

## PERDIDAS ESPERADAS EN LOS EDIFICIOS CAUSADAS POR TERREMOTOS

JOSÉ GRASES\*

*El autor José Grases, profesor de la Universidad Central de Venezuela, presenta en este artículo, aparecido en lengua inglesa en la publicación «The Geneva Papers on Risk and Insurance», el desarrollo de una metodología para el cálculo de pérdidas directas por daños materiales en edificios como consecuencia de terremotos:*

*Desde el punto de vista científico, este trabajo presenta una importante convalidación empírica, al haberse comprobado un cierto ajuste entre los datos derivados del método empleado y los resultados reales acontecidos en los edificios afectados por el terremoto de Caracas de 1967. De otra parte, como cualquier metodología aplicada a la predicción de pérdidas, este tipo de análisis presenta la utilidad de ayudar al reconocimiento e identificación de los peligros derivados de la ocurrencia de terremotos en áreas de susceptibilidad sísmica.*

En las zonas urbanas densamente pobladas, las pérdidas causadas por terremotos pueden alcanzar niveles catastróficos. Las pérdidas directas, tales como daños en los edificios e instalaciones, normalmente son consideradas independientemente de las pérdidas indirectas y consecuenciales del terremoto, tales como inundaciones, fuegos, etc. Respecto a las pérdidas directas, los daños en los edificios suelen preverse y contemplarse en normas especiales de diseño y de resistencia de la edificación a terremotos. De esta forma, se espera que los edificios proyectados y construidos de acuerdo a las normas establecidas puedan soportar esfuerzos intensos en la zona de deformación no elástica bajo la acción de un terremoto de una determinada intensidad prevista, en áreas urbanas localizadas en zonas sísmicas sujetas a daños más o menos generalizados, de mayor o menor importancia económica, según las observaciones experimentales contrastadas.

En aras de la simplicidad, los edificios no construidos de acuerdo con ciertas normas, o que no las cumplen, deben considerarse bajo un cierto índice de corrección a los efectos de evaluar los correspondientes valores de sus parámetros de diseño, tales como resistencia a esfuerzos cortantes, rigidez y ductilidad.

Además conviene recordar que, en las normas que establecen los criterios de edificación, se admite la posibilidad de que los movimientos del suelo sobrepasen en algún momento de la vida del edificio los valores previstos, aunque la probabilidad de que esto suceda pueda ser considerada suficientemente pequeña.

De todo lo anteriormente dicho se deduce que, si se produce una fuerte sacudida de tierra en zonas urbanas a causa de un terremoto, la cuan-

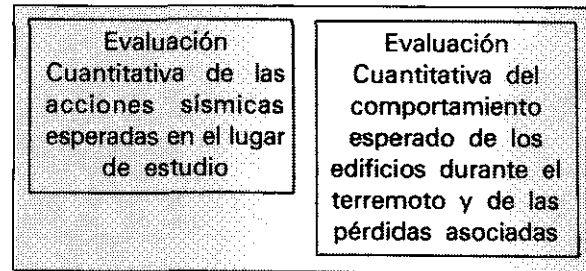
\* Profesor en la Universidad Central de Venezuela, Instituto de Materiales y Modelos Estructurales, IMME, Facultad de Ingeniería.

tía de las pérdidas debidas a daños y/o derrumbamiento de edificios puede ser muy importante. Para su evaluación obviamente es necesario tener en cuenta tanto la intensidad del seísmo como el comportamiento esperado de los edificios, así como sus respectivas fluctuaciones.

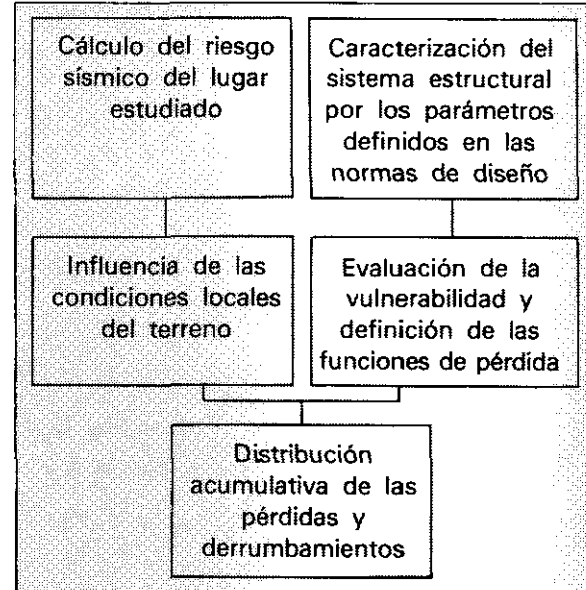
Es por ello que este artículo se concentra en el desarrollo de un método cuantitativo para el cálculo de las pérdidas directas debidas a daños materiales producidos en edificios como consecuencia de terremoto, y su aplicación a efectos de comprobación, al conjunto de edificios afectados por el terremoto de Caracas de 1967. La principal contribución de todo ello cabe resumirla en tres aspectos:

- a) El desarrollo de un *procedimiento* general para el *cálculo de las pérdidas* por terremoto, que sustituya a las fórmulas basadas en las muy conocidas matrices de probabilidad, cuyo valor es limitado cuando se trata de edificios de varios pisos.
- b) La posibilidad de calcular las *pérdidas esperadas en un solo edificio* o en un gran número de ellos, de diferentes tipos, alturas, resistencias, fechas de construcción y características geotécnicas del terreno.
- c) La identificación de *situaciones críticas* que pueden ser el origen de pérdidas catastróficas en áreas urbanas.

