

Homenaje a
Rodrigo Flores Álvarez
AUCH, 5ª serie, N° 21 (1989): 325-336

COMENTARIOS SOBRE INGENIERÍA ASÍSMICA

EDUARDO KAUSEL*

"...y aconteció que cuando cesó de hablar todas estas palabras, se abrió la tierra que estaba debajo de ellos. Abrió la tierra su boca, y los tragó a ellos, a sus cosas, a todos los hombres de Coré, y a todos sus bienes".

[Núm 16: 31-32]

INTRODUCCIÓN

A partir de mediados del siglo veinte, la ciencia de la ingeniería asísmica progresó a grandes pasos como resultado de haberse dedicado ingentes esfuerzos en comprender el origen, la naturaleza y las características de los movimientos telúricos, como así también el comportamiento dinámico de las estructuras. No es, pues, sorprendente que hoy en día la consideración de los efectos de terremotos y otras cargas dinámicas en el análisis y diseño de las estructuras sea cosa rutinaria. Al mismo tiempo, el advenimiento en la última década de poderosas microcomputadoras ha hecho posible el desarrollo e implementación de elaborados programas para la evaluación del comportamiento sísmico de sistemas complejos. Si bien

*Professor of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Room 1-271, Cambridge, Massachusetts.

tales programas permiten en el presente cálculos otrora imposibles, al mismo tiempo han abierto las puertas al diseño sísmico a personas carentes de una preparación adecuada en este arte, con los consecuentes riesgos que esto implica. En buenas cuentas, la disponibilidad de estos programas ha llevado a lo que podría llamarse la *democratización* de la ingeniería: ya no parece necesario invertir altas sumas en especialistas y consultores. Debe recordarse, sin embargo, que las técnicas de análisis y diseño de actualidad, como así también los modelos estructurales comúnmente usados, están basados en abstracciones y simplificaciones de la naturaleza; por consiguiente, es necesario entender la base teórica de los programas usados para poder comprender los resultados arrojados. Estas ideas nos llevan entonces a comentar en líneas generales ciertos aspectos de la ingeniería sísmica. Dada la extensión del tema, no es posible cubrir todos los ángulos, y ciertamente no en detalle; la intención en este trabajo es tan sólo presentar una discusión somera de algunos aspectos generales.

MEDIDAS DE INTENSIDAD SÍSMICA

La severidad de un sismo sobre estructuras existentes depende de muchos factores que no pueden caracterizarse adecuadamente con sólo un parámetro. Sin embargo, la necesidad de establecer criterios de diseño que sean simples de aplicar y que resulten en niveles de seguridad satisfactorios, ha motivado la costumbre de especificar el sismo de diseño en términos de un solo número, y que comúnmente es la aceleración máxima del suelo. En situaciones que requieran de una descripción más elaborada, es posible especificar también otros valores, tales como la velocidad y desplazamiento máximos, la duración del movimiento intenso, o incluso el contenido de frecuencias en términos de espectros de respuesta o espectros de potencia.

La aceleración máxima del suelo puede estimarse por medio de un estudio de riesgo sísmico específico a la zona en que va a erigirse la estructura, o como es más frecuente, directamente de mapas sísmicos correspondientes a períodos de retorno apropiados, y que se encuentran en las normas de diseño sísmico.

Los estudios de riesgo sísmico están basados en la identificación de las fallas activas, o potencialmente activas, y las zonas de actividad tectónica en un radio de quizás una centena de kilómetros alrededor del sitio de interés. Estudios de la geología y sismología del lugar, que incluyan descripciones de la historia sísmica de la provincia, son además utilizados para establecer relaciones estadísticas entre la frecuencia y la magnitud de los sismos del lugar. Una de las relaciones empíricas de magnitud-

frecuencia más conocidas y comúnmente usadas es la ecuación de Gutenberg-Richter. Esta fórmula da resultados satisfactorios en el rango de magnitudes de interés en ingeniería sísmica ($M = 5-8$), pero tiende a exagerar la frecuencia de los eventos cataclísmicos ($M > 8$), como así también la de los movimientos muy ligeros (por ejemplo, puede demostrarse que esta relación implica una liberación de energía por unidad de tiempo que es infinita, incluso si se la trunca a una magnitud máxima arbitraria). Habiéndose establecido la frecuencia de los sismos en las regiones epicentrales, se procede luego a combinar esta información con relaciones empíricas de atenuación, que expresan la intensidad sísmica en el lugar en función de las distancias epicentrales. El resultado final de este estudio es, entonces, una relación estadística para el período de retorno (o su inverso, la frecuencia) de sismos que exceden una intensidad mínima dada.

