
DISEÑO OPTIMO EN INGENIERIA SISMICA*

Emilio Rosenblueth †

Instituto de Ingeniería, UNAM
A.P. 70-472, 04510, Coyoacán México, D.F.

RESUMEN

Merece revisión el criterio “óptimo” para la sociedad, de minimizar la esperanza del costo inicial más las pérdidas por sismo actualizadas a tasa constante de descuento. La tasa debe decrecer en función del tiempo; a menudo convienen soluciones intermedias entre el óptimo tradicional y el óptimo para el inversionista, y la intolerancia social en áreas muy sísmicas justifica el criterio de mantener fija la esperanza del valor presente de las pérdidas por sismo en términos de la inversión inicial. Otras conclusiones son: Las incertidumbres, particularmente en atenuación, incrementan mucho los coeficientes óptimos de diseño. Se justifica que el factor de importancia sea independiente del sitio, y que la rama de los espectros de diseño para periodos largos descienda más gradualmente que la correspondiente a tasa constante de excedencia; y los proyectos de investigación más promisorios conciernen innovaciones y temas en que nuestra incertidumbre es máxima.

ABSTRACT

The apparently societally optimum design criterion of minimizing the expected present value of initial cost plus seismic losses discounted at a constant rate, merits revision. The discount rate must decrease as a function of time; it is often advisable to adopt solutions intermediate between the traditional optimum and the investor's optimum, and social intolerance can justify a criterion based on fixing the expected present value of seismic losses in terms of investment. Other conclusions are: Uncertainties particularly in attenuation formulas can greatly increase the optimum design coefficients. It is justified to take the importance factor as time independent, and to make the long-period branch in design spectra descend more gradually than the one for constant exceedance rate; and the most promising research projects concern innovations and subjects beset with large uncertainties.

1. INTRODUCCION

Como profesionales debemos siempre adoptar la mejor de las decisiones posibles, es decir optimar. Dado que la utilidad es por definición una medida escalar de la intensidad de preferencia, debemos maximizar la utilidad. Esta aseveración, sin embargo, no determina la decisión a tomar. Nos queda estipular utilidad para quién, en qué sentido y quién la cuantifica. Las respuestas que demos a estas interrogantes influirán en nuestros criterios de diseño, en lo que estipulen los reglamentos de construcción, incluyendo, por ejemplo, el factor de importancia y la forma de los espectros de diseño, en cómo zonifiquemos un territorio y en las prioridades que asignemos a proyectos de investigación. Después de discutir el concepto de utilidad, su relación con la ética y cómo ha de cuantificarse, examinaremos las implicaciones que tiene, en los conceptos mencionados y extraeremos algunas conclusiones.

* Conferencia invitada al X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica celebrado en octubre de 1993 en Puerto Vallarta, Jal.

2. ETICA Y UTILIDAD

Hace más de 2300 años Aristóteles sostuvo que bueno es aquello que produce el máximo bien (Aristóteles, 1983). Esta posición es sostenible el día de hoy. Si actuáramos en un mundo determinista, conociendo perfectamente las consecuencias de nuestras posibles decisiones y cómo nos afectarían esas consecuencias, podríamos elegir la decisión óptima –óptima para nosotros– con solo ordenar las posibles decisiones decrecientemente en función de lo que consideramos preferible, y tomar la primera de ellas.

Se define la *utilidad* como una medida escalar lógica de la intensidad de preferencia. La decisión más deseable es por tanto aquella que maximiza la utilidad. En un contexto determinista el concepto de utilidad sería innecesario. En el mundo en que vivimos, sin embargo, toda cuantificación está sujeta a incertidumbre. El concepto de utilidad resulta indispensable para comparar las diversas opciones entre sí.

Emplearemos aquí el concepto de utilidad introducido por von Neumann y Morgenstern (1947). Estos autores adoptan un conjunto de axiomas congruentes con el sentido común, entre ellos el de que la utilidad de una decisión cuyas consecuencias son inciertas es igual a la esperanza de las utilidades de dichas consecuencias. Ante incertidumbres la toma de decisiones exige por tanto el uso de la teoría de probabilidades.

Entenderemos por *probabilidad* una medida escalar lógica de la intensidad de convicción. Por “lógica” entendemos que cumple con los axiomas de Cox (Jaynes, 1991) o de Kolmogoroff y que operamos con ella acatando las reglas de la lógica formal. Desecharemos los conceptos clásicos de probabilidad, como el frecuentista y como el de una medida supuestamente objetiva, pues incurrir en contradicciones.

A diferencia de la utilidad, que puede estar comprendida entre menos infinito e infinito, la probabilidad está confinada al intervalo [0,1]. Por otra parte, la utilidad admite transformaciones lineales positivas, es decir que si, en vez de tomar decisiones partiendo de las utilidades u_j de sus posibles consecuencias, partimos de las utilidades $au_j + b$, en que a y b son constantes y a es positiva, no se ven afectadas nuestras decisiones. En cambio las probabilidades no admiten tales transformaciones.

Así como podemos referirnos a la utilidad de un evento para un individuo, también podemos referirnos a la utilidad del evento para un grupo de individuos. Surge entonces la pregunta de cómo habremos de combinar las utilidades individuales para obtener la utilidad colectiva. Harsanyi (1978) ha demostrado que, para que la utilidad de un grupo de individuos satisfaga los axiomas de von Neumann y Morgenstern, necesita ser una función lineal de las utilidades individuales. Así,

$$u = \sum_i \delta_i u_i \dots \dots \dots (1)$$

donde u es la utilidad para el grupo, u_i lo es para el i ésimo individuo integrante del grupo y las δ_i son constantes.

Dos son las tendencias éticas relevantes a nuestra profesión que gozan de amplia aceptación en la actualidad. Una es el utilitarismo, que, expresado cualitativamente se resume en el principio del “mayor bien para el mayor número”. La otra, el contractualismo, que sostiene que toda decisión debe cumplir con un contrato resultado de negociación entre las partes involucradas, sean explícitos o no la negociación y el contrato.

Es fácil imaginar situaciones en que el contractualismo conduce a decisiones nada éticas ya que el acuerdo en que tales decisiones se apoyan resulta de la imposición del más fuerte. Por otra parte, Ferrater Mora y Cohn (1981) demuestran que no es sostenible un utilitarismo absoluto, en que procuráramos maximizar la suma de las utilidades de todos los seres vivos o de los seres sensibles, o aun de todos los seres humanos, a lo que llegaríamos haciendo las δ_i iguales entre sí en la ec 1. Necesariamente hemos de asignar mayor peso a unos seres (como los que integran los grupos de que formamos parte) que a otros. De esta forma podemos lograr que las dos escuelas éticas coincidan entre sí, aunque ello nos haga confrontar frecuentes conflictos internos que hayamos de resolver. Por ejemplo, quien acepta contribuir a formular

el reglamento de construcciones para una entidad federativa se compromete a procurar el beneficio de sus habitantes, por conducto de cuyos representantes legales habrá contraído implícitamente el compromiso, pero también ha de tener en cuenta a los demás habitantes del país, que acudirán en auxilio de los primeros en caso de catástrofe, ya que la capacidad de respuesta de quienes habitan la entidad será limitada. Además la consternación abarcará a todos los ciudadanos y, aunque el efecto sea pequeño en cada uno, el número de ellos podrá ser elevado. Por lo mismo también deberá dar cierto peso al resto de la humanidad. El coautor del reglamento necesitará decidir cuánto peso asignar a cada uno de estos grupos. Está asimismo la interrogante de cuántos recursos distraer de la protección contra temblores de edificios ordinarios para destinarlos a la protección de edificios históricos u obras de arte cuya conservación podrá beneficiar a generaciones venideras. Más palpables y frecuentes son los conflictos internos causados por imperfección en las disposiciones que pretenden lograr que el profesional sirva a la sociedad sirviendo a sus clientes. Típicamente a quien invierte en un inmueble para venderlo un año después de construirlo, le resulta óptimo un coeficiente de cortante basal de diseño del orden de la mitad que el óptimo para la sociedad si tenemos en cuenta el costo inicial y las pérdidas por temblor. Si el ingeniero diseñara usando el valor que aparentemente resultaría óptimo para la sociedad, en muchos casos haría poco atractiva la inversión y su cliente preferiría destinar su capital a otro negocio, o acudir a un profesional menos escrupuloso, con lo que la sociedad y el ingeniero mismo resultarían perjudicados. En consecuencia los reglamentos deben en general tender a un grado de seguridad intermedio entre el que más conviene al inversionista y el que sería óptimo para la sociedad si sólo consideráramos costo inicial y pérdidas por sismo. Es más, hay inmuebles que con este criterio merecerían ser apreciablemente más seguros desde el punto de vista social que lo estipulado reglamentariamente. ¿Hasta dónde ha de sacrificar el ingeniero los intereses de su cliente por beneficiar a la comunidad? ¿Y cómo ha de proceder en ausencia de reglamentos si tiene en cuenta que la licencia para ejercer su profesión le fue conferida, no por el inversionista, sino por representantes de la sociedad?

Compete al profesional en cada ocasión resolver los conflictos de esta naturaleza.

Es fácil para el profesional estimar las utilidades correspondiente a cada posible consecuencia de sus decisiones por lo que respecta a utilidades para el inversionista. Le bastan algunas preguntas bien elegidas y algunos cálculos. ¿Cómo estima las correspondientes utilidades desde el punto de vista de la sociedad? Acudiendo a su imaginación el profesional ha de colocarse en el lugar de quienes serían afectados por cada posible decisión. Sin embargo, si el profesional basa su juicio únicamente en este ejercicio, seguramente cometerá serios errores de apreciación debido a diferencias culturales. Por lo mismo haría mal en complementar su juicio meramente con las opiniones de representantes legales de quienes serían afectados por sus decisiones. Necesita la participación de miembros representativos de los potencialmente afectados, al menos recabando sus opiniones mediante cuestionarios o encuestas.

3. CUANTIFICACION DE LA UTILIDAD

Conviene expresar en unidades monetarias traducidas a valor presente los beneficios, costos y pérdidas que pueden resultar de nuestras decisiones. El razonamiento tradicional para la traducción a valor presente ha sido este: un gasto que ha de erogarse dentro de t años puede cubrirse invirtiendo hoy a interés compuesto una cantidad igual a dicho gasto por una función de descuento. Esto conduce a la función de descuento $e^{-\gamma t}$, donde γ es la tasa de descuento, que frecuentemente se ha tomado igual a 5% o poco más al año. Es más convincente, sin embargo, el argumento de que nos interesa el bienestar de toda la población y que, por tanto, hemos de descontar las cantidades futuras justamente de conformidad con las preferencias de la población. En un estudio reciente, basado en encuestas entre ciudadanos norteamericanos, Cropper y Portney (1992) encuentran que, tratándose del valor social de una vida humana anonima, la tasa de descuento es función decreciente del tiempo. (En el sentido que aquí le damos, este valor es el que la sociedad está o debería estar dispuesta a invertir para salvar una vida humana en el presente según se infiere de lo que la sociedad invertiría para reducir en una pequeña cantidad el peligro de que se perdiera tal vida. Para llegar a este resultado los autores citan cifras derivadas

de una encuesta sobre el número de vidas que, si se salvaran en el futuro, equivaldrían a salvar una vida en el presente.) Según Cropper y Portney la explicación más probable a esta variación en γ proviene de que el interés en lo que suceda durante la vida de la persona encuestada es apreciablemente mayor que en lo que suceda después. La variación en γ es como se muestra en la figura 1. Puede allí apreciarse que los datos empíricos se aproximan adecuadamente mediante la expresión

$$e^{-\gamma t} = 0.56e^{-0.45t} + 0.44e^{-0.033t} \dots\dots\dots (2)$$

en que t está en años. Es lógico que la función de descuento que se aplique al número de vidas se aplique también a cantidades monetarias, como sostienen los autores mencionados y otros que han estudiado el tema.

Una vez transformadas las cantidades monetarias a valor presente quedan convertirlas en utilidades. Así podemos calcular las utilidades que corresponden a las posibles consecuencias de cualquier decisión postulada. Asignando probabilidades a dichas consecuencias potenciales obtenemos la esperanza de sus utilidades, que es la utilidad asociada a la decisión que se haya postulado. Ello permite identificar la decisión que produciría la máxima utilidad y que sería por tanto la decisión óptima, la que debe adoptarse.

Desde el punto de vista de la sociedad vale suponer que hay una relación lineal entre las cantidades monetarias y la utilidad, pues dichas cantidades son casi siempre pequeñas en comparación con los recursos con que cuenta la sociedad. Incluso los daños directos e indirectos que causó el temblor del 19 de septiembre de 1985, lo que constituye la peor catástrofe natural que ha sufrido nuestro país, fueron, grosso modo, dos órdenes de magnitud menores que nuestro producto interno bruto. Por tanto, maximizar la utilidad para la sociedad equivale prácticamente a maximizar la esperanza de los beneficios económicos netos que esta recibe como consecuencia de las decisiones que se analicen.

Generalmente cuanto mayores son sus coeficientes de diseño sísmico mayor es la capacidad de una estructura para resistir otras fuerzas laterales, en particular las debidas a viento. Indirectamente, también, casi siempre aumenta la capacidad estructural ante otras sollicitaciones, como las debidas a fuerzas gravitacionales, a cambios volumétricos y a hundimientos diferenciales. En rigor la dependencia de las pérdidas correspondientes en función de los coeficientes de diseño sísmico debe incluirse en el proceso de optimación. Sin embargo, por claridad en la exposición, en los párrafos siguientes nos limitaremos a tener en cuenta las pérdidas debidas a sismo.