Cuadro I



Cuadro II



## METODO GENERAL PARA EL CALCULO DE PERDIDAS DIRECTAS

En el problema general de predecir las pérdidas en los edificios producidas por la acción de un terremoto en un lugar dado, existen dos grupos de parámetros, tal como se expresa en el Cuadro I.

Las cuestiones del Cuadro I requieren la consideración de algunos problemas concretos. Por tanto, ambos aspectos pueden extenderse en la forma indicada en el Cuadro II.

A fin de que el método desarrollado tenga en cuenta las variables que influyen decisivamente en las pérdidas esperadas de un edificio dado, cada uno de los cuadros anteriores se ha dividi-

do en sus parámetros fundamentales. Como se podrá ver, en algunos casos se han simplificado las asunciones con objeto de facilitar la modelización de interacción entre los parámetros, prefiriendo la utilización de modelos sencillos antes que ignorar la influencia de algunos parámetros.

### Acciones sísmicas en el lugar estudiado

Dada una posibilidad de que se produzca un terremoto, la incertidumbre asociada a la variabilidad de los movimientos máximos esperados del terreno se incorpora normalmente a la evaluación

del riesgo sísmico en un lugar dado. Esto lleva al complementario de la función de distribución acumulada  $F_A(a)$  del parámetro en estudio A. Por tanto, si A representa la máxima aceleración del terreno en el lugar estudiado y las probabilidades han sido calculadas sobre una base anual, la probabilidad anual de que exceda de ese valor máximo será:

$$(1) \quad P[A > a] = 1 - F_A(a)$$

A causa de su *relación directa* con el diseño y análisis estructural, para un corrimiento dado referido al punto crítico, los movimientos del terreno se dan normalmente en términos de función de respuesta espectral  $S(a, T, \beta)$ , donde:

a es un valor dado de A.

T es el período fundamental de vibración.

$\beta$  es un factor de amplificación que depende del corrimiento, el período y las condiciones geotécnicas del terreno.

De acuerdo con los tipos actuales, fueron consideradas tres clases de terrenos, asociando a cada uno de ellos una cierta función media  $\beta(T)$ , con  $\beta(T=0) = 1,0$ ; es decir, espectros de respuesta normalizados. Además, dado un valor de T, se considera que el valor  $\beta$  tiene una distribución normal, con un coeficiente de variación del orden de 0,40 (\*). Por último, dejando aparte los efectos de escala, en el método desarrollado ha sido aceptado que la acción del seísmo puede definirse como el producto de dos variables independientes:

$$(2) \quad S(a, T, \beta) = \beta(T) \cdot a$$

luego:

$$(3) \quad P[S \leq s] = P[A \leq a] \cdot P[\beta \leq \beta]$$

Obsérvese que la definición de acciones sísmicas en términos de Escalas de Intensidad (por ejemplo, la Escala de Mercalli Modificada) es útil en las fórmulas menos desagregadas. En tales casos es necesario el uso de información estadística sobre pérdidas dadas en forma de matrices

\* En realidad,  $\beta$  se debe considerar como una distribución truncada; no obstante, esta simplificación no presenta dificultades para el tratamiento matemático posterior.

de probabilidad. Esta alternativa requiere una gran cantidad de datos estadísticos, generalmente, no disponibles ni tan siquiera para los tipos de edificios más corrientes. De hecho, las matrices de daños son puntos concretos de una función continua.

#### Caracterización de la respuesta estructural y situaciones límite

Dada la variedad casi infinita de edificios y de sistemas resistentes posibles en las zonas urbanas, la evaluación de la respuesta de los mismos a los movimientos sísmicos ha sido simplificada por su agrupación dentro de un número limitado de respuestas tipificadas. Aparte de diferencias obvias tales como materiales de la estructura, alturas, valores de reconstrucción, etc., la caracterización de la respuesta tiene en cuenta las tres propiedades siguientes:

- El período natural (fundamental) de la vibración.
- La resistencia del edificio a los movimientos sísmicos.
- La capacidad de absorber y disipar energía en la zona de deformación no-elástica.

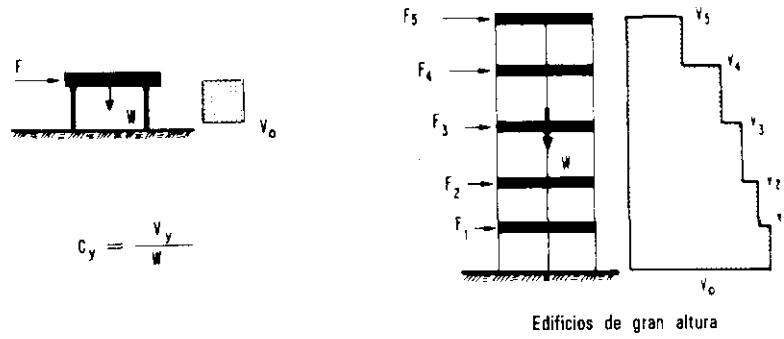
En los edificios actuales la primera de estas propiedades se puede estimar por medio de relaciones empíricas entre el período fundamental de la vibración y la forma del edificio, tal como se hace en las normas de diseño. Las otras dos requieren de abstracciones relativas a los criterios de diseño y los detalles de la estructura. Alguno de estos datos se puede obtener a partir de la fecha del proyecto y de la construcción.

En el Gráfico 1 se ilustran estas dos propiedades:  $C_y$  representa el coeficiente de resistencia sísmica, considerado como un parámetro determinista;  $D_m$  es una variable aleatoria que refleja la ductilidad disponible.

El uso de estos tres parámetros sencillos presenta algunas ventajas:

- Su relación directamente con prescripciones legales o criterios de diseño, independientemente de la edad del edificio.
- La posibilidad de una evaluación cuantitativa del comportamiento esperado del edificio, en

**Gráfico 1. Representación de la resistencia y de la capacidad de disipación de energía del edificio.**



W: Peso de la construcción (carga muerta más carga viva)  
 $V_y$ : Fuerza cortante máxima en la base de la construcción  
 $C_y$ : Coeficiente sísmico

FIGURA 1a - Representación de la resistencia del edificio.

$$D = \frac{\delta}{\delta_y} \quad \text{Ductilidad requerida}$$

$$D_m = \frac{\delta_m}{\delta_y} \quad \text{Ductilidad disponible}$$

$\delta_y$ : Deformación elástica

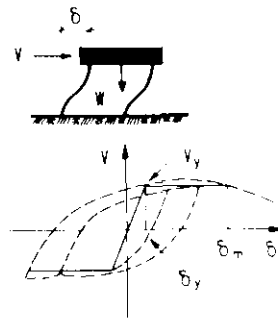


FIGURA 1b - Representación de la capacidad del edificio para absorber y disipar energía sísmica.

términos de estados límite bien definidos, que se expondrán a continuación.

Tres estados límite han sido seleccionados de acuerdo y con relación a las funciones de pérdida de vidas humanas y de daños materiales. El *estado límite 1* es asociado con la deformación de la estructura. El *estado límite 2* se define como aquel en el que la ductilidad requerida  $D$  iguala a la ductilidad disponible  $D_m$ . Es fácilmente demostrable que, dada la hipótesis anterior, la demanda de ductilidad  $D$  varíe según las siguientes expresiones, de acuerdo a la simplificación de modelos asumida:

(4) a) para  $T \leq 0,1$  seg

$$D = \frac{a \beta}{10 C_y T} + 1 - \frac{1}{10 T}$$

(5) b) para  $0,1 \leq T < T^*$

$$D = \mu \frac{a}{C_y} \beta$$

(6) c) para  $T \geq T^*$

$$D = \mu \frac{a}{C_y} \beta \left( \frac{T^*}{T} \right)^p$$

donde  $\mu$  es un factor de corrección que tiene en cuenta el efecto de los altos modos de vibración.

Independientemente de cuáles sean las condiciones del terreno,  $\beta$  se considera como una variable aleatoria y no se tiene en cuenta la variabilidad de  $C_y$  y  $T$ . Por tanto, dado un cierto valor de la aceleración máxima del terreno  $a$  y ciertas características del edificio situado en un terreno

dado ( $C_v$  y  $T$ ), el valor de la ductilidad requerida  $D$  es también aleatorio y su función de densidad de probabilidad  $f_D(d)$  tendrá la misma variabilidad que  $\beta$ . Obsérvese que el estado límite 2 está asociado a daños importantes (estructurales y no estructurales), pero con una escasa probabilidad de derrumbamiento o ruina, es decir, un riesgo pequeño de pérdida de vidas humanas. Algunas normas aceptan explícitamente la posibilidad de que se sobrepase  $D_m$ , siendo tal probabilidad calculada mediante:

$$(7) \quad P[D > D_m] = \int_0^{\infty} [1 - F_D(x)] f_{D_m}(x) dx$$

Esto hace necesario la definición de un *tercer estado límite*, que se define por la condición de inestabilidad, debido a la excesiva ductilidad requerida, pérdida de resistencia u otros efectos secundarios. Esto supone pérdida total y un gran riesgo de pérdida de vidas humanas. Dicho estado se ha llamado también ductilidad última,  $D_u$ , por ser alcanzado el *estado límite 3* cuando  $D \geq D_u$ . A fin de entender mejor el significado y la cuantificación de este estado límite, recordemos algunas limitaciones corrientes en las normas de edificación:

- La ductilidad requerida  $D$  no debe sobrepasar el valor medio disponible  $D_m$ , el cual queda garantizado a través de los valores que se determinan mediante pruebas de laboratorio. A partir de esos mismos valores puede decirse si una estructura tiene una muy pequeña probabilidad de superar una ductilidad requerida, por ejemplo del orden de  $2 D_m$ .
- El desplazamiento  $\Delta$ , incluidos desplazamientos no elásticos, no debe sobrepasar ciertos límites. Para edificios de poca altura, esta norma puede expresarse en la forma:

$$(8) \quad \Delta \leq \frac{T^2 g C_v D}{4 \pi^2 h}$$

donde  $h$  es la altura de un piso a otro, y  $\Delta$  es el desplazamiento admisible. Por tanto, de acuerdo con las limitaciones establecidas el valor máximo que puede alcanzar  $D$  es:

$$(9) \quad D = \frac{4 \pi^2 \Delta h}{T^2 C_v g}$$

- En las normas más recientes se han limitado también los efectos de  $P - \Delta$ . Si  $K'/K$  es la

relación torsión/módulo de elasticidad, entonces se producirá inestabilidad si:

$$(10) \quad D > \frac{1 - K'/K}{(T/2 \pi)^2 g/h - K'/K}$$

Los tres estados límite mencionados anteriormente pueden resumirse en la forma indicada en el Gráfico 2. La zona sombreada entre las áreas de diseño y de fallo es una zona de transición en la que la ductilidad última  $D_u$  es más probable. A menos que fuera posible obtener mejor información, en el método general se acepta que  $D_u$  es una variable aleatoria con distribución normal, que satisface estas dos condiciones:

- a) La probabilidad de que  $D_u$  caiga dentro del área de diseño es del 5%.
- b) La probabilidad de que  $D_u$  caiga dentro del área de fallo según se ha definido es también del 5%.

#### Referencia a las normas y criterios de diseño

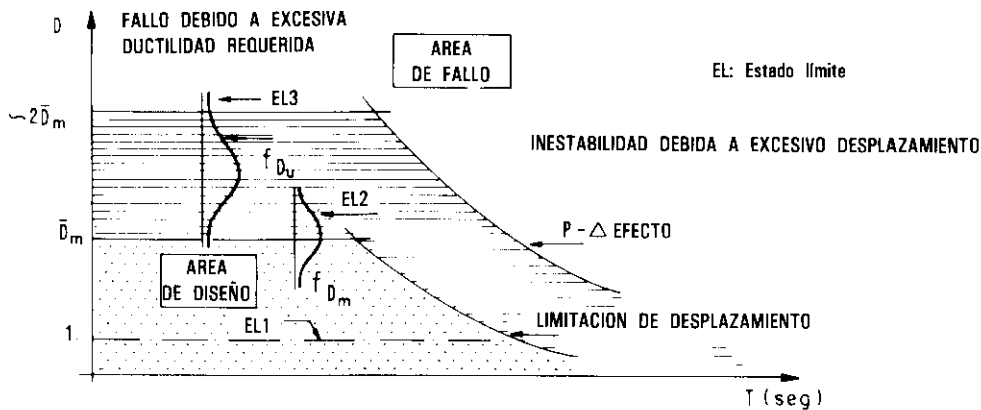
De la tipificación de los estados límite establecidos se deduce claramente que edificios de idéntica forma, dimensiones e incluso resistencias, pueden comportarse de un modo totalmente distinto ante los mismos movimientos sísmicos si tienen diferentes ductilidades  $D_m$ . Por tanto, una vez seleccionada una norma de edificación como referencia, deben introducirse factores de corrección para edificios proyectados y construidos de acuerdo con otros códigos y/o criterios de diseño. En el caso de gran número de edificios esta posibilidad de corrección es muy útil, ya que a lo largo de un cierto tiempo se han podido usar varias normas diferentes.

Los edificios excluidos explícitamente de las normas típicas requieren una consideración especial. Tal es el caso de los edificios de varios pisos construidos con grandes paneles prefabricados. Por otro lado, los edificios con características semejantes, según la definición utilizada anteriormente, pueden agruparse bajo un solo tipo.

#### Funciones de pérdida y vulnerabilidad

Se entiende por vulnerabilidad al riesgo, el grado de pérdida de un elemento o un grupo de ele-

Gráfico 2. Representación de los estados límite.



mentos, debido a la ocurrencia de un fenómeno natural, expresado en una escala desde 0 (no hay pérdida) hasta 1 (pérdida total). Los procedimientos estadísticos empleados normalmente en el cómputo de pérdidas se sustituirán aquí por funciones de pérdida definidas en los términos de los estados límite descritos anteriormente. Estas dependen de la demanda de ductilidad requerida  $D$ , de forma que los aumentos de  $D$  incrementarán los daños y consecuentemente el porcentaje de pérdida  $P$ , tal como se observa cualitativamente en el Cuadro III.

La variación de la pérdida media esperada  $\bar{P}$  con respecto a  $D$  aparece en el Gráfico 3. Para los

sistemas cuya pérdida media esperada aumenta proporcionalmente con respecto a  $D$ , el exponente  $z$  es casi uno. El valor de  $z$  será mayor que uno en los sistemas frágiles. En el Gráfico 4 se presenta la sensibilidad a  $z$ .

Debido al hecho de que es muy poco conocido el comportamiento de esta función, hubo de ajustarse por medio de la función beta:

$$(11) \quad f_p(p) = \frac{1}{B(q; r)} p^{q-1} (1-p)^{r-1}$$

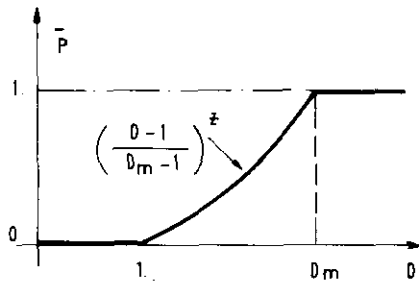
$$(12) \quad \bar{P} = q/(q+r)$$

Cuadro III

PARTE DEL EDIFICIO	DEMANDA DE DUCTILIDAD (D)			
	0	1	$D_m$	$D_v$
<b>Cimientos:</b>				Sin daños
<b>Tipos de elementos resistentes a terremotos:</b>		Fisuras	Deformación	Daños definitivos
<b>Elementos no estructurales:</b>		Fisuras	Roturas	Colapso
<b>Instalaciones:</b>		Daños ligeros		Colapso
<b>Acabados y ornamentos:</b>		Daños ligeros		Destrucción

