

Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica
ENERO/DICIEMBRE 2000 - VOLUMEN 10 - Nº 1 y 2



AMENAZA SÍSMICA Y EL CÓDIGO SÍSMICO DE COSTA RICA¹

Rodolfo Herrera J.²

Resumen

Se da una respuesta general a las preguntas que usualmente se hacen en la comunidad profesional y científica, en especial la no relacionada con la ingeniería, sobre temas como amenaza sísmica, código sísmico: cuáles son sus propósitos, qué regula, qué alcances tiene? Se trata los conceptos de sistema estructural, ciencias de la ingeniería, diseño estructural y cuál es su relación con la práctica de la ingeniería de la construcción. Se analiza brevemente la filosofía del Código como sistema de reglas tecnológicas y su relación con lo que espera el público y las relaciones y responsabilidades de los distintos profesionales involucrados en la construcción de obras. Se hace un resumen de la historia de la práctica del diseño sísmico en Costa Rica y se describen los esfuerzos y el estado actual de la elaboración de nuevas normas.

Summary

A general answer is given to the questions usually asked in the professional and scientific community, specially the one not related to engineering on themes such as seismic hazard; what are purposes, regulations and extension of seismic code?. Is about the concepts of the structural systems, engineering sciences and structural design, as well as its relation with the practice of the engineering construction. A brief analysis is taken of the philosophy of Code as a system of technological rules and its relation of what is expected by public and the relations and the responsibilities of the differents professionals involved in the construction work. A brief summary of the history at the practice of the seismic design in Costa Rica in which the efforts and the actual state of the elaboration of new norms are described.

2. AMENAZA SÍSMICA

Se llama *amenaza, peligro, riesgo* a algún estado de la naturaleza o de la sociedad que sea una fuente de peligro con potencial para causar enfermedad, herida o muerte de personas o daño a alguna instalación o al ambiente. El tema que nos ocupa trata solo de los *peligros y amenazas naturales* debidas a los *sismos*, afectando edificios y otro tipo de construcciones. Desde tiempo inmemorial los seres humanos han sufrido los terremotos como la fuerza ineluctable de los mensajeros de la condena. Homero, al igual que Hesiodo, creía que expresaban la terrible venganza de Poseidon el dios del mar y el verdadero príncipe de los cataclismos. Los Chinos creían que eran las convulsiones y los temblores del gran Dragón, quien vivía en las profundidades

de la Tierra. Los Japoneses estaban convencidos de que eran producidos por las contorsiones furiosas de Namazu, el gigante quien habita en el fango.

Toda catástrofe natural responde a criterios de tragedia clásica: lugar, tiempo y sociedad. Han existido acontecimientos brutales sin regularidad aparente, al menos a la escala de la memoria humana, que han afectado a sitios específicos pero despoblados. Sin embargo, solo merece llamarse "catástrofe natural" a aquel suceso que afecta las zonas pobladas. Una "catástrofe técnica" se da cuando es el producto de una falla técnica y en muchos casos por la acción combinada con algún efecto natural, por ejemplo la falla del puente sobre el río Tacoma bajo la acción del viento, o el resultado de una inundación, o un colapso

¹Este artículo contiene de manera ampliada la intervención del autor en las jornadas de ciencia y tecnología realizadas por la Academia de Ciencias de Costa Rica en diciembre de 1999.

² Ing., Dr., Prof. emérito, Fac. Ingeniería, Univ. de Costa Rica

de una edificación por efecto sísmico. El grado en que un terremoto violento afecta a la población depende de si la zona es muy despoblada o si en cambio hay ciudades u otras infraestructuras esenciales. En tal caso el daño crece en una proporción exponencial.

Es sorprendente que a pesar de la potencia destructiva y del impacto emocional de estos fenómenos, no es sino hasta la mitad del siglo veinte que se inicia un entendimiento racional sobre los "sismos". Sin embargo, a largo plazo las causas de las catástrofes naturales y sus recurrencias no han sido dilucidadas, y la memoria sigue siendo el único instrumento fiable de previsión y entonces de prevención. Se da una memoria dual: la primera es la del "tiempo de la naturaleza", la cual es alimentada por las informaciones conservadas en los archivos geológicos (por ejemplo, los sedimentos depositados después de una inundación, la transformación del paisaje). Una función de las *ciencias geológicas y sismológicas* es leer en "la memoria de los tiempos de la naturaleza", lo que permite fechar los sucesos, en medir su amplitud, ampliar la investigación de los orígenes y analizar la recurrencias". Es solo con la invención del *sismógrafo* (descendiente de la "veleta para el clima" del matemático chino Chang Hang en el 132 A.D.) que el conocimiento de la estructura interna de la Tierra ha progresado y el entendimiento de los sismos se convirtió en una posibilidad. Los métodos y técnicas actuales, como por ejemplo las medidas radiométricas fundadas sobre la radioactividad natural de ciertos isótopos (radiocarbono 14, potasium/argon, trazas de fisión, etc.), suministran una enorme precisión. Cuando las dificultades subsisten en la interpretación de los resultados, es necesario confrontarlos con los datos obtenidos por otros métodos (por ej. la observación geomorfológica) o la relación simultánea de varios métodos.

La otra cara es la "memoria humana: cultural y material". La primera de ellas no es dada por

las tradiciones, la educación, las conmemoraciones o la retrospectiva difundida en las masas después de una catástrofe. Ella sin embargo está llena de subjetividad: el interés, las experiencias, los prejuicios y la preocupación del momento. Los psicólogos sociales saben que la percepción y la memoria son limitadas y creativas, así como muy fuertemente coloreadas por la emoción y el interés. El resumen y la interpretación de los resultados varía según el que la sociedad posea escritura o sea de una cultura exclusivamente oral. La memoria humana es en general deficiente. Pero la "memoria material" es alimentada por las trazas (ruinas) dejadas a la humanidad por las catástrofes, trazas que se mezclan con las de la naturaleza y las completan. Sus métodos de análisis son los mismos (fechas): incluye temas escritos, pinturas, fotos y otros films. Todo ello forma los archivos como base de la "sismicidad histórica", fuente esencial de información antes de la aparición de los "sismómetros" y "acelerómetros" [35].

Al contrario de lo que acontece con la memoria humana, la ausencia de una memoria es cosa rara en la naturaleza; solo las trazas de un suceso rarísimo puede pasar desapercibido y darle una falsa reputación de estabilidad a ciertas regiones. Tal es el objeto de la *ciencia geológica* en general (investigación en ciencias de la tierra), objetivar la memoria natural (retroedición), explicar sus causas, hipotetizar leyes, y predecir los procesos.

2. AMENAZA SÍSMICA: SISMOLOGÍA

Es evidente que los sismos producen un gran cantidad de peligros para las estructuras de los edificios y que nuestro país pertenece a una zona geográfica de gran sismicidad. La vibración sísmica, la ruptura de fallas, el fallamiento local del medio soportante (licuefacción, asentamientos o compactación diferencial, deslizamiento de tierra) y una inundación pueden dañar los edificios y llevarlos al colapso. Además como se

demonstró en San Francisco en 1906 y más recientemente en 1995 en Hyogoken-Nambu en Japón, los sismos indujeron conflagraciones que pueden dar severos daños, pérdidas mayores de vidas, y pérdidas económicas substanciales. De las cuatro amenazas enumeradas solo la oscilación sísmica es considerada en las normas de diseño estructural: *código sísmico*.

En *sismología* y específicamente en *ingeniería sísmica*, la *amenaza sísmica* es un término usado para describir la caracterización general del movimiento sísmico, cuantificando la ocurrencia de futuros acontecimientos sísmicos y los efectos asociados. El conocimiento sobre la naturaleza del movimiento sísmico es la meta de las *prácticas científicas geológico-sismológicas*: explicar las causas y poder predecir los posibles acontecimientos. La *sismología* es la ciencia básica que estudia el fenómeno sísmico, el estudio de las perturbaciones producidas en el interior del planeta Tierra. La hipótesis sustantiva es que los sismos producen movimientos ondulatorios que se propagan en el interior y la superficie terrestre y que el análisis de la forma, la identidad, y la secuencia de las ondas (descifrando los sismogramas y acelerogramas), permite tener información sobre la localización e intensidad del origen de tales fenómenos. Así por ejemplo los registros sismográficos (evidencia sismológica) constituyen uno de los principales materiales de observación de la *sismología*. En bases a tales hipótesis y otras dadas por las ciencias físicas es que se construyen los sismógrafos, acelerómetros, etc., que detectan, amplifican y registran las ondas sísmicas. Pero la meta principal es poder desarrollar modelos conceptuales (imágenes) del interior inobservable de la Tierra, hipotetizando y construyendo teorías sobre tales procesos, de modo que los registros son la fuente de la observación y el medio de contrastación de las hipótesis geofísicas. La lectura de los registros requiere la utilización de la teoría del medio deformable, la física del

estado sólido y todas aquellas que tienen relación con el artefacto de observación y la interpretación de las señales geofísicas.

La *predicción científica* no es una *prognosis ordinaria* realizada en base a generalizaciones de sentido común referentes a la sucesión, conjunción, correlación o las frecuencias empíricamente halladas, es decir, una transposición de la experiencia ordinaria al futuro. La *predicción científica* es un operación conceptual que trasciende la experiencia porque se basa en enunciados de leyes y no en resúmenes inductivos. No necesita anticipar la repetición del pasado, pues se trata de predecir hechos de una clase no experimentada, que nunca han sucedido. La *sismología* está progresando al intentar constituir teorías no representacionales, no "leyes fenomenológicas" o series temporales de experiencia sin potencia predictiva (que no existen). La *predicción científica* puede fallar porque depende del grado de verdad de la teoría en que se fundamenta. La *predicción sismológica científica* no se ha dado por completo, en realidad la *sismología* nunca ha predicho con certeza algún terremoto.

Los movimientos sísmicos en un sitio son muy complejos y son representados por la *sismología* matemáticamente por funciones temporo-espaciales (tridimensionales) que dependen de la naturaleza de la fuente sísmica (la magnitud del sismo, el mecanismo del origen del sismo), de las características del medio y trayectoria por el que se transmite (la geología entre los puntos de la trayectoria, las características de la atenuación), de la distancia desde el hipocentro al sitio de cimentación y de las características del sitio en que se soporta la estructura del edificio. También las características del movimiento del terreno son influidas por el tipo de depósitos del suelo bajo los sitios de cimentación. Por eso los efectos sísmicos no son los mismos en todos los sitios (por ej. Nicaragua 1972, México, 1985, Alajuela, 1992). Como se señaló anteriormente, actualmente no hay

teorías que permitan una *predicción* adecuada de los sismos.

Para la determinación de la *sismicidad regional* (las propiedades estadísticas de la amenaza sísmica potencial), los sismólogos tienen dos enfoques usuales: uno es el muestreo estadístico de los registros históricos en las zona de edificación (fenomenológico) y el otro es la investigación analítica sobre la base de teorías (no representacionales), como la modelación matemática de las fuentes sísmicas y los funciones de atenuación. El *análisis de la amenaza sísmica* envuelve la modelización y la caracterización de todos las fuentes sísmicas potenciales en términos de su magnitud máxima, geometría, (tipo de falla, profundidad y localización) y recurrencia (rutinariamente estimada usando un modelo tipo Richter, que relaciona magnitud y recurrencia). Relaciones de atenuación han sido desarrolladas que relacionan los parámetros del movimiento del suelo (y la respuesta espectral) a fuentes características (y respuesta espectral en las fuentes) como una función de la distancia y las condiciones del suelo en el sitio [3].

Esta información que la *sismología* le puede suministrar (por ej. las "máximas intensidades sísmicas") a la *ingeniería sísmica* es importante pues le permite hipotetizar sobre el efecto y la magnitud de las acciones sísmicas sobre un edificio (carga sísmica). Generalmente la *sismicidad* queda expresada en términos probabilísticos definiendo en qué medida un parámetro sísmico pueda ser excedido (por ej. aceleración). Esto permite una *zonificación sísmica* caracterizada por las *aceleración máxima probable* (aceleraciones pico) o por *aceleraciones efectivas* del suelo, que varían en función de una región. Es importante para la ingeniería el conocimiento del *máximo sismo esperable*: máximo nivel de movimiento sísmico que se puede esperar en un sitio con construcciones dentro del marco geológico conocido. Estos datos son las *predicciones de la sismología* adecuados al interés de la *ingeniería sísmica*. Esto sirve de

fundamento para definir y determinar objetivamente los modelos teóricos que representen a la sollicitación sísmica sobre una edificación.

Ante la incertidumbre de los información sísmica suministrada, también la *ingeniería sísmica* puede fundamentar la escogencia de los niveles cuantitativos de las acciones sísmicas, en los datos de muestras de registros sísmicos (aunque no hay muchas), obtenidos con instrumentos de ingeniería (acelerómetros) traducidos teóricamente a las necesidades de sus modelos estructurales. Más explícitamente, determinación de las aceleraciones efectivas a partir de los registros de las funciones temporales de aceleración y la sintetización en espectros funciones dependientes del modelo de un oscilador de una sola masa. Actualmente se está elaborando un nuevo el Código Sísmico para el país, en el cual se están revisando lo existente y proponiendo nuevas formas de cálculo para las fuerzas sísmicas.

Es conveniente observar que las llamadas *magnitudes sísmicas* [35] determinadas por los sismólogos son objetivas (independiente del sitio del observación o del observador; por ej., la medida más conocida a nivel del público es la magnitud de Richter), son parámetros que dan una medida de la energía total liberada en un evento o proceso de ruptura de una falla (nivel del movimiento en la fuente). Estas han sido lentamente aceptadas e interpretadas por el público (por ej. el periodismo), pero no tiene ningún significado en el daño potencial. Esto se confunde a veces con la magnitud *intensidad* del sismo (medido por la escala de Mercalli Modificada u otras escalas similares), que son escalas subjetivas, pues una misma magnitud de sismo puede producir distintos efectos medidos por la intensidad y determinados por la localización del sitio de construcción y el tipo y calidad de la misma (es decir, depende del observador y su localización). Para propósitos de la ingeniería la intensidad es un factor menos útil, salvo

cuando se trata de evaluar el resultado de un acontecimiento.

3. EL CONCEPTO DE SISTEMA ESTRUCTURAL Y LA CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

Aquel *sistema material* componente de un artefacto (por ej. un edificio) que tiene por función especial la de mantener la estabilidad y resistir las acciones externas al sistema, se llama *estructura* o *sistema estructural*, y es el principal subsistema de un artefacto o "construcción": un edificio, puente, etc. En el caso de los edificios hay otros componentes de éste que constituyen estructuras secundarias o equipos importantes (por ej. instalaciones electromecánicas), las cuales deben mantener su funcionalidad después de un sismo. La falla de la estructura implica el daño o colapso o desplome de un edificio o de cualquier otro tipo de obra.

Explícitamente un *sistema estructural* tiene (como todo sistema) una "composición", en este caso un conjunto de cuerpos materiales (artefactos: barras, cables, vigas, muros, losas, etc.) vinculados mutuamente y con el medio soportante. La "estructura" del sistema consiste del conjunto de relaciones entre esos componentes, su modo de vincularse física y geoméricamente, su configuración geométrico espacial; el "ambiente" o entorno del sistema es todo aquello que no se considera como su composición y que interactúa con ella (en el caso de un edificio por ejemplo el viento, cargas gravitacionales permanentes o temporales, etc.). Esta interacción se representa con "fuerzas" de diversos tipos: cargas gravitacionales (peso), cargas de sismo o de viento, temperatura, etc. La estructura antes estas acciones responde con su movimiento cambiando de configuración, es decir, deformándose (respuesta cinemática), la cual depende de las propiedades de los materiales constitutivos de sus componentes, del tipo de componentes (subsistemas). El comportamiento del sistema (su ley

constitutiva) no es el mismo que el de sus componentes, pero se puede "predecir" en términos de ellos. La estructura está determinada por su "composición" (tipo de materiales y componentes) y por su "estructura" (relaciones incluyendo las leyes de su movimiento) y tiene una respuesta o movimiento (cambio de configuración) ante los cambios en el entorno (cargas, especialmente sísmicas).

La ciencia particular denominada *mecánica estructural* (una de sus partes importantes para la *ingeniería sísmica* es la dinámica de estructuras) pretende explicar (obtener leyes nomológicas) y predecir el comportamiento: movimiento o deformación de la estructura cuando está solicitada a acciones externas, como es el caso particular del movimiento sísmico. Esta ciencia es una *ciencia de la ingeniería*: una *práctica científico-tecnológica* [7, 12] que desarrolla conceptos, hipótesis, teorías, modelos teóricos en términos matemáticos, datos, conocimiento técnico empírico, sistemas de *reglas tecnológicas* (normas o códigos de diseño), etc., que explican y predicen el movimiento de estos objetos o artefactos materiales. Tales teorías y modelos teóricos tienen por objetivo básico la *fiabilidad* o *seguridad*, el *desideratum* de la *previsión tecnológica*. La cualidad especial de esta ciencia es que trata de cosas que la *práctica tecnológico-científica* ha inventado, en este caso, *estructuras*. En el campo de las ingenierías tales ciencias se llaman *ciencias de la ingeniería*, un campo de las *ciencias aplicadas*.

La *respuesta dinámica* de la estructura ante acciones externas es una función de sus *propiedades mecánicas*, a saber: *periodo natural*, *factor de amortiguamiento*, *factor de ductilidad*, parámetros que caracterizan al modelo teórico o conceptual que representa a la estructura supuesta. Estas propiedades se sintetizan matemáticamente en general en una función o *parámetro estructural*.

La *predicción* científica de la respuesta de estructuras bajo sismo es una meta a alcanzar. Hoy se pueden chequear formas estructurales no usuales con alguna mayor confianza que antes, lo que abre nuevas perspectivas a los ingenieros y arquitectos. Las nuevas herramientas de *software* abren estos espacios al diseño. También para estructuras sencillas pero en situaciones, difíciles de predecir su comportamiento y que antes se resolvían con reglas empíricas o muy conservadoramente [9], hoy se pueden tratar más racional y exactamente (como por ejemplo el problema de una estructura sustentada en un suelo sedimentario profundo, donde es necesario usar pilotes; la determinación de las fuerzas y la demanda de ductilidad en los pilotes bajo carga sísmica era antes un problema muy complejo, pues se requería el conocimiento de la interacción estructura-suelo). Por otra parte hay una mayor sofisticación en la definición de movimientos del suelo (geotecnia) basados en un entendimiento de los procesos de la fuente y la capacidad para analizar los efectos de los sismos anteriores. Hay un enorme aumento en la cantidad de información disponible (datos de movimiento fuerte) que han ayudado mucho en este sentido. La capacidad para analizar y entender el comportamiento cíclico de los suelos es creciente, permitiendo hoy estimar con más confiabilidad, fenómenos tales como la amplificación de los efectos en un sitio y la licuación del suelo. La ciencia de la ingeniería denominada *mecánica de los suelos* y la *geotectónica*, son las prácticas que tratan este problema de los suelos o estratos del medio soportante de las estructuras.

El problema para la ciencia de la ingeniería estructural es que la *valoración de la seguridad* es basada sobre el comportamiento de estructuras usando modelos teóricos o modelos físicos y no siempre hay suficiente experimentación previa sobre prototipos experimentales, como se realiza con los artefactos industriales (el control de las variables solo puede realizarse en condiciones

artificiales). Los ingenieros infieren de la experiencia pasada "reglas de dedo" (una regla empírica adoptada porque se considera que, correcta o erróneamente, trabaja o porque su violación podría no ser productiva) o "reglas técnicas" (reglas consistentes con la ciencia o con la ética) que pueden ser útiles para el ingeniero, el problema es cómo transferir formalmente esta experiencia de problemas y datos de pruebas del pasado a los problemas actuales, cuando la naturaleza del problema y de la estructura son solo aproximadamente similares. O sea que se trabaja, aun asumiendo ningún error humano, con *grados de incertidumbre*: en primer lugar la *incertidumbre sobre el sistema* (modelo teórico que representa la "composición" y la "estructura" del sistema estructural) debido a la inexactitud del modelo teórico usado, en la hipótesis de que los datos sobre los parámetros que lo caracterizan matemáticamente sean precisos y en segundo lugar, la *incertidumbre sobre los parámetros* mismos, es decir, debido a la naturaleza de los parámetros que describen al sistema estructural y su interacción, como por ejemplo la determinación de las sollicitaciones sísmicas.

La *falta de seguridad* asociada sobre la incertidumbre de un modelo teórico, queda evidenciada cuando se trate de constituir una contrastación experimental con los siguientes aspectos: falta de repetibilidad del estado de la estructura, la falta de correspondencia entre la claridad de la definición del estado de la estructura en el modelo y el estado de la estructura como será construida y la falta de repetibilidad de los valores de los esfuerzos y deformaciones, cada vez que un estado particular aparece. En el caso de los sismos la contrastabilidad experimental se da en cierta forma cuando sucede una falla estructural, o en el peor de los casos, un colapso total de la edificación u obra civil, o sea, *a posteriori*. Así la *incertidumbre del sistema* no puede ser normalmente valorada por estadística "objetiva" y debe por tanto ser valorada en cierta forma "subjetivamente". Por otra parte

la *incertidumbre de los parámetros de entrada* (por ejemplo las propiedades de los materiales) para un modelo teórico de la estructura, puede valorarse por el uso de estadística "objetiva", proporcionando distribuciones de probabilidad si los parámetros son variables aleatorias. La *incertidumbre* es pues una combinación de la *incertidumbre de los parámetros y del sistema*.

Actualmente el *análisis del riesgo sísmico*, que incluye elementos tales como la amenaza sísmica, la transmisión de la energía al sitio en estudio, la respuesta dinámica en el sitio, la falla de componentes y la falla del sistema estructural mismo, es un campo interdisciplinario (ciencias sismológicas y las ciencias de la ingeniería sísmica) de gran desarrollo y aplicación al objetivo de obtener la mayor seguridad en obras importantes.

4. LA INGENIERÍA: EL PROCESO DEL DISEÑO

La *ingeniería: una práctica tecnológica* [10, 16] que a diferencia de la prácticas científicas, entre ellas la *práctica científico-tecnológica* y específicamente para el caso que nos ocupa, la *ciencias de la mecánica estructural* relacionadas con el problema sísmico, no se ocupa directamente de explicar a los procesos existentes. Su función esencial es el *diseño*: "la creación conceptual de un sistema conceptual que represente a un posible sistema concreto o artefacto por construir o fabricar" [16]. El ingeniero le interesa, y tal es su conocimiento, el conocimiento de cómo hacer las cosas, el conocimiento de cómo, pues el de qué es el objetivo del conocimiento del científico.

En la práctica de la *ingeniería* lo que se da siempre es un problema "práctico" a resolver (un paso de puente o un edificio con determinada función), esencialmente dentro de las condiciones de seguridad y economía. En el caso de los sistemas estructurales estos le son propuestos o se los propone como solución y siempre se da la pregunta: de todos

los posibles soluciones de un problema práctico, cuál es la mejor?Cuál es el *riesgo sísmico* involucrado? La respuesta requiere de un proceso de modelación y cálculo, en el cual lo que interesa es el balance adecuado de la seguridad y el costo (veces con consideraciones estéticas y ambientales). En el caso sísmico se debe estimar, dados unos límites para las consecuencias económicas y sociales por el posible efecto, la magnitud del riesgo sísmico, generalmente dada en términos de magnitudes probabilistas. Este proceso es limitado por el tiempo y el financiamiento involucrado. La propuesta consistirá de un modelo teórico o conceptual del posible sistema concreto por construir y de cómo construirlo. El proceso por el cual esto se realiza es un proceso que se da en el pensamiento, en una combinación de síntesis y análisis, de selección del modelo teórico que mejor representa a la estructura propuesta. No se puede analizar una cosa que primero no se ha hipotetizado, supuesto, inventado antes: hay una etapa creativa e innovativa.

El sistema conceptual [12] es materializado en planos, esquemas, especificaciones, datos, métodos, cálculos, reportes, certificaciones, etc., denominados *documentos de diseño*, los que contienen tanto referencias sustantivas sobre el objeto concreto, como referencias operativas sobre su operación futura o sobre su mantenimiento o sobre su construcción.

Los ingenieros estructurales, principales diseñadores de los sistemas estructurales, juzgan la calidad, seguridad y economía de sus estructuras sobre la base de su entrenamiento, experiencia, juicio técnico y su *conocimiento científico*. En todo el conocimiento científico existente y a mano relacionado con su problema, con el contexto teórico de éste. Actualmente se dispone de una gran variedad de nuevas herramientas, transferidas desde los subsistemas de investigación para el uso práctico de las oficinas de diseño. Los métodos de análisis hoy pueden ser más sofisticados, debido a las computadoras se

pueden realizar complejos análisis dinámicos no-lineales, hay una enorme capacidad sobre investigación de datos, como por ejemplo la utilización de modelos del comportamiento cíclico posfluencia de materiales, etc.

El proceso denominado en general *diseño*, es un eje fundamental de toda ingeniería y de toda *práctica tecnológica* [10, 16] en general. El otro "eje de la ingeniería" se denomina usualmente *construcción* en el campo de la *ingeniería civil* y contiene la actividad denominada la *dirección técnica y la administración de la construcción*: una actividad orientada a dirigir, controlar y determinar el proceso de ejecución de las obras. En este campo se desarrollan las "tecnologías propias de la construcción", como por ejemplo el uso de maquinaria, la invención de procedimientos prácticos, la planificación de las obras, el diseño de los sistemas de actividades, el análisis de los costos operativos, etc. En la construcción de edificios por ejemplo se han desarrollado mucho las "tecnologías alternativas" conducentes a amortiguar el efecto de los sismos, particularmente el aislamiento de la base, y otras técnicas tales como los amortiguadores pasivos, están siendo parte del rango estandar de opciones ha considerar, aun para aplicaciones relativamente convencionales. La práctica tecnológica de la construcción se realiza por medio de sistemas concretos de producción (*tecnosistemas*) [13]: empresas constructoras, industria que tiene en parte la característica que es en parte dependiente y variable con las circunstancias de la zona, lugar y tipo de obra por construir. Las obras se construyen siguiendo las indicaciones de los proyectos previamente diseñados, específicamente los planos del futuro artefacto (edificio, puente, represa, etc.), los cuales a su vez están sujetas a cambio, revisión, rediseño, según las circunstancias y necesidades del desarrollo de las obras. Esto se hace en relación entre los ingenieros constructores y los ingenieros inspectores o diseñadores directamente. La

responsabilidad civil de las obras la toma globalmente la empresa constructora. Se evidencia así que hay dos etapas del proceso, una división del trabajo real y profesional. No es una interdisciplina ideológica sino que es constitutiva del proceso distribuido en dos ejes: *diseño-ejecución*. Un buen diseño no implica una buena construcción o viceversa.

5. LA DEMANDA Y LA RESPUESTA SÍSMICA

El análisis de una estructura propuesta se desarrolla en tres etapas [11]: análisis de las acciones externas (por ejemplo, demanda o cargas sísmicas), análisis de la respuesta de la estructura a estas acciones y análisis de los resultados de los cálculos de la respuesta para determinar si la estructura es segura.

Cuando las acciones sobre un sistema estructural son debidas al *movimiento sísmico* (que induce o produce un movimiento del medio soportante de la estructura) las acciones son de carácter dinámico y con propiedades aleatorias que dependen de varias funciones mutuamente relacionadas. En primer lugar la *sismicidad regional* en la zona o sitio de construcción, las características del movimiento del suelo representadas por parámetros como la *amplitud*, la *duración* y el período o *frecuencia predominante*. En segundo lugar el *comportamiento* del sistema estructural ante estas acciones, tiene también un carácter dinámico (depende por ejemplo, de su frecuencia propia de oscilación). En los últimos cincuenta años el conocimiento en este campo de la ciencia ha avanzado significativamente en el mundo, no ha dejado de progresar.

Como se comentó previamente, la determinación de las acciones sísmicas o de la *demanda sísmica* sobre un sistema estructural es un campo intermedio entre dos ciencias: sismología y ciencias de la ingeniería sísmica: una *sismología aplicada* a los problemas de la *ingeniería sísmica*. El análisis de la amenaza

sísmica (en base a los datos e información sismológica: fuentes sísmicas y las relaciones de atenuación) se sintetiza por medio de un *factor de sismicidad*, una función de los parámetros *amplitud*, *duración*, y período o *frecuencia predominante* de un sismo, los cuales permiten determinar sus propiedades.

En el Código Sísmico de Costa Rica (1986) la sismicidad es expresada mediante *curvas de isoaceleración* en función de los periodos de retorno, que determinan una zonificación sísmica del país y permiten a los ingenieros estructurales calcular los coeficientes de fuerza sísmica. Basados en los registros de las funciones aceleración, velocidad y desplazamiento en un sitio o zona (determinados por medio del procesamiento de los datos de la red de acelerómetros), el análisis de la demanda se traduce o transforma para la *ingeniería sísmica en espectros de respuesta de pseudo-aceleración* (un modelo teórico que se basa en el comportamiento de un oscilador de una sola masa cuando está solicitado por funciones que reproducen los parámetros dinámicos del sismo). La mayoría del códigos presentan formas espectrales normalizadas que varían como una función de la geología local [3,4]. Además, generalmente la forma espectral es una función de las condiciones del suelo locales (en suelos blandos la amplificación del movimiento del terreno pueden ser mayores a un 500%).

La *intensidad sísmica* o *factor de sismicidad* que puede esperarse en el sitio de construcción durante su vida útil, es un *parámetro no-estructural* que permite determinar la *demanda sísmica* o *solicitud* de fuerzas sísmicas sobre el sistema estructural propuesto.

La unión de los dos factores (su producto): *demanda sísmica (factor de sismicidad o parámetro no-estructural)/respuesta dinámica (parámetro estructural)* constituye un sistema conceptual: *solicitud-respuesta sísmica* o el *efecto de la carga sísmica*. El primer factor se

puede determinar a partir de las características o condiciones de la amenaza sísmica y el segundo de las características mecánicas del sistema estructural. Propuesto un sistema estructural, con el conocimiento de los factores mencionados, el ingeniero estructural tiene la posibilidad de chequear si la estructura puede sobrevivir ante una *demanda sísmica*, pues ella (su modelo teórico) deberá cumplir con la condición que su *resistencia* determinada por la *respuesta*, sea mayor que el *efecto de la carga sísmica*. Para ello se controla que las sollicitaciones sísmicas relevantes sobre el sistema estructural, que le demandan a él una rigidez, ductibilidad, resistencia y estabilidad (absorción de energía, disipación de energía), deba ser menor que lo que la estructura propuesta puede suministrar.

Por otra parte el comportamiento objetivo de un sistema estructural es definido hoy día, relacionando un nivel de *comportamiento* (resistencia, desplazamiento) con un nivel de *demanda sísmica*. Estos niveles incluyen generalmente la posibilidad de la *ocupación inmediata, seguridad de vida y ningún colapso* (algunas veces referido como "prevención del colapso" o "cerca del colapso") de un edificio posteriormente a un evento sísmico. La *seguridad de vida* es el nivel de comportamiento estandar para la utilización u ocupación de la obra [1] y el objetivo más relevante de la *ingeniería sísmica*. Los códigos sísmicos incluyen o deben incluir metodologías y parámetros que tomen en consideración todos estos aspectos del comportamiento.

6. NORMAS DE DISEÑO: OBJETIVOS Y ALCANCE

En base al resultado de la investigación, el producto teórico y experimental de las ciencias de la ingeniería estructural y de la práctica de la ingeniería de la construcción, es que se pueden construir *sistemas de reglas tecnológicas* que guíen y ayuden a los ingenieros en el proceso del diseño. Las reglas

prescriben como hacer algo. Tales son los llamados *códigos de diseño*, como el *código sísmico*: un "sistema de normas o reglas" basadas en el mejor conocimiento sobre el campo y que sintetizan ciertos procedimientos o métodos de cálculo, conteniendo un conjunto de recomendaciones orientadas a que se logre un diseño estructural seguro y fiable de un proyecto. Las *reglas tecnológicas* son fundadas en el conocimiento científico, son *normativas* que solo pueden ser *efectivas* en ciertos grados, al contrario de los enunciados de leyes científicas (descriptivas o interpretativas).

En general el Código [3] establece los requisitos mínimos que se deberían cumplir en el cálculo de estructuras sismo-resistentes. Es responsabilidad de cada profesional establecer los requisitos adicionales que se deriven de las características específicas de cada proyecto.

Los códigos o normas de diseño no sustituyen el análisis o la investigación necesaria para cada problema particular que enfrente el ingeniero estructural. Como se ha descrito el diseñador profesional debe desarrollar un modelo matemático que describe la geometría espacial de la estructura o edificio y las características mecánicas de los componentes, así como las características de la demanda sísmica. Estos pasos como ya se describió, introducen significativas incertidumbres que podrían influenciar la seguridad de los resultados. Los códigos no dan en general guía para el desarrollo de modelos para representar a las estructuras propuestas. En el Código se contemplan estructuras o grupos de ellas, que por ser muy frecuentes y poseer características comunes, son susceptibles de recibir un tratamiento regular. Aquellas estructuras con una tipología no contemplada en la norma deben ser objeto de estudios especiales. Además el Código también define distintas categorías de edificios: edificios ordinarios (ocupación estandar) y edificios esenciales (típicamente hospitales, centros de comunicación, y otras instalaciones críticas),

todas las cuales deberían permanecer operando después de un sismo.

De todos los posibles efectos de un sismo sobre una estructura el único que estará siempre presente es la vibración del terreno y ése es al que se refiere las recomendaciones contenidas en el Código Sísmico. Donde el ingeniero estructural tiene o ha tenido poco o menor control, es en la selección en el caso de edificios del sitio del proyecto, pues estos son usualmente escogidos por otras razones no relacionadas con el comportamiento sísmico. Riesgos como el fallamiento local, asentamientos, licuación (Nigata, Japón), deslizamientos (Anchorage, Alaska), etc. que son potencialmente mucho más destructores, ocurren en sitios específicos cuyo índice de peligrosidad deben evaluarse con antelación a la escogencia del sitio, con la recomendación de geotecnistas o sismólogos según el caso. Lo recomendable es evitar tales sitios y cuando esto no sea posible deben hacerse los estudios y minimizar el peligro. Por esta razones no conviene construir obras cerca de fallas geológicas que puedan producir desplazamientos relativos muy grandes (es claro que para obras nacionales de gran envergadura, en general las instituciones del estado siempre han considerado estos hechos).

El Código recomienda que los ingenieros y diseñadores en general, deben considerar e identificar tales problemas por medio de la colaboración de otros especialistas: geólogos, sismólogos, geotecnistas (por ej. ingenieros de suelos). En el Código no se describen estrategias para mitigar estas amenazas, solo se señala su importancia y la necesidad de realizar los estudios correspondientes. De igual manera las inundaciones no son consideradas en los códigos, a pesar del hecho de que pueden ser catastróficas como lo demostraron el daño causado por el tsunami en 1993, por el sismo de $M_L = 7.8$ en Hokkaido-nansei-oki en Japón.

Otro elemento en el diseño de edificios es el bajo control que tiene el ingeniero estructural en la determinación del sistema estructural, proceso creativo la mayoría veces realizada por *arquitectos*. Sin embargo, hoy día existe una mejor relación profesional en este campo, para buscar estructuras más regulares y que reunan desde el inicio del proyecto las condiciones estructurales óptimas para poder determinar o definir su comportamiento posible. El Código reconoce esto y recomienda y restringe cierto tipo de estructuraciones o configuraciones espaciales en el caso de los sismos, o en su lugar obliga a realizar análisis dinámicos especiales.

Los códigos de diseño son populares en las oficinas de diseño estructural, porque usualmente están ligados a la posibilidad de dar respuestas a los problemas del diseño (aun si no siempre ellas sean las apropiadas). Por otra parte son populares con los clientes porque parece que dan un nivel objetivo de seguridad. Sin embargo el cumplimiento del Código no es garantía para un comportamiento satisfactorio y existe el peligro de que se traten los códigos como documentos legales (no son *códigos legales*), más que elementos de guía para una buena práctica del diseño. (por ello se considera que el nombre adecuado debería ser *norma sísmica*).

Siendo una práctica internacional de trabajo, en muchos países nos encontramos con un gran rango de códigos y de diferentes soluciones aplicables. En muchos se confunde los sistemas de reglas con los requerimientos explicatorios o comentarios. Las *normas del diseño* del futuro tendrán forma distinta, habrán nuevas formas estructurales y nuevos materiales, así como nuevos procedimientos de diseño y de construcción y diferentes enfoques de la amenaza sísmica. La práctica del diseño tendrá que acomodarse a estas nuevas situaciones y enfoques. También es importante insistir en que el Código Sísmico *no es un código o una norma de construcción*, es un *sistema de reglas para el diseño de*

estructuras, una guía para el ingeniero estructural. Es importante señalar lo anterior para que el público entienda lo mejor posible la división de trabajo existente y los alcances y las limitaciones de una norma de diseño como es el Código Sísmico. La *moralidad* de un sistema de reglas tecnológicas solo se puede estimar *a priori* computando los pronósticos relevantes (las acciones racionales del diseño), los cuales solo se pueden chequear *a posteriori* observando las consecuencias o daños sobre sistemas estructurales, en los que se supone que el proceso de ejecución de una obra (su control y calidad) haya sido cumplido cabalmente, es decir, haya sido realizado dentro de las *normas de construcción* adecuadas o que se hayan podido determinar otros factores fuera del control técnico.

Las normas o *reglas tecnológicas* deben reflejar en estado del arte existente y por ello son variables con el tiempo, pues el conocimiento se desarrolla permanentemente. Es por eso que se debe mantener financiamiento para la investigación en la ciencias de la ingeniería estructural (dinámica de estructuras, etc.), investigación experimental, ingeniería sísmica, geotecnia y sismología, necesarios para una adecuada y permanente revisión de las normas de diseño. Es importante recalcar, para recuerdo de los políticos de la ciencia y la tecnología, que la única fundamentación válida de una regla (por ej. de un Código Sísmico), es un sistema de leyes científicas (fórmulas legaliformes), porque solo éstas pueden dar razón correcta de los hechos y por tanto el que la regla funcione. En otras palabras, hay que financiar a la ciencia tecnológica y básica. Para que la regla sea eficiente debe estar precedida por la verdad, tal es la regla que fundamenta la *acción racional*.

El Código define una *filosofía del diseño sismo-resistente* [3, 4] presente en todo las normas del mundo: la búsqueda del menor riesgo en la pérdida de vidas humanas, de modo que durante un sismo sea el menor posible, es decir, trata de proteger la vida, la

salud, y el bienestar público. Esta es la responsabilidad de los diseñadores o ingenieros estructurales y mediatamente de los ingenieros constructores. Como se puede deducir de lo hasta aquí tratado la naturaleza aleatoria de los fenómenos sísmicos y de la naturaleza de la respuesta de las edificaciones y del conocimiento de ambos factores, hace imposible la eliminación de total del riesgo, y depende del avance del conocimiento científico y de la buena técnica de construcción.

El *objetivo general* del Código Sísmico de Costa Rica [3, 4] es procurar que toda estructura y cada una de sus partes sea proyectada, diseñada y construida de manera que: (1) resista sismos menores sin ningún daño; (2) resista sismos moderados sin daños estructurales, admitiéndose algunos no estructurales; (3) resista sismos fuertes sin colapso; admitiéndose algún daño estructural reparable en lo posible. El riesgo económico será el resultado del balance de los gastos de reparación y el costo marginal que se requerirá para evitar esos daños. Aunque exista este propósito tecnológico los costos para construir edificios capaces de resistir todos los sismos concebibles sin daño es muy grande. Los códigos sísmicos suministran estándares mínimos para alcanzar objetivos de comportamiento adecuados. La filosofía descrita (propia también de otros códigos vigentes) requiere una revisión [36], pues no contempla medidas tendientes a disminuir las pérdidas económicas producidas por los daños secundarios, los que además pueden hacer inservible a una edificación impidiendo su funcionalidad (por ej. la de hospitales). Esta revisión es parte de los asuntos que se están considerando en la elaboración de una nueva norma sísmica.

En efecto, un código moderno debe definir *niveles de comportamiento típicos* que condicionen los diseños (modelos de los sistemas estructurales propuestos para su análisis), los cuales comúnmente son los

siguientes: *ningún colapso* (o la prevención del colapso), *seguridad de vida*, *control del daño*, *ocupación inmediata*, *totalmente funcional* [2]. Todo diseño es un compromiso con el grado en que estas distintas restricciones podrían llegar a cumplirse. Es obvio, que dadas las enormes incertidumbres existentes en el proceso de diseño y construcción, asegurar contra daño sísmico aun para sismos moderados, es una tarea muy difícil.

Los profesionales arquitectos, ingenieros civiles (en especial los ingenieros estructurales): diseñadores y constructores, cumplen con la condición social especial de que el *Estado* al registrarlos como profesionales por medio del Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica (CFIA), les otorga el monopolio sobre el diseño estructural, inspección y construcción de obras civiles y por otra parte ellos mediante el producto de su trabajo, toman la obligación y el deber de proteger y darle bienestar al público en el ambiente construido. El CFIA obliga al profesional a cumplir con un *código de ética*: un código de conducta moral, en el que el principal deber es para la sociedad y en segundo lugar para su cliente. Tanto diseñadores como constructores (ingenieros civiles y arquitectos) tienen la obligación ética de tratar de realizar obras capaces de resistir los efectos catastróficos de los sismos, cumpliendo como primer objetivo el proteger la vida humana, lo cual principalmente implica evitar el colapso: son dos objetivos esenciales. En segundo lugar tratar de reducir los daños estructurales o no, para disminuir las pérdidas económicas y sociales. El Código Sísmico es solo un elemento, aunque importante, para lograr este propósito general.

7. LA PREVENCIÓN: DATOS HISTÓRICOS

Enfrentar los riesgos naturales es realizar acciones de prevención (orientación sobre la ocupación y utilización del suelo, protección

técnica, información) y de defensa (gestión de las crisis, aseguramiento). Prever es también tomar en cuenta el comportamiento de los individuos y de los grupos sociales, para evitar que la amenaza no termine en catástrofe. A diferencia de las "catástrofes técnicas", no hay en materia de "catástrofes naturales" la posibilidad de la identificación o sanción de culpables. En el caso sísmico la *previsión tecnológica* se sustenta en la predicción científica, su objetivo es cómo influir en las circunstancias para producir ciertos hechos o evitarlos, tanto social como tecnológicamente (por ej. construir mejor). Es función del *tecnólogo* indicar los medios adecuados y su previsión (una relación medios-fin) y el conjunto de acciones preventoras que eviten largos y costosos programas posteriores de reconstrucción, así como solucionesseudocientíficas o misionesseudohumanitarias. La triada de la mitigación de los efectos de un terremoto son: la predicción científica, la predicción tecnológica (prevención) y el trabajo organizado en el planeamiento del alivio de cualquier desastre.

La investigación dirigida a la obtención de una seguridad máxima incita a la sociedad a creerse invulnerable a los peligros y hacer abstracción de ellos. También la sofisticación de los sistemas de prevención y de gestión puede conducir al debilitamiento de la vigilancia técnica y social o a la transferencia de una categoría de riesgos a otra. La vida urbana rompe ciertas relaciones de la sociedad con la naturaleza, tendiéndose a borrar ciertas informaciones de su memoria, pero en la ciudad la naturaleza siempre está presente, en realidad la ciudad es naturaleza reorganizada, el mundo de la *artificis* no está separado de la naturaleza pues es su propio producto. Para evitar las pérdidas de memoria, los datos recordando las catástrofes deben estar presentes y validados, estructurados y almacenados en los ordenadores. Una sociedad no debe temer a la información científica sobre sismos, de lo que hay que huir es de los pronósticos irracionales o mágicos. Las

medidas preventivas a nivel social son importantes para evitar en lo posible, lo que llamamos catástrofes sociales producidas por las catástrofes naturales. La funcionalidad de los sistemas de información geográfica, multimedia, hipermedia (sistemas que permiten la creación de vínculos entre los diversos documentos) permiten inventariar y almacenar la información, así como a reactivar la memoria sobre las catástrofes. También ayudan al análisis de la sociología colectiva, a las acciones para la formación y educación, tanto en los programas escolares como en los medios de información pública. En Costa Rica existe una *Comisión Nacional de Emergencia* que considera y tiene larga experiencia en algunos de estos aspectos, aunque hay que evitar la posibilidad de una burocratización mediocre e incrementar la base tecnológica

En el país se ha enfocado objetivamente la amenaza sísmica adoptando medidas de prevención tendientes a reducir el impacto de los eventos sísmicos destructivos [38]. Estas medidas se comenzaron a tomar desde el siglo pasado posteriormente al terremoto de Cartago de 1841, con la publicación como ley del "Código Carrillo" (instrucciones y obligaciones a cumplir para una buena construcción), que es el primer "*primer código de construcción*" en Costa Rica [15, 28]. La construcción de adobe se prohibió mediante un decreto ley del Gobierno de Costa Rica, posteriormente al terremoto de 1910, el cual destruyó de nuevo la ciudad de Cartago. Actualmente es el único país de América Latina en el que no se usa la construcción de adobe desde hace 87 años [29]. Ya a finales del siglo pasado se instalaron registros instrumentales, los que fueron dejados sin recursos, operación que se reinició hasta 1940 y en los setenta se inició la instalación de una red más densa [29]. En 1986 el Gobierno publicó un decreto que exigía que todas las obras esenciales y edificios públicos debían estar sujetos a estudios de vulnerabilidad y adecuación sísmica, lo cual ha sido una

medida muy importante para disminuir el riesgo de obras civiles esenciales.

El terremoto de Managua de 1972 fue un evento destructivo que motivó a nuestra comunidad profesional y académica a realizar la primera norma sísmica para el país. El primer Código Sísmico fue publicado en enero de 1974 por la Comisión Permanente del Código Sísmico (CPCS) perteneciente al CFIA [3]. El impulso inicial lo dio la Escuela de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Costa Rica (UCR) mediante una Comisión de Investigación que para tal propósito se nombró, a la que pertenecieron los ingenieros Eddy Hernández Castrillo, Luis Luckowiecki Gotfried, Franz Sauter Fabian, Jorge Gutierrez Gutierrez y el suscrito [14]. Posteriormente el CFIA formalizó su apoyo creando la Comisión actual con la condición de "permanente". El cumplimiento del Código es parte del *código de ética* del CFIA y existe una ley que obliga a su aplicación en el diseño estructural de obras civiles. Una nueva versión modernizada denominada Código-86 fue publicada en 1987, y es la que rige hoy día para la práctica del diseño estructural.

A nivel académico (enseñanza e investigación) la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Costa Rica (UCR) enfocó desde finales de la década del 60 la necesidad de promover el campo de las ciencias de la ingeniería y el diseño orientadas hacia el problema sísmico, creando nuevos cursos en ingeniería estructural, enviando estudiantes becados a universidades extranjeras, nombrando profesores de tiempo completo, etc. Esto creó las condiciones para que la práctica de esa especialidad de la ingeniería civil tenga un buen nivel en el país. En nuestro país se ha alcanzado un excelente nivel académico y profesional en el campo de la ingeniería estructural, que se refleja en publicaciones, congresos, empresas consultoras, industrias de la construcción (por ejemplo las industrias de prefabricación) y una de las más altas densidades de especialistas de América Latina.

La UCR actualmente ofrece carreras de posgrado en la Escuela de Ingeniería Civil, unidad académica que ha sido la pionera en el campo del desarrollo de las ciencias para la *ingeniería sísmica, geotecnia, mecánica de suelos, ingeniería estructural* en general. También ha sido importante el desarrollo de la investigación y la enseñanza en los campos de la *geología, vulcanología y la sismología*, en la UNAH y en la UCR. En ésta última desde hace 5 años hay una carrera de posgrado en *sismología*, la cual a la fecha a graduado 8 profesionales para el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), UCR, Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica (OVSICORI): Universidad Nacional (Heredia).

En la Escuela de Ingeniería Civil de la UCR, funcionan un Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANNAME), un Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS) y hay programas de investigación en el campo. Simultáneamente al desarrollo científico-tecnológico, los campos de las ciencias de la *geología y la sismología*, tanto en la UCR como en la Universidad Nacional, han progresado en correspondencia con el avance del conocimiento a nivel internacional.

El registro instrumental se inició a nivel mundial apenas hace 100 años. El país cuenta con dos centros de investigación y medición sismológica: en la Universidad Nacional (OVSICORI; Heredia) y en la Universidad de Costa Rica. La instrumentación es muy nueva históricamente y en Costa Rica en lo que se refiere a acelerógrafos (importantes para la ingeniería sísmica) data de la década del 70 y 80. Actualmente el mencionado LIS, procesa y controla la información obtenida por la red de acelerógrafos del país. Hay dos redes sismológicas y de registro instrumental de movimiento fuerte que cubren la mayor parte del territorio, lo que ha permitido un conocimiento cada vez más completo de la sismicidad del país (por ejemplo, obtener las

características focales de los eventos sísmicos).

La UCR por medio del Centro de Prevención y Mitigación de los Desastres Naturales de Centroamérica (CEPREDENAC), es actualmente la sede a partir de 1998 del "Centro Sismológico de América Central y de Alertas contra Tsunamis" (CASC). En coordinación con CEPREDENAC y los países escandinavos se instaló en el país un sistema de cómputo SUN, con sofisticados *softwares* para la detección de análisis y cálculo probabilístico de la amenaza sísmica para sitios específicos. Las redes sísmicas y acelerógrafos del LIS y de la Escuela de Geología de la UCR y Oficina de Sismología y Vulcanología del ICE, se han modernizado y actualizado. Gracias a la recopilación de datos hechos por las redes del LIS y el ICE, Costa Rica es uno de los pocos países de América Latina que cuenta con una relación o "ley de atenuación" local [5].

El primer estudio de peligrosidad sísmica [27] que evaluó por primera vez la amenaza y riesgo sísmico del país, fue realizado como reacción al sismo de Managua de 1972, por el John Blume Earthquake Engineering Research Center de la Universidad de Stanford, California, bajo la dirección del prof. Haresh Shah, y coordinado por el ingeniero Franz Sauter F. Este estudio dio la base para la determinación del coeficiente sísmico, de los espectros y de la zonificación sísmica del país, parte de la normativa vigente.

En el período de 1990-1991 el país estuvo sujeto a una escalada sísmica que se puede resumir por los siguientes eventos [15, 39]: 25/3/90; sismo de $M_s = 7.1$ al sureste de la costa sureste de Nicoya; en abril y agosto de 1990: sismos en la zona de Puriscal, de los que 21 tuvieron magnitudes mayores que $M_b = 4.0$, los mayores el 30/6/90 de $M_b = 5.0$ y el 8/6/90 de $M_b = 5.8$. El 22/12/90 a 5 km al norte de Santiago de

Puriscal se registró un sismo de $M_b = 5.8$. El 22/12/91 se registró en el Valle de la Estrella, Limón un sismo de magnitud $M_b = 7.6$, que fue el mayor sismo registrado en todo el globo terráqueo ése año. Estos eventos incentivaron la necesidad de revisar la *zonificación sísmica* que usa el CS-86, basados ahora en una base de datos mucho más completa que la de 1997.

El gobierno de Noruega, mediante la agencia NORSAR de Oslo, ha auspiciado un programa de investigación: *Reduction of Natural Disasters in Central America* [RONDICA], que produjo una investigación sobre la amenaza sísmica de la región de Centroamérica con la colaboración de investigadores costarricenses y centroamericanos. Este estudio actualizó el estudio de amenaza sísmica de 1977 y fueron resumidos en el informe de la ing. María Laporte del ICE, en colaboración con ingenieros residentes en Noruega: *A Seismic Hazard for Costa Rica* [14]. La base de datos utilizada en el citado estudio fue ampliada respecto al estudio NORSAR anterior, mediante registros recientes de estaciones sismológicas locales y regionales contenidos en el Catálogo de Sismos Centroamericano copiado por W. Rojas et. al [30], estudio que evaluó la sismicidad general del país.

Se puede decir que durante los sismos de Cóbano y Alajuela de 1990 y el terremoto de Limón de 1991 las obras civiles como edificios y residencias, mostraron un comportamiento adecuado con un número bajo de víctimas y pérdidas económicas reducidas, comparados con el impacto en otros lugares de América Latina y el resto del mundo [38]. Esto muestra que las medidas tomadas en el diseño estructural y en el control de las construcción de obras, el mejor nivel técnico de los operarios, etc. ha sido buena. Es indudable que la existencia del Código Sísmico ha mejorado la calidad del diseño por parte de los ingenieros civiles, que la relación

indispensable con los arquitectos y la comprensión de estos sobre la necesidad de una estructuración adecuada son indispensables para un comportamiento adecuado de la estructura de la obra. También se piensa que se ha aumentado la experiencia constructiva en el país, en general hay un mejor nivel de la práctica del diseño y la construcción. Es importante sin embargo aumentar el control ingenieril de la construcción, en especial en obras de vivienda con miras a soportar con éxito amenazas de mayor envergadura. Se debe observar que en el país la responsabilidad en el control de las obras y su diseño, no todo es realizado por ingenieros civiles y menos por ingenieros estructurales, pues en esta labor también los arquitectos y "tecnólogos" tienen participación. La vasta mayoría de las tragedias por sismos son causadas por el colapso de edificios no diseñados o contruidos por ingenieros o empresas calificadas. Sistemas estructurales no "ingenierizados" probablemente constituyendo una gran factor de riesgo social y mayor será la amenaza sísmica