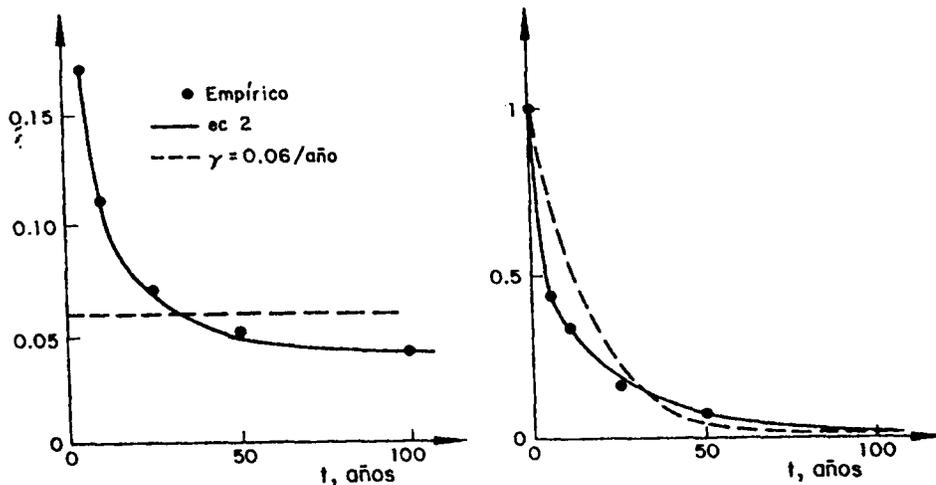


Fig. 1 Tasa y función de descuento a) γ , años⁻¹; b) $e^{-\gamma t}$

Si se supone que los beneficios sociales que produce una estructura, mientras esta no haya fallado y no haya sido dañada, son independientes de los coeficientes de diseño, la máxima utilidad corresponde a la decisión que minimiza la esperanza del valor presente del costo inicial de una estructura y las pérdidas potenciales por daño y falla. En ocasiones se cumple la hipótesis de independencia entre coeficientes de diseño y beneficios. En otras, la adopción de coeficientes elevados puede reducir la rentabilidad de un inmueble o afectar desfavorablemente su funcionamiento o su aspecto. En tales casos vale sumar al costo inicial la esperanza del valor presente de lo que se ven menguados los beneficios al emplear coeficientes elevados. Con esto se simplifica y unifica el proceso de optimación, tanto en la práctica del diseño como en la elaboración de un reglamento. En general podemos decir que, en apariencia, el óptimo se logra minimizando la esperanza del valor presente del costo inicial sumado a las pérdidas por sismo. Sin embargo, al menos en principio, hay estructuras de suficiente importancia como para justificar que se las diseñe más conservadoramente de lo que especifica el reglamento de construcciones vigente. Ello debería conducir a la adopción de coeficientes reglamentarios poco menores que los aparentemente óptimos. Mas el número de tales estructuras es demasiado pequeño como para afectar apreciablemente las disposiciones reglamentarias. Es más, se ha llegado a decir, y quizá con razón, que en la realidad las disposiciones reglamentarias marcan máximos y no mínimos. De mayor importancia es la consideración que mencionamos, en cuanto a que un aumento en el costo inicial tiende a desviar las inversiones en inmuebles. Como consecuencia también el verdadero óptimo de un reglamento debe generalmente estar comprendido entre el óptimo para el inversionista y el aparentemente óptimo para la sociedad. Su cuantificación requiere de estudios económicos que no hay indicios de que se hayan intentado hasta la fecha. En el presente trabajo calcularemos los coeficientes que deben emplearse en el diseño haciendo caso omiso de la influencia que hemos mencionado de dichos coeficientes en el mercado de bienes raíces.

4. ZONACION

Al zonificar una región es usual especificar que el coeficiente de diseño para cada tipo de estructura (definido por sus periodos naturales en cada dirección, regularidad, materiales constructivos, partido estructural e importancia) sea constante en una misma zona. Zonificar implica pues un incremento en el costo, una pérdida de utilidad. Ello se ve casi siempre más que justificado por la eliminación de ambigüedades y por la mayor facilidad en la aplicación de requisitos reglamentarios.

Dos son los principales criterios que se han propuesto para zonificar (García-Pérez y Rosenblueth, 1993a y b; Rosenblueth y García-Pérez, 1993). Vale llamar al primero de *minimización del costo inicial*. En él se parte de valores mínimos de los coeficientes de diseño en cada punto de la región por zonificar, de manera que una estructura que se construirá en determinada zona no ha de diseñarse para menos que los máximos valores de tales coeficientes que le corresponden en función del tipo de estructura, y casi todas las estructuras de una misma zona quedarán diseñadas para coeficientes mayores que los que les tocarían si no se hubiera zonificado. Habrá por tanto un desperdicio de recursos en la región que se considere. Las curvas isoparamétricas resultantes pueden corresponder por ejemplo, a ordenadas espectrales asociadas a cierto periodo de recurrencia, digamos a 500 años. Una vez elegido el número de zonas se busca establecer las fronteras interzonales de manera que este desperdicio sea mínimo, lo que equivale a minimizar la esperanza del valor presente del costo inicial de todas las estructuras que se construirán en la región. En el segundo enfoque, o de *minimización del costo total*, los coeficientes de diseño y las fronteras entre las zonas se establecen a partir de una descripción de la sismicidad en cada punto de la región y se procura minimizar la esperanza del valor presente de la suma del costo inicial y pérdidas por sismo en toda la región. Es usual que los dos criterios conduzcan a zonaciones diferentes.

Diríase que sólo el segundo criterio tiene visos de racionalidad pues a primera vista el primero favorece únicamente al contratista mientras que el segundo favorece a la sociedad, especialmente si al inversionista se le hace la concesión que hemos mencionado. Sin embargo, el primer criterio es más aceptable por parte de los autores y usuarios de una norma pues aun en su elaboración emplea el lenguaje tradicional de "diseñese por lo menos para tanto". Hay, sin

embargo, un argumento de mayor peso que favorece al primer criterio en ciertas circunstancias, el cual se apoya en el concepto de intolerancia social (Starr, 1969). En áreas de muy elevada sismicidad la optimización a que lleva el segundo criterio puede dar por resultado daños y fallas por sismo demasiado frecuentes a juicio de la sociedad, al grado de volverse intolerables para ella, independientemente de que el cálculo indique que se trata, desde el punto de vista económico, de la frecuencia óptima de fallas por sismo. En esas áreas bien puede ser preferible el primero de los criterios pues precisamente permite controlar las frecuencias con que se dañan o caen los edificios.

5. COEFICIENTE OPTIMO DE DISEÑO

5.1 Comentario introductorio

Congruentemente con el criterio de minimización del costo inicial en zonación, cuando hemos de elegir al coeficiente c de corte basal en el diseño de una estructura individual, debemos hacer que la esperanza del valor presente de las pérdidas por sismo sea igual a la tolerancia social de tal esperanza. Referiremos este valor al costo inicial C_0 que tendría la estructura si no se la diseñara para resistir temblores. En cambio, si hemos de ser congruentes con el criterio de zonación de minimización del costo total, debemos hallar el coeficiente de diseño c que minimiza la esperanza del valor presente del costo inicial más las pérdidas por sismo, referida también a C_0 , empezaremos por el segundo criterio, ilustrándolo con las condiciones que rigen en el valle de México para los edificios del grupo B que marca el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (1987), pero simplificándolas en grado extremo en aras de la brevedad y claridad de exposición. Con ambos criterios mencionados necesitamos expresar el costo inicial de un edificio y la esperanza de las pérdidas por sismo en función de c .

5.2 Costo inicial

Sean x el costo inicial del edificio y C_0 el valor de x si no se diseñara el inmueble para resistir sismos. Con base en varios estudios (Whitman y col, 1973; Grandori, 1977; Ferrito 1984; Rosenblueth, 1987; Vargas y Jara, 1989), cuyos resultados difieren significativamente entre sí, vale suponer que x es igual a C_0 por una función lineal de una potencia de c . El exponente de c es próximo a 1 para edificios bajos con muros de carga, a 1.5 para edificios esbeltos de unos 20 pisos de alto con marcos de concreto, y superior a 1.5 para los más esbeltos. Pensando en una estructura representativa tomaremos

$$X = \begin{cases} C_0 & \text{si } c \leq c_0 \\ [1 + 0.5 (c - c_0)^{1.2}] C_0 & \text{si } c \geq c_0 \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

El papel que damos a c_0 obedece a que sabemos que a una estructura no diseñada por sismos resiste pequeños temblores como si hubiera sido diseñada para resistirlos. Tomaremos $c_0=0.02$ para ejemplificar.

5.3 Pérdidas cuando ocurre un sismo

Sea z la demanda calculada de coeficiente de corte basal. Llamaremos a z la "intensidad" del temblor de que se trate para la estructura que interese. En estudios del monto de los daños directos sufridos por edificios en el valle de México durante sismos recientes, Esteva y col (1988) y Ordaz y col (1992) han concluido que tales daños son sensiblemente proporcionales a $(z/c)^2 x$ cuando se toma z igual a la ordenada del espectro de pseudoaceleración,

referido a la aceleración de la gravedad, para un coeficiente de amortiguamiento de 5 por ciento y periodo igual al fundamental de vibración de la estructura reducida por comportamiento estructural inelástico. Tomaremos esta esperanza de pérdida igual a

$$y_{zei} = \theta [(z - z_0)/c]^{1.6} x \dots\dots\dots (4)$$

si $z \geq z_0$, y 0 si $z \leq z_0$, donde θ es una constante y la introducción de z_0 reconoce que para temblores de muy baja intensidad no se presenta daño alguno. Adoptaremos $z_0=0.06$. (En realidad suelen presentarse algunos daños insignificantes cuando z es poco menor que z_0 . Ello sugiere adoptar una forma funcional diferente en estudios ulteriores.)

La ec 4 tiene en cuenta sólo las pérdidas materiales directas que sufre el edificio. Las pérdidas económicas del contenido del edificio, las económicas indirectas y las no económicas crecen rápidamente con los daños que sufre la construcción. Supondremos que son iguales a y_{zei} por $1+b(z/c)^2$ donde b es un coeficiente que depende del destino del inmueble. Con fines ilustrativos tomaremos $b=0.10$ para los edificios del grupo B. Queda entonces la esperanza de la pérdida total, entre el instante en que ocurre el sismo y un corto tiempo después, en la forma

$$y_{zi} = \begin{cases} 0 & \text{si } z \leq z_0 \dots\dots\dots (5) \\ \theta [(z - z_0)/c]^{1.6} [1+b(z/c)^2]x & \text{si } z \geq z_0 \end{cases}$$

En rigor y_{zi} , debe tender asintóticamente a una constante cuando z crece indefinidamente, constante que corresponde a destrucción total. Sin embargo, los valores de z que aquí nos interesan son suficientemente pequeños como para ignorar tal consideración y adoptar la ec 4.

5.4 Esperanza del valor presente de las pérdidas causadas por temblores de intensidad z

Consideremos una construcción que no se ha visto sujeta a ningún temblor con intensidad superior a z_0 . Cuando ocurre un temblor de intensidad z la pérdida está dada por la ec 5. La esperanza del valor presente de la pérdida vale $y_{zi} \exp(-\gamma t)$ donde γ es la tasa de descuento y t el tiempo trascurrido desde ahora hasta que ocurre el temblor. Sea $p(t; z)$ la función de densidad de probabilidades de t para un temblor de intensidad z . Entonces la esperanza del valor presente de las pérdidas

causadas por este sismo es $y_{zi} \int_0^{\infty} p(t; z) e^{-\gamma t} dt$. Si suponemos que los tiempos de arribo de los temblores obedecen a un proceso

múltiple de Poisson, entonces $p(t; z) = v \exp(-vt)$ donde $v = v(z)$ es la tasa de ocurrencia de los temblores de intensidad z . Por tanto la contribución del primer temblor de esta naturaleza a la esperanza del valor presente de las pérdidas causadas por este sismo es

$$y_{zi} v \int_0^{\infty} e^{-(\gamma+v)t} dt = y_{zi} v / (\gamma + v) \dots\dots\dots (6)$$

si γ es constante. La esperanza de la contribución del n -ésimo temblor de esta intensidad es $y_{zi} [v / (\gamma + v)]^n$ (Rosenblueth, 1976). Si suponemos que se repara, refuerza o reconstruye el inmueble inmediatamente después de cada sismo dejándolo en sus condiciones iniciales, y así ignoramos los efectos de acumulación de daños, obtenemos la contribución de todos los temblores con intensidad comprendida entre z y $z+dz$, $y_{zi} dz$, donde

$$y_z = y_{zi} \sum_{n=1}^{\infty} [v / (\gamma + v)]^n = y_{zi} v / \gamma \dots\dots\dots (7)$$

Reconociendo ahora que γ no es constante y poniendo la ec 2 en la forma

$$e^{-\gamma t} = \xi e^{-\gamma_1 t} + (1-\xi)e^{-\gamma_2 t} \dots \dots \dots (8)$$

con $\xi = 0.56$, $\gamma_1 = 0.45/\text{año}$ y $\gamma_2 = 0.033/\text{año}$, obtenemos

$$y_z = y_{z1} v [\xi/\gamma_1 + (1-\xi)/\gamma_2] = y_{z1} \left\{ \xi \sum_{n=1}^{\infty} [v/(\gamma_1+v)]^n + (1-\xi) \sum_{n=1}^{\infty} [v/(\gamma_2+v)]^n \right\}$$

Sustituyendo valores numéricos queda

$$y_z = y_{z1} v/0.0687 \dots \dots \dots (9)$$

donde v está en años⁻¹; es decir, el uso de γ variable de acuerdo con la ec 2 equivale al empleo de $\gamma = 0.0687/\text{año}$, constante, cuando se trata de un proceso de Poisson. Seguramente este valor depende de la cultura de la población cuyas opiniones se tengan en cuenta.

5.5 Esperanza del valor presente de la pérdida total por sismo

La contribución de los sismos con intensidad entre z y $z+dz$ a la esperanza del valor presente de las pérdidas es $y \cdot dz$. La

de todos los sismos es $y = \int_0^{\infty} y_z \, dz$. Para cuantificarla necesitamos calcular la tasa de ocurrencia en función de z .

La obtenemos a partir de la tasa de excedencia, $\lambda = v = -d\lambda/dz$. Ahora bien, la tasa de excedencia de la magnitud de los temblores que se generan en una fuente dada puede verse como si constara de dos partes (figura 2). La primera corresponde a los temblores que pudiéramos llamar “ordinarios”; obedece la llamada ley de Gutenberg-Richter, que estos autores encontraron para cada una de las provincias tectónicas en que consideraron dividida la superficie terrestre (Gutenberg y Richter, 1954) y la tomaremos según la expresión que proponen Cornell y Vanmarcke (1969), que se puede poner en la forma

$$\lambda = \alpha (e^{-\beta M} - e^{-\beta M_1}) \dots \dots \dots (10)$$

si $M \leq M_1$, y $\lambda = 0$ si $M > M_1$, en la que α y β son constantes, M es magnitud y M_1 el máximo valor de M para esta clase de temblores. El parámetro β se halla en torno a 2.3 para todas las provincias tectónicas, y en particular es prácticamente 2.3 para los temblores de subducción que se originan cerca de nuestra costa del Pacífico. Esta parte de λ , en papel semilogarítmico, empieza casi como una recta inclinada descendente y se clava asintóticamente conforme M tiende a M_1 . La segunda parte de λ corresponde a los temblores característicos (Youngs y Coppersmith, 1985; Ordaz y Rosenblueth, 1984), cuyas magnitudes, que llamaremos M_2 , están próximas a la máxima que puede generarse en la fuente. Por lo pronto tomaremos M_2 como una magnitud fija, en cuyo caso la segunda parte de λ tiene la forma de función escalón negativa que se muestra en la figura 2.

La principal razón por que una provincia tectónica sólo muestra tasas de excedencia como la primera parte de la λ que corresponde a una fuente específica es seguramente que en la provincia están agregados los temblores que se generan en todas las fuentes que ella contiene, a las cuales corresponden muy diversas magnitudes y tasas de excedencia de los temblores característicos.

