternativas de solución es pequeño, el SE puede auxiliar en el proceso de selección.
- Si el problema es muy complejo, la actual tecnología de los SE's puede ayudar a mejorar la comprensión del proceso de diseño lo que facilita en gran medida la solución del problema.

Este campo todavía es limitado en el sentido de que no se ha logrado manejar más que la etapa de prediseño (diseño conceptual), debido a la complejidad de tener interfase con programas procedurales que realicen el análisis estructural (segunda etapa); actualmente se estudia el desarrollo de un KBES (Knowledge-Based Expert System) que realice el diseño estructural integrado, que cuente con procesamiento simbólico de heurística y conocimiento experimental, así como cálculos procedurales algorítmicos, para finalmente integrar procesos simbólicos, numéricos y manejo de base de datos [Adeli 89].

#### Algunos SE's desarrollados en el área de Puentes

AASHTO BRIDGE RATING SYSTEM: Sistema Experto que maneja todas las posibles entradas a un problema de diseño de puentes y utiliza el conocimiento acumulado en una base de datos para generar un diseño. Desarrollado en la Universidad Lehigh [Maher 87a y Allen 87], este sistema abarca los puentes carreteros simplemente apoyados con superestructura de concreto reforzado y vigas "I" de concreto pretensado. Se consideran los efectos del tráfico vehicular y la sobrecarga.

La base de datos está estructurada en un formato de hoja de cálculo. El método básico se basa en una búsqueda de razonamiento hacia adelante de la base de datos para una clasificación de puentes.

Sirve como una interfaz inteligente entre bases de datos y códigos de elemento finito. Está implementado en Fortran en una computadora CDC.

**BDES** (Bridge Design System): Sistema Experto desarrollado para ayudar al Ingeniero en el proceso de decisión, modelación y análisis de puentes carreteros de Carolina del Norte; Incorporando conocimiento experto de factores de seguridad así como de criterios de servicio y seguridad de la AASHTO y del Estado de Carolina del Norte.

Desarrollado en la Universidad Duke [Maher 87a y Allen 87], este sistema usa un método de reglas de producción con cadenamamiento hacia adelante. Los gráficos son usados para entrada y salida de datos. Fue escrito en Pascal para uso con Ingenieros novatos.

La entrada de este sistema requiere que el ingeniero defina la geometría del puente en forma gráfica, su función y el medio ambiente en que será desarrollado. El sistema genera entonces posibles soluciones al problema usando aproximaciones y asumiéndolas; posteriormente usa un método de factor de carga para checar los diseños. Este sistema es capaz de diseñar superestructuras de puentes de claros tanto cortos como medianos, continuos o discontinuos.

La base de conocimiento incluye tipo formal y heurístico. Cuando el diseño generado por el sistema no conoce las especificaciones requeridas, permite al usuario conocer las causas de que el diseño no sea factible. Su estado actual es el de prototipo de desarrollo; futuras versiones incluyen reglas de rediseño.

**CRACK** (Consultant Reasoning About Cracking Knowledge): Sistema Experto para el dominio sobre el problema de fatiga y fractura en puentes de cubiertas con vigas de acero. Desarrollado en el MIT [Kim 88] e implementado en PROLOG dentro de una Macintosh. Existen tres razones primordiales para el uso de un método basado en el conocimiento en esta área del dominio de la Ingeniería de puentes:

- A) Es un problema práctico donde existe el conocimiento, pero frecuentemente no se utiliza;
- B) El conocimiento es de diversos tipos (estadístico, heurístico, ingenieril, etc.), pero bien delimitado, de tal manera que es posible cubrir completamente el conocimiento requerido para solucionar el problema; y
- C) El conocimiento adquirido tiene usos múltiples (análisis de fallas, determinación de causas de

pérdidas de esfuerzo y fijaciones, para predecir lo que resta de la vida de servicio, y para verificar y optimizar diseños).

A KNOWLEDGE-BASED SYSTEM FOR PLATE GIRDER DESIGN: Este sistema basado en el conocimiento, desarrollado en el MIT [Pagnoni 85], produce eficientemente un diseño preliminar óptimo de traveses para puentes. Dadas las dimensiones de la viga y las cargas aplicadas, el sistema selecciona las dimensiones de patines, almas y rigidizadores.

Está escrito en lenguaje C implementado en una microcomputadora. Está basado en el esquema de Genera-Prueba-Actualiza: El generador produce opciones de configuraciones de alta calidad, después, el probador verifica que ninguna de las reglas de dedo relevantes sea violada; en caso de que esto suceda, se aplican las medidas correctivas a la opción.

A KNOWLEDGE-BASED SYSTEM FOR CONCRETE BRIDGE DECK INSPECTION: También desarrollado en el MIT [Pagnoni 85], este sistema realiza un análisis automático de los datos de radar utilizados para determinar el deterioro en las cubiertas en puentes de concreto. Está implementado utilizando un shell como el de Mycin. Las señales de radar son introducidas a un procesador digital convencional, el cual proporciona datos burdos de las condiciones de cada lugar al procesador basado en el conocimiento. Esto, basado en las bases de conocimiento del radar, el deterioro de concreto y la Ingeniería de Puentes, interpreta los datos y concluye si el deterioro no se presenta, si el medio ambiente conducirá al deterioro o si el deterioro ha dado comienzo; con un factor de certeza asociado a cada conclusión hecha.

AN ADVISOR FOR CONCRETE BRIDGE PRELIMINARY DESIGN: Realiza el diseño preliminar de puentes seleccionando un grupo de posibles configuraciones con sus métodos constructivos para una situación dada [Pagnoni 85]. También se desarrolló en el MIT y fue implementado con dos herramientas: IMAC, un procesador de árboles de decisiones, y Mini-Mycin, un sistema basado en reglas. Elige entre 15 posibles soluciones tan sólo con contestar al usuario 12 preguntas alternativas

que, exceptuando una, sólo aceptan sí o no como respuesta. Esta primera parte la realiza con IMAC, y posteriormente asocia a cada respuesta un factor de certeza con Mini-Myclin.

### **Comentarios**

Como se puede apreciar, los SE's representan un gran avance en el desarrollo de la tecnología aplicada a las estructuras y una gran ayuda para los estudiantes de esta rama de la Ingeniería Civil, ya que pueden ser empleados para la enseñanza y preparación de los futuros estructuralistas. Y esto porque, a diferencia de los programas procedurales, los SE's no se pueden considerar (ni diseñar) como cajas negras.

La idea de la aplicación de estos programas computacionales dentro de las estructuras no es la mecanización de procedimientos analíticos, sino un mayor y más rápido entendimiento de éstos.

La aplicación de los SE en el área de estructuras aún es limitada, ya que no se ha conseguido integrar todo el proceso del diseño estructural dentro de un sólo SE. En algunos procedimientos de este proceso intervienen apreciaciones subjetivas del usuario que implican factores de certidumbre que aún no pueden ser calibrados por la discordancia de opiniones entre expertos.

En el siguiente capítulo se presenta, a manera de planteamiento del problema, una parte de la Ingeniería Estructural que son los códigos de diseño, particularmente se habla de los de puentes carreteros.

## CAPITULO III

---

### ANÁLISIS SISMICO DE PUENTES CARRETEROS

---

#### Introducción

Los códigos de diseño (manuales y reglamentos) constituyen la forma más usual que utiliza el ingeniero para expresar restricciones y recomendaciones. Estas últimas permiten aligerar el trabajo al diseñador, ya que son el resultado de experiencia y conocimientos.

Los ingenieros responsables del análisis sísmico de una estructura poseen regularmente información general sobre las características estructurales de la obra. En un puente, por ejemplo, se conocen todas las características geométricas (claro, altura de pilas, grado de esviamiento, etc) con las cuales el ingeniero elige los criterios para el análisis sísmico, desde el método a emplear hasta la forma de aplicarlo [Suástegui, Gómez y Lara 91].

Sin embargo, en México no hay códigos de diseño que consideren el caso específico de estas estructuras. En lo particular, el análisis sísmico de puentes se ve "viciado" por el de edificios y en algunos casos se recurre a métodos desarrollados en otros países como a continuación se comenta.

#### Revisión de la práctica nacional

En México contamos con dos tipos de códigos de diseño sísmico:

El primero le corresponde a los reglamentos de construcción regionales (por ejemplo el del Distrito Federal) apoyados en sus respectivas normas técnicas complementarias, las cuales sirven como un complemento para la mejor aplicación de los reglamentos a los cuales están ligadas. Como su nombre lo indica, el alcance de este tipo de reglamentos sólo se aplica a nivel local.

Tal es el caso del Reglamento de Construcciones del D.F., donde se resaltan las estructuras urbanas más comunes como son edificios (habitationales, de oficinas, hospitales, etc.) y de estructuras de uso Industrial como las chimeneas. Quedando descartados los puentes de este reglamento.

El segundo es el correspondiente al Manual de Obras Civiles editado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), el cual está estructurado a manera de recomendaciones. Este manual de la CFE es aplicable a nivel nacional, ya que las recomendaciones son generales. La parte donde se encuentran estas recomendaciones es la C.1.3, referente a diseño sísmico.

En ninguno de los dos casos anteriores se hace referencia especial a los puentes, tanto urbanos como carreteros y de ferrocarril, como estructuras especiales y mucho menos al tratamiento al que deben ser sujetos.

Para el caso del manual de CFE se tienen las siguientes referencias:

En la sección 3.2.2 se clasifican las estructuras por su destino en A, B y C, sin embargo no se hace alusión a los puentes.

En la sección 3.2.3 se clasifican las estructuras por su estructuración en tipos 1, 2 y 3, ubicando en el tipo 3 a "otras estructuras", entre las cuales entrarían los puentes por no encajar en las definiciones de los tipos 1 y 2. Además se aclara que las especificaciones son para estructuras tipo 1.

Por otro lado, al hablar de los diferentes tipos de análisis sísmico sólo se mencionan las restricciones para la aplicación de los métodos simplificado y estático en edificios.

A falta de códigos nacionales, el diseñador de puentes mexicano se ve obligado a recurrir a códigos extranjeros, sobre todo de la AASHTO. Sin embargo, en algunos casos se extrapolan criterios que no son aplicables o se utilizan hipótesis de trabajo que conducen a diseños fuera de la realidad.

Por otro lado, todos los códigos de diseño sísmico mexicanos prohíben el uso de códigos extranjeros con parámetros nacionales y viceversa: "El empleo de recomendaciones con parámetros establecidos

por otros códigos de diseño puede conducir a un diseño inseguro de la estructura" [Manual de Obras Civiles 81]. Lo anterior debido a que cada código trata de llegar a los niveles de seguridad que considera adecuados mediante el uso de factores de seguridad explícita o implícitamente incluidos en las diferentes etapas del diseño y que el peso que se da a los factores parciales es diferente de uno a otro código, por lo que puede llegarse a resultados inseguros, o excesivamente conservadores, si se toman, por ejemplo, las cargas y los factores de carga de un reglamento, mientras se calculan las resistencias con los criterios de otro [Mell 91].

Por lo anterior se puede apreciar la necesidad de un código de diseño sísmico que contemple el caso especial de los puentes carreteros. Actualmente se realiza la revisión del Manual de Obras Civiles, cuya última versión fue realizada en 1981 [Manual de Obras Civiles 81]. Entre los capítulos a actualizar se encuentra el C.1.3, mencionado anteriormente. A continuación se comenta una versión preliminar del manual de CFE para la parte de puentes.

### **Modificaciones a las recomendaciones del Manual de Obras Civiles de la CFE en su parte de diseño sísmico (C.1.3).**

Una de las modificaciones más notables del manual de CFE es la aparición de nuevos tipos de estructuras, dentro de las cuales a los puentes les corresponde el tipo 7.

Para las estructuras tipo 7 (puentes carreteros), además de los ya conocidos métodos dinámicos (análisis modal espectral y análisis paso a paso) se proponen dos nuevos tipos de análisis sísmico: el método simplificado y el método estático para puentes regulares, que se definirán posteriormente.

Se podría empezar por definir lo que es un puente regular [U.S. Department of Transportation 81]: "Un puente regular es aquél que no tiene cambios bruscos de masa, rigidez o geometría a lo largo de su claro y no tiene grandes diferencias en estos parámetros entre soportes adjuntos (excluyendo a los apoyos). Por ejemplo, un puente puede ser considerado regular si es recto o describe un sector de un

arco no mayor de 90 grados y tiene columnas o pilas adyacentes que no difieren en rigidez por más de 25%.

Por ser las primeras recomendaciones que se editan en México se proponen criterios de análisis razonablemente sencillos. La filosofía básica de diseño adoptada radica en el cálculo de fuerzas obtenidas de un análisis elástico lineal, y reducidas por un factor de ductilidad para obligar a los elementos estructurales a ingresar en el rango inelástico.

Al pensar en los métodos estáticos se desea el desarrollo de un método simplificado aproximado al análisis dinámico de puentes que baste para el diseño final de puentes simples e inclusive sea usado en el diseño preliminar en puentes más complejos, por las siguientes razones [U.S. Department of Transportation 81]:

- 1) Son simples extensiones de los que actualmente se están usando, lo que facilitaría su implementación
- 2) No se requiere de cálculos complejos para su solución
- 3) Rapidez y facilidad de aplicación

La determinación de la respuesta sísmica por los métodos estáticos equivalente consta de tres pasos básicamente:

- 1) Calcular el período del primer modo de vibrar en la dirección de análisis
- 2) Obtener el coeficiente sísmico y el factor de ductilidad correspondiente
- 3) Distribuir la fuerza sísmica estática equivalente a los elementos de la subestructura

A continuación se describen los cuatro métodos de análisis sísmico propuestos para puentes carreteros por las nuevas recomendaciones de CFE:

### 1.- Método Simplificado de análisis

Hasta antes del sismo de San Fernando (1971), este método era el más común para diseño de puentes. Para simplificar la idealización del puente, se hacen las siguientes consideraciones en el comportamiento [U.S. Department of Transportation 81]:

- Se hace una distribución de áreas tributarias con la superestructura para cada tramo de apoyos, realizándose los cortes transversalmente.
- Toda la subestructura se supone empotrada, y las pilas de cimentación son las columnas de un marco cuya trabe, formada por la superestructura, se considera infinitamente rígida (fig. 2). Cada marco vibra en su propio período natural, independientemente del período de los otros marcos.
- Las deformaciones transversales y la rigidez a la torsión de la superestructura no contribuyen a la rigidez del sistema, pero su masa sí influye en el cálculo de las fuerzas de inercia.

Como se puede apreciar, existen demasiadas simplificaciones en este método; aún para los puentes de geometría sencilla, las suposiciones hechas no dejan de ser cuestionables.

Uno de las principales inexactitudes es el cálculo del período, que acarrea consigo una carga sísmica estática equivalente fuera de la realidad. Además, la distribución de esta fuerza puede no ser la adecuada. Es por eso que el método se limita en las nuevas recomendaciones a puentes que cumplan con los siguientes requisitos:

- que tenga más de un tramo: Esto se debe a que para puentes de un solo tramo no se considera necesario ningún tipo de análisis sísmico, basta con diseñar las longitudes de los apoyos.

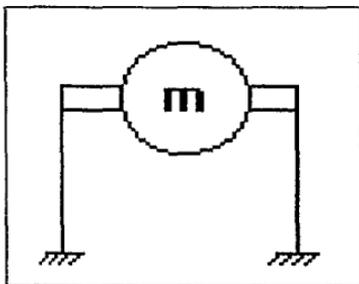


Figura 2: Modelo del método simplificado.

b) que sean rectos y que la longitud de sus tramos sea muy parecida: Esto con el fin de evitar diferencias significativas de los períodos fundamentales entre tramo y tramo para evitar fallas por movimientos a desfase.

c) que se pueda suponer que los marcos del puente trabajan de manera independiente tanto en sentido longitudinal como transversal. Esta es la base para que el método sea aplicado, ya que la idealización de este método es de marcos independientes. Para lograr esto, un experto proporciona las siguientes observaciones: "Cuando un puente es discontinuo se puede considerar que los tramos trabajan de manera independiente. En el caso de que éste sea continuo, sólo se le puede considerar con marcos independientes si el índice de rigidez (IR) es menor a 0.8".

El índice de rigidez se refiere a la contribución relativa de las columnas a la rigidez transversal de la estructura entera. El índice de rigidez se obtiene del cociente  $W_2 / W_1$  como se muestra en la figura 3 [U.S. Department of Transportation 81].

Donde:

$W_1$  = Rigidez a la flexión lateral de la superestructura considerando la contribución de las columnas

$W_2$  = Rigidez a la flexión lateral de la superestructura sin considerar la contribución de las columnas

d) que sus claros sean menores de 40 m y el ancho de la calzada sea menor de 30 m. Esta restricción surgió de que en la actualidad los puentes carreteros en México se construyen con base en traveses prefabricadas, formando tramos simplemente apoyados de una longitud no mayor a los 40 m.

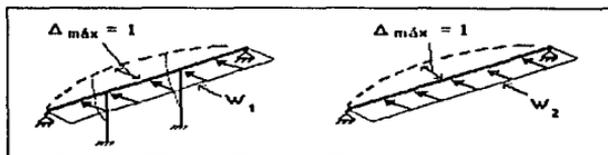


Figura 3: Obtención del índice de rigidez

El método consta esencialmente de los siguientes pasos:

- 1.- Se elige el marco a diseñar.
- 2.- Se obtiene la masa tributaria (m).
- 3.- Se calcula la rigidez del marco en el sentido de análisis (K).
- 4.- Se obtiene el período fundamental de vibración (T).
- 5.- Se calcula el coeficiente sísmico (c) correspondiente a T y se define el factor de ductilidad (Q) del marco.
- 6.- la fuerza lateral equivalente (E) se obtiene con la fórmula

$$E = [ c / Q ] * W$$

donde W es el peso de la masa tributaria.

#### *II.- Método de análisis estático (o de la carga uniforme)*

Ante un evento sísmico moderado, el puente puede ser capaz de responder como un conjunto de elementos estructurales, lo que implica que el diseño debe tomar en cuenta la distribución de fuerzas entre todos los elementos resistentes.

Para superar las deficiencias del método simplificado (aunque con limitaciones), surgió este método empírico, con los siguientes objetivos [U.S. Department of Transportation 81]:

- a) Considerar la continuidad de la superestructura en la determinación del período natural del sistema.
- b) Distribuir la carga sísmica en todos los elementos del puente que participen en la resistencia.
- c) Poder incluir en el modelo estructural la rigidez de la cimentación y de los estribos.

Para cumplir con los objetivos del método, el puente debe satisfacer con los siguientes requisitos:

- a) que tenga más de un tramo.
- b) que sea recto y que las longitudes de sus tramos sean muy parecidas.
- c) que la fuerza sísmica se distribuya en todos los marcos resistentes.
- d) que el índice de rigidez sea menor que 2.
- e) que sus claros sean menores de 120 m y el ancho de la calzada no supere los 30 m.

Está implícito en este método supone el puente responde fundamentalmente en el primer modo de vibración, ya que se desea que el puente tenga un movimiento coordinado en todos los tramos y que haya una repartición uniforme de la fuerza sísmica

La restricción del inciso e) está asociada al hecho de que para claros mayores se recomienda el uso de puentes atirantados o suspendidos, los cuales salen del alcance de aplicación del método estático.

Experiencias recientes demuestran que este método empírico proporciona resultados confiables para puentes simples, sin embargo, puede requerir en ciertos casos un análisis tridimensional; aún para puentes simples, en el análisis de la rigidez transversal de las columnas interactuando con la superestructura.

En un estudio realizado para evaluar la precisión y las limitaciones de este método comparado con un análisis dinámico de espectro de respuesta, se hizo un intento de clasificar los tipos de estructuras que pueden ser analizadas con este método [U.S. Department of Transportation 81]. Se encontró que el criterio más importante para clasificar la estructura era el índice de rigidez, definido anteriormente.

En los casos considerados en el estudio, se observó que este método puede producir resultados precisos para estructuras continuas rectas, sin esvía dado que el  $IR$  sea menor o igual que 2. Sin embargo, para estructuras con  $IR > 2$ , sólo aquellas con longitudes de claros balanceadas y la misma

rigidez de columnas se puede utilizar con exactitud el método. Por el contrario, se observó que el método no es satisfactorio para estructuras con soportes esviados, articulaciones intermedias o alineamientos curvos.

Los siguientes son los pasos del método estático:

- 1.- Considerando articulado el puente en el plano horizontal, se aplica una carga uniforme ( $q$ ), que es generalmente unitaria perpendicular a la estructura en la dirección de la vibración (fig. 4).
- 2.- Se realiza un análisis estático a la estructura para determinar los desplazamientos y los elementos mecánicos debidos a la carga  $q$ .
- 3.- Se ajusta el desplazamiento máximo al unitario ( $\Delta = 1\text{cm}$ ); con el factor de ajuste obtenido, se ajusta la carga unitaria a la correspondiente al máximo desplazamiento de 1 cm.

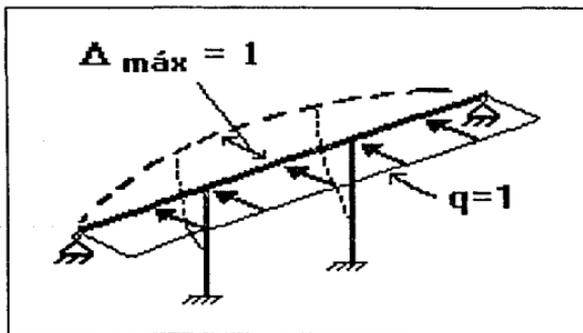


Figura 4

- 4.- Se multiplica la carga uniforme  $q$  ajustada por la longitud de la estructura; resultando ésta el valor de la rigidez total de la estructura.
- 5.- Se calcula la carga muerta total de la estructura.

6.- se determina el período natural de vibración.

7.- Se determina el coeficiente  $c$  correspondiente al período fundamental de vibración y se define el factor de ductilidad de la estructura.

8.- La fuerza sísmica total  $[E]$  actuante en la estructura, se obtiene con

$$E = [c / Q] * W$$

donde  $W$  es el peso de la carga muerta total.

9.- La fuerza  $E$  se convierte en una carga uniforme equivalente.

10.- Para determinar las fuerzas en los miembros debidas a la carga uniforme, se distribuyen las fuerzas en los miembros de la carga uniforme original aplicada a la estructura.

En este método se deben tomar en cuenta las incertidumbres en la dirección de análisis, por lo que se propone la combinación de efectos horizontales debidos al sismo de la siguiente manera: El 100% de los efectos del componente que obra en la dirección de análisis y el 30% de los efectos del que obra perpendicularmente a ella, con los signos que para cada concepto resulten más desfavorables.

En el desarrollo del procedimiento de análisis estático, es necesario determinar el período y la distribución de la fuerza lateral resultante. Un método confiable para calcular el período de vibración debe incluir la rigidez efectiva de la cubierta, restricciones de apoyos e interacción suelo-estructura, y la discontinuidad de las juntas de expansión, además de las rigideces individuales de las columnas. En resumen, se debe considerar el verdadero comportamiento dinámico del puente. Cuando el período se estima, el valor debe ser menor que el real para estar del lado de la seguridad al calcular la fuerza lateral equivalente. Es imposible que todos los tipos de puentes se presten a técnicas simplificadas, sin embargo, una gran parte de los tipos comunes son cubiertos. Se deben considerar modos de vibrar transversales y longitudinales.

### III.-Análisis sísmico dinámico

El análisis dinámico es necesario cuando la estructura del puente no cumple con las restricciones para un análisis estático, por la consideración de efectos no lineales o por la importancia de la estructura. Sin embargo, es importante recordar que los métodos de análisis dinámicos proporcionan resultados más realistas que los métodos estáticos.

Las nuevas recomendaciones de la CFE para diseño por sismo permiten como métodos de análisis sísmico dinámico los análisis modal espectral y el paso a paso. Estos métodos son recomendables para puentes que no pueden ser clasificados como regulares, como se mencionó en la parte de análisis estáticos.

#### IIIa.- Método de análisis modal espectral:

Para aplicar el análisis dinámico modal espectral, se hacen las siguientes consideraciones:

- + La estructura se comportará elásticamente
- + Las máximas respuestas modales ocurren simultáneamente
- + No se toma en cuenta la duración del temblor

Debido a que las respuestas máximas de todos los modos no son simultáneas, se ha demostrado, con base en estudios probabilísticos, que en estructuras elásticas es más realista estimar la respuesta total con la expresión

$$S = (CS_j^2)^{0.5} \dots\dots\dots(1)$$

Donde:

$S_j$  = Respuesta máxima de la estructura debida al modo  $j$ , donde  $S_j$  puede ser fuerza cortante, fuerza axial, desplazamiento lateral, momento flexionante, etc.

**S = Cota superior a la respuesta de la estructura con la participación de todos los modos**

Un espectro presenta variaciones bruscas en la respuesta máxima en función del período natural. Por eso se recurre a espectros de diseño, los cuales toman en cuenta:

- \* Incertidumbres en la valuación de períodos
- \* Efectos de temblores de distintos orígenes
- \* Influencia del amortiguamiento
- \* Influencia de los distintos tipos de suelos

Los espectros de diseño están en función de:

Período fundamental de la estructura [T]

Porcentaje de la gravedad (aceleración) [a/g]

Zona sísmica [A, B, C o D]

Factor de ductilidad de la estructura [Q]

Tipo de construcción al que pertenece la estructura [7]

La manera de tomar en cuenta el comportamiento inelástico se realiza mediante espectros reducidos por ductilidad [c/Q].

### ***IIIb.- Análisis Paso a Paso:***

La nueva versión del Manual de Obras Civiles también permite como procedimiento de análisis sísmico dinámico el cálculo paso a paso de las respuestas a temblores específicos, estipulándose que podrán emplearse para este fin acelerogramas de temblores reales o de movimientos simulados o combinaciones de ambos siempre y cuando se usen menos de 4 movimientos representativos,

Independientes entre sí, cuyas Intensidades sean compatibles con los demás criterios que consignan las normas y que se tengan en cuenta el comportamiento no lineal de la estructura y las Incertidumbres que haya en cuanto a sus parámetros.

Para la realización de este método se requiere la Integración numérica de la ecuación de movimiento del puente.

Se supone que la excitación sísmica es la misma (en amplitud y fase) en los apoyos del puente; o sea que no se considera la posible variación espacial del movimiento del terreno. Esto sólo se puede suponer cuando las longitudes de las ondas sísmicas son muy grandes comparadas con la distancia entre apoyos del puente. De no ser así, el puente puede fallar debido a movimientos diferenciales.

Con este método se puede realizar análisis lineal y no lineal. Sin embargo, el análisis no lineal es de uso limitado ya que consume mucho tiempo de computadora.

Si se desea un análisis paso a paso lineal, conviene encontrar en primer lugar los modos de vibrar de la estructura, para luego calcular numéricamente la respuesta en cada modo; lo cual significa tratar con sistemas de un solo grado de libertad, puesto que las respuestas modales están desacopladas entre sí.

Se tiene la ventaja de que sólo es necesario considerar unos cuantos de los primeros modos. Se deben examinar aspectos como el amortiguamiento y la reducción por ductilidad asociados a cada modo; la selección de temblores que sean realmente independientes entre sí y congruentes con las intensidades implícitas en los aspectos de diseño, y la manera de considerar las excentricidades accidentales.

Para cualquiera de los métodos dinámicos también se deben considerar los efectos bidireccionales, por las mismas razones del método estático de análisis.

Con respecto al factor de comportamiento sísmico ( $Q$ ), la nueva versión del Manual de Obras Cíviles contempla los siguientes valores para puentes:

VALOR DE Q	CARACTERÍSTICAS DEL PUENTE	COMENTARIOS
4.0	La resistencia a fuerzas laterales es suministrada por marcos de dos o más columnas de concreto reforzado o acero (figura 5a).	Es de esperarse que un marco de varias columnas tenga un comportamiento dúctil en su plano. Además, este tipo de subestructuras poseen la característica de ser redundantes. Sin embargo, en la dirección ortogonal al marco se deberá utilizar el valor de Q asignado a una pila.
3.0	La resistencia a fuerzas laterales es suministrada por pilas de una sola columna de concreto reforzado o acero (figura 5b).	En general, la base de las columnas es la zona más afectada durante un sismo en este tipo de subestructuras.
2.0	La resistencia a fuerzas laterales es suministrada por pilas-muro (figura 5c).	Las pilas-muro poseen gran rigidez en la dirección transversal al puente. Para la dirección ortogonal se usará el valor de Q asignado a pilas de una sola columna.
1.5	Para el diseño de pilas aisladas y de estribos de mampostería, y para el diseño de las conexiones de la subestructura con la cimentación y de la subestructura con la superestructura.	Debe recordarse que durante un sismo el material de relleno de los accesos puede inducir empujes dinámicos importantes sobre estas subestructuras.
0.8	Para el diseño de las conexiones entre los estribos y la superestructura.	Estas conexiones deberían diseñarse prácticamente con el valor de las fuerzas elásticas, sin embargo se opta por aumentar el valor de estas cargas para que no sufran daños o que éstos sean muy leves.



Figura 5

Otra modificación del manual es que para puentes no regulares se debe incluir el efecto de la componente vertical del movimiento, por la posibilidad de generación de fuerzas axiales adicionales en las pilas, lo cual aumenta la demanda de ductilidad.

En lo que respecta a interacción suelo-estructura, los efectos se consideran mínimos para puentes cortos y de poco peso, sin embargo la distribución de fuerzas en el tablero (y por consecuencia en las pilas) se puede ver afectada por las fuerzas ejercidas por el terreno sobre los estribos. En puentes con cimentaciones profundas o en terreno blando, los efectos pueden ser significativos, así como en puentes muy esvajados.

Por último, para puentes de un solo tramo no se requiere de un análisis sísmico riguroso, sin embargo, deben revisarse la magnitud de las fuerzas longitudinales y transversales en las conexiones y las longitudes de apoyo.

### **Comentarios**

En este capítulo se buscó resaltar los siguientes puntos:

- 1.- La necesidad de un código de diseño sísmico de puentes carreteros.
- 2.- Todas las consideraciones que implica proponer una restricción dentro de unas recomendaciones de diseño, y que en general no son transparentes al diseñador.
- 3.- La complejidad de los códigos de diseño en general tanto para interpretación como para seguir con orden todas las especificaciones. En lo que respecta a la interpretación se debe en gran medida al punto anterior.

Como se pudo apreciar, el primer punto se ve aliviado por la actualización del capítulo C.1.3 del Manual de Obras Civiles de la CFE, ya que en él se contempla a los puentes como una estructura especial. Si bien no se abarcan todos los puentes dentro de este manual, si se pretende contemplar la gran

mayoría de los que se diseñan en México. Con lo cual se llena un gran vacío del diseño sísmico en el ámbito nacional.

Por otro lado, con los puntos 2 y 3 se puede notar que la tendencia de los códigos de diseño es de que sean más flexibles o abiertos, dejando cada vez más consideraciones al juicio del diseñador. Esto implica una mayor preparación y un conocimiento más adecuado de parte del diseñador y una visión más amplia del proceso de diseño estructural para aplicarlos correctamente.

Un problema muy común de los manuales y reglamentos de diseño es que el conocimiento se encuentra esparcido, lo cual produce una búsqueda laboriosa y tardada, y en consecuencia una mala interpretación de información.

La propuesta de esta tesis es la de un sistema experto que asesore a los futuros usuarios del manual de CFE en la parte que corresponde al diseño sísmico puentes cuando una consideración no quede lo suficientemente explícita para llevarla a cabo.

La correcta interpretación de una recomendación de diseño es de suma importancia, ya que en un estudio realizado de 500 casos de fallas de los últimos cuarenta y ocho años muestra que tres cuartas partes de éstas se debieron a errores humanos [Sowers 91]. Los errores humanos involucrados en dichas fallas se pueden agrupar en tres categorías:

- a) Las condiciones detrás del conocimiento prevaleciente
- b) Ignorancia del conocimiento prevaleciente
- c) mal uso de conocimiento prevaleciente

Los errores por mal uso del conocimiento es responsable del 40% de las fallas estudiadas.

**En el siguiente capítulo se plantea el modelo de conocimiento, llevado a sistema experto, para enfrentar problemas al momento de la elección de un método de análisis sísmico de un puente carretero.**

## CAPITULO IV

---

### **ANASIS: Un asesor para la elección del Método de Análisis Sísmico de puentes carreteros**

---

#### **Introducción**

Como se pudo apreciar en el capítulo anterior, la elección del método de análisis sísmico de un puente requiere del conocimiento especializado del proyectista o ingeniero responsable de tal actividad, ya que la interpretación de los datos disponibles muchas veces se dificulta por la vaguedad de éstos.

Para facilitar esta tarea, resulta conveniente una herramienta que asesore al Ingeniero en esta elección. Con el auge de las técnicas de Ingeniería del conocimiento, particularmente de los Sistemas Expertos, se han desarrollado medios poderosos para representar y manipular el conocimiento contenido en los códigos de diseño.

Un sistema experto que guíe la selección y aplicación de un método de análisis sísmico en unas recomendaciones que son las primeras en su tipo en México puede ser de gran utilidad tanto para los diseñadores que se enfrentarán a nuevos métodos como para estudiantes que piensan incursionar en el diseño de puentes o de los códigos de diseño.

El SE motivo de este trabajo está basado en la última versión (todavía en revisión) del capítulo C.I.3 del Manual de Obras Civiles de CFE. Utiliza los métodos de análisis tratados en el capítulo anterior y con las restricciones mencionadas en el mismo.

#### **Objetivos**

Se pretende crear un prototipo operacional de un SE asesor que dé consulta sobre la elección del método de análisis sísmico a seguir para un determinado tipo de puente carretero. Este prototipo operacional servirá para futuras investigaciones acerca de diseño sísmico de puentes carreteros.

Una vez seleccionado el método de análisis, el SE debe asesorar en su aplicación y en la obtención de los parámetros a utilizar en dicho método. Esto con el objeto de facilitar la tarea y ahorrarle tiempo al diseñador en ésta.

El planteamiento general es el uso de la tecnología de los SE en el manejo de códigos de diseño. Los objetivos específicos son la aplicación del SE al diseño sísmico de puentes carreteros auxiliándose de las recomendaciones de un manual.

En la parte sombreada de la figura 6 se muestra la intervención de ANASIS en el proceso del diseño sísmico de un puente carretero:

Una vez realizado el diseño preliminar de un puente, se introducen algunas características de éste (número de tramos, características del suelo, localización geográfica, etc.).

Cuando el puente tiene solamente un tramo, el sistema proporciona algunas recomendaciones para el diseño de apoyos. Si tiene más de un tramo, elige uno de entre los cuatro posibles métodos de análisis sísmico y para el caso de análisis estáticos (simplificado o estático) ANASIS lleva a cabo varias ayudas para la aplicación del método. Si el método elegido resulta ser el dinámico, el sistema sólo da recomendaciones y algunos parámetros que se deben tomar en cuenta para su aplicación.

#### **Elección del shell**

El shell utilizado es el Level 5 Object, que en este caso en especial tiene las siguientes ventajas [Level 5 Object]:

A) Se basa principalmente en la programación orientada a objetos. Esto facilita el ordenación del conocimiento, ya que éste se puede dividir en clases, atributos e instancias.

La idea principal de la programación orientada a objetos es tan simple como lo describe Morrill [89]:

"Nosotros percibimos el mundo como una variedad de objetos; cuando observamos una planta,

nosotros miramos una planta, no una masa de átomos individuales. Podemos dividir la planta en hojas, flores, tallo y raíz; pero seguimos viendo esas partes como unidades, como objetos.

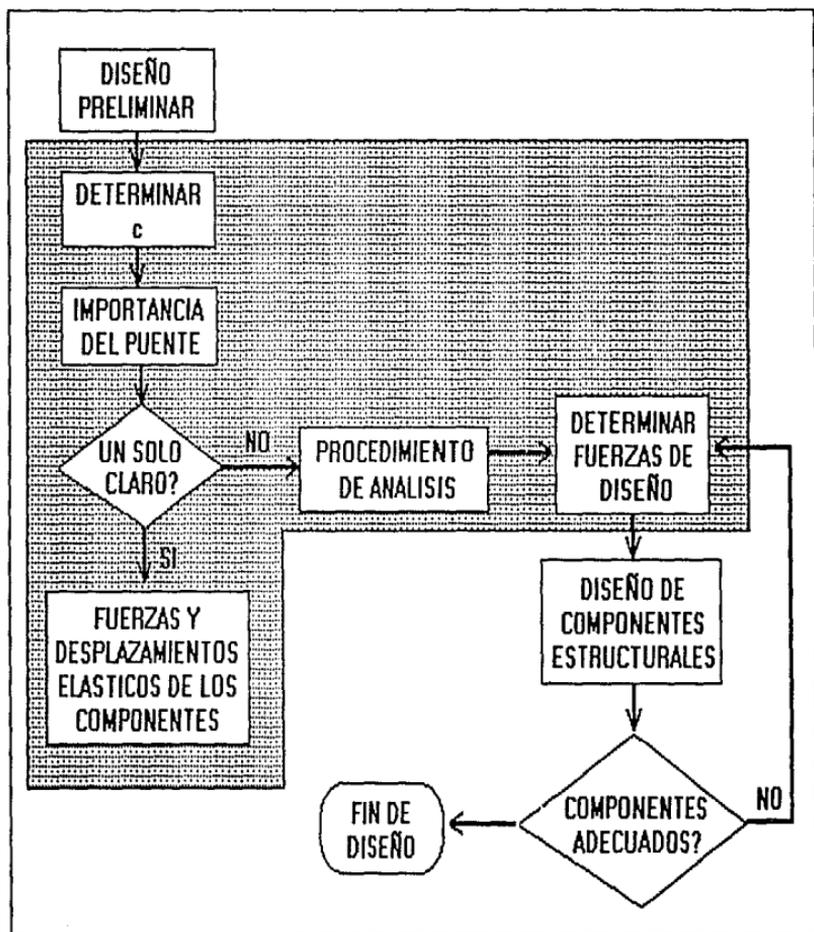


Figura 6: Procedimiento de diseño sísmico de puentes carreteros

"Si subdividiéramos las partes y piezas de la planta en moléculas, siguen agrupadas en diferentes átomos que también percibimos como unidades simples. Para llevar la analogía un paso más, la programación procedural tradicional trata los átomos, mientras que la programación orientada a objetos trata la planta."

B) Permite el manejo de gráficos, que para ingeniería estructural son de gran utilidad para una mejor comprensión del usuario con respecto a los términos utilizados y consideraciones hechas por el programador. Lo cual da transparencia a la consulta (muy deseada en programas para ingeniería estructural).

C) Permite el manejo de hiperregiones, que junto con el inciso B completan la interfaz explicativa, cuando el usuario así lo requiera. Las hiperregiones son cuadros reservados de la pantalla que se activan al posicionarse en ellas y presionar un botón del ratón.

Estas hiperregiones activan los botones que harán funcionar la interfaz explicativa de tipo ¿qué? (que será tratada con detalle más adelante) desplegando en pantalla una explicación completa de la pregunta que se le hace al usuario.

D) La máquina de inferencia puede trabajar de varias maneras: hacia atrás (utilizando reglas), hacia adelante (usando demons) o con encadenamiento mixto (combinación de los dos anteriores. En el capítulo II se definen los diferentes tipos de encadenamiento.

Para este caso en específico se necesitaba de cualquiera de los tres métodos de encadenamiento, ya que la primera base funciona predominantemente hacia atrás, sin embargo incluye algunas reglas hacia adelante. Por otro lado, la segunda base funciona únicamente hacia adelante.

E) Permite el manejo de bases de datos en DBASE III, que en cuestión de códigos de diseño son muy útiles; ya que cuando éstos son modificados basta con cambiar los datos de las bases que maneje el sistema para actualizarlo.

En el sistema ANASIS se utilizó solamente una base de datos que incluye la tabla de valores de los espectros de diseño para las diferentes zonas sísmicas del país proporcionados por la CFE. El uso de esta base se explicará con detalle más adelante.

### Funcionamiento de ANASIS

El modelo de conocimiento utilizado por el SE se divide en dos partes principalmente:

La primera parte selecciona el tipo de análisis sísmico a utilizar basado en las recomendaciones del Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Se han propuesto cuatro tipos de análisis sísmico de puentes carreteros ( dos estáticos y dos dinámicos). En esta sección se revisan las restricciones propuestas para la aplicación de los métodos estáticos y, de no cumplirse estas restricciones se busca la aplicación más conveniente de los dos métodos dinámicos.

La filosofía de esta parte del modelo es que las preguntas sean lo más transparentes al usuario, aún cuando éste no tenga mucha experiencia con el área. Esta transparencia fue obtenida directamente de las personas implicadas en la actualización del manual de CFE, evitando así problemas de interpretación. Este procedimiento lo realiza a través de reglas (encadenamiento hacia atrás). Ya que este tipo de inferencia se recomienda para muchas entradas (que son las restricciones) y pocas salidas (cuatro métodos de análisis) para que el usuario no proporcione datos de más. Dentro de esta parte se incluyó una pequeña base de datos para la obtención del coeficiente sísmico ( $c$ ) dependiendo de las características del terreno y de la situación geográfica del puente.

En la segunda parte, una vez elegido el método de análisis, el SE asesora en la aplicación de dicho método. Para los estáticos realiza todo el análisis numérico dando algunas sugerencias conforme obtiene los datos. Para los métodos dinámicos asesora en su aplicación y en las consideraciones a seguir en el momento de modelar el puente y llevar a cabo el análisis. Para esta parte se eligió encadenamiento hacia adelante, ya que son muchas entradas obligatorias para efectuar el análisis (datos del puente y suelo) pero son más las recomendaciones que se pueden hacer.

En resumen, el sistema experto actualmente está formado por:

Dos bases de conocimiento. La primera base consta de alrededor de 30 reglas: para encadenamiento hacia atrás, y la segunda de alrededor de 20 reglas para encadenamiento hacia adelante. La primera base puede escoger entre cuatro soluciones, y la segunda puede activar ayudas individuales, pero éstas a su vez pueden mezclarse entre ellas mismas.

### Arquitectura

Las partes más importantes de la estructura o arquitectura del Sistema Experto para fines de este trabajo se muestran en la figura 7 y son explicados a continuación:

### Motor de Inferencia

En la primera parte de ANASIS, cada uno de los métodos de análisis sísmico toma el lugar de una meta, como sigue:

#### AGENDA

1. sismicidad OF domain
2. solo recomienda OF domain
3. metodo simplificado OF domain
  - 3.1 considera OF domain IS longitud apoyos
  - 3.2 considera OF domain IS suelo-estructura
  - 3.3 considera OF domain IS componente vertical
4. metodo estatico OF domain
  - 4.1 considera OF domain IS longitud apoyos
  - 4.2 considera OF domain IS suelo-estructura

#### 4.3 considera OF domain IS componente vertical

### 5. analisis modal OF domain

#### 5.1 considera OF domain IS longitud apoyos

#### 5.2 considera OF domain IS suelo-estructura

#### 5.3 considera OF domain IS componente vertical

### 6. paso a paso OF domain

#### 6.1 considera OF domain IS longitud apoyos

#### 6.2 considera OF domain IS suelo estructura

#### 6.3 considera OF domain IS componente vertical

La primera meta sirve para Investigar el coeficiente sísmico "c" y el espectro de diseño de la zona de ubicación del puente para la recomendación para puentes de un solo claro y los cuatro métodos restantes. En realidad nunca llega a ser verdadera (la condición a cumplir para que se haga verdadera es el absurdo de que c sea igual a 0) La segunda meta en la agenda se refiere al caso de puentes de un solo tramo, que no necesitan un análisis sísmico detallado. Cuando esta meta se hace verdadera el sistema proporciona el espectro de diseño sísmico y la forma de obtener la fuerza sísmica. Las metas 3, 4, 5 y 6 son obvias. El orden que se eligió es por grado de complejidad del método de análisis. Para el caso de estas metas se revisan además tres submetas: Que el puente pueda tener problemas de movimientos en desfase en los apoyos (submeta 1), o que la interacción suelo estructura sea significativa y tenga que ser considerada (submeta 2), o que tenga que ser considerada la componente vertical del sismo (submeta 3).

Cada una de estas metas será alcanzada por reglas que contienen las restricciones para el uso de cada método, como se verá en la parte de la base de conocimiento.

Una vez alcanzada una de las metas y revisadas las tres submetas, ANASIS de la opción al usuario de encadenar (ligar) a la segunda base de conocimiento, transfiriendo parámetros que fueron calculados en la primera parte y serán utilizados en la segunda.

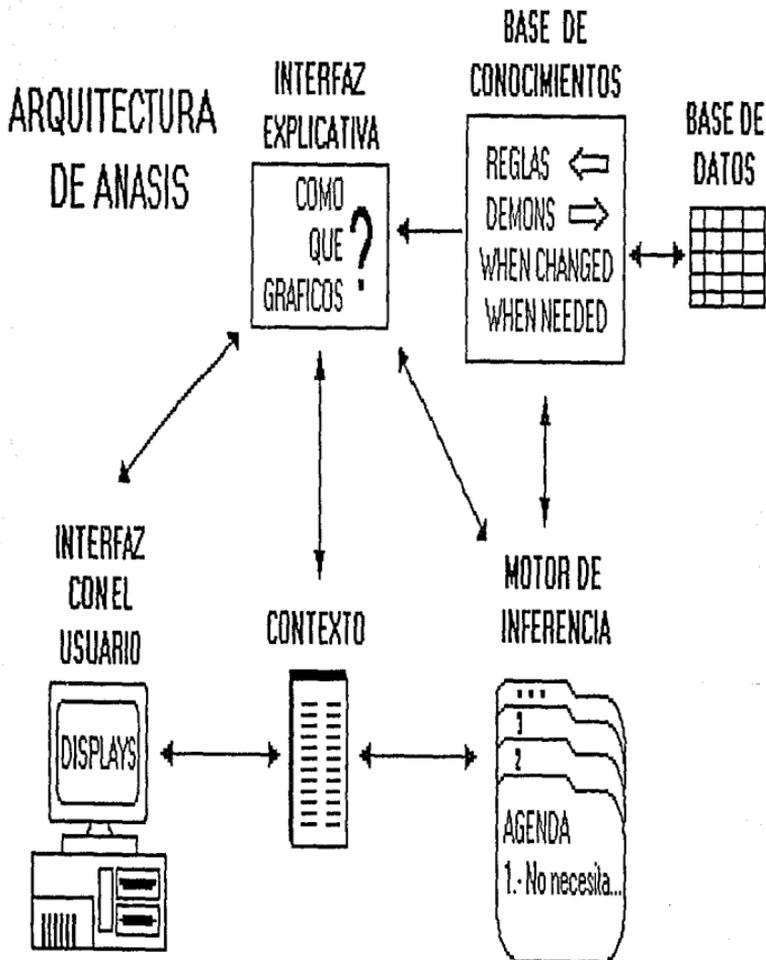


Figura 7: Arquitectura de ANISIS

En la segunda parte, conforme se adquieren datos, se van activando algunos demons y el proceso termina cuando ya no hay demons que puedan ser activados.

### Base de conocimiento

En la base de conocimiento se encuentran los objetos, las reglas, los demons y procedimientos.

Las reglas son condiciones para hacer verdadera una conclusión, por ejemplo:

RULE para solo recomienda

IF numero OF tramos < 2

THEN solo recomienda

Las reglas para llegar a una meta están colocadas a tres diferentes niveles: El primer nivel corresponde a reglas con condiciones de tipo muy general cuya interpretación es difícil, por ejemplo:

RULE para Metodo Simplificado

IF restricciones geométricas MS OF puente

AND medidas restringidas MS OF puente

AND comportamiento sísmico MS OF puente

THEN metodo simplificado

Este tipo de reglas se implementaron pensando en futuras versiones o modificaciones de ANASIS.

El segundo grupo de reglas trata las restricciones textuales de las recomendaciones del manual, por ejemplo:

RULE para geometría ME

IF superestructura OF puente IS recta

AND rigidez OF tramos IS parecida

AND claros OF puente IS continuos

AND esvíaamiento OF puente = FALSE

THEN restricciones geométricas ME OF puente

Como se puede ver, estas reglas son un poco menos generales, sin embargo algunas de las restricciones de éstas siguen quedando vagas para un usuario Inexperto del manual. Cuando en futuras revisiones del manual estas restricciones cambien, sólo se modificarán en las reglas. Una gran utilidad de la programación orientada a objetos utilizada por Level 5 Object es que cuando las reglas son modificadas, los atributos con las que éstas fueron hechas siguen conservando todas sus características que son aplicables a cualquier otra regla.

El tercer y último nivel de reglas es el presentado al usuario. Este nivel es el encargado de realizar las preguntas y verificar si las reglas de los niveles iniciales son verdaderas o falsas. La filosofía con que fueron diseñadas estas reglas es que quedaran las preguntas lo más transparentes posible al usuario.

Un ejemplo de reglas de este nivel es la siguiente:

RULE para fuerza sísmica2

IF Índice de rigidez OF puente > 2

AND rigidez de columnas OF puente IS parecidas

THEN distribución fuerza sísmica OF puente IS en todos los marcos

Las preguntas que hace el sistema surgen de este tipo de reglas, los conceptos manejados en ellas son básicos para un estructurista, y en caso de que no fueran lo suficientemente explícitos, existe el servicio de explicación para el usuario con definiciones, explicaciones de procedimientos, etc.

Los demons son reglas que funcionan en sentido inverso, esto es, que se accionan cuando la condición se hace verdadera, por ejemplo:

DEMON para metodo simplificado

IF metodo simplificado

THEN ASK display asesoria2 parte1

Cada uno de los procedimientos y reglas utilizados fueron obtenidos de pláticas con expertos y consultas bibliográficas:

El conocimiento formal se obtuvo de la literatura sobre el tema y de reglamentos extranjeros [AASHTO, 1988; Applied Technology Council, 1986; Bridge and Structural Committee, 1977; California Department of Transportation, 1985; Gates, 1979; Kawashima, 1991], mientras que el conocimiento heurístico fue proporcionado por expertos.

En el apéndice B se muestran las partes más importantes, para los fines de este trabajo, de las dos bases de conocimiento.

#### Interfaz con el usuario

Se trató de ser lo más amigable posible con el usuario a través de gráficos y con el manejo de la pantalla a través del ratón; para lo único que el usuario se ve obligado a tocar el teclado es para introducir datos numéricos.

A los displays que hace referencia la figura 7 es al arreglo de pantallas para presentación al usuario de las preguntas para los datos que va requiriendo el sistema..

#### Interfaz explicativa

Para un mayor entendimiento por parte del usuario, el sistema en general maneja tres tipos de explicaciones: Gráficos, que se presentan en transcurso de toda la consulta junto con las preguntas realizadas por el sistema a manera de ilustración. Botones de ayuda de dos tipos: El tipo ¿qué?, refiriéndose a qué es lo que está preguntando el sistema al usuario; y el tipo ¿cómo?, refiriéndose a la forma en que el sistema obtiene algunos resultados.

Todas las imágenes están relacionadas con cada pregunta para un mayor entendimiento de éstas. Esto sirve para que el usuario se dé una idea de lo que se le está preguntando.

Cuando al usuario le queda muy vaga la pregunta y la imagen gráfica no es suficiente para su comprensión, existe el segundo tipo de explicación: El tipo ¿qué?. Un ejemplo de las explicaciones de tipo ¿qué? que puede proporcionar el sistema es la siguiente, que se activa con un botón que el usuario ve cuando aparece la pregunta del índice de rigidez:

**WITH** explicaciones preguntas 1 [1]: = "El índice de rigidez [I<sub>r</sub>] relaciona la contribución relativa de las columnas a la rigidez transversal de la estructura total. Como se muestra en la figura, el índice de rigidez es el resultado de dividir la rigidez de la estructura considerando columnas [W1], entre la rigidez de la superestructura actuando como viga simple [W2]. Esto es:  $I_r = W1 / W2$ "

El último tipo de explicación sirve cuando el sistema comienza a dar algunos resultados y el usuario desea saber cómo se llegó a ellos, como proporcionar fórmulas de cálculos, por ejemplo:

**WITH** explicaciones preguntas 2 [3]: = "El período fundamental de vibración se calcula con la fórmula  $T = 0.2 * (M/P)^{0.5}$ "

Donde  $M = W/g$  = masa, y  $P$  = rigidez"

### **Comentarios**

Se pudo apreciar que el sistema ANASIS ofrece una gran transparencia para el usuario y es muy amigable con éste.

A pesar de que el Level 5 Object maneja coeficientes de certeza, se optó por no usarlos en esta versión por no estar definidos para la mayoría de los parámetros.

En el siguiente capítulo se presentan las conclusiones finales de este trabajo.

# CAPITULO VI

---

## CONCLUSIONES

---

La investigación descrita a lo largo de esta tesis, lleva a dos tipos de conclusiones:

a) Con respecto a la tecnología aplicada;

La sobrevivencia y desarrollo de las empresas depende cada vez más de sus estrategias tecnológicas. El Ingeniero debe prepararse para entender y aprovechar las nuevas tecnologías, así como utilizar las modernas herramientas que hacen más productivo su trabajo.

Actualmente los programas de cómputo pueden resolver gran parte de los problemas complejos, y el Ingeniero que los utilice está obligado, como profesional que es, a aprender y entender el funcionamiento de éstos.

Con la aplicación correcta de esta nueva tecnología, las repercusiones negativas que algunos Ingenieros ven en los sistemas expertos aplicados a Ingeniería estructural quedarían reducidas al mínimo de la siguiente manera [Zufelt 89]:

- 1.- Conocer el problema de diseño: Planeando el problema y estudiando el método de solución, lo que permite identificar las áreas de aplicación de la tecnología.
- 2.- Conocer el proceso de diseño: Familiarizándose con los pasos a seguir y las ecuaciones a usar, lo que facilita la detección de la ausencia de datos o errores en éstos.
- 3.- Conocer la tecnología disponible: Estar familiarizado con los paquetes a usar y sus limitaciones para asegurar una correcta utilización de los mismos.
- 4.- Revisar la salida de datos: Para verificar que los resultados sean satisfactorios. Nunca pensar que la máquina va a corregir errores del usuario.

Los Sistemas Expertos pueden servir como apoyo y complemento de la adquisición y asimilación de los conocimientos técnicos.

**b) Con respecto a futuras versiones de ANASIS:**

Como se planteó desde un comienzo, ANASIS es un prototipo operacional que servirá para futuras investigaciones en el Instituto de Ingeniería. El funcionamiento del modelo de conocimiento que se planteó en este trabajo, aunque es aceptable, todavía tiene limitaciones. Para mejorarlo, ya se está pensando en las modificaciones que se describen a continuación.

Se piensa incorporar una base de datos con los puentes construidos en los últimos diez años en México que contemple, entre otras cosas, las consideraciones hechas durante su diseño. Esto con el fin de que el sistema pueda realizar comparaciones del puente en estudio con los de la base e incluso pueda retroalimentarse con los nuevos que analicen. Esta base de datos no pudo ser implementada en esta versión de ANASIS porque todavía se encuentra en proceso de captura.

Otra parte que se pretende incorporar son programas algorítmicos de análisis lineal para la obtención de desplazamientos en los métodos estáticos y para el cálculo del índice de rigidez que serían de gran ayuda para el usuario. Actualmente se están estudiando los algoritmos de estos procedimientos y la mejor manera de modelarlos, ya que el sistema intervendría como un intermediario entre los paquetes algorítmicos y el usuario.

Cuando esté aprobada la última revisión del Manual de Obras Civiles de CFE, se pueden introducir más ayudas para la obtención de parámetros como el factor de ductilidad ( $Q$ ) y el tipo de suelo (I, II o III), que harían más extenso el conocimiento de ANASIS con respecto a las recomendaciones del manual.

# APENDICE A

---

## BIBLIOGRAFIA

---

- ADELI, H y CHEN, Y (1989): *Structuring Knowledge and databases In an Expert System for Integrated structural design*, Microcomputer and Civil Engineering, vol. 4, No. 3, pp 175-204.
- ALLEN, RH (1987): *Expert Systems in Structural Engineering: Works in Progress*, Journal of Computing In Civil Engineering, ASCE (ed), vol. 1, No. 4, pp 312-319.
- CHEN, R y LIU, X (1988): *Expert System RAISE-1*, en ADELI (ed) Microcomputer Knowledge-Based Expert Systems in Civil Engineering: Proceedings of a symposium sponsored by the Structural Division of the ASCE. pp 16-25.
- FAZIO, P, BEDARD, C y GOWRI, K (1988): *A Rule-Based System for Estimating Snow Loads on Roofs*, en ADELI (ed) Microcomputer Knowledge-Based Expert Systems in Civil Engineering: Proceedings of a symposium sponsored by the Structural Division of the ASCE. pp 73-78.
- JONES, M y SAONUMA, V (1988): *Prototype hybrid Experts System for R/C Design*, Journal of Computing In Civil Engineering, ASCE, vol. 2, No. 2, pp 136-143.
- KIM, W y CONNOR, J (1988): *Using PROLOG on a MACINTOSH to build an Engineering Expert System*, en ADELI, H (ed) : Microcomputer KBES In Civil Engineering, pp 26-39.
- LARA, F y GELMAN, G (1989): *Métodos y modelos del conocimiento para sistemas expertos*, Reporte Interno Instituto de Ingeniería.
- MAHER, ML (1987): *Expert Systems for Structural Design*, Journal of Computing In Civil Engineering, ASCE (ed), vol. 1, No. 4, pp 270-283.

- MAHER, ML (1987a): *Expert Systems in Structural Engineering*, en MAHER, ML (ed), Expert Systems for Civil Engineers, ASCE , pp 49-76.
- MALASRI, S (1988): *PC Plus + LOTUS 123*, en ADELI (ed): Microcomputer Knowledge-Based Expert Systems In Civil Engineering: Proceedings of a symposium sponsored by the Structural Division of the ASCE. pp 79-87.
- Manual de Obras Civiles, Comisión Federal de Electricidad, México, 1981.
- MELI, R (1991): *Comentarios al título sexto "Seguridad estructural de las construcciones" del Reglamento de construcciones para el Distrito Federal; Series del Instituto de Ingeniería*, N° ES-1.
- MORRILL, J (1989): *Object-Oriented Programming*, BYTE, McGraw-Hill (publicación), marzo, pp 228.
- Object Oriented Expert System for Microsoft Windows; User's Guide, Versión 2.0, Builders Inc.: New York, NY, 1990.
- PAGNONI, T (1985): *Expert Systems for Bridge Engineering*, Reporte técnico IBC-85-34, Departamento de Ingeniería Civil, Instituto Tecnológico de Massachussets, Massachussets, USA.
- PARSAYE, K y CHIGNELL, M (1988): *Expert Systems for Experts*, Wiley, New York.
- Reglamento de construcciones para el D.F., Departamento del Distrito Federal, 1987.
- SHIRASHI, N et al (1989): *Knowledge-Based Expert System for damage assessment based on fuzzy reasoning*, Artificial Intelligence Techniques and Applications for Civil and Structural Engineers, pp 211-216.
- SOWERS, G (1991): *The human factor in failures*, Civil Engineering, marzo, pp 72-73.

- SUÁSTEGUI, M, GÓMEZ, R y LARA, F (1991): *Propuesta de un Sistema Experto para el análisis sísmico de puentes carreteros*. Memorias del VIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural y IX de Ingeniería Sísmica, Manzanillo, Colima, México, vol. II, pp 7-94 a 7-103.
- U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration (1981): *Seismic Design of Bridges. Workshop Manual*. Enero.
- WIJESUNDERA, DA y HARRIS, FC (1985): *The Integration of an Expert System Into the construction planning process* , CIVIL-COMP 85, Proceedings of the Second International Conference on Civil and Structural Engineering Computing, vol. 2, pp 399-405.
- ZUFELT, JE (1989): *Is advanced technology "the gateway to irresponsibility"?*, Journal of Professional Issues in Engineering, vol. 115, no. 4, ASCE (ed), pp 434-437.

# APENDICE B

---

## BASE DE CONOCIMIENTO DE ANASIS

---

### **CLASS** arreglos

**WITH** conclusiones STRING

**WITH** explicaciones preguntas 1 STRING

**WITH** explicaciones preguntas 2 STRING

**WITH** conclusiones2 STRING

**WITH** explicaciones preguntas 3 STRING

### **CLASS** db3 zonasism SINGLE EXTERNAL "dBASEIII B:\zonasism.DBF"

**WITH** zona STRING

**WITH** suelo NUMERIC

**WITH** ccalc NUMERIC

**WITH** a0 NUMERIC

**WITH** t1 NUMERIC

**WITH** t2 NUMERIC

### **CLASS** explicaciones

**WITH** explica todo SIMPLE

**WITH** ventana explicacion SIMPLE

### **CLASS** geotecnia

**WITH** geografia STRING

WHEN NEEDED

BEGIN

IF zona sísmica OF puente IS A THEN

geografia OF geotecnia := "a"

ELSE

IF zona sísmica OF puente IS B THEN

geografía OF geotecnia := "b"

ELSE

IF zona sísmica OF puente IS C THEN

geografía OF geotecnia := "c"

ELSE

geografía OF geotecnia := "d"

END

**WITH** estrato NUMERIC

WHEN NEEDED

BEGIN

IF tipo de suelo OF puente IS I THEN

estrato OF geotecnia := 1

ELSE

IF tipo de suelo OF puente IS II THEN

estrato OF geotecnia := 2

ELSE

estrato OF geotecnia := 3

END

**WITH** II NUMERIC

**WITH** estrato blando arcilloso muy compresible SIMPLE

**WITH** altura del estrato NUMERIC

**CLASS** puente

**WITH** Índice de rigidez NUMERIC

**WITH** restricciones geométricas MS SIMPLE

**WITH** medidas restringidas MS SIMPLE

**WITH** comportamiento sísmico MS SIMPLE

**WITH** restricciones geométricas ME SIMPLE

**WITH** medidas restringidas ME SIMPLE

**WITH** comportamiento sísmico ME SIMPLE

**WITH** distribución fuerza sísmica COMPOUND

en todos los marcos,

solo en algunos marcos

**WITH** zona sísmica COMPOUND

A,

B,

C,

D.

**WITH** tipo de suelo COMPOUND

I,

II,

III

**WITH** superestructura COMPOUND

recta,

curva

**WITH** claros COMPOUND

discontinuos,

continuos

**WITH** coeficiente sísmico NUMERIC

**WITH** rigidez de columnas COMPOUND

parecidas,

diferentes

**WITH** grados de esviamiento NUMERIC

**WITH** esviamiento SIMPLE

**WITH** apoyos COMPOUND

esviamados,

no esviamados

**WITH** puente recto SIMPLE

**WITH** diferencia rigidez columnas adyacentes NUMERIC

**WITH** considerar efectos no lineales SIMPLE

**WITH** peso liviano SIMPLE

**WITH** tramos largos SIMPLE

#### **CLASS** tramos

**WITH** numero NUMERIC

**WITH** ancho del tablero NUMERIC

**WITH** longitud maxima NUMERIC

**WITH** rigidez COMPOUND

parecida,

diferente

**WITH** marcos COMPOUND

dependientes,

independientes

**WITH** rigidez del tablero COMPOUND

influye en la del puente,

no influye en la del puente

**WITH** rectitud SIMPLE

**WITH** características COMPOUND

regulares,

Irregulares

**WITH** cambios bruscos en superestructura MULTICOMPOUND

de masa,

de rigidez,

de geometría

**WITH** porcentaje cambio masa NUMERIC

**WITH** porcentaje cambio rigidez NUMERIC

**WITH** porcentaje cambio geometría NUMERIC

**WITH** cambio de masa SIMPLE

**WITH** cambio de rigidez SIMPLE

**WITH** cambio de geometría SIMPLE

SHARED ATTRIBUTE solo recomienda SIMPLE

SHARED ATTRIBUTE método simplificado SIMPLE

SHARED ATTRIBUTE método estático SIMPLE

SHARED ATTRIBUTE análisis modal SIMPLE

SHARED ATTRIBUTE paso a paso SIMPLE

SHARED ATTRIBUTE C de CFE NUMERIC

WHEN NEEDED

BEGIN

FIND dB3 zonasism

LIMIT 1

WHERE suelo OF dB3 zonasism = estrato OF geotecnia

AND zona OF dB3 zonasism = geografía OF geotecnia

WHEN FOUND

C de CFE := ccalc OF dB3 zonasism

Ao := a0 OF dB3 zonasism

T1 := t1 OF dB3 zonalsm

T2 := t2 OF dB3 zonalsm

FIND END

END

SHARED ATTRIBUTE A0 NUMERIC

SHARED ATTRIBUTE T1 NUMERIC

SHARED ATTRIBUTE T2 NUMERIC

SHARED ATTRIBUTE exponente NUMERIC

SHARED ATTRIBUTE considera MULTICOMPOUND

longitud apoyos,

suelo estructura,

componente vertical

WHEN CHANGED

BEGIN

IF considera IS longitud apoyos = TRUE THEN

BEGIN

text OF caja conclusiones := CONCAT( text OF caja conclusiones, conclusiones2[ 1] OF  
arreglos 1)

considera IS longitud apoyos := FALSE

END

IF considera IS suelo estructura = TRUE THEN

BEGIN

text OF caja conclusiones := CONCAT( text OF caja conclusiones, conclusiones2[ 2] OF  
arreglos 1)

considera IS suelo estructura := FALSE

END

IF considera IS componente vertical = TRUE THEN

**BEGIN**

**text OF caja conclusiones := CONCAT( text OF caja conclusiones, conclusiones2[ 3] OF  
arreglos 1)**

**considera IS componente vertical := FALSE**

**END**

**END**

## **AGENDA**

1. sismicidad OF domain
2. solo recomienda OF domain WITH display conclusiones
3. metodo simplificado OF domain
  - 3.1 considera OF domain IS longitud apoyos
  - 3.2 considera OF domain IS suelo estructura
  - 3.3 considera OF domain IS componente vertical
4. metodo estatico OF domain
  - 4.1 considera OF domain IS longitud apoyos
  - 4.2 considera OF domain IS suelo estructura
  - 4.3 considera OF domain IS componente vertical
5. analisis modal OF domain
  - 5.1 considera OF domain IS longitud apoyos
  - 5.2 considera OF domain IS suelo estructura
  - 5.3 considera OF domain IS componente vertical
6. paso a paso OF domain
  - 6.1 considera OF domain IS longitud apoyos
  - 6.2 considera OF domain IS suelo estructura
  - 6.3 considera OF domain IS componente vertical

**DEMON 1**

IF solo recomienda

THEN text OF caja conclusiones := conclusiones[ 1 ] OF arreglos 1

**DEMON para conclusiones MS**

IF metodo simplificado

THEN text OF caja conclusiones := conclusiones[ 3 ] OF arreglos 1

**DEMON para conclusiones ME**

IF metodo estatico

THEN text OF caja conclusiones := conclusiones[ 4 ] OF arreglos 1

**DEMON para conclusiones AM**

IF analisis modal

THEN text OF caja conclusiones := conclusiones[ 5 ] OF arreglos 1

**DEMON para conclusiones PP**

IF paso a paso

THEN text OF caja conclusiones := conclusiones[ 6 ] OF arreglos 1

**DEMON para explicaciones**

IF explica todo OF explicaciones

THEN output OF ventana de explicacion := display explicaciones

**DEMON para tipo de suelo I**

IF tipo de suelo OF puente IS I

THEN exponente := 0.5

**DEMON para tipo de suelo II**

IF tipo de suelo OF puente IS II

THEN exponente := 0.666667

DEMON para tipo de suelo III

IF tipo de suelo OF puente IS III

THEN exponente := 1

DEMON 3

IF numero OF tramos > 1

THEN text OF explicaciones generales := explicaciones preguntas 1[ 3] OF arreglos 1

RULE para sismicidad

IF C de CFE <= 0

THEN sismicidad

RULE para restriccion1

IF numero OF tramos < 2

THEN solo recomienda

RULE para Metodo Simplificado

IF restricciones geometricas MS OF puente

AND medidas restringidas MS OF puente

AND comportamiento sismico MS OF puente

THEN metodo simplificado

ELSE metodo simplificado := FALSE

RULE para suelo estructura

IF peso liviano OF puente

THEN considera IS suelo estructura

RULE para revisar longitud de apoyos

IF tramos largos OF puente  
THEN considera IS longitud apoyos

**RULE** para considerar componente vertical

IF tipo de suelo OF puente IS III  
OR características OF tramos IS Irregulares  
THEN considera IS componente vertical

**RULE** para metodo estatico

IF restricciones geometricas ME OF puente  
AND medidas restringidas ME OF puente  
AND comportamiento sismico ME OF puente  
THEN metodo estatico  
ELSE metodo estatico := FALSE

**RULE** para modal

IF metodo simplificado = FALSE  
AND metodo estatico = FALSE  
AND considerar efectos no lineales OF puente = FALSE  
THEN analisis modal

**RULE** para geometria MS

IF superestructura OF puente IS recta  
AND características OF tramos IS regulares  
THEN restricciones geometricas MS OF puente  
ELSE restricciones geometricas MS OF puente := FALSE

**RULE** para medidas MS

IF ancho del tablero OF tramos <= 30

AND longitud maxima OF tramos  $\leq 40$   
 THEN medidas restringidas MS OF puente  
 ELSE medidas restringidas MS OF puente := FALSE

**RULE** para comportamiento sísmico MS

IF marcos OF tramos IS Independientes  
 THEN comportamiento sísmico MS OF puente  
 ELSE comportamiento sísmico MS OF puente := FALSE

**RULE** para tipo de suelo1

IF estrato blando arcilloso muy compresible OF geotecnia = FALSE  
 OR estrato blando arcilloso muy compresible OF geotecnia = TRUE AND altura del estrato OF  
 geotecnia  $\leq 10$   
 AND fi OF geotecnia  $\leq 0.2$   
 THEN tipo de suelo OF puente IS I

**RULE** para tipo de suelo2

IF estrato blando arcilloso muy compresible OF geotecnia = FALSE  
 OR estrato blando arcilloso muy compresible OF geotecnia = TRUE AND altura del estrato OF  
 geotecnia  $\leq 10$   
 AND fi OF geotecnia  $> 0.2$   
 AND fi OF geotecnia  $< 0.45$   
 THEN tipo de suelo OF puente IS II

**RULE** para puente regular

IF rigidez de columnas OF puente IS parecidas  
 AND cambio de masa OF tramos = FALSE  
 AND cambio de rigidez OF tramos = FALSE  
 AND cambio de geometría OF tramos = FALSE

THEN características OF tramos IS regulares  
ELSE características OF tramos IS Irregulares

**RULE** para geometría ME

IF superestructura OF puente IS recta  
AND características OF tramos IS regulares  
AND claros OF puente IS continuos  
AND esviamiento OF puente = FALSE  
THEN restricciones geométricas ME OF puente  
ELSE restricciones geométricas ME OF puente := FALSE

**RULE** para medidas ME

IF ancho del tablero OF tramos  $\leq$  30  
AND longitud máxima OF tramos  $\leq$  120  
THEN medidas restringidas ME OF puente  
ELSE medidas restringidas ME OF puente := FALSE

**RULE** para comportamiento sísmico ME

IF distribución fuerza sísmica OF puente IS en todos los marcos  
THEN comportamiento sísmico ME OF puente  
ELSE comportamiento sísmico ME OF puente := FALSE

**RULE** para rectitud del puente1

IF puente recto OF puente  
THEN superestructura OF puente IS recta  
ELSE superestructura OF puente IS curva

**RULE** para rectitud del puente2

IF claros OF puente IS discontinuos

AND rectitud OF tramos = TRUE  
THEN superestructura OF puente IS recta  
ELSE superestructura OF puente IS curva

RULE para independencia de tramos

IF rigidez del tablero OF tramos IS no influye en la del puente  
THEN marcos OF tramos IS independientes  
ELSE marcos OF tramos IS dependientes

RULE para rigidez columnas

IF diferencia rigidez columnas adyacentes OF puente  $< = 25$   
THEN rigidez de columnas OF puente IS parecidas  
ELSE rigidez de columnas OF puente IS diferentes

RULE para cambios masa

IF cambios bruscos en superestructura OF tramos IS de masa  
AND porcentaje cambio masa OF tramos  $> = 10$   
THEN cambio de masa OF tramos  
ELSE cambio de masa OF tramos := FALSE

RULE para cambios rigidez

IF cambios bruscos en superestructura OF tramos IS de rigidez  
AND porcentaje cambio rigidez OF tramos  $> = 20$   
THEN cambio de rigidez OF tramos  
ELSE cambio de rigidez OF tramos := FALSE

RULE para cambios geometria

IF cambios bruscos en superestructura OF tramos IS de geometria  
AND porcentaje cambio geometria OF tramos  $> = 15$

THEN cambio de geometría OF tramos

ELSE cambio de geometría OF tramos := FALSE

RULE para esviajamiento del puente

IF grados de esviajamiento OF puente  $> = 10$

OR apoyos OF puente IS esviajados

THEN esviajamiento OF puente

ELSE esviajamiento OF puente := FALSE

RULE para fuerza sísmica1

IF índice de rigidez OF puente  $< = 2$

THEN distribución fuerza sísmica OF puente IS en todos los marcos

ELSE distribución fuerza sísmica OF puente IS solo en algunos marcos

RULE para fuerza sísmica2

IF índice de rigidez OF puente  $> 2$

AND rigidez de columnas OF puente IS parecidas

THEN distribución fuerza sísmica OF puente IS en todos los marcos

ELSE distribución fuerza sísmica OF puente IS solo en algunos marcos

RULE para influencia del tablero2

IF claros OF puente IS continuos

AND índice de rigidez OF puente  $< = 1$

THEN rigidez del tablero OF tramos IS no influye en la del puente

ELSE rigidez del tablero OF tramos IS influye en la del puente

RULE para influencia del tablero1

IF claros OF puente IS discontinuos

THEN rigidez del tablero OF tramos IS no influye en la del puente

**ELSE rigidez del tablero OF tramos IS influye en la del puente**

**END**