Actualmente el Colegio de Ingenieros Civiles mediante la *Comisión Permanente del Código Sísmico* (CPCS) se ha propuesto la preparación de una versión nueva, que pondría a la norma sísmica en acuerdo con el estado del arte. La CPCS coordinada por el Dr. Jorge Gutiérrez G., espera tener lista una nueva versión para el próximo año, la cual se ha denominado *Código Sísmico 2000*. Esta tendrá, respecto a la versión existente, cambios en las caracterización y cuantificación de la amenaza sísmica, en la metodología para la determinación del factor sísmico, en las consideración del análisis del comportamiento estructurales y en las normas y recomendaciones para el cálculo (reforzamiento y dimensionamiento) de elementos estructurales en general. Con todo ello se pretende poder ofrecerle a la comunidad profesional, una guía moderna para cumplir con sus objetivos y obligaciones.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Aaron Moya, et al. *Instrumentación para la medición de movimiento fuerte: operación, mantenimiento, y procesamiento de datos de la red SAN*, Memorias del X Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sísmica, Costa Rica, dic., 1998.
- [2]. ATC Applied Technology *A critical review of current approaches to earthquake-resistant design*, Council , National Center for Earthquake Engineering Research (NCEER) Project No. 92-4601, California , 1995.
- [3]. Comisión Permanente del Código Sísmico, *Código Sísmico de Costa Rica*, Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica, Costa Rica, 1985.
- [4]. Gutierrez G., Jorge. *Comentarios Código Sísmico de Costa Rica*, Reporte Comisión Permanente del Código Sísmico, Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica, Costa Rica, 1987.
- [5]. Climent, A. et al. (en preparación). *Microzonificación sísmica de San José, Costa Rica*, Laboratorio de Ingeniería Sísmica y Escuela Centroamericana de Geología, UCR, ICE y Comisión Nacional de Emergencias.
- [6]. Cruz Miguel A. et al. *Evaluación del potencial de daño de sismos recientes en Costa Rica*. Memorias del X Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sísmica, Costa Rica, dic., 1998.
- [7]. Fernández, M. *Proposal to establish a tsumani warning in Central America*. En Technical Report No. 11 (1-10), University of Bergen, Norway y Red Sismológica Nacional, UCR, Costa Rica., 54 p., 1998.

- [8]. González V., Cleto. Temblores, terremotos, inundaciones y erupciones volcánicas en Costa Rica, 1608-1910, Tipografía Avelino Alsina, Costa Rica, 1910.
- [9]. Havskov, J. *The Seisan Earthquake Analysis Software for Central America Observatories on the IBN PRÁCTICA SOCIAL and SUN*. Inst. Solid Earth, University of Bergen, Norway, 236 p., 1997.
- [10]. Herrera J., Rodolfo. *La práctica tecnológica*, Revista *Filosofía*, XXVII (66), 349-359, 1989, Univ. de Costa Rica.
- [11]. Herrera J., Rodolfo. *Consideraciones sobre el método*, Memoria del V Seminario sobre Ingeniería de Estructuras, CFIA y UCR, 1990.
- [12]. Herrera J., Rodolfo. *Los sistemas conceptuales de la tecnología*, Revista *Ingeniería*, 1(1): 67:78, 1991, Univ. de Costa Rica.
- [13]. Herrera J., Rodolfo. *Los sistemas tecnológicos concretos*. Revista *Ingeniería*, 2(2): 43-58, 1992, Univ. de Costa Rica.
- [14]. Herrera J., Rodolfo. *Resumen histórico sobre el origen del Código Sísmico de Costa Rica*. Revista *Ingeniería*, 2 (1):25:30, 1992, Univ. de Costa Rica.
- [15]. Herrera J., Rodolfo. *Conmemoración del 50 aniversario de la promulgación del primer código de construcción en 1841*, Revista *Ingeniería*, 2 (1): 35:40, 1992, Univ. de Costa Rica.
- [16]. Herrera J., Rodolfo. *Ingeniería: un marco conceptual*, Revista *Ingeniería*, 5(1): 39:51, 1996, Univ. de Costa Rica.
- [17]. Laporte, M., Lingholm, C., Bungum, H. y Dahle A. *A Seismic Hazard for Costa Rica*, Technical Report N0. 2-14, NORSAR, Research Council of Norway, Kjeller, Norway, julio 1994.
- [18]. Laporte, M., Sauter F., Montero W. *La amenaza sísmica en Costa Rica*. Reporte: Comisión Permanente del Código Sísmico de Costa Rica, nov. 1995.
- [19]. Protti, M., Guendel, F., McNally, K. *The geometry of the Wadati-Benioff zone under southern Central America and its tectonic significance: results from high resolution local seismographic network*. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Elsevier Science B.V., 1994.
- [20]. Machette et al. *Mapa de Fallas y pliegues cuaternarios de Costa Rica, escala 1:750.000*. Proyecto Internacional de la Litosfera sobre principales fallas activas del mundo. Cooperación entre US, Geological Survey, UCR, ICE, 1998.
- [21]. Memorias I, II, III, IV, V, VI Seminario de Ingeniería Estructural, Costa Rica.
- [22]. Miyamura, S. *Sismicidad en Costa Rica*. Editorial UCR, 1980.
- [23]. Montero W. *Sismicidad histórica de Costa Rica*, Geofísica Internacional Vol. 28-3, pp. 531-559, 1989.
- [24]. Montero W. y Morales, Luis Diego. *Sismotectónica y niveles de actividad de microtemblores en el suroeste del Valle Central, Costa Rica*, Memoria II Seminario de Ingeniería Estructural, Costa Rica, 1983.
- [25]. Morales, Luis Diego. *Daños causados por el terremoto de Limón: pérdidas y medidas de mitigación*. Revista Geológica de América Centryal, Vol. Especial, abril, 1994.
- [26]. Morales, Luis Diego, et al. *Recurrencia de temblores y evolución del peligro sísmico del noroeste del Valle Central*,

- Costa Rica, Memoria IV Seminario de Ingeniería Estructural, Costa Rica 1986.
- [27]. Mortgat, Ch., Zsutty, Th., Shah, H.C., Lubetkin, L. *A study of seismic risk for Costa Rica*, Report No 25, John Blume Earthquake Engineering Research Center de la Universidad de Stanford, University of California, abril 1977.
- [28]. Obregón, Clotilde María. *Carrillo al conmemorarse los 150 años de haber dictado las instrucciones sobre construcción de edificios*, Revista Ingeniería, 2 (1): 31:34, 1992, Univ. de Costa Rica, 1992.
- [29]. Ramírez, R. Santana, G, Chacón, O. *Mapa de amplificación sísmica del valle central*. Laboratorio de Ingeniería Sísmica, UCR, 1994.
- [30]. Rojas, W., et al. *A Catalog of Historical and Recent Earthquakes in Central America*. Technical Report No. 2-7, NORSAR, Research Council of Norway, Kjeller, Norway, 1993.
- [31]. Rojas, W., et al. *Amenaza sísmica de América Central. Informe final*, CEPREDENAC, 79 p., Costa Rica, 1997.
- [32]. Rojas, W., et al. *Seismic Hazard Analysis for the Metropolitan Area of the Central Valley Costa Rica*. En Technical Report NORSAR, Po Box 51, N-2007 Kjeller, Norway, 58 p., 1998.
- [33]. Santana G., Terán-Gilmore A. *Damage potential of earthquake motions recorded in southern Central America*, Rev. Ingeniería 4(2): 75-88, Univ. de Costa Rica, 1994.
- [34]. Schmidt Victor, et al. *Costa Rica Spectral Strong Motion Attenuation*, Technical Report, Laboratorio de Ingeniería Sísmica UCR, 45 p., 1997.
- [35]. Sauter, Franz. Fundamentos de Ingeniería Sísmica I. Introducción a la Sismología, Edit. Tecnológica de Costa Rica, Instituto Tecnológico de Costa Rica, 1989.
- [36]. Sauter, Franz. *Enfoque crítico de los códigos sísmicos vigentes*, V Seminario de Ingeniería Estructural, Costa Rica, 1990.
- [37]. Sauter, Franz. *El entorno tectónico y la amenaza sísmica en Costa Rica*, XI World Congress on Earthquake Engineering, Acapulco, México, junio 1996.
- [38]. Sauter, Franz. *Preventive Measures for seismic mitigation in Costa Rica*, 49 ERI Annual Meeting 97, Texas, February 1997, Earthquake Engineering Research Institute.
- [39]. Sauter, F., Laporte M., Santana G. *La zonificación sísmica de Costa Rica y el coeficiente sísmico*, Reporte Comité de Demanda Sísmica, Comisión Permanente del Código Sísmico, 1999.
- [40]. Structural Engineers Association of California (SEAOC) *Vision 2000* report, 1995.
- [41]. Vargas M, William y Santana Guillermo. *El sismo de Cóbano del 25 de marzo de 1990 y la zonificación sísmica vigente*, V Seminario de Ingeniería Estructural, Costa Rica, 1990.