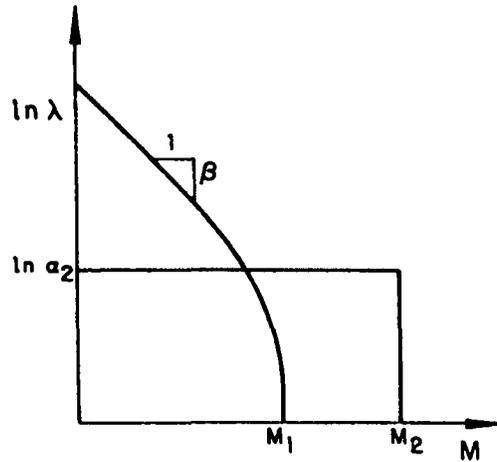


Fig. 2 Tasa de excedencia de magnitudes

Debe acudir a fórmulas de atenuación para conocer el valor de z que corresponde a determinada magnitud dados el foco y la estación de interés. A grandes distancias focales puede escribirse

$$z = Fe^{\beta M} \dots\dots\dots (11)$$

donde F depende de la distancia focal y generalmente de las trayectorias de las ondas sísmicas; además F y β' dependen del periodo T y son independientes de M . La función F se obtiene como el producto de una función correspondiente al valor de z en roca basal horizontal, la cual merece el nombre de atenuación propiamente dicha, y la función de transferencia, para el periodo de interés, entre la roca basal horizontal y la estación de interés, función que sintetiza en cierta forma los efectos de sitio. Para temblores originados cerca de la costa mexicana del Pacífico y fijando la atenuación en el valle de México (Singh y col, 1987), β' vale del orden de 0.8 para estructuras representativas.

Combinando las ecs 10 y 11 obtenemos, para la primera parte de λ ,

$$\lambda = \begin{cases} \alpha (z^{\beta/\beta'} - z_1^{\beta/\beta'}) & \dots\dots\dots (12) \\ 0 & \text{si } z \leq z_1 \end{cases}$$

De aquí, notando que $\beta/\beta' \approx 3$, resulta aproximadamente

$$v = \begin{cases} \alpha_1 z^4 & \text{si } z \leq z_1 \\ 0 & \text{si } z > z_1 \end{cases} \dots\dots\dots (13)$$

para los temblores de primera clase, donde α_1 es una constante. Para los de la segunda clase con $z=z_2$, podemos escribir

$$v = \alpha_2 \dots\dots\dots (14)$$

donde α_2 es la tasa de ocurrencia.

Adoptaremos ahora $\theta=0.049$, $\gamma=0.07/\text{año}$, $z_1=0.20$, $z_2=0.40$, $\alpha=10^{-4}/\text{año}$ y $\alpha_2=0.02/\text{año}$. Sustituyendo estos valores y las ecs 3, 5, 13 y 14 en la 9 nos queda

$$y=7 \times 10^{-5}(41.47+0.5797/c^2) [1+0.5 (c-0.02)^{1.2}]C_0/c^{1.6} \dots\dots\dots(15)$$

El valor óptimo de c se alcanza minimizando la esperanza del valor presente de todos los costos, $w=x+y$, lo que exige que $dw/dc=0$. De aquí resulta $c=0.215$.

Consideremos ahora un sitio en el área epicentral. Allí deja de ser válida la ec 11 para temblores de gran magnitud debido a un fenómeno de saturación (Ordaz y col 1989). Los grandes temblores se originan por ruptura de áreas de grandes dimensiones. Como consecuencia, en el área epicentral y cerca de ella las ondas que se producen cerca de la periferia del área de ruptura están necesariamente lejos de la estación y la afectan relativamente poco. Esto se refleja en curvas típicas de atenuación (figura 3). Además cerca de la costa del Pacífico se encuentran a menudo materiales sueltos no cohesivos. Ambos fenómenos limitan los valores elevados de z . De una manera muy simplificada supondremos que, en el nuevo sitio, a una tasa de excedencia dada se duplican todos los valores de z excepto z_1 que en vez de valer 0.8 sólo vale 0.5. Procediendo como en el primer sitio, encontramos que el valor óptimo de ese eleva de 0.215 a 0.254, es decir en 18%

A estos resultados llegamos minimizando lo que hemos llamado el costo total. Si en cambio fijamos la condición de que las pérdidas y/x sean las mismas en ambos sitios y sostenemos $c=0.215$ para los edificios del grupo B en el sitio a gran distancia focal, encontramos para el sitio que se halla en el área epicentral que c debe incrementarse a 0.276, o sea en 28 por ciento.

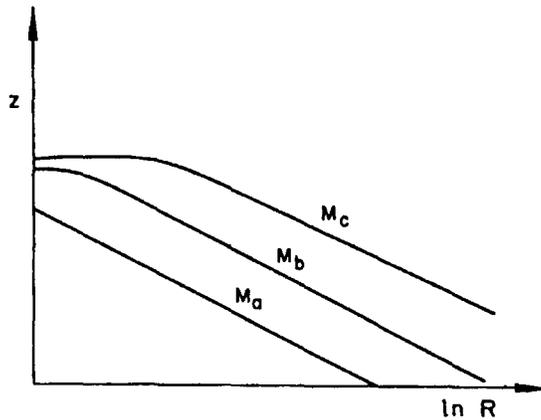


Fig. 3 Curvas de atenuación $M_a < M_b < M_c$

5.6 Efectos de las incertidumbres

Hasta aquí hemos tratado todos los parámetros como deterministas. No obstante, las incertidumbres en cada uno de ellos llegan a ser muy elevadas. Dado que la mayoría de los parámetros se obtuvieron por regresión lineal entre su logaritmo y los de cantidades conocidas, asignaremos a cada parámetro distribución lognormal, salvo a M_1 , que es sensiblemente función lineal del logaritmo del momento sísmico. Vale entonces (Benjamín y Cornell, 1970) la expresión

$$E X = \exp (E \ln X) \exp (\sigma^2/2) \dots\dots\dots (16)$$

en que X es una variable aleatoria con distribución lognormal y σ denota la desviación típica de $\ln X$ (Para valores pequeños de σ , esta desviación típica difiere poco del coeficiente de variación de X .) De aquí que si $Y=X^m$, donde m es un exponente real, el factor correctivo $\exp (\sigma^2/2)$ se convierta en $\exp (m^2\sigma^2/2)$.

La principal fuente de incertidumbre se encuentra en el valor de z que corresponde a una magnitud dada y a coordenadas geográficas dadas del foco y de la estación. Según Mario Ordaz (Ordaz, 1993) el valor de σ para la aceleración máxima del terreno en las fórmulas de atenuación es típicamente 0.7 pero se ve reducida sensiblemente a 0.45 si nos referimos a la aceleración máxima efectiva ("EPA", abreviatura de *effective peak acceleration*), la cual se calcula a partir de las ordenadas espectrales de pseudoaceleración para períodos muy cortos de vibración. Tomaremos este último valor de σ para z dados M y las coordenadas geográficas pertinentes. Asignando a M distribución normal con desviación típica de 0.2, queda la de z igual a 0.48. (Por otra parte en estudios realizados por Mario Chávez (Chávez, 1988) se ha encontrado que a menudo la escasez e imprecisión en los datos que consignan los catálogos disponibles de temblores son causa de incertidumbres comparables a las que aquejan a las fórmulas de atenuación.) Sigue en importancia la incertidumbre en la capacidad estructural, que tendremos en cuenta asignando a $\ln c$ la desviación típica 0.4, que es razonable para marcos de concreto reforzado. Nótese, por otra parte, que en los más de los casos el fenómeno de sobre-resistencia hace que la esperanza de c exceda en mucho (a veces por un factor superior a 3) al valor nominal de este coeficiente cuando se trate de pérdidas por sismo; tomaremos $\sigma=0$ por lo que toca a c en la expresión para x , pues es un valor elegido por quien diseña. Asignaremos a σ el valor 0.4 también por lo que concierne a z_0 y 0.2 a α_2 .

Si ahora tomamos los parámetros deterministas que dieron origen a la ec 15 como las modas de los parámetros inciertos, usando métodos numéricos aproximados vemos la ec 15 convertida en

$$y = 7 \times 10^{-5} (50.47 + 4.3121/c^2) [1 + 0.5(c - 0.02)^{1.2}] C_0/c^{1.6}$$

Procediendo de esta manera encontramos que, para los edificios del grupo B en el sitio a gran distancia focal, la c óptima se incrementa de 0.215 a 0.294, es decir 37% y corresponde a una tasa de excedencia varias veces menor que cuando se ignora la incertidumbre. En el área epicentral la c óptima que minimiza el costo total pasa de 0.254 a 0.376, sufriendo pues un incremento de 48%; y, si adoptamos el criterio de conservar y/x constante, c pasa de 0.276 a 0.377, un aumento de 37% causado por las incertidumbres. Aunque los órdenes de magnitud de los efectos de las incertidumbres serán medianamente sensibles a refinamientos en el cálculo, valdrá la pena revisar los valores numéricos a que hemos llegado, pues algunos de los parámetros que empleamos están poco fundamentados y en la realidad habrá que considerar los efectos de temblores provenientes de fuentes distintas de la única que aquí hemos tenido en cuenta. Además nuestros cálculos deben corregirse en cuanto a la forma de la función de pérdida, ya que no hemos tenido en cuenta la tendencia de esta función a tornarse asintótica a una horizontal que necesariamente mostrará esta función para grandes valores de z/c .

6. FACTOR DE IMPORTANCIA

Todos o casi todos los reglamentos de construcción contemporáneos exigen que los edificios muy importantes y aquellos cuya función es crucial a raíz de un macrosismo se diseñen más conservadoramente que el resto. Reglamentariamente se marca un llamado *factor de importancia* que multiplica a los coeficientes especificados para otras que estructuras se cimenten en la misma zona o en sitios de sismicidad comparable. El Reglamento del Distrito Federal de 1942 contenía una extensa lista de coeficientes que cubrían una enorme gama de valores dependientes del destino de la construcción. La tendencia contemporánea establece el factor de importancia con un rango de variación mucho más estrecho, también en función del uso que se prevea para el inmueble. Así, el Uniform Building Code (1988) de los Estados Unidos establece 1.0 para estructuras ordinarias, 1.2 para las de cierta importancia y 1.3 para las de importancia excepcional. El Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (1987) consigna 1.5 para las construcciones muy importantes y 1.0 para las demás que se diseñen contra sismo. Además pide, para las primeras, la participación de especialistas en la dirección de la obra. Al menos en México y en los Estados Unidos el factor de importancia se toma independiente de la sismicidad del sitio de interés y de su proximidad a las principales fuentes potenciales de temblores.

Así sucede en México con los reglamentos que se han aprobado o propuesto para entidades distintas del Distrito Federal (véase por ejemplo Ordaz y col, 1989). Surge la duda de si tal práctica es la más adecuada.

Para explorar el problema supondremos que el factor de importancia refleja un incremento exclusivamente en las pérdidas económicas indirectas y en las no económicas, no en los daños materiales que sufre el edificio mismo. En consecuencia calcularemos en cuánto debe incrementarse el término que contiene a b en la expresión para y –digamos que b aumenta a un valor a – para que el coeficiente de diseño pase de 0.294 (que ya tiene en cuenta las incertidumbres) a 1.5 veces este valor en el sitio que se halla a gran distancia focal. Después, conservando estos valores de a y b veremos en cuánto debe incrementarse el coeficiente óptimo c de 0.376 (con el segundo criterio) o 0.377 (con el primero) en el sitio del área epicentral.

Procediendo de esta manera encontramos que, en el sitio alejado del área epicentral, $a/b=8.73$ para que $c=0.294 \times 1.5$ sea óptimo según el segundo criterio, y $a/b=6.38$ con el primero (y/x constante). Empleando estos valores de a/b hallamos que en el área epicentral el criterio pasa de 0.376 a 0.561, lo que implica un factor de importancia de 1.49, y, con el primer criterio, c debe pasar de 0.377 a 0.555, que implica un factor de importancia de 1.47. Ciertas construcciones por el gran impacto que su falla tendría en la población, merecen un coeficiente de diseño mayor que los edificios ordinarios. Más procede entonces asociar el aumento en c a un incremento en θ que en b . Los factores de importancia que así se encuentran en el área epicentral son 1.50 con el segundo criterio y 1.51 con el primero.

Se concluye que en todos los casos el factor de importancia debe ser prácticamente independiente de la sismicidad, de la proximidad a las fuentes sísmicas y del criterio de diseño que se adopte.

7. RAMA DESCENDENTE DE LOS ESPECTROS DE DISEÑO

Es común que para períodos altos de vibración las ordenadas del espectro de diseño descieran más lentamente que las esperanzas de la ordenadas de respuesta correspondientes a tasas pequeñas de excedencia. Así, mientras estas pueden variar en proporción a T^{-1} , donde T es el periodo, las ordenadas de diseño que marcan los reglamentos suelen variar en proporción sea a $T^{-2/3}$ o a $T^{-1/2}$. Se ocurre preguntarse si tal práctica está justificada.

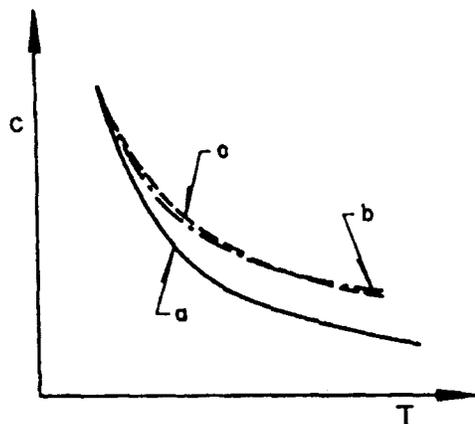


Fig. 4 Rama descendente del espectro de diseño a) Proporcional a T^{-1} ; b) Óptimo; c) Proporcional a $T^{-0.7}$

La ec 15, una vez corregida por incertidumbres, nos es útil para conocer cómo varía el coeficiente de corte basal de diseño en función de z . Supondremos, para ejemplificar, que todas las z varían en proporción inversa con el periodo de vibración, T . Encontramos que el valor de c que minimiza a w varía como se muestra en la figura 4 donde se compara con curvas proporcionales a T^{-1} y a $T^{-0.7}$. Efectivamente por consideraciones de optimización la rama que desciende debe

hacerlo más lentamente que lo que indican los espectros de respuesta. En otras palabras, si nos resulta barato que una estructura resista temblores, podemos y debemos darnos el lujo de diseñarla más conservadoramente.

Este razonamiento sólo se aplica cuando se diseña de acuerdo con el segundo criterio que hemos enunciado, es decir cuando c es tal que minimiza w . Hay además otra consideración de peso, aplicable cualquiera que sea el criterio de diseño. En efecto, cuanto mayor sea T , más probable es que se trate de un edificio con muchos pisos o de una nave industrial o un edificio semejante a ella. El primero tendrá mayor probabilidad de requerir w la concentración de ductilidad en algunos niveles más pronunciada que el promedio correspondiente a todo el edificio, mientras que en una nave industrial la estructura tiene menores defensas que en un edificio de apartamentos. En ambos casos se justifica que cuanto mayor sea T más conservador sea el diseño y por tanto que la rama que desciende lo haga más gradualmente que la que corresponde a tasa constante de excedencia.

