

BASES PARA LA EVALUACION DE LA VULNERABILIDAD SISMICA EN ESTRUCTURAS EXISTENTES

Ing. Carlos Fernández
Ing. Guillermo Santana, Ph.D.
Laboratorio de Ingeniería Sísmica
Universidad de Costa Rica

RESUMEN

Este trabajo describe los parámetros básicos que se han de tomar en cuenta tanto para desarrollar una metodología secuencial de evaluación como para la estimación de la vulnerabilidad en edificios existentes de concreto. En él se sugieren varias fases que pueden ser usadas para el establecimiento de prioridades dentro de inventario de edificios de una ciudad. Cada una de estas fases cuenta con una serie de filtros cuyo objetivo es la identificación de posibles focos que puedan presentar algