
LA INGENIERIA SISMO-RESISTENTE

JUAN DIEGO JARAMILLO FERNANDEZ

INTRODUCCION

Desde un punto de vista amplio se puede decir que el fin de la Ingeniería Sismo-Resistente, en combinación con muchas otras disciplinas científicas y sociales, es proteger las vidas y bienes de las personas que tienen asiento en regiones amenazadas por eventos sísmicos de alto potencial destructivo. En consecuencia, esta tarea no sólo involucra las actividades tendientes a mejorar las prácticas del diseño y la construcción de obras civiles, sino, y particularmente en estos momentos en que la cultura de la prevención se impone a la de la acción, las actividades que tienen que ver con la planeación de usos y ocupación del suelo. Cualquier acción dirigida al objetivo señalado puede clasificarse dentro de uno de los dos grandes grupos de actividades en que se dividen los quehaceres de la Ingeniería Sismo-Resistente: **caracterización del fenómeno sísmico y comportamiento estructural ante eventos sísmicos**. A continuación, se definen los objetivos de cada una de estas dos grandes áreas, las acciones que hoy se ejecutan para cumplirlos, las que en un futuro probablemente se emprenderán, y finalmente, la forma que toman los resultados de las investigaciones para que formen parte de los Códigos de Construcción y de la práctica diaria del diseño y construcción de obras civiles.

1. CARACTERIZACION DEL FENOMENO SISMICO

A la hora de enfrentar cualquier diseño, es obligatorio responder a la pregunta: ¿para qué cargas se debe diseñar?; ¿para resistir qué?. Un Ingeniero con conocimientos en el comportamiento de sistemas ante cargas dinámicas, enunciaría la pregunta anterior de la siguiente forma: ¿Cuál es la función de desplazamiento del suelo?; en una gráfica de desplazamiento del suelo vs tiempo ¿cómo se representaría el movimiento ocasionado por el temblor?, porque si conozco esa información, dice el Ingeniero, estoy en condiciones de cuantificar los niveles de esfuerzo y deformación de cada una de las partes de la estructura, y sabiendo lo anterior, predecir qué secciones del edificio se agrietarán, sufrirán algún daño, etc. Pero mucho mejor que poder predecir los daños, agrega el Ingeniero, es evitarlos, porque si conozco con anterioridad la carga a que va a estar sometida la estructura, puedo diseñarla y construirla de tal forma que no sufra ningún daño cuando se presente el evento sísmico. La seguridad con la que habla nuestro ingeniero

JUAN DIEGO JARAMILLO FERNANDEZ. Profesor, Universidad EAFIT, Depto. de Ingeniería Civil.

no es completamente sincera; sabe que cuenta con cierto grado de incertidumbre en la predicción de la respuesta de la estructura, aún conociendo la carga a la que va a estar expuesta, pero que puede llevarlo a niveles razonablemente bajos si cuida ciertos detalles en los procesos de diseño y construcción.

El primero de los problemas con que se encuentra el Ingeniero es que no sabe las cargas de diseño. La función por la que él pregunta no se conoce, y como se ve el panorama, tardará muchísimos años en esclarecer completamente el problema. No hay alternativa: Es necesario diseñar a las estructuras para resistir unas fuerzas que creemos semejan las solicitaciones sísmicas a las cuales va a estar sometida durante su vida útil.

El primero de los problemas con que se encuentra el Ingeniero es que no sabe las cargas de diseño. La función por la que él pregunta no se conoce, y como se ve el panorama, tardará muchísimos años en esclarecerse completamente el problema. Por lo pronto no hay alternativa: Es necesario diseñar a las estructuras para resistir unas fuerzas que creemos semejan las solicitaciones sísmicas a las cuales va a estar sometida durante su vida útil. No se trata, tampoco, de diseñarlas para cargas que nunca se van a alcanzar; la Ingeniería es un problema de optimización de recursos, y a cada estructura se le debe dar la resistencia suficiente para que, dentro de niveles aceptables de riesgo, cumpla la función para la cual fue proyectada. Aún si quisiéramos diseñarla para la carga máxima nos veríamos en serias dificultades: ¿Acaso el temblor más grande registrado en un sitio es el máximo que se puede presentar? Asociados a una carga de diseño hay un riesgo y una inversión de recursos durante la vida de la obra. El riesgo se mide como la probabilidad de que la carga de diseño pueda ser excedida durante la vida de la

obra. Los recursos están formados de dos partes: La inversión inicial y la inversión por pérdidas debidas a daños por sismos. Mientras la primera parte, la inversión inicial, aumenta con el incremento de las cargas de diseño, la segunda disminuye: se espera que las pérdidas por sismos rebajen puesto que está diseñada con cargas más altas. Lo contrario ocurre si diseñamos para cargas muy bajas; la inversión inicial es baja pero las pérdidas por sismo debemos esperar que se incrementen. La carga de diseño de una estructura, debido a la incertidumbre inherente al fenómeno involucrado y a la debida a nuestro desconocimiento del mismo, es un problema de decisiones bajo condiciones de incertidumbre, y los dos elementos que sirven de base para tomar la decisión sobre las cargas de diseño son: El nivel de riesgo aceptable y el valor presente de las inversiones necesarias. Para estimar estos dos elementos es necesario modelar probabilísticamente el fenómeno. A continuación, se describirán algunas de las herramientas que se utilizan para cuantificar las acciones sísmicas en un sitio.

CATALOGOS SISMICOS

Uno de los elementos con que se cuenta para estimar las cargas sísmicas son los catálogos sísmicos, cuyo contenido básico son, la fecha, posición geográfica y magnitud (una medida de la energía liberada) de los eventos ocurridos en una región. Estos catálogos, junto con información geológica de la zona, permiten determinar las posibles fuentes sismogénicas de una región, porque los temblores no se generan aleatoriamente sobre la superficie terrestre; si se grafican sobre un mapa los sitios donde han ocurrido sismos, se hará evidente la preferencia de estos fenómenos por ciertas zonas de la corteza terrestre: Japón, Chile, Perú, Ecuador, Colombia, Costa Rica, Nicaragua, México, etc. En una escala más reducida, por ejemplo en el Territorio Nacional, es posible identificar las zonas de mayor actividad sísmica, y esta información complementada con la geológica, determina las posibles fuentes sismogénicas. Por otro lado, el potencial destructivo de un temblor disminuye a medida que nos alejamos del epicentro (proyección sobre la superficie terrestre de la fuente del temblor). Este fenómeno de atenuación junto con la determinación de las fuentes sísmicas permiten cuantificar, así sea comparativamente y en términos de intensidades (potencial de daño de un sismo en un sitio), las amenazas sísmicas de diferentes lugares de una región.

Pero no todas las fuentes sismogénicas se comportan de la misma forma: La frecuencia de ocurrencia de eventos y las magnitudes que se liberan son los dos parámetros que caracterizan una fuente. Ninguno de estos parámetros se puede tratar como determinista: No existe una fuente que libere temblores de la misma magnitud ni a intervalos de tiempo iguales. Ambos procesos, el de ocurrencia y el de liberación de magnitudes, se deben tratar probabilísticamente a través de una función de densidad de probabilidad conjunta del tiempo entre eventos y la magnitud liberada. Esta función, que caracteriza completamente a una fuente sísmica, se estima con base en los catálogos sísmicos y la información geológica de la zona.

REGISTROS INSTRUMENTALES

Otro de los elementos que se tiene en cuenta para estimar las cargas sísmicas son los registros instrumentales. Uno de estos es justamente el que quisiera nuestro Ingeniero para diseñar las estructuras: La función de desplazamientos del suelo vs tiempo. Infortunadamente para él, se trata del evento que acaba de ocurrir y no del que le tocará soportar a su edificio en el futuro. Pero pensar que el evento que se acaba de registrar dará información sobre los futuros que se presentarán, no está tan lejos de la realidad. Los registros instrumentales dan información de la forma como se atenúa la energía con la distancia. Si se cuenta con una red de acelerógrafos y en todos se registra el mismo evento, es posible determinar a grandes rasgos, la forma como se propaga la onda sísmica. Lo anterior nos permite predecir la intensidad que se registrará en determinado lugar si se presenta un temblor de magnitud M en la fuente X . En otras palabras, la ley de atenuación, deducida de los registros instrumentales en combinación con modelos geofísicos de propagación de ondas, transporta los temblores de las fuentes a los sitios de interés. Si se combinan todas las fuentes potencialmente dañinas para un sitio y se transportan sus acciones a través de leyes de atenuación, el resultado es un modelo de ocurrencia de intensidades en el sitio; una función que simula la ocurrencia e intensidad de los movimientos sísmicos sentidos en un lugar y que son producidos por múltiples fuentes. Con esta función y otra de respuesta estructural es posible evaluar lo que nos habíamos propuesto: El nivel de riesgo y la inversión asociados a una carga de diseño, parámetros que sirven para decidir cuál debe ser la resistencia a carga sísmica de una estructura.

EFFECTOS LOCALES

Si se tuvieran acelerógrafos instalados en todos los sitios donde se piensa construir, y cada uno contara con un gran banco de eventos registrados, se evitaría el traslado del movimiento, matemáticamente hablando, desde las fuentes hasta los sitios de construcción; el catálogo de registros instrumentales en un sitio aportaría gran parte de la información necesaria para definir ese modelo de ocurrencia de movimientos sísmicos en un lugar, y así definir la carga de diseño de las estructuras. Pero el sueño de contar con esa información no se debe precisamente al ahorro en el trabajo de hallar las cargas de diseño, se debe fundamentalmente a dos factores: Primero desaparecería toda la incertidumbre asociada al proceso de transporte del movimiento entre la fuente y el sitio, justamente la parte del modelo que más incertidumbre aporta, y segundo, automáticamente se estaría teniendo en cuenta un elemento no mencionado, pero que cada vez cobra más importancia en el proceso de estimación de los movimientos sísmicos sentidos en un sitio: Los efectos locales. Se refiere con este nombre al conjunto de modificaciones que inducen en el movimiento del suelo las características mecánicas del terreno y la configuración topográfica local. Estas modificaciones son, fundamentalmente, cambios en los contenidos de frecuencia del movimiento; atenuando las amplitudes en ciertas frecuencias y amplificándolas en otras. En algunas localidades con suelos blandos y configuraciones topográficas especiales como valles muy cerrados, son los efectos locales los que determinan finalmente las características del movimiento.

La carga de diseño de una estructura, debido a la incertidumbre inherente al fenómeno involucrado y nuestro desconocimiento del mismo, es un problema de decisiones bajo condiciones de incertidumbre, y los dos elementos que sirven de base para tomar la decisión son: El nivel de riesgo aceptable y el valor presente de las inversiones necesarias.

CARGA DE DISEÑO OPTIMA

Como se puede apreciar, son múltiples y muy inciertos los factores que determinan la carga sísmica de diseño de una estructura. Para redondear la idea, se repetirán en un orden que no necesariamente se debe llevar en el cálculo, pero que está ligado a la secuencia de ocurrencia del fenómeno. El primer elemento es la caracterización de las fuentes sismogénicas: Modelación de los procesos de ocurrencia y liberación de energía de cada una de las fuentes. La segunda componente es la estimación de las leyes de atenuación: Descripción de la forma como se propaga la energía a través de la corteza terrestre. En tercer lugar, la estimación de los efectos locales: Modificaciones que introducen en el movimiento las características mecánicas del suelo y la topografía local. Estos tres primeros elementos conforman lo que se denomina la estimación de la **amenaza sísmica** del lugar. A continuación es necesario involucrar la respuesta estructural en el modelo: No es suficiente decir: se va a diseñar para un movimiento que tiene una probabilidad de excedencia de 10% en 50 años, que es la vida útil de la estructura. No se conoce con tanta precisión la respuesta estructural a un movimiento sísmico como para pensar que si presenta un movimiento que exceda el de diseño la estructura se desploma y si no lo excede, no le pasa nada. En realidad lo que se puede asegurar, y eso mientras se respeten ciertos lineamientos en el proyecto estructural, es que para movimientos que tengan características parecidas al de diseño, la estructura sufra cierto porcentaje de daños. El costo de estos daños comparado con la inversión inicial para evitarlos podría modificar el nivel de riesgo acordado y llevarnos a aceptar otros niveles de riesgo. La definición de la carga sísmica de diseño no es un problema que tiene que ver exclusivamente con la amenaza sísmica, tiene que ver también con la disponibilidad de recursos.

EL CODIGO COLOMBIANO

El Código Colombiano de Construcciones Sismo-Resistentes especifica la carga de diseño sísmico por medio del espectro de diseño, que es una manera práctica y muy simple de expresar cargas dinámicas (funciones del tiempo). La forma y amplitudes de este espectro varían según la zona del país donde se piensa construir: En los sitios cercanos a las fuentes sismogénicas, donde se espera se presenten movimientos muy fuertes, las cargas sísmicas de diseño son más altas que en sitios más alejados. Una vez se selecciona el espectro que le

corresponde a un lugar geográfico, se modifican su forma y amplitud para tener en cuenta las características del suelo local: Para suelos blandos las amplitudes se incrementan y los contenidos de frecuencia se mueven hacia los periódicos altos; característicos de estos suelos. Finalmente, dependiendo de la importancia de la estructura, las amplitudes del espectro se vuelven a modificar, "para aquellas edificaciones que son indispensables después de un temblor para atender la emergencia y preservar la salud y la seguridad de las personas" los valores del espectro se incrementan en 20%. Como se puede apreciar, así sea de una manera muy simple, a través de coeficientes y multiplicadores, el Código Colombiano refleja la filosofía del diseño sismo-resistente lo que hasta el momento de su divulgación se conocía del fenómeno sísmico en Colombia. Actualmente el Código está siendo revisado para tener en cuenta nueva información, nuevos adelantos tecnológicos, y también, para revisar y modificar si es el caso, los criterios que sirvieron de base para fijar los parámetros que allí se presentan.

¿QUE HACER?

ALA PREGUNTA: ¿Qué se debe hacer para mejorar el conocimiento del fenómeno sísmico en Colombia, y por ende su respuesta?, me uno a las voces de las personas que se desempeñan en estas labores, y que desde hace mucho tiempo están pidiendo más atención del gobierno para destinar recursos a la investigación y a la formación de personal que se dedique a esta tarea. El problema sísmico colombiano, como su nombre lo dice, es colombiano y no se resuelve importando recetas y códigos de otras latitudes.

2. COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

El problema del diseño sismo-resistente no se resuelve especificando correctamente la carga de diseño sísmico, es más, suponiendo que el espectro de diseño es el correcto, que el análisis estructura y el diseño de cada elemento fueron realizados con las técnicas y herramientas que hoy conocemos, el comportamiento del sistema ante un sismo puede llegar a ser completamente indeseable. Un temblor localiza e identifica cualquier defecto, por pequeño que sea, en una construcción. Buena parte del éxito de un proyecto estructural se asegura en la concepción misma de la obra: Un proyecto en el que la transmisión de cargas entre los elementos sea clara, simple y expedita, en donde la función de todos y cada uno de los elementos que la componen esté

perfectamente definida, un sistema en el que por su sencillez, los resultados del análisis, cualitativamente hablando, puedan preverse, será una obra muy probablemente exitosa. La experiencia obtenida del comportamiento de edificios ante temblores, señala ciertos sistemas estructurales como eficientes y a otros como inadecuados. Hacer caso omiso de estas enseñanzas puede resultar sumamente costoso. Pensar que los adelantos tecnológicos en el área de la computación y en los métodos de análisis permiten darle solución estructural a cualquier proyector arquitectónico, es poner en serio peligro la estabilidad de una obra. Aunque se ha avanzado bastante en la comprensión de los sistemas estructurales, hay todavía muchos detalles que se escapan de nuestro control y entendimiento.