8. PROYECTOS DE INVESTIGACION

Es defensible elegir los proyectos de investigación que maximizan el cociente beneficio/costo. Sin embargo, en la disciplina que nos ocupa los beneficios de una buena investigación exceden tanto a los costos de realizarla que la importancia de los costos palidece. Más de tenerse en cuenta es la factibilidad de conseguir recursos para la investigación y atender primordialmente a los beneficios que pueden lograrse.

Mucho se ha avanzado durante los últimos lustros en la recopilación y procesamiento de información acerca de los movimientos sísmicos y sus efectos geotécnicos y en las estructuras. Buena parte de lo que hoy se hace es afinar lo que ya se sabe. Ahora bien, repetidamente se ha señalado en la literatura que, cuando se está cerca de la solución óptima, un mayor acercamiento a ella trae consigo tan solo beneficios insignificantes. La situación se ilustra en la figura 5, que muestra la utilidad en función de un parámetro de diseño, donde se aprecia que el fenómeno obedece a que la tangente a la curva de utilidad es horizontal en el óptimo. Es difícil combatir la tentación de varios investigadores por abordar estos proyectos, ya que es natural que se engolosinen con ellos y mediante poco esfuerzo logren resultados intachables y por tanto publicables. Si en cambio hay razones para pensar que en determinado concepto actualmente se está lejos del óptimo, un proyecto de investigación puede traer consigo beneficios que lo justifiquen ampliamente.

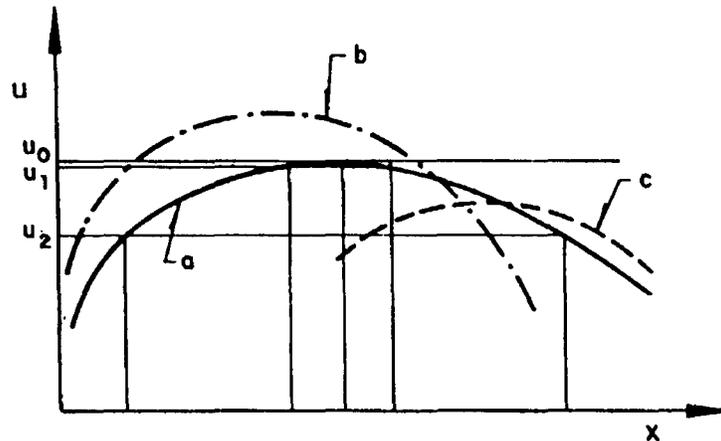


Fig. 5 Solución convencional e innovaciones. a) Solución convencional: $u_0-u_1 =$ Ganancia cuando se está cerca del óptimo, y $u_0-u_2 =$ Ganancia cuando se dista del óptimo; b) Innovación exitosa; c) Innovación infructuosa.

Para ejemplificar el argumento vale referirse al catálogo existente de sismos preinstrumentales en la República (García y col, 1988). El trabajo contiene tanta información que poco se ganaría tratando de recopilar aún más. En

cambio se antoja hacer un esfuerzo por estimar las magnitudes de los eventos consignados y a partir de allí reevaluar la sismicidad del país.

No se justificaría refinar con los datos de los últimos seis años el estudio realizado sobre las distribuciones de probabilidades de los tiempos entre temblores característicos para la brecha de Guerrero y la exbrecha de Michoacán (Jara y Rosenblueth, 1988, 1992). Sí en cambio hacer estudios semejantes, usando todos los datos disponibles y desarrollos teóricos, para otros segmentos de la zona mexicana de subducción asociada a la brecha del Pacífico, especialmente el de Jalisco y el de Tehuantepec, en que las incertidumbres son enormes.

Tampoco procede ya seguir trabajando en fórmulas de atenuación aplicables a temblores de subducción para conocer los espectros de movimientos del terreno en el valle de México ignorando los efectos de azimut, cuando los ensayos y análisis recientes de Lermo (1993) señalan que tales efectos podrían ser significativos. Ni sería aconsejable seguir ensayando miembros estructurales prismáticos, hechos con los materiales comunes, para conocer mejor su capacidad de comportamiento dúctil. En cambio, casi no hay análisis ni resultados experimentales para cuantificar este aspecto en miembros de sección variable diseñados ex profeso para incrementar su ductilidad.

También esta extendida en investigación, y por razones análogas a las que citamos, la práctica de analizar estructuras específicas sujetas a temblores específicos, ya sea reales o simulados, sin posibilidad de generalizar los resultados para aplicarlos a nuevas estructuras que se verán sujetas a temblores seguramente distintos de los empleados en el análisis. Urgen estudios generalizables. Incluso en lo que concierne a simulación de temblores los métodos más empleados basan toda su información en un solo registro cuando lo que se necesita es tener en cuenta el universo de los sismos que pueden generarse en cada fuente. Algunos esfuerzos se han hecho en este sentido, incluso en nuestro país (Ordaz y col, 1993), pero la formulación de modelos realistas de fuente está aún casi virgen.

Desde hace varios años Francisco Sánchez-Sesma y colaboradores en el Instituto de Ingeniería de la UNAM y en el Centro de Investigación Sísmica de la Fundación Javier Barros Sierra han venido desarrollando y analizando modelos de grandes valles sedimentarios, con miras a su aplicación principalmente al valle de México. Tales trabajos se han visto complementados en la segunda de estas instituciones con estudios empíricos sobre funciones de transferencia en diversos sitios del valle de México. Los trabajos de esta índole deben continuar, mas la mayor parte del énfasis debería descansar ahora en métodos prácticos aproximados que permitieran aprovechar los resultados para aplicarlos a sitios y temblores específicos.

La misma figura hace ver cómo en ocasiones pueden alcanzarse beneficios mucho mayores explorando innovaciones que dan lugar a curvas de utilidad que pueden diferir sustancialmente de las que corresponden a la práctica establecida. Para que las innovaciones beneficien de verdad, se necesita que no impliquen un costo excesivo, así que el análisis de su funcionamiento debe ir acompañado de un análisis de costos, cosa que se omite las más de las veces.

Con dos avances promisorios ejemplificaré el contenido de este último párrafo. Ambos caben en el rubro de control pasivo, el cual está recibiendo gran atención. El primer avance pertenece al campo de los disipadores de energía. Estos dispositivos están en general demostrando ser menos útiles de lo que se pensaba. Sea que disipen energía por histéresis de elementos de acero o que lo hagan por fricción o por deformación de elastómeros, aumentan la rigidez de la estructura, al menos ante deformaciones pequeñas, lo que en general aumenta las sollicitaciones sísmicas y en parte contrarresta al efecto positivo de la disipación. Además, uno de los pocos análisis de costos que se han publicado (Sosa y Ruiz, 1993) indica que su costo es inconvenientemente elevado. Los beneficios son aparentemente mucho mayores si se acude a disipadores líquidos en cilindros con émbolo provistos de válvulas especiales (Constantinou y Symans, 1992).

El segundo posible avance es el motivo de una tesis doctoral que se está iniciando (Febres, 1993). Se trata de aisladores de base que tienen configuraciones sumamente ingeniosas y que, para edificios cimentados en suelo no demasiado deformable, tal vez logren reducir las fuerzas sísmicas exigiendo costos no demasiado altos.