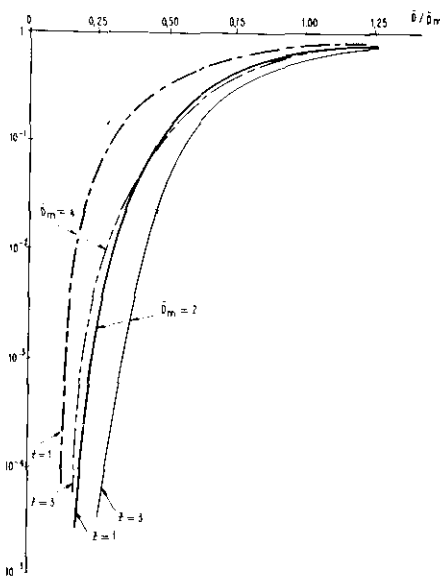
0%    0.1%    1%    10%    50%    100%    ►  
Grados de pérdida

Gráfico 3. Variación de la pérdida media esperada  $\bar{P}$ . Función de pérdida.



$$\begin{aligned} \bar{P}(D) &= 0 \text{ para } D \leq 1 \\ \bar{P}(D) &= 1 \text{ para } D > D_m \\ \bar{P}(D) &= [(D-1)/(D_m-1)]^z \text{ para } 1 < D \leq D_m \end{aligned}$$

Gráfico 4. Sensibilidad de las pérdidas esperadas para diferentes valores de z de la función de pérdida.



donde q y r dependen de D de modo que el coeficiente de variación para la distribución simétrica (q = r) alcance un valor dado de 0,35, fijado arbitrariamente. En otras palabras:

$$(13) \quad CV = \sqrt{\frac{q \cdot r}{(q+r)^2 (q+r+1)}} (q+r)/q$$

por tanto, q + r = 7.

Para poder calcular la pérdida esperada en un edificio dado, conocidas la función de pérdida esperada  $\bar{P}(D)$  y la función de densidad de probabilidad de D para un valor máximo de aceleración del terreno a, es necesario resolver:

$$(14) \quad \int_0^{\infty} \bar{P}(\delta) \cdot f_D(\delta/a) \cdot d\delta$$

donde  $\delta$  es una variable auxiliar que indica D. Obsérvese que  $f_D(\delta/a)$  no es sólo sensible a la aceleración máxima del terreno a, sino también al período fundamental del edificio T, a las condiciones del terreno y al coeficiente sísmico  $C_v$ . La probabilidad de colapso o derrumbamiento se calcula como la probabilidad de que se alcance el estado límite 3:

$$(15) \quad B_c = B[D \geq D_u] = \int_0^{\infty} F_{D_u}(\delta) \cdot f_D(\delta) \cdot d\delta$$

donde:

$$(16) \quad F_{D_u}(\delta) = \int_0^{\infty} f_{D_u}(x) dx$$

El cálculo de  $B_c$  es necesario para la estimación de la pérdida de vidas humanas y otras pérdidas indirectas.

Puesto que se ha supuesto que  $f_D$  y  $f_{D_u}$  están normalmente distribuidas y pueden considerarse estadísticamente independientes, la probabilidad de colapso o derrumbamiento puede calcularse como:

$$(17) \quad B_c = F_u(-\beta^*)$$

donde  $F_u$  tiene una distribución normal estándar y  $\beta^*$  es el llamado índice de fiabilidad:

$$(18) \quad \beta^* = \sqrt{\sigma_{D_u}^2 + \sigma_D^2} / (\bar{D}_u - \bar{D})$$

Adoptándose en la aplicación del método al terremoto de Caracas los valores siguientes:

$$(19) \quad \sigma_{D_u} = 1,25 \quad \sigma_D = 0,38D$$

## APLICACION AL TERREMOTO DE CARACAS DE 1967

Las informaciones de este terremoto procedieron de un gran número de fuentes diversas. Aunque algunas de las informaciones son incompletas y otras poco fiables, ocasionalmente, en estos casos los datos necesarios han sido inferidos como se explica más adelante.

### Información general

Situada en un valle de aluvión a una altura de 900 m sobre el nivel del mar, la Capital de Venezuela se asienta en una zona sísmica reconocida. Cuando ocurrió el terremoto de 1967 se estimaba que la población urbana censada era de un millón y medio de habitantes, que vivían en una zona urbana de alta concentración, con edificios de hasta 30 pisos.

El epicentro del terremoto de grado 6,6 se localizó a unos 50 km de la ciudad, no existiendo registros acelerográficos de este terremoto. En base a los daños en los edificios y al comportamiento de las estructuras, varios autores estimaron los movimientos máximos del terreno. Para esta aplicación se han tomado los valores máximos de aceleración del terreno en el valle: 40 gals (=  $\text{cm}/\text{sg}^2$ ) en la zona de terreno duro (que representa alrededor del 38% de la zona afectada), entre 60 y 80 gals en la zona intermedia (alrededor del 50% de la zona afectada), y hasta 100 gals en los terrenos blandos, que representan el resto de la zona afectada. El valor máximo estimado de la aceleración del terreno en los suelos intermedios es algo menor que el máximo más probable en períodos de 50 años, si se acepta para la zona de Caracas una distribución de los valores máximos del tipo II, siguiendo:

$$(20) \quad P[A > a] = 1 - e^{-(a/23,5)^{-2,46}}$$

El número total de edificios dañados en el valle, intentando casar las diferentes fuentes de información, fue del orden de 2.500. De ellos entre la mitad y un tercio fueron edificios altos, en los que se presentaron diferentes grados de daños:

50% con daños en los elementos no estructurales pero sin daños en los sistemas de resistencia estructural; 30% con ligeros daños estructurales y fuertes daños no estructurales; 19% con importantes daños estructurales, a veces irrecurables, y un 1% derrumbados total o parcialmente. De este último porcentaje, 4 edificios de altura entre 10 y 12 pisos quedaron absolutamente destrozados y en ellos se encontró la casi totalidad de las 300 víctimas del terremoto. La incidencia y concentración de daños en distintas zonas del valle hacen muy probable que las condiciones del terreno han cambiado las características espectrales de los movimientos sísmicos. En una encuesta llevada a cabo en la zona más afectada (zona de Los Palos Grandes), se encontró que la media ponderada de la Intensidad de Mercalli Modificada asignada a los edificios de una a tres plantas difería hasta en 3 grados de la Intensidad asignada a los de 12 plantas.

Según fuentes oficiales, las pérdidas monetarias alcanzaron unos 500 millones de Bolívares (alrededor de 120 millones de dólares USA de la época) aunque no hay información de cómo se distribuyeron estas pérdidas. La cantidad aludida representa el dinero asignado por el Gobierno para reparaciones y reconstrucción de los edificios afectados, si bien puede tomarse como límite inferior. El coste de otras pérdidas (daños reparados y no reparados en edificios públicos o privados) se debería añadir a la cantidad indicada.

### Estructura de los edificios en el valle de Caracas en el momento del terremoto

Los datos disponibles sobre el tipo, altura, número y edad de los edificios existentes en el valle de Caracas en el momento del terremoto son incompletos y en algunos casos contradictorios. Los valores adoptados lo han sido de acuerdo con el censo de población de 1970, número de permisos de edificación concedidos por las autoridades locales y mapas fotográficos aéreos. El número total de edificios calculado fue de 40.000\*, un 25% de los cuales tenían 10 o más pisos. El Gráfico 5 presenta las características de los 12 tipos

\* En este número no se cuentan las construcciones de adobe o similares. Sí se incluyen unas 2.000 fábricas o locales industriales.



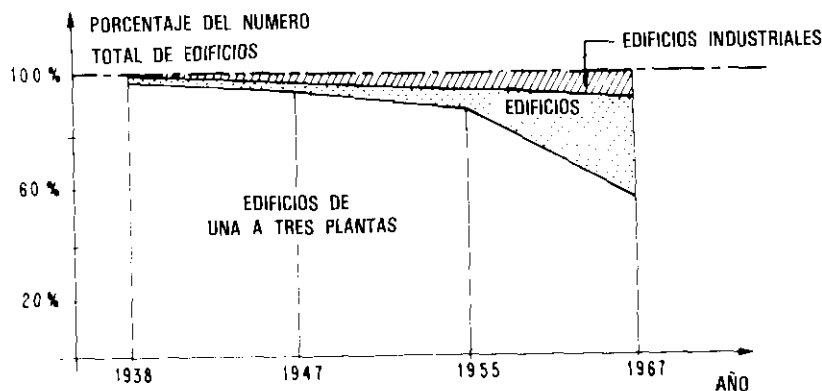
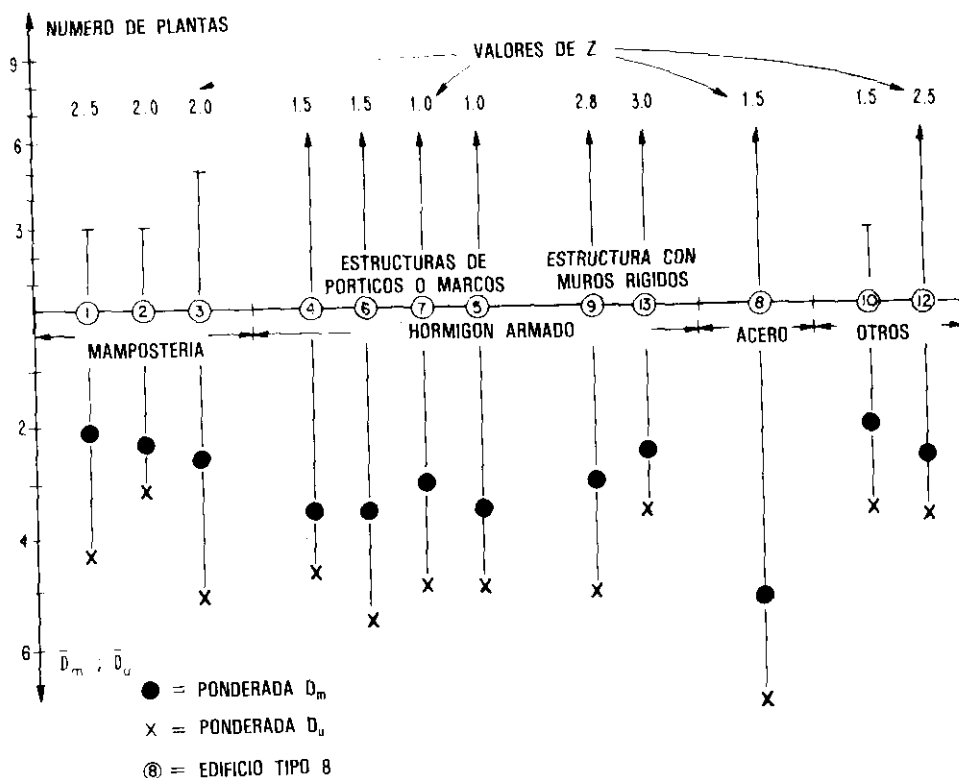
de edificios existentes, en los términos de los parámetros que se han descrito anteriormente.