El problema sísmico colombiano, como su nombre lo dice, es colombiano y no se resuelve importando recetas y códigos de otras latitudes.

DISIPACION DE ENERGIA POR COMPORTAMIENTO INELASTICO

En la década de los sesentas, producto de observar el comportamiento de algunos edificios ante sollicitaciones sísmicas, se extendió y se llevó a la práctica la idea de utilizar la ductilidad (capacidad de alcanzar grandes deformaciones bajo esfuerzo constante) de algunos materiales de construcción, el acero por ejemplo, en la disipación de la energía que le induce un temblor a un edificio. Esta grandiosa idea, en términos de parámetros de diseño, significaba reducir la resistencia de la estructura y confiar el faltante a la disipación de energía por comportamiento inelástico. La idea era maravillosa: Se reducían los costos de construcción simplemente utilizando unas propiedades del material que siempre habían estado ahí y estábamos desperdiçando. El abuso de la medicina no se hizo esperar: Se dieron casos de reducción de la resistencia del orden de 15 veces, y peor aún, se le decretaron propiedades de ductilidad a materiales que no las tenían, el concreto reforzado por ejemplo, para justificar reducciones en resistencia que abarataran los costos. La respuesta de la Naturaleza tampoco se hizo esperar: Los primeros temblores que ocurrieron luego de que esta práctica de diseño se popularizara hicieron evidentes algunas de las

muchas limitaciones que tiene. Actualmente se conserva la idea pero bajo ciertas limitaciones y controles. Por ejemplo, para poder confiar a elementos de concreto reforzado la tarea de disipar energía en el intervalo inelástico es necesario proveerlo generosamente de detalles en la disposición y cantidad de refuerzo, y, en las estructuras en general, es necesario satisfacer ciertos requisitos de distribución regular de elementos resistentes, tanto en altura como en planta. Esta última recomendación está orientada a evitar la presencia de puntos débiles dentro de la estructura, pues es allí donde se concentrarán los daños. Un detalle fundamental para no olvidar cuando se decide rebajar la resistencia y confiar a la ductilidad la disipación de la energía, es que esta reducción no es gratuita: Mientras más resistencia se reduzca mayores serán las incursiones de la estructura en el intervalo inelástico y mayores por ende, los desplazamientos de la estructura, siendo estos últimos los responsables de los daños a los acabados, muros divisorios, etc. Los temblores recientes de Murindó señalan los grandes desplazamientos, que ocasionaron daños en los acabados de muchos de los edificios de Medellín, como uno de los puntos débiles que hay que reforzar y mejorar en la práctica del diseño estructural en nuestro medio. También es culpable de los daños a los edificios vecinos por golpeteo durante el temblor la gran flexibilidad (los grandes desplazamientos) de algunas estructuras.

CODIGO COLOMBIANO

Cualquier diseño, y particularmente el sismo-resistente, debido a la incertidumbre que se tiene en las cargas, está basado en un profundo conocimiento de todo el problema y en el detalle cuidadoso de cada una de sus partes. Para que las propuestas anteriores no sean únicamente recomendaciones de buena fe, el Código Colombiano en el Título A "Requisitos generales de diseño y construcción sismo-resistente", fuera de especificar las cargas de diseño sísmico, define los sistemas estructurales que pueden usarse en las diferentes zonas de riesgo sísmico en que se divide el país (alto, intermedio y bajo); inclusive, en la zona de riesgo sísmico alto, prohíbe el uso de algunos sistemas estructurales; del resto, restringue el uso de unos para edificios de baja altura, y castiga a los otros con factores bajos de reducción por ductilidad. En otro de sus apartes el Código exige detalles, más severos a medida que se asciende en la escala de riesgo sísmico, en la figuración y colocación del refuerzo. También, de acuerdo a las configuraciones en planta y elevación

de la estructura, el edificio se clasifica como regular o irregular. En caso de caer en la última categoría se sugiere la utilización de métodos de análisis especiales que tengan en cuenta los efectos de las irregularidades.

