

ESTIMACION DE DAÑOS PROBABLES CAUSADOS POR SISMOS

L. Esteva y R. Guerra

Instituto de Ingeniería, Ciudad Universitaria, México 20, D. F.

RESUMEN

Se presentan criterios para determinar costos esperados de daños por unidad de tiempo y distribuciones probabilísticas de costos acumulados en lapsos dados. Tales criterios se basan en modelos estocásticos sobre ocurrencia de sismos y sobre distribuciones condicionales de intensidad, así como en relaciones entre la última variable y costo esperado de daños. En ausencia de observaciones directas, este último tipo de relaciones se establece con base en estudios sobre respuesta dinámica para cada intensidad y costos de daños como función de deformaciones de entrepiso.

INTRODUCCION

Para la formulación de normas óptimas de diseño y construcción, el establecimiento de primas de seguro y la toma de decisiones con respecto a refuerzo de construcciones existentes, es necesario estimar costos esperados de daños causados por sismo en términos de las características de estructuras y acabados en dichas construcciones. Tal estimación implica la determinación de un modelo estocástico relativo a los tiempos de ocurrencia y características de sismos en cada sitio, la estimación de los costos esperados de daños asociados a cada intensidad y la integración de las contribuciones a los costos esperados totales de todos los sismos que ocurran. Como la historia sísmica futura es incierta, los costos de daños sólo pueden estimarse en forma probabilística, aun en caso de conocer determinísticamente las características de cada construcción y los costos de daños para una intensidad dada. Para los fines citados al principio de este párrafo interesa conocer, entre otros conceptos, costos esperados de daños por unidad de tiempo y distribuciones de probabilidades de pérdida máxima en un evento y de costos acumulados de daños en lapsos dados.

Para ciertos tipos de edificios los costos esperados de daños asociados a intensidades dadas pueden estimarse a partir de los valores observados de dichos costos en diversos temblores. Sin embargo, tal tipo de información es escasa, y tanto en la estimación de daños en edificios típicos

como en la correspondiente a construcciones específicas suele ser necesario acudir a determinaciones indirectas de costos de daños, a partir de estimaciones de respuesta dinámica y de relaciones semiempíricas entre deformaciones y costos de daños. Este planteamiento se adopta en este trabajo, no sin reconocer los amplios márgenes de incertidumbre que caracterizan a la práctica presente de ingeniería, por lo que respecta a la estimación de resistencias estructurales, contribución de elementos no estructurales a la resistencia, deterioro de rigidez y resistencia por influencia de cargas cíclicas, y respuestas estructurales a partir de curvas carga-deformación.

Los costos esperados de daños por unidad de tiempo son función de la frecuencia media de excedencia de cada intensidad, y son insensibles a otros parámetros del modelo estocástico de la sismicidad. La distribución de la pérdida máxima en un evento y la de los costos acumulados de daños en lapsos dados dependen, además, de la distribución de los tiempos de espera entre eventos. Por simplicidad, en este trabajo se adopta la hipótesis de que en un sitio dado la ocurrencia de temblores con intensidades por encima de un valor dado constituye un proceso de Poisson. Tal hipótesis es adecuada en general para tomar decisiones de diseño de construcciones nuevas, pero puede ser poco realista para tomar dichas decisiones en aquellas zonas en donde se han descubierto relaciones más o menos sistemáticas entre los tiempos de ocurrencia de eventos importantes, o cuando se avizoran en el futuro próximos niveles especialmente altos de actividad, tal como ocurre inmediatamente después de un temblor de gran magnitud o cuando existe información para suponer la inminencia de tal evento.

SISMICIDAD

De la información estadística se concluye que los temblores tienden a ocurrir en enjambres, agrupándose tanto en el tiempo como en el espacio. Tal afirmación contradice la hipótesis de proceso de Poisson y no solo es válida cuando se consideran las réplicas y los movimientos premonitores de temblores importantes, sino también cuando dichos eventos menores se eliminan de los registros de actividad sísmica.

Algunos modelos probabilísticos diferentes del de Poisson se han deducido a partir de datos estadísticos, pero los lapsos de observación se limitan al orden de una o dos décadas (Vere-Jones, 1966; Shlien y Toksözs, 1970), y contienen muy pocos temblores grandes. Para estos últimos es razonable suponer menor correlación espacial y temporal que para eventos pequeños y moderados, y por ende aceptar el modelo de Poisson, pero los datos estadísticos en general no bastan para confirmar o refutar tal hipótesis. Los modelos conceptuales sobre el proceso de acumulación y liberación de energía de deformación en ciertas zonas de la corteza terrestre, en conjunto con la historia sísmica de dichas zonas, han conducido a la formulación de modelos que implican la existencia de tendencias sistemáticas en la actividad regional o local. Un ejemplo es la teoría de las lagunas de sismicidad (seismic gaps) planteada por Kelleher *et al* (1973) para describir la sismicidad de diversas zonas de la corteza, pero que no ha sido desarrollada ni evaluada dentro de un marco probabilístico formal. Dada la escasez de datos estadísticos sobre magnitudes altas en unidades tectónicas dadas, la formulación de modelos mejorados sobre sismicidad deberá probablemente

basarse en planteamientos de tipo bayesiano que a los pocos datos disponibles añadan hipótesis iniciales basadas en modelos mecánicos idealizados de las fuentes sísmicas (Burridge y Knopoff, 1967; Veneziano y Cornell, 1973). Por simplicidad, en este trabajo el número de temblores con magnitud mayor o igual que M que se generan en una fuente sísmica dada se representa por un proceso de Poisson, definido por $\lambda(M)$, la tasa de ocurrencia de eventos por unidad de volumen y por unidad de tiempo. La determinación de la sismicidad local se convierte en este caso en la estimación de $\lambda(M)$. Los criterios y problemas asociados con tal estimación han sido descritos en otros trabajos (Esteve, 1975, 1976).

La transformación de los modelos sobre actividad de las fuentes sísmicas cercanas a un sitio de interés en modelos sobre ocurrencia de diversas intensidades en dicho sitio implica el uso de relaciones entre magnitud (o momento sísmico), intensidad (expresada en términos de parámetros directamente relacionados con la respuesta estructural) y distancias entre sitio y fuente. Tales relaciones son semi-empíricas y se basan en los registros de sismos obtenidos para una variedad de condiciones locales, trayectorias de las ondas y mecanismos focales, y la incertidumbre asociada con sus predicciones influye significativamente en las estimaciones de riesgo sísmico (Esteve, 1977a). Parte de la incertidumbre en cuestión está constituida por desviaciones sistemáticas asociadas con la influencia de condiciones locales, pero la naturaleza de tales desviaciones sólo se ha establecido con precisión para ciertas condiciones extremas, tales como aquellas en que se tienen mantos superficiales de espesor significativo constituidos por material mucho menos rígido que el subyacente (Ruiz, 1977; Esteve, 1977a). Diversos estudios analíticos y observaciones de campo hacen ver las desviaciones sistemáticas asociadas con accidentes topográficos o irregularidades de la geología subsuperficial, y se han formulado criterios para obtener relaciones recurrencia-intensidad que tomen en cuenta las condiciones locales, a partir de curvas del mismo tipo para condiciones estándar (terreno firme y plano) y de distribuciones de probabilidades de las relaciones entre intensidades ocurridas en un sitio dado y las que habrían tenido lugar en condiciones estándar (Apéndice). La implantación de tales criterios está supeditada a la obtención de las distribuciones de probabilidades citadas, y estas hasta la fecha sólo se han establecido para un conjunto limitado de condiciones típicas.

INTENSIDADES, RESPUESTAS ESTRUCTURALES Y DAÑOS

Cuando se proyectan estructuras, la predicción de daños se basa en las distribuciones probabilísticas previstas de resistencias, rigideces y otras propiedades mecánicas; se parte de la capacidad para predecir respuesta estructural a partir de intensidad, y costos de daños a partir de la primera. Pero los criterios adoptados en estas predicciones carecen de verificación empírica suficiente, en particular la relación entre respuesta y daños: aun conociendo desplazamientos laterales y fuerzas internas, no contamos con información suficiente para estimar daños estructurales, ni para definir si una construcción cuya resistencia lateral se ha agotado teóricamente, quedará en pie, aunque inútil, o sufrirá colapso. La diferencia en consecuencias puede ser apreciable. Para fines de determinar primas de seguro, se requieren datos sobre costos medios de daños para cada intensidad para di-

versos tipos de estructuras, criterios de diseño y niveles de control de calidad. Tal es la información presentada por Whitman *et al* (1973) y Wong (1975). Cuando se plantea la toma de decisiones sobre reparación o refuerzo de una estructura específica, la estimación de respuesta y daños habrá de hacerse a partir de las características mecánicas y geométricas de dicha estructura (Blume *et al*, 1975), teniendo en cuenta las incertidumbres asociadas con la estimación de las características en cuestión y con las relaciones adoptadas para predecir respuesta y daños en términos de ellas. La influencia de daño acumulado puede ser decisiva.

En este trabajo el énfasis se pone en la predicción de daños en lapsos dados, bajo la hipótesis de que es posible predecir el daño para una intensidad dada en términos de propiedades mecánicas y respuesta estructural. Se desprecia la influencia del daño acumulado.

Entre los daños más usuales causados por sismos en construcciones se cuentan fallas de elementos estructurales sometidos a esfuerzos superiores a su capacidad, desplazamientos excesivos que afectan a acabados y elementos no estructurales, fallas de cimentación (debidas con frecuencia a momentos de volteo no previstos en el diseño), asentamientos diferenciales, licuación del suelo de cimentación, e impacto entre edificios contiguos. En general, las dos causas citadas en primer término son responsables de la mayor parte de los daños, y por ello concentraremos en ellas nuestra atención. Los casos en que son de esperarse daños considerables debidos a falla local o general del terreno de cimentación ameritan tratamiento diferente.

RELACIONES DAÑO-DEFORMACION

Villaverde y Esteva (1974) proponen que los daños sufridos por un edificio se cuantifiquen en función del costo de los elementos dañados del edificio, obteniéndose estos en términos de las deformaciones estimadas para cada intensidad. A estos costos habría que añadir los que afecten a los contenidos, tales como mobiliario, equipo y personas, y los indirectos debidos al cese de actividades en el edificio: reducciones en la producción de bienes y servicios. Los costos de daños se obtendrán como fracción del costo inicial del edificio y está implícita la hipótesis de que la relación entre el costo de un daño específico y el total de cada inmueble no varía con el tiempo.

Si se ignoran los efectos de carga repetida, es posible establecer relaciones entre deformación de entrepiso y daño. A partir de unos cuantos datos de laboratorio y de calibración con la práctica usual de diseño, Villaverde y Esteva (1974) proponen las relaciones que siguen entre deformaciones angulares y costos esperados de daños.

a) Acabados

Se adoptaron gráficas como la de la fig 1, definidas por las relaciones siguientes:

$$D = 0 \quad \text{para } \gamma < \gamma_0 \quad (1a)$$

$$D = (\gamma - \gamma_0) / (\gamma_1 - \gamma_0) \quad \gamma_0 \leq \gamma < \gamma_1 \quad (1b)$$

$$D = 1 \quad \gamma_1 \leq \gamma \quad (1c)$$

En estas ecuaciones

γ = deformación angular del elemento considerado

γ_0 = deformación angular para la cual empieza a haber daños en acabados

γ_1 = deformación angular que produce daño total en acabados.

D = daños de un elemento, expresado en fracción de su costo inicial

Villaverde y Esteva (1974), clasifican a los acabados en frágiles y dúctiles y proponen el uso de los valores siguientes:

Acabados	γ_0	γ_1
Frágiles	0.002	0.006
Dúctiles	0.006	0.012

b) Muros

Se adoptan las expresiones 1, pero ahora γ_0 y γ_1 se hacen depender de la deformación característica γ_y , o de cedencia (aquella a la que corresponde una reducción brusca de la rigidez en la curva carga-deformación al primer ciclo de carga), de la ductilidad límite α , y del parámetro β , que determina un intervalo de deformaciones posteriores a γ_y para el que los costos de daños son despreciables (agrietamientos pequeños, que no se reparan). Las expresiones para γ_0 y γ_1 son las siguientes:

$$\gamma_0 = \gamma_y \{1 + \beta(\alpha - 1)\} \quad (2a)$$

$$\gamma_1 = \alpha \gamma_y \quad (2b)$$

Los parámetros γ_y , α y β deben determinarse experimentalmente para diversos tipos de muro. Para los materiales más usuales en la ciudad de México se consideran adecuados los siguientes valores: $\alpha = 4$ si los muros están confinados; en caso contrario, $\alpha = 2$. En todos los casos, $\beta = 0.25$. γ_y se estima a partir de la capacidad de cedencia en corte τ_y y el módulo de rigidez G :

$$\gamma_y = \tau_y / G \quad (3)$$

c) Marcos estructurales

Se adopta la forma siguiente (fig 2)

$$D = 0 \quad \text{para } \gamma < \gamma_0 \quad (4a)$$

$$D = (\gamma - 0.65\alpha\gamma_y)^2 / (0.1225 \alpha^2 \gamma_y^2) \quad \gamma_0 \leq \gamma < \gamma_1 \quad (4b)$$

$$D = 1 \quad \gamma_1 \leq \gamma \quad (4c)$$

Aquí,

$$\gamma_0 = 0.65\alpha\gamma_y$$

$$\gamma_1 = \alpha\gamma_y$$

α tiene el mismo significado que en el caso de muros. Para las construcciones de marcos de concreto reforzado en la ciudad de México puede tomarse igual a 8.

γ_y se estima a partir de la capacidad lateral de fluencia (V_y), la rigidez lateral de entrepiso (K_y = fuerza cortante/desplazamiento relativo) y la altura del mismo:

$$\gamma_y = V_y / (k_y h) \quad (5)$$

En la fig 3 se comparan valores de daños expresados en términos de desplazamientos de entrepiso, obtenidos por Wong (1975) a partir de datos del temblor de San Fernando, 1971, con los predichos por el criterio propuesto. La línea continua es el ajuste a las observaciones de campo, y las líneas discontinuas constituyen los costos predichos en estructura y acabados. Tanto la dispersión en los datos de campo como las discrepancias entre observaciones y valores predichos son considerables.

INTENSIDAD, COSTO Y RECURRENCIA

Para una intensidad dada, el costo esperado de daños debe obtenerse a partir de estudios sobre respuesta estructural que tomen en cuenta las características no lineales del sistema. En teoría, la predicción de respuesta debería basarse en la integración numérica, paso a paso, de las ecuaciones de movimiento para un conjunto de temblores de la misma intensidad, en la determinación de los daños en cada elemento para cada temblor y en el cálculo del daño total medio para el conjunto de movimientos. Tal proceder en general no se justifica, por el costo excesivo de los análisis paso a paso, y porque la precisión de los resultados que con ello se obtienen es menor que la que suele suponerse, en vista de la dificultad para determinar la respuesta no lineal ante varias componentes simultáneas del movimiento del terreno, y la poca información experimental disponible sobre comportamiento en tales condiciones y sobre la influencia del deterioro. Una alternativa aceptable para estructuras que no posean variaciones bruscas en masas, rigideces y resistencias, consiste en estimar la respuesta no lineal a partir de análisis modales para espectros elastoplásticos correspondientes a ductilidades o relaciones de fluencia (capacidad lateral disponible dividida entre capacidad lateral requerida para respuesta elás-

tica) congruentes con la intensidad considerada y la capacidad del sistema. Para ello habrán de tenerse en cuenta los datos sobre ductilidad desarrollada en un sistema de varios grados de libertad en relación con la ductilidad que se esperaría para un sistema de un grado de libertad diseñado para el mismo espectro (Esteve, 1977b).

A partir de relaciones intensidad-recurrencia y de costos esperados de daños, como fracción del costo total, que corresponden a cada intensidad, es inmediata la determinación de relaciones costo-recurrencia, es decir, número medio de eventos por unidad de tiempo para los que el costo de daños excede de un valor dado. La fig 4 muestra de manera esquemática curvas típicas costo-recurrencia para el caso en que las propiedades estructurales son inciertas y para aquellos en que la resistencia ante los diversos estados límite puede predecirse determinísticamente. En el último caso, v_D representa la tasa media de excedencia de intensidades mayores que la mínima para que se produzca algún daño; v_F es la tasa de colapso o pérdida total.

COSTO ESPERADO DE DAÑOS POR UNIDAD DE TIEMPO

Sea $f_C(\cdot)$ la densidad de probabilidades del costo de daños en un evento cualquiera con intensidad mayor o igual que y_0 , tal que la probabilidad de daños para intensidades menores es nula o despreciable. Si la relación entre intensidad y costo se expresa como $y = y(c)$, se obtiene

$$f_C(c) = f_Y\{y(c)\} dy/dc \quad (6)$$

en donde $f_Y(\cdot)$ es la densidad de probabilidades de la intensidad cada vez que ocurre un sismo con intensidad mayor o igual que y_0 . Sea v_0 la tasa de ocurrencia de tales sismos. El número medio de temblores que producen daños en el intervalo $(c, c+dc)$ en la unidad de tiempo es $-dv(c)$ (el símbolo menos obedece a la forma decreciente de v con c), y es también igual a v_0 multiplicado por la probabilidad de que el daño esté comprendido en el intervalo citado; es decir,

$$-dv(c) = v_0 f_C(c) dc \quad (7)$$

de donde

$$f_C(c) = (-1/v_0) dv/dc \quad (8)$$

La esperanza del costo de daños en un evento cualquiera está dada por

$$\bar{c} = \int_0^\infty c f_C(c) dc = (-1/v_0) \int_{v_0}^0 c dv(c) \quad (9)$$

y la esperanza del costo por unidad de tiempo resulta

$$C_0 = \bar{c} v_0 = - \int_{v_0}^0 c dv(c) \quad (10)$$

que equivale a

$$C_0 = v_F - \int_{v_0}^{v_F} c dv(c) \quad (11)$$

Cambiando la variable de integración

$$C_0 = v_F - \int_0^1 c \frac{dv}{dc} dc \quad (12)$$

Integrando por partes, y sustituyendo extremos de integración,

$$C_0 = \int_0^1 v(c) dc \quad (13)$$

Es decir, C_0 es igual al área bajo la curva costo-recurrencia

DISTRIBUCION DE PROBABILIDADES DE COSTOS DIVERSOS DURANTE LAPROS DADOS

Los costos esperados de daños calculados como se indica arriba incluyen la contribución de eventos excepcionales que corresponden a periodos de recurrencia muy largos en un sitio dado. En vista de que muchas de las decisiones relacionadas con riesgo sísmico se basan en los eventos cuya probabilidad de ocurrencia es significativa en lapsos de unas cuantas décadas, se considera de utilidad estimar la distribución de probabilidades de costos acumulados en lapsos dados. Para determinar estos valores es necesario conocer las probabilidades de ocurrencia de temblores con intensidades dadas, y de los costos de daños asociados a cada intensidad.

La probabilidad de que $\Sigma D(t)$, el costo de daños acumulados en un lapso t , exceda a una cierta cantidad d , puede expresarse como sigue

$$P[\Sigma D(t) > d] = P[n = 1]P[D_1 > d] + P[n = 2]P[D_1 + D_2 > d] + \dots \quad (14)$$

Aquí, n es el número de temblores que pueden presentarse durante el lapso t y D_i el daño producido por el temblor i .

Si la expresión anterior se normaliza con respecto a tC_0 , costo esperado en el lapso t , se obtiene

$$P[(\Sigma D(t)/tC_0) > y] = \sum_{j=1}^{\infty} P[n = j] P[(\sum_{i=1}^j D_i/tC_0) > y] \quad (15)$$

Si la ocurrencia de temblores se representa como un proceso de Poisson, se tiene

$$P[n = j] = e^{-tv_0} (tv_0)^j / j! \quad (16)$$

La distribución probabilística del daño condicionada a la ocurrencia de una intensidad mayor o igual que y_0 depende del valor que arbitrariamente se asigne a esta última variable. Villaverde y Esteva (1974) estimaron los daños esperados en diversos edificios típicos de características determinísticas para diversas intensidades, y dedujeron la distribución probabilística del daño en un evento cualquiera aplicando las ecs 6 y 8. Mediante una selección adecuada de y_0 , los autores citados ajustaron a la distribución probabilística citada una función gamma (fig 5), definida como sigue:

$$P[(C/tC_0) \leq y] = \frac{1}{\Gamma(r)} \int_0^{\lambda y} u^{r-1} e^{-u} du \quad (17)$$

Aquí,

C = costo de daños ante la ocurrencia de un evento

C_0 = costo esperado de daños por unidad de tiempo

$\Gamma(r)$ = función gamma

Los parámetros de la distribución gamma adoptada deben ajustarse de modo que representen de la manera más precisa posible, congruente con la simplicidad buscada, las probabilidades de excedencia de daños del mismo orden que los daños medios, cuando dichas probabilidades corresponden a periodos de recurrencia de unas cuantas décadas. El criterio de ajuste puede consistir en respetar el costo medio de los daños en cada temblor y lograr las menores discrepancias en las ordenadas de las curvas original y ajustada en el intervalo de costos comprendido entre 0.04 y 0.9 del medio. La primera condición se logra si se hace

$$r/\lambda = E(C/tC_0) = \bar{C}/tC_0 \quad (18)$$

es decir,

$$\lambda = rtC_0/\bar{C} = rtv_0 \quad (19)$$

y r se determina imponiendo la segunda condición de ajuste, como se muestra en la fig 5, en donde las curvas de trazo interrumpido son distribuciones gamma de media unitaria para varios valores del parámetro r y las de trazo continuo las funciones de distribución de costos en estructuras analizadas en este trabajo. Por inspección, en este caso se seleccionó $r = 1$.

Por otra parte, si la distribución de probabilidades del costo de daños para cada evento se representa por medio de la distribución de la ec 17, de las propiedades de la distribución se puede escribir

$$P[(C_1 + C_2 + \dots + C_i)/tC_0 \leq y] = \frac{1}{\Gamma(ri)} \int_0^{\lambda y} u^{ri-1} e^{-u} du \quad (20)$$

en donde el miembro de la izquierda representa la probabilidad de que el costo normalizado de daños acumulados en i eventos sea menor o igual que y .

De las ecs 15, 16, 19 y 20 se obtiene

$$P[(\Sigma D(t)/tC_0) > y] = \sum_{i=1}^{\infty} \left[\frac{(e^{-\beta})^i}{i!} \left\{ 1 - \frac{1}{\Gamma(ri)} \int_0^{r\beta y} u^{ri-1} e^{-u} du \right\} \right] \quad (21)$$

en donde $\beta = tv_0$

En la fig 6 se muestran distribuciones de probabilidades de costos acumulados en lapsos dados, para diversos valores de $\beta = tv_0$. A menor valor de este parámetro el daño acumulado se predice con mayor incertidumbre.

COMENTARIOS FINALES

La metodología aquí esbozada permite tratar la predicción de costos de daños dentro de un marco probabilístico formal. Como suele ocurrir en casos ingenieriles sus resultados serán tan precisos como la información de campo disponible. Este proceso ha servido de base a estudios sobre daños, con fines de fijar primas de seguros y para la toma de decisiones relativas a refuerzo de estructuras en zonas sísmicas. Estudios futuros deberán prestar atención a la determinación de costos de daños en estructuras reales que se hayan visto sujetas a temblores, a la estimación de resistencias estructurales y a la predicción de la influencia de daños causados por temblores previos, entre otros conceptos.

REFERENCIAS

- Blume and Associates, 1975. "Effects prediction guidelines for structures subjected to ground motion". San Francisco, California 94105.
- Burridge, R. and Knopoff, L., 1967. "Model and theoretical seismicity". Bull. Seismological Soc. Am., 57, 341-371.
- Esteva, L., 1975. "Geology and probability in the assessment of seismic risk". Instituto de Ingeniería, UNAM. Reporte E13.
- Esteva, L., 1976. "Seismicity". Capítulo 6 del libro *Seismic risk and engineering decisions*, editado por Rosenblueth, E. y Lomnitz, C., Elsevier, Amsterdam.
- Esteva, L., 1977a. "Microzoning: models and reality". Proc. Sixth World Conference on Earthquake Engineering, New Delhi.
- Esteva, L., 1977b. "Ductilidad y comportamiento sísmico". Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, No 18.
- Kelleher, J., Sykes, L. and Oliver, J., 1973. "Possible criteria for predicting earthquake locations and their application to major plate boundaries of the Pacific and the Caribbean". J. Geophys. Res., 78 (14): 2547-2585.
- Ruiz, S., 1977. "Influencia de las condiciones locales en las características de los temblores", Instituto de Ingeniería, UNAM. Reporte 387.
- Shlien, S., and Tokzözs, M.N., 1970. "A clustering model for earthquake occurrences". Bull. Seismological Soc. Am. 60 (6), 1765-1787.
- Veneziano, D., and Cornell, C. A., 1973. "Earthquake models with spatial and temporal memory for engineering seismic risk analysis". Mass. Inst. Technol., Dept. Civ. Eng.
- Vere-Jones, D., 1966. "Stochastic models for earthquake occurrence", J. R. Stat. Soc., 32 (1), 1-45.
- Villaverde, R. y Esteva, L., 1974. "Costos probables de daños causados por temblores en construcciones", Instituto de Ingeniería, UNAM. Informe a la Asociación Mexicana de Instituciones de Seguros.

Whitman, R. V., Hong, S. T. and Reed, J. W., 1973. "Damage statistics for high rise buildings in the vicinity of the San Fernando earthquake". Mass Inst. Technol., Dep. Civ. Eng. Report R73-24.

Wong, E. H., 1975. "Correlations between earthquake damage and strong ground motion". Mass. Inst. Technol., Dep. Civ. Eng. Report R75-23.

APENDICE

Influencias de condiciones locales en $v(y)$

Supóngase que U (variable aleatoria) representa la relación entre la intensidad de un temblor cualquiera en el sitio de interés, teniendo en cuenta la influencia de las condiciones locales, y la que el mismo temblor habría tenido para condiciones estándar. Si U es independiente de la intensidad y su distribución de probabilidades está dada por $f_U(\cdot)$, entonces $v(y)$, la tasa media de ocurrencia por unidad de tiempo de temblores con intensidad mayor o igual que y puede obtenerse a partir de $v_0(y)$, la tasa que se obtendría para condiciones estándar, como sigue

$$v(y) = -\int_0^\infty \frac{\partial v_0(\eta)}{\partial \eta} P[U > y/\eta] d\eta \quad (A1)$$

Integrando por partes, esta ecuación se convierte en la siguiente

$$v(y) = \int_0^\infty v_0(y/\xi) f_U(\xi) d\xi \quad (A2)$$

en donde $f_U(\cdot)$ es la función de densidad de probabilidades de U .

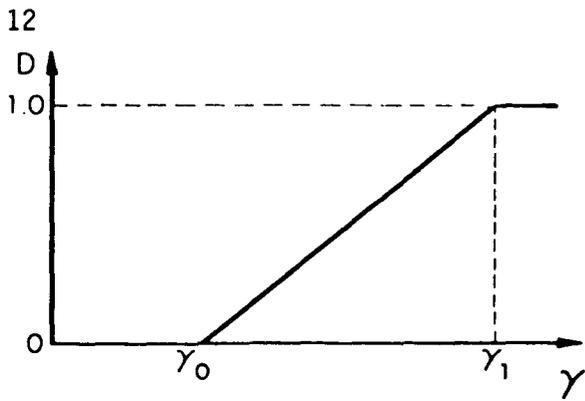


Fig 1. Relación daño - deformación en muros y acabados

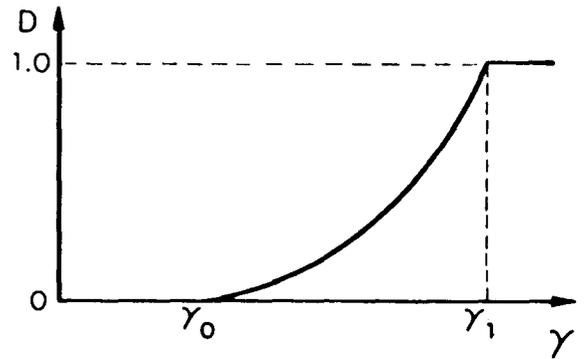


Fig 2. Relación daño - deformación en marcos

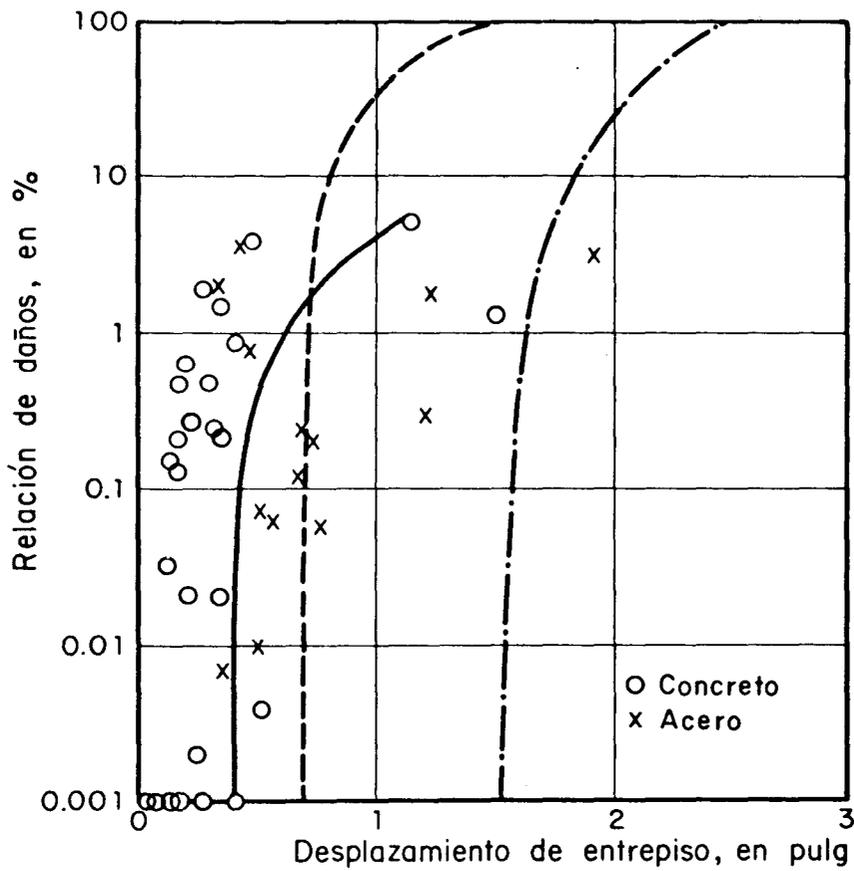


Fig 3. Relaciones daño - deformación en edificios

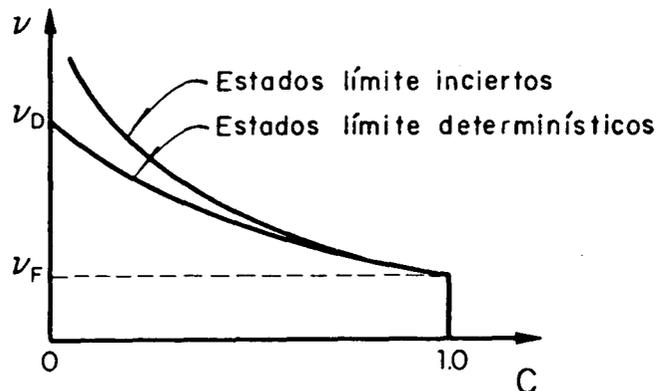


Fig 4. Curvas típicas frecuencia - costo de daños

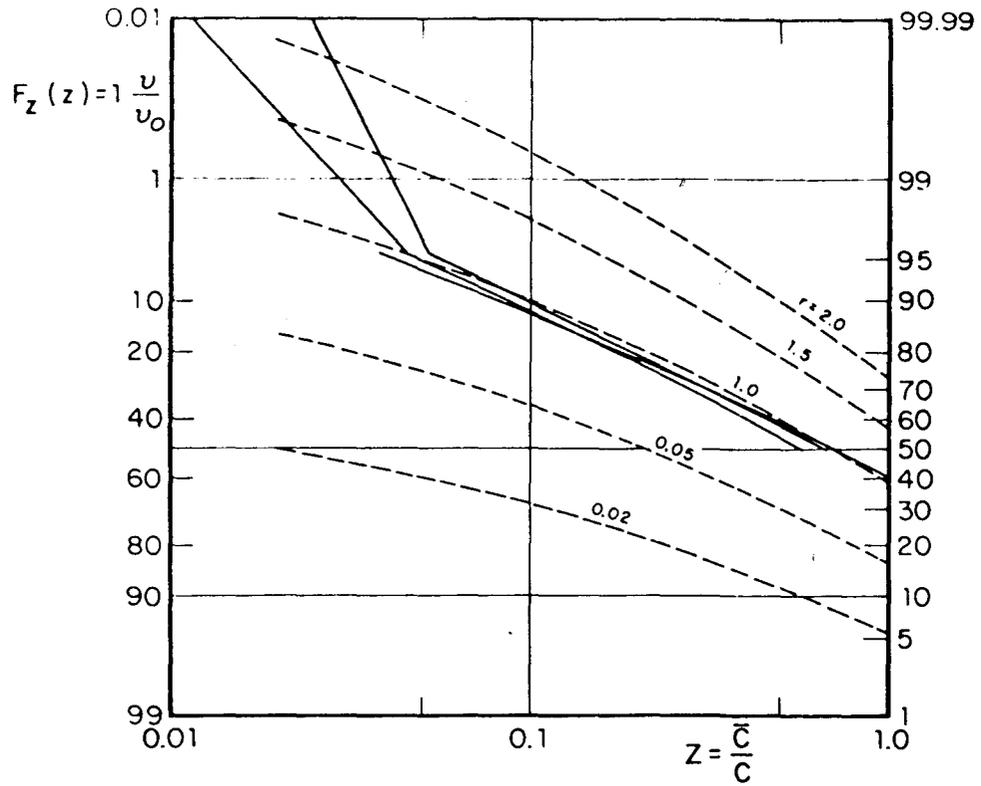


Fig 5. Ajuste de la distribución de probabilidades del costo de daños en un evento

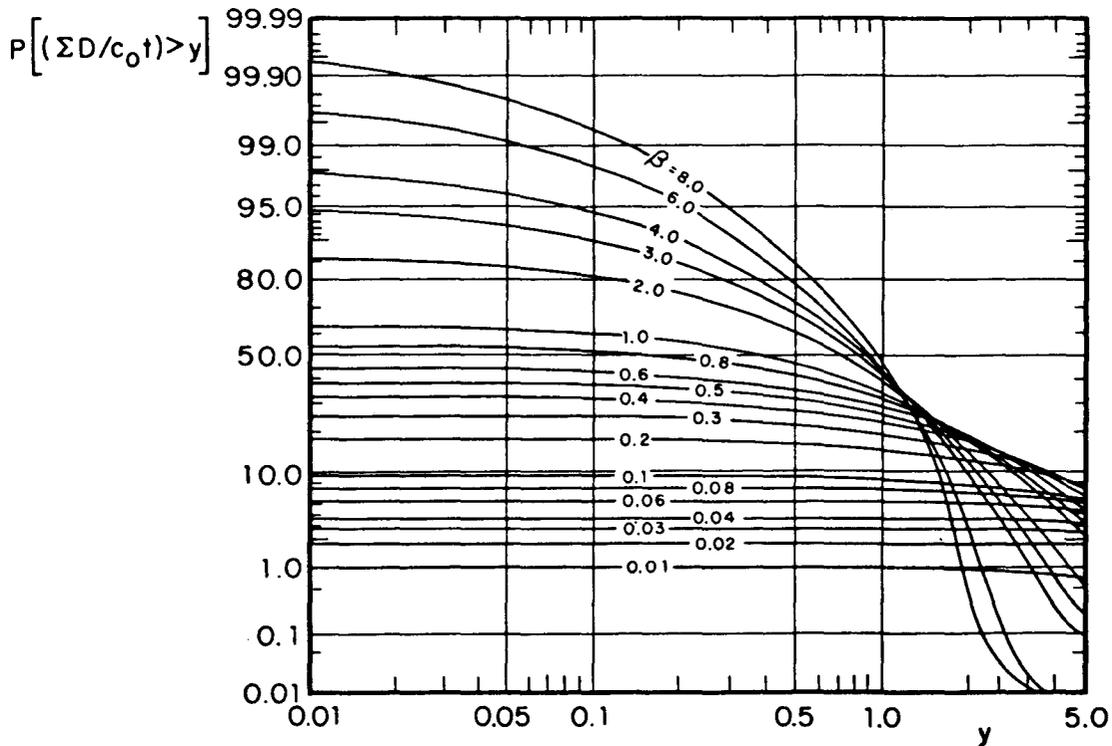


Fig 6. Distribución probabilística de daños acumulados