Se clasificaron los edificios de varias alturas, atendiendo al período fundamental de vibración  $T$  (seg). Los valores de  $\bar{D}_m$  y  $\bar{D}_u$  se ponderaron según la distribución en porcentaje por edades dentro de cada tipo de edificio en el momento del terremoto\*\*. El número total de viviendas era de 260.000; de ellas, más de un cuarto (71.000) estaban en edificios de una a tres plantas. En el

momento del terremoto, aproximadamente la mitad de la población vivía en edificios de 6 ó más plantas, que representaban el 10% del total de edificios. Alrededor del 10% de la población vivía en edificios de 12 ó más plantas, representando el 1% del número total de edificios.

\*\* Estimación realizada teniendo en cuenta el crecimiento de la población entre 1938 y 1970, estadísticas de ventas de ascensores y fechas de cambios oficiales en las normas de edificación.

Gráfico 5. Características y distribución de los tipos de edificios.



Paralelamente fueron utilizados los siguientes parámetros de corrección:

- a) Coeficientes sísmicos de deformación.
- b) Contribución de la carga viva usada en el análisis.
- c) Valores de servicio o cargas vivas.
- d) Distribución de esfuerzos cortantes.
- e) Criterios de diseño y detalles de los aspectos estructurales.

Sobre la base de valores unitarios y zonas urbanas típicas, el valor de reposición del total de los edificios se estimó en 24.000 millones de Bolívares (\*).

### Resultados

Fueron calculados para cada tipo de edificio y para cada grupo de altura de los edificios los valores medios de la demanda de ductilidad  $\bar{D}$ , las pérdidas esperadas  $\bar{P}$  y la probabilidad de derrumbamiento. Para ilustrar la variabilidad de las pérdidas esperadas debidas al terremoto de Caracas de 1967, se presenta en el Cuadro IV una muestra de 93 casos diferentes estudiados, observando los siguientes datos:

(\*) De acuerdo con los periódicos de la época, el valor de sustitución de los 4 edificios hundidos en Los Palos Grandes fue de 4,2 millones de Bolívares.

- a) Las pérdidas esperadas obtenidas cubren una amplia gama de valores. Desde prácticamente cero (edificios de los tipos 12 y 13, situados en terrenos duros), hasta más del 60% del valor de reposición (edificios de los tipos 5 y 7 situados en terrenos blandos).
- b) Para un tipo dado de altura del edificio, las máximas pérdidas esperadas son de una magnitud de uno o dos grados mayores en terrenos blandos que en terrenos duros. Para períodos muy largos, estas diferencias pueden ser todavía más pronunciadas.
- c) También se presentan diferencias muy grandes entre diferentes tipos de edificios situados en diferentes tipos de terrenos.

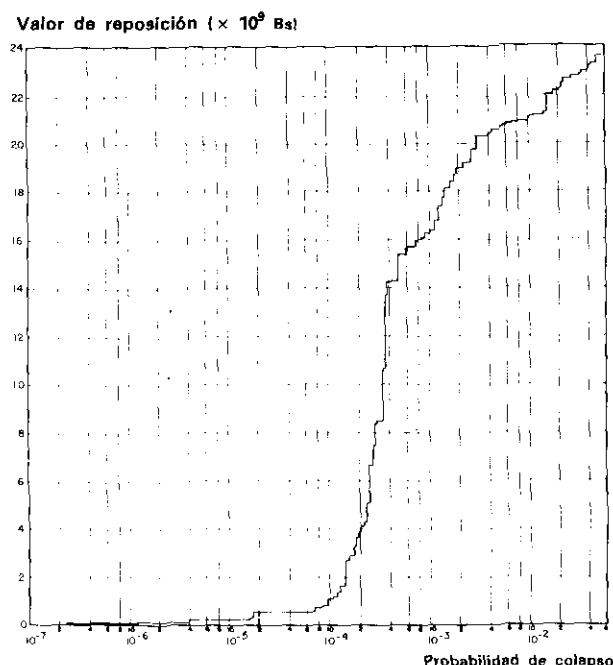
Para calcular las probabilidades de colapso o derrumbamiento que se dan en el Cuadro IV, se calcularon previamente los índice de fiabilidad, expresados como la inversa del coeficiente de variación de la distribución normal de la variable aleatoria ( $D_u - D$ ). Sin entrar en diferencias entre distintos tipos de edificios, para terrenos duros este índice varía entre 1,976 y 4,973, con una media de 3,310. Para terrenos blandos, varía entre 1,377 y 3,179, con una media de 2,299. Dado que estamos tratando con distribuciones normales, las diferencias entre los valores medios nos llevan directamente a probabilidades de colapso del orden de  $4,6 \times 10^{-4}$ ;  $1,1 \times 10^{-2}$ . Por tanto, la probabilidad de colapso es, como me-