La aceleración máxima es normalmente el punto de anclaje para descripciones más elaboradas del movimiento sísmico. Por ejemplo, el área bajo el espectro de potencia (el cual, búrdamente hablando, es el valor absoluto del espectro de Fourier) es igual al valor cuadrático medio del acelerograma, que a su vez está fuertemente relacionado con la aceleración máxima. En consecuencia, en modelos estocásticos más refinados, es posible controlar la aceleración en forma indirecta, a través de ajustes a las amplitudes espectrales. Los espectros de potencia, como así también los espectros de respuesta (que proveen para un sismo dado la respuesta máxima de un sistema de un grado de libertad con frecuencia y amortiguamiento dados), son el punto de partida de las técnicas para la generación de acelerogramas sintéticos, es decir, de registros sísmicos artificiales.

MOVIMIENTOS DEL TERRENO

El movimiento que experimenta el suelo en la vecindad de la estructura es el resultado de una serie de mecanismos que actúan concurrentemente sobre la señal sísmica. Algunos de estos mecanismos son inherentemente aleatorios, mientras que otros pueden estudiarse en forma satisfactoria con modelos matemáticos determinísticos.

Aún antes de proceder con la excavación del suelo y construcción de la estructura, es decir en el terreno libre, existen muchas fuentes de incertidumbre que afectan la estimación de las características del movimiento del suelo. Las más importantes de estas características son: la amplitud efectiva, el contenido de frecuencias, la duración, el contenido de ondas (ondas de cuerpo y/o superficiales), la correlación entre las

componentes horizontales y la vertical del sismo, y la coherencia espacial a escala pequeña. Estas características dependen de factores globales diversos, tales como la magnitud del sismo, la distancia epicentral, las leyes de atenuación, y la geología de la región, como así también de factores locales tales como las propiedades mecánicas del suelo en la vecindad de la fundación cuando se le somete a cargas dinámicas o cíclicas, la estratigrafía, y la presencia de otras estructuras.

En ciertos casos es importante considerar también el hecho que las estructuras no son objetos puntuales sin dimensión, sino que están enterradas parcialmente y tienen frecuentemente dimensiones físicas comparables con las longitudes de las ondas que inciden en ellas. Así se explica entonces que aún estructuras con perfecta simetría cilíndrica puedan ser sujetas a movimientos torsionales, causados por el tránsito de las ondas. Una práctica prudente es, pues, incluir una componente torsional en el sismo de diseño, que puede determinarse en función de la geometría de la fundación, y las propiedades del suelo.

Las consideraciones anteriores sugieren que, en general, no es suficiente especificar sólo la variación en tiempo del sismo en un punto. En aquellos casos en que se requieren investigaciones dinámicas más detalladas (represas y embalses, plantas nucleares, etc.) es necesario especificar también el mecanismo de propagación del sismo, y el contenido de ondas.

En el caso de plantas nucleares, que son las estructuras analizadas con las técnicas de mayor sofisticación, es práctica corriente modelar el suelo con estratos paralelos horizontales, y suponer que los movimientos en el terreno libre son simplemente el resultado de trenes de ondas que se propagan verticalmente. Una consecuencia inmediata de este modelo es la reducción en las amplitudes espectrales a puntos bajo la superficie —por ejemplo, el nivel de la fundación— que se observa a las frecuencias naturales de la columna de suelo que se eleva por sobre el nivel examinado. Como se juzga que estas reducciones son artificiales, ya que resultan del modelo de propagación usado, y no de requerimientos físicos del sistema, no es raro que se establezcan límites a las reducciones de los espectros de respuesta con la profundidad. Puede demostrarse, sin embargo, que esta selectividad y supresión de energía a ciertas frecuencias se observa también en otros tipos de ondas, aún cuando las frecuencias a que ello ocurre sean ligeramente distintas. El problema no se deriva, entonces, del uso de ondas de cuerpo propagándose verticalmente, sino del uso de un mecanismo de propagación único con perfecta coherencia espacial.

Un tema íntimamente relacionado con el anterior es el de la amplificación de movimientos sísmicos en estratos blandos de suelo. Este es un

fenómeno importante que no puede descartarse, particularmente, en el caso de edificación en altura sobre sedimentos blandos.

Debe notarse que el movimiento efectivo del suelo bajo la fundación depende no sólo de los factores anteriormente citados, sino que puede ser afectado por las propiedades inelásticas del suelo en las inmediaciones de la fundación y la posible separación de las paredes de ésta con el relleno. En el caso de estructuras macizas o de grandes dimensiones, es posible también que se observen fenómenos de interacción dinámica entre la estructura y el suelo. Una posibilidad que debe considerarse en tales casos es la representación del suelo por muelles y amortiguadores (impedancias), los que pueden obtenerse de la literatura técnica. Si la estructura tiene considerable enterramiento, es necesario considerar además el efecto de éste no sólo en el valor de las impedancias, sino que también en el movimiento basal efectivo.

MODELOS ESTRUCTURALES

Puede afirmarse con bastante certeza que prácticamente todos los modelos matemáticos empleados hoy en día para analizar y diseñar estructuras reales son lineales y determinísticos. Los modelos no-lineales que se debaten en seminarios y conferencias tienen fundamentalmente valor académico y científico, y carecen de utilidad práctica inmediata para el ingeniero diseñador. El refinamiento de los modelos lineales abarca desde los simples modelos estáticos recomendados en las normas, hasta complejos modelos dinámicos tridimensionales de marcos, celosías, o elementos finitos. La experiencia demuestra, sin embargo, que durante un sismo fuerte las estructuras entran casi invariablemente en un régimen inelástico. Por otra parte, estudios de simulación efectuados con modelos matemáticos indican que los desplazamientos máximos de la estructura no dependen significativamente del comportamiento inelástico. En consecuencia, es posible estimar la respuesta inelástica con los resultados de un análisis elástico por medio de factores de ductilidad, definidos como la razón entre los desplazamientos máximos, y aquellos correspondientes al límite elástico. Habiéndose realizado esta estimación, es posible diseñar la estructura para las fuerzas y deformaciones resultantes de manera tal que su integridad física durante un sismo no se vea afectada. Esto requiere a su vez que el ingeniero provea detalles estructurales que garanticen, por una parte, suficiente ductilidad y capacidad de disipación de energía, pero sin comprometer, por otra, la seguridad de los elementos soportantes principales (columnas y muros). Esta técnica, conocida por el nombre de *método del factor de ductilidad*, parece dar resultados aceptables para

estructuras convencionales. Sin embargo, debe observarse cautela en su uso para estructuras especiales, tales como plataformas marinas, ya que el comportamiento de éstas en el régimen inelástico puede ser diferente del comportamiento de los edificios en altura. Aún más, el método requiere de estructuras con suficientes elementos redundantes, lo que no sucede en el caso de estructuras estáticamente determinadas.

El análisis sísmico de una estructura requiere abstraer las propiedades esenciales de ésta en un modelo discreto compuesto de elementos ideales (vigas y columnas perfectas, nudos sin dimensión, diafragmas rígidos, etc.). Este modelo se describe en términos de tres características: la masa, la rigidez, y el amortiguamiento.

La primera de estas características, es decir, la masa, puede determinarse con relativa exactitud, aún cuando las cargas de servicio no sean perfectamente conocidas.

La rigidez, por otra parte, es bastante más incierta, ya que muchos factores influyen en su valor: los elementos arquitectónicos; las uniones y juntas; el arreglo de las armaduras; la variabilidad de las dimensiones de los elementos construidos; la calidad del hormigón; etc. No es sorprendente entonces que puedan observarse discrepancias importantes entre los períodos calculados para los edificios, y los períodos medidos instrumentalmente.

Aún mayor incertidumbre existe en la estimación del amortiguamiento, ya que ciertamente las estructuras reales no tienen amortiguadores de ninguna clase. La disipación de energía que se observa durante la vibración de una estructura resulta de pérdidas por fricción interna e histéresis. Estas pérdidas típicamente aumentan con las deformaciones máximas, pero son relativamente independientes de la velocidad de deformación (es decir, de la frecuencia). Por consiguiente, la representación de los elementos disipativos a través de amortiguadores viscosos no es, en general, satisfactoria. A lo sumo es posible determinar empíricamente las razones de amortiguamiento globales de las estructuras con ayuda de ensayos dinámicos, o infiriéndolas de registros sísmicos obtenidos de sismógrafos montados en estructuras del mismo tipo de la que está siendo analizada.

ANÁLISIS DINÁMICO

Si el análisis dinámico se realiza por medio de la descomposición modal de la estructura (ya sea en tiempo, o con espectros de respuesta), es posible prescribir razones de amortiguamiento crítico en forma individual para cada modo, sin necesidad de distinguir entre amortiguamiento viscoso e

histerético. En cambio, si las ecuaciones diferenciales se integran directamente en tiempo, es necesario entonces establecer matrices de amortiguamiento viscoso que simulen de alguna manera las características histeréticas de las estructuras reales. Uno de los métodos más usados, pero no necesariamente más satisfactorio, es conocido por el nombre de *amortiguamiento de Rayleigh*. Se basa éste en formar la matriz de amortiguamiento como combinación lineal de las matrices de masa y rigidez. Aún cuando pueden ajustarse así las razones de amortiguamiento para dos frecuencias arbitrarias, el amortiguamiento dentro y fuera del intervalo definido por estas frecuencias puede ser mucho menor o mayor, respectivamente, del que se desea lograr. Un procedimiento que puede usarse para evitar esta dificultad consiste en realizar la transformación modal inversa con la matriz de amortiguamiento crítico, pero esto requiere calcular todos los modos del sistema; no sólo los modos superiores pueden no tener importancia en la respuesta dinámica, sino que la integración en tiempo pierde atractivo una vez que todos los modos son conocidos —a menos que se intente un análisis no-lineal. Todos estos problemas se evitan en una solución en el dominio de frecuencias, la que permite fácil representación de cualquier tipo de amortiguamiento lineal, y en particular, de amortiguamiento histerético.

Hay dificultades más sutiles, pero no menos importantes, que se presentan en ciertos métodos comúnmente usados para estudiar problemas de interacción suelo-estructura. Tales dificultades pueden ocurrir cuando el análisis dinámico se hace en dos etapas con modelos estructurales inconsistentes: en la primera etapa, el sistema suelo-estructura se idealiza en dos dimensiones con elementos finitos, y se le da a la estructura tan sólo detalles someros; este modelo se utiliza para establecer el movimiento de traslación y rotación en la base de la estructura. Luego, en una segunda etapa se modela la estructura en sus tres dimensiones con gran detalle y se la somete, en la base, a los movimientos encontrados anteriormente. Esta estrategia no es satisfactoria, y la razón se encuentra en el hecho que los movimientos en la base de la estructura no son sólo funciones de la elasticidad del suelo, de la geometría de la fundación y de la inercia de la estructura, sino que también de las frecuencias naturales de ésta y de los correspondientes amortiguamientos modales. Un análisis matemático detallado demuestra que las funciones de transferencia para los movimientos de la fundación carecen de energía (es decir, tienen valor nulo) a las frecuencias naturales de la estructura sobre base rígida: al cambiarse la estructura en la segunda etapa, se cambian sus frecuencias naturales, lo que suele acarrear grandes distorsiones en la respuesta dinámica de ésta.

Una consideración importante en un análisis modal con espectros de respuesta es el fenómeno de los modos con poca separación de frecuencias. Existe tendencia entonces a que las respuestas máximas correspondientes a modos contiguos ocurran casi simultáneamente, ya que las respuestas modales están casi en fase. Fórmulas propuestas por Newmark y Rosenblueth (como así también otras más recientes) pueden utilizarse en estos casos para combinar las contribuciones modales en forma apropiada. Este fenómeno tiene también consecuencias importantes en el diseño de edificios, ya que implica que deben eludirse aquellas formas que resulten en frecuencias de translación y torsión parecidas. Como quiera que sea imposible diseñar estructuras perfectamente simétricas con respecto a sus planos principales, existe la posibilidad que la respuesta en translación excite al modo torsional, y esto debe evitarse en la medida posible.

Ocurre frecuentemente que no todos los grados de libertad del sistema tienen asociada una masa, como sucede cuando se analizan las traslaciones horizontales, y se desprecian las inercias verticales y rotacionales. En relación a esto abundan en la literatura técnica los trabajos que recomiendan para estos casos una condensación estática de los grados de libertad dependiente; se argumenta que así puede reducirse drásticamente el número de ecuaciones del sistema. Si bien este argumento es correcto, debe considerarse también que la matriz de rigidez así obtenida estará completamente poblada, mientras que la matriz de rigidez del sistema original es probablemente de banda estrecha. Es probable entonces que sea más eficiente considerar todos los grados de libertad del sistema original que el sistema condensado, siempre que el algoritmo de integración —o de la solución del problema de valores característicos— pueda considerar elementos nulos en la matriz de masas (frecuencias infinitas).

MÉTODOS NUMÉRICOS

Los algoritmos de integración pueden clasificarse en dos grupos: 1) Métodos basados en aproximaciones físicas del sistema, y 2) Métodos basados en aproximaciones matemáticas.

En el primer grupo pueden distinguirse dos subgrupos, dependiendo si las aproximaciones se ejercen sobre las funciones de excitación o sobre la respuesta. Ejemplo del primer subgrupo es el *método de aceleración lineal*, en el cual la excitación sísmica se supone que varía linealmente entre pasos, mientras que la respuesta dinámica en un paso dado se obtiene en forma cerrada. En el segundo subgrupo, cabe citar los métodos β de

Newmark, θ de Wilson, y el de Houbolt; en estos tres últimos se hacen suposiciones diversas con respecto a como varía la respuesta entre los pasos de integración. Algunos de estos métodos pueden aplicarse sólo a sistemas lineales elásticos, mientras que otros pueden emplearse también para sistemas inelásticos.

En el segundo grupo se encuentran los métodos de etapas múltiples (multistep methods) y los métodos de Runge-Kutta. Entre los métodos de etapas múltiples se incluye la familia de los métodos de *diferencias finitas*, los métodos de *integración numérica* (Simpson, etc.), y combinaciones de ambos.

Dependiendo del método, de sus parámetros, y del sistema de ecuaciones a resolver, la integración puede ser *explícita* o *implícita*. En el primer caso, la solución para el paso siguiente es sólo función de variables conocidas y pueden, por lo tanto, determinarse directamente. En cambio, en los esquemas implícitos, es necesario iterar a cada paso, ya que la solución en un tiempo dado no sólo depende de los pasos anteriores, sino que además de sí misma.

Los métodos de integración pueden ser *inestable* (es decir, inútiles), *condicionalmente* estables e *incondicionalmente* estables. En el segundo caso, la solución se deteriora a medida que avanza la integración si los incrementos de tiempo exceden de un cierto límite; en cambio, en el último caso esto no sucede. No obstante, debe observarse que la estabilidad de una solución no es garantía de la exactitud de ella, ya que pueden producirse distorsiones tales como la elongación de los períodos y el amortiguamiento espúreo. Otro factor que debe considerarse en la selección de un método es el hecho que el algoritmo puede ser incondicionalmente estable cuando se le usa en un esquema explícito, pero puede pasar a ser condicionalmente estable cuando la formulación es implícita. Finalmente, debe tenerse en cuenta que las demostraciones matemáticas de estabilidad y convergencia se realizan sólo para sistemas de un solo grado de libertad. En el caso de sistemas de muchos grados de libertad, se argumenta que las demostraciones de estabilidad y convergencia son válidas para cada uno de las ecuaciones modales de éstos, y por lo tanto, para el sistema original de ecuaciones. Lamentablemente, tal demostración no es completa, ya que puede suceder que las ecuaciones no puedan desacoplarse por medio de transformación modal. Por otra parte, en el caso de sistemas no-lineales, se ha dicho que el sistema de ecuaciones es lineal en cada paso (aún cuando cambien de paso en paso), y que la rigidez mayor (típicamente la rigidez inicial) es la que controla la estabilidad. Este es realmente un argumento falso, que no resiste un análisis matemático detallado. En trabajos más recientes sobre este tema, se ha demostrado

que en ciertos sistemas que exhiben rigideces tangenciales negativas a partir de una cierta deformación (strain-softening) se pueden producir fenómenos caóticos; esto implica que pequeños cambios en las condiciones iniciales, o cambios en la precisión con que se realizan los cálculos, pueden cambiar drásticamente la respuesta calculada (la trayectoria en tiempo).

Muy relacionado a este tema está también el problema de la aplicación de modelos constitutivos no-lineales al estudio de la respuesta dinámica de suelos. Puede afirmarse, eso sí, que poco o nada se sabe de las propiedades matemáticas de los métodos numéricos no-lineales hoy en uso, o de la falibilidad de los mismos. Peor aún, muchos de ellos requieren de parámetros que no pueden establecerse experimentalmente ni en el terreno, ni en el laboratorio. Por consiguiente, tales modelos sólo tienen relevancia en estudios académicos, y no en la práctica de ingeniería.

En cambio, las soluciones en el *dominio de frecuencias* ofrecen muchas ventajas para el análisis de sistemas lineales, aunque pueden producirse problemas numéricos si la amortiguación es débil. Cabe agregar que los métodos de integración y de diferenciación en tiempo pueden también interpretarse como operadores (o filtros) en el dominio de frecuencias. En consecuencia, el análisis de las características de estos operadores en frecuencia permite poner al descubierto muchas de sus virtudes o desventajas.

Un hecho que debe considerarse cuando se utiliza una solución en el dominio de frecuencias es que muchas veces pueden presentarse errores que pasan desapercibidos, debido a que los cálculos no exhiben, en general, inestabilidades que sean obvias. En consecuencia, es esencial que el usuario de un programa que opera en frecuencia tenga cabal conocimiento de los principios de las transformadas de Fourier, ya que debe poder decidir racionalmente el número de puntos que deben tomarse para la transformada, la frecuencia máxima (frecuencia Nyquist), y el intervalo de frecuencia. La frecuencia máxima depende del contenido de frecuencias de la excitación, como así también de las frecuencias naturales del sistema físico, que pueden estimarse. Por otra parte, el incremento de frecuencias tiene que ser lo suficientemente pequeño para obtener no sólo una resolución adecuada de la función (o funciones) de transferencia, sino también para evitar el doblamiento (aliasing & folding) de la respuesta en tiempo. Esto puede ocurrir en sistemas de baja frecuencia rasonante y de poco amortiguamiento, en los que la respuesta transiente no decae rápido.

Un caso típico ocurre, por ejemplo, cuando se estudia la amplificación (unidimensional) de ondas en un estrato marino sobre el cual se va a

construir una plataforma petrolera. Supóngase que se utiliza para este objeto un programa formulado en el dominio de frecuencias, como es normal en esta situación. Si el suelo consiste en una arcilla saturada blanda con velocidad de onda cortante de 100 m/s, y una profundidad a la roca de 75 m, la frecuencia fundamental es $f = 100/4 \cdot 75 = 0,33$ cps. Si el suelo tiene una fracción de amortiguamiento histerético de $\beta = 5\%$, eso implica que el ancho de banda de la función de transferencia a la frecuencia fundamental es $2 \cdot 0,05 \cdot 0,33 = 0,03$ cps. Este valor implica que, para obtener una resolución adecuada de la función de transferencia, debe utilizarse un incremento de frecuencias quizás no mayor que 0,005 cps. A su vez, este incremento requiere de un período de Fourier $T = 1/0,005 = 200$ cps. Considerando que la mayoría de las veces la duración de los sismos utilizados en estos análisis no exceden de 20 segundos, es muy posible que un usuario incauto olvide agregar al final del registro una zona quieta de longitud adecuada. Si el sismo está digitizado en incrementos de 0,02 segundos, entonces el número total de puntos requerido para este caso es $N = 200/0,02 = 10.000$. Con gran probabilidad, este número es mayor que la capacidad del programa, lo que incita la tentación de cortar esquinas. Una alternativa para evitar el problema descrito es filtrar el sismo, eliminar las frecuencias superiores a un cierto límite, y luego cambiar el incremento de tiempos.