Un proyecto en el que la transmisión de cargas entre los elementos sea clara, simple y expedita, en donde la función de todos y cada uno de los elementos que la componen esté perfectamente definida, un sistema en el que por su sencillez, los resultados del análisis, cualitativamente hablando, puedan preverse, será una obra muy probablemente exitosa.

Pero no basta con tener un código excelente; una serie de normas y recomendaciones, aunque muy acertadas, no cubren la totalidad de los casos, a lo sumo sirven de guía y referencia y marcan los límites entre lo prohibido y lo permitido. El buen juicio de un Ingeniero experimentado no se reemplaza con códigos. Aunque el Artículo 10. del Título Preliminar del Código dice: "Las construcciones que se adelanten en el Territorio de la República deben sujetarse a las normas establecidas en el presente Código, quedando a cargo de las oficinas o dependencias distritales o municipales encargadas de conceder las licencias para tal fin, la exigencia y vigilancia de su cumplimiento" es bien sabido por todos que no existe ningún control gubernamental sobre esta materia. En momentos en que la cultura de la prevención se impone, no estaría bien esperar a que sean los temblores los que vigilen el cumplimiento de las normas.

¿QUE SE ESTA HACIENDO?

Actualmente en materia de comportamiento estructural se están haciendo desarrollos muy prometedores con dispositivos disipadores de energía. La

idea consiste en concentrar la disipación de energía, que actualmente se hace en los elementos estructurales que transportan las cargas, como son las vigas, las columnas y los muros, en elementos construidos de materiales especiales (polímeros, hules, aceros, etc.) diseñados específicamente para cumplir la función de disipar, consumir, gastar energía. Hoy en día se cumple esta función a costa de daños, en la mayoría de los casos permanentes, en los elementos estructurales. Estos dispositivos disipadores de energía cumplirían exactamente la misma función que cumplen los amortiguadores en un carro: evitar que los golpes debidos a los baches en la vía se transmitan directamente a la estructura del carro.

El sueño de aislar a las estructuras de los temblores a través de superficies deslizantes entre el edificio y el suelo no se abandona. Actualmente se investigan apoyos de polímeros flexibles, que si bien no aíslan del todo a la estructura, sí limitan al menos la fuerza cortante que se transmite del sueño al edificio. En China, permanentemente azotada por grandes eventos sísmicos, se estudia la posibilidad de apoyar, por lo pronto las casas de habitación, en camas de arena de granulometría cuidadosamente seleccionada, que hagan las veces de superficies deslizantes y limiten las fuerzas que transmite el suelo.

La Ingeniería Sismo-Resistente es un área en pleno desarrollo que ofrece espacios en aplicación y desarrollo de nuevas tecnologías, de nuevos materiales, en el desarrollo de ciencias básicas (geofísica y sismología), en el desarrollo de modelos matemáticos que permitan representar cada vez con más fidelidad el fenómeno físico que nos ocupa. En fin, si algo tenemos es un futuro promisorio, esperanzador y pleno de trabajo.

BIBLIOGRAFIA

- Sarria, A. 1982. "Ingeniería sísmica". Bogotá. Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Bogotá.
- Newmark, N.M. y Rosenblueth, E. 1976. "Fundamentos de ingeniería sísmica". México: Diana.
- Sauter, F. 1989. "Fundamentos de ingeniería sísmica". San José Ed. Tecnológica de Costa Rica.