Cuadro IV

CARACTERÍSTICAS DE LOS EDIFICIOS				DEMANDA DE DUCTILIDAD			PERDIDAS ESPERADAS (%)			PROBABILIDAD DE COLAPSO ( $\times 10^{-3}$ )			
Tipo	T (seg)	C <sub>v</sub>	D <sub>m</sub>	D <sub>u</sub>	Tipo de terreno			Tipo de terreno			Tipo de terreno		
					Duro	Intermedio	Blando	Duro	Intermedio	Blando	Duro	Intermedio	Blando
1	0,15	0,13	2,2	4,4	0,59	0,88	1,08	0,02	0,9	4,5	1,3	3,3	5,9
3	0,15	0,12	2,6	5,1	0,64	0,95	1,17	0,20	1,9	6,2	0,23	0,71	1,5
4	0,50	0,06	3,5	5,5	1,06	1,08	2,29	2,5	2,2	31,0	0,36	0,39	17,0
	0,90	0,05	3,5	5,5	0,84	0,98	2,68	0,4	1,5	49,0	0,15	0,26	39,0
5	1,30	0,45	3,5	5,5	0,73	0,88	2,63	0,15	0,6	47,0	0,096	0,18	38,0
	0,50	0,06	3,5	4,9	1,06	1,08	2,29	4,5	4,9	45,0	1,7	1,9	44,0
6	0,90	0,05	3,5	4,9	0,84	0,98	2,68	1,3	3,0	60,0	0,82	1,3	84,0
	0,50	0,07	3,5	5,5	0,98	1,00	2,11	0,7	0,8	27,0	0,24	0,29	11,0
7	1,30	0,05	3,5	5,5	0,66	0,79	2,35	0,05	0,38	37,0	0,073	0,12	10,0
	0,60	0,06	3,0	4,9	0,92	1,07	2,11	4,5	9,0	50,0	0,97	1,9	30,0
8	1,90	0,04	5,0	7,0	0,66	1,40	2,42	0,01	3,3	20,0	0,0003	0,018	1,7
10	0,15	0,20	2,0	3,5	0,41	0,62	0,76	0,01	0,50	1,80	6,6	12,0	16,0
13	0,30	0,28	2,5	3,5	0,28	0,50	0,54	—	0,002	0,003	4,5	8,9	9,1

día, 24 veces menor en el primer caso (terrenos duros) que en el segundo (terrenos blandos).

**Gráfico 6. Distribución acumulada de los valores de sustitución con respecto a la probabilidad de derrumbamiento.**



Estos resultados se corresponden totalmente con las hipótesis y abstracciones asumidas. Sin embargo, su extrapolación fuera de estas condiciones debe hacerse con la máxima cautela.

La pérdida total esperada calculada asciende a 1.292 millones de Bolívares, que representan el 5,4% del valor total de reposición estimado (24.000 millones de Bolívares). Esta pérdida es 2,58 veces mayor que el límite inferior anteriormente aludido (500 millones de Bolívares). Los Gráficos 6 y 7 presentan la distribución acumulativa de los valores de reposición y del número de edificios, respectivamente, con respecto a la probabilidad de colapso. Del Gráfico 6 se deduce que para la intensidad del terremoto de Caracas

de 1967, unas inversiones en edificios del orden de los 2.000 millones de Bolívares podrían asociarse de una probabilidad de colapso por encima de  $10^{-2}$ . Del mismo modo, suponiendo que la distribución es simétrica, las pérdidas probables esperadas debidas a derrumbamientos (inestabilidad) solamente eran de unos 5 millones de Bolívares, cantidad del mismo orden de magnitud que las pérdidas que tuvieron lugar debidas a derrumbamiento de edificios.

Del Gráfico 7 se deduce que el 11,5% de los edificios existentes se asociaba a una probabilidad de colapso por encima de  $10^{-2}$ . El número probable de edificios derrumbados es 52, y el número de víctimas humanas puede estimarse como 5 ó 6 veces mayor, lo que supone que estas cifras sean comparables con lo que ocurrió en realidad.

#### Comentario final

Los resultados obtenidos demuestran que las pérdidas esperadas en los diferentes tipos de edificios son distintas según sean los parámetros elegidos. Todavía quedan muchos asuntos que estudiar a fin de mejorar la fiabilidad de un método general tan desagregado como el indicado en este artículo. Su justificación debe hacerse por partes o por bloques, como se ha intentado hacer en el Cuadro IV. Con esto queremos decir que, aunque la aplicación del método haya dado buenos resultados, no quiere decir que la metodología empleada sea válida para su aplicación general. De hecho se está intentando aplicarla a otros sucesos parecidos.

Por último, esta experiencia demuestra la importancia sin igual de un buen trabajo de campo, y la necesidad de estadísticas lo más exactas posibles para que se pueda aplicar correctamente cualquier metodología a la predicción de pérdidas. No es necesario recalcar la utilidad que tiene este análisis para la identificación de situaciones críticas anteriores a un terremoto que merecerán mayor atención con el fin de evitar en lo posible pérdidas catastróficas en el futuro.

**Gráfico 7. Distribución acumulada del número de edificios con respecto a la probabilidad colapso.**