USO DE COMPUTADORAS

Con el desarrollo del computador a mediados de este siglo, y principalmente como resultado de los espectaculares avances en la capacidad de procesamiento de datos que se produjeron en los últimos quince años, hemos sido testigos del rápido desarrollo de las técnicas numéricas hoy en uso y la consiguiente expansión en la capacidad de analizar problemas complejos. Entre los ejemplos destacados de técnicas recientes que han impactado la ingeniería sísmica se encuentran: el método de elementos finitos; el método de integral de frontera; la transformada rápida de Fourier; las fronteras absorbentes (transmisoras, silenciosas o anecoicas); y los métodos matriciales para el estudio de ondas en medios estratificados.

En efecto, es común hoy en día usar programas de elementos finitos para estudiar problemas de propagación de ondas, de interacción suelo-estructura, estabilidad de taludes, y muchos otros. Esto requiere que las mallas sean elegidas con esmero para evitar errores en los modelos. Por ejemplo, es posible demostrar que en un espacio infinito, homogéneo y discreto (es decir, modelado con elementos finitos rectangulares de igua-

les propiedades y tamaño) pueden propagarse ondas que no necesariamente corresponden a modos de propagación observables en el sistema continuo correspondiente. En el caso de ondas planas, puede establecerse que existen dos ondas de cuerpo que no están, en general, polarizadas ni en la dirección de propagación, ni en el plano transversal a esta dirección, sino que en direcciones oblicuas a ella. Estas dos soluciones homogéneas a las ecuaciones discretas de onda corresponden aproximadamente a las ondas dilatacionales y cortantes; sus respectivas velocidades de propagación son función no sólo de la frecuencia de las ondas, sino que también de sus direcciones de propagación. El sistema es, entonces, dispersivo tanto en el espacio como en frecuencias. En este sentido, el sistema se comporta un tanto como un medio ortotrópico cuyos ejes principales coinciden con las líneas de la malla.

Por otra parte, se ignora aún si la geometría de la malla, la anisotropía que ella presenta, y especialmente la presencia de elementos de distinto tamaño, tienen influencia en la manera que se desarrollan regiones plásticas y se desencadenan modos de falla. Estas consideraciones pueden ser de importancia en el estudio de estabilidad de taludes, en los cuales la geometría de la malla podría dictar la dirección de deslizamiento.

En buenas cuentas, un buen programa debe incorporar verificación interna de datos para establecer la admisibilidad de éstos en relación a los algoritmos utilizados. Idealmente, mensajes de advertencia deberían ser impresos cuando el usuario intentare especificar elementos finitos demasiado elongados, rígidos, o con conectividades absurdas, etc. En la mayoría de los programas existentes, tales barreras de seguridad no existen, lo que acarrea el riesgo de que los datos de entrada no sean consistentes con los métodos usados. Tales problemas se evitan, naturalmente, si los resultados obtenidos son verificados de alguna manera, y no se les acepta con fe ciega.

Quizás como resultado del fácil acceso a poderosas computadoras y técnicas numéricas, como así también del abaratamiento de los costos de procesamiento, existe hoy una tendencia de sobreestimar el valor de los resultados obtenidos con ayuda de programas complicados, y de desechar la realidad objetiva de los problemas de ingeniería que pretenden resolverse. Se observa a veces que la solución de los problemas matemáticos se aceptan como soluciones de los problemas físicos mismos. En tales casos, las técnicas en uso pasan por amos, y no por sirvientes del buen entendimiento: los números vencen a la razón.