9. CONCLUSIONES

Hemos abordado ciertos aspectos del problema de diseñar por sismo en forma óptima para la sociedad. Hemos puesto de manifiesto los siguientes conceptos:

1. La tasa de descuento para traducir cantidades futuras a presentes es función decreciente del tiempo. Sin embargo, ante procesos múltiples de Poisson puede encontrarse una tasa constante equivalente que suministre los mismos resultados que la tasa variable, siempre que no se consideren explícitamente fenómenos tales como la acumulación de daños. Las cantidades a que se refieren estos comentarios pueden ser monetarias o puede tratarse de la utilidad para la sociedad.
2. Generalmente vale tomar como primera aproximación a los coeficientes reglamentarios de diseño aquellos que minimicen la esperanza del valor presente del costo inicial más las pérdidas por sismo. Sin embargo, si se tiene en cuenta el efecto de dichos coeficientes en el mercado de bienes raíces, suele justificarse adoptar coeficientes comprendidos entre los que con este criterio serían óptimos y los que resultarían óptimos para el propietario. Además, atendiendo a consideraciones de intolerancia social a las fallas demasiado frecuentes, en zonas de muy elevada sismicidad procede diseñar de manera que la tasa de pérdidas por sismo resulte constante en términos de la inversión inicial.
3. Es decisiva la influencia de las incertidumbres –particularmente la incertidumbre en las fórmulas de atenuación– en los coeficientes que deben adoptarse para diseño.
4. El factor de importancia es poco sensible a la sismicidad y a las distancias a las principales fuentes simogénicas.
5. La rama que desciende para períodos largos en los espectros de diseño debe hacerlo más gradualmente que la que corresponde a una tasa constante de excedencia.
6. Las principales inversiones en adquisición de datos y en investigación deben concentrarse en los conceptos en que es máxima la incertidumbre y en la generación de innovaciones.

RECONOCIMIENTO

Agradezco a Jaime García-Perez y a Mario Ordaz su revisión crítica del primer manuscrito del trabajo, sus sugerencias constructivas y la ayuda que prestaron en la preparación de la versión definitiva.

REFERENCIAS

- Aristóteles (1983). *Ética Nicomaquea*, versión de A Gómez Robledo, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Benjamín, J y Cornell, CA (1970). *Probability, Statistics, and Decision for Civil Engineers*, McGraw-Hill Book Company, Nueva York.
- Constantinou, MC y Symans, MD (1992). *Experimental and Analytical Investigation of Seismic Response of Structures with Supplemental Fluid Viscous Dampers*, NCEER-92-0032.
- Cornell, CA y Vanmarcke, E (1969). *The major influences on seismic risk*. Proc Fourth World Conf on Earthq Engrg, Santiago de Chile: A169-A183.
- Cropper, ML y Portney, PR (1992). *Discounting human lives*, Resources, V 108, verano: 1-4.
- Chávez, M (1988). *Influence of uncertainties about depth and epicentral location of earthquakes on seismic hazard analysis*, Res Mechanica, V 25, N° 2:171-181.

- Esteva, L, Díaz, O, Terán, A y García, J (1988). Costos probables de daños causados por temblores en construcciones, Informe del Proyecto 8750, Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
- Febres, R (1993). Tesis doctoral en vías de realización.
- Ferrater Mora, J y Cohn, P (1981). *Ética Aplicada: del Aborto a la Violencia*, Alianza Editorial, Madrid.
- Ferrito, J M (1984). Economics of seismic design for new building, *J Structl Engrg ASCE*, V 110, No 12: 2925-2937.
- García, V, Hernández, R, Márquez, I, Molina, A, Pérez, JM, Rojas, T y Sacristán, C (1988). Cronología de los sismos en la cuenca del valle de México, *Estudios sobre sismicidad en el valle de México*.
- García-Pérez, J y Rosenblueth, E (1993a). Zonación sísmica para minimización del costo inicial en problemas reducibles a una dimensión. Sometido para su publicación en *Ingeniería Sísmica*.
- García-Pérez, J y Rosenblueth, E (1993b). Zonación sísmica para minimización del costo total en problemas reducibles a una dimensión. Sometido para su publicación en *Ingeniería Sísmica*.
- Grandori, G (1977). Seismic zoning as a problem of optimization, *Proc Second Internatl Conf on Structl Safety and Reliability*, Munich: 613-624.
- Gutenberg, B y Richter, CF (1954). *Seismicity y of the Earth (and Associated Phenomena)*, Princeton University Press, Princeton, NJ.
- Harsanyi, J (1978). Bayesian decision theory, rule utilitarianism, and Arrow's impossibility theorem, on Justice and Economic Distribution, J Arthur y WH Shaw, eds, Prentice Hall, Inc, Englewood Cliffs. NJ.
- Jara, JM y Rosenblueth (1988). Probability distribution of times between characteristic subduction earthquakes, *Earthquake Spectra*, V 4. No 3: 499-530.
- Jara, JM y Rosenblueth, E (1992). Variación de los coeficientes sísmicos de diseño como función del tiempo, versiónexpandida, Centro de Investigación Sísmica de la Fundación Javier Barros Sierra, Boletín, V 2, No 1: 3-21.
- Jaynes; ET (1991). *Probability Theory - The Logic of Science*, edición preliminar incompleta, Washington University, St Louis, MO.
- Lermo, J (1993). comunicación personal.
- Ordaz, M (1993). comunicación personal.
- Ordaz, M, Arboleda, J y Singh, SK (1993). Un nuevo método para simular acelerogramas usando registros pequeños como funciones de Green, este volumen.

- Ordaz, M, Jara, JM y Singh, SK (1989). Riesgo sísmico y espectros de diseño en el estado de Guerrero, Informe de los Proyectos 8782 y 9745, Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
- Ordaz, M, Meli, R, Montoya, C, Sánchez, L y Pérez-Rocha, LE (1992). Data base for seismic risk assessment in Mexico City, Memorias del Simposio Internacional sobre Prevención de Desastres Sísmicos, 18-21 de mayo, México DF, VIII, 99-109.
- Ordaz, M y Rosenblueth, E (1989). Earthquake magnitude exceedance rate and self-similarity, *Earth Engrg Struct Dyn*, V 18, 1017-1023.
- Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (1987).
- Rosenblueth, E (1976). Optimum design for infrequent disturbances, *Proc ASCE, Journal of the Structural Division*, V 102, ST9, 1807-1825.
- Rosenblueth, E (1987). What should we do with structural reliabilities, *Reliability and Risk Analysis in Civil Engineering, Proc Fifth Internatl Conf on Applications of Statistics and Probability in Soil and Structl Engrg, Waterloo, Ont*: 24-34.
- Rosenblueth, E y García-Pérez, J (1993). Seismic zonation. Aceptado para su publicación en *Journal of Engineering Structures*.
- Singh, SK, Mena, E y Castro, R (1987). Empirical prediction of ground motion in México City from coastal earthquakes, *Bull Seism Soc Am*, No 77, 1862-1867.
- Sosa, A y Ruiz, SE (1992). Análisis estructural y costos de edificios con aisladores sísmicos, *Ingeniería Sísmica*, No 44:11-28.
- Starr, C (1969). Social benefit versus technological risk, *Science*, V 165: 1232-1238.
- Uniform Building Code of America (1988). Section 2312: Earthquake Regulations, International Conference of Building Officials, Whittier, CA.
- Vargas, E y Jara, JM (1989). Influence del coeficiente sísmico de diseño en el costo de edificios con marcos de concreto, *Memorias VIII Congr Nac de Ing Sísm y VII Congr Nac de Ing Estructural, Acapulco, Gro*: D30-D39.
- von Neumann, J y Morgenstern, O (1947). *Theory of Games and Economic Behavior*, 2a edic, Princeton University Press, Princeton, NJ.
- Whitman , RV, Biggs, JM, Brennan III, J, Cornell, CA, de Neufville, R y Vanmarcke, E (1973). Summary of methodology and pilot application, *Seismic Decision Analysis Report No 9*, MIT Dept of Civil Engineering, Cambridge, MA.
- Youngs, RR y Coppersmith, KJ (1985). Implications of fault slip rates and earthquake occurrence models to probabilistic seismic hazard estimates, *Bull Seism Soc Am*, V 75, No 4: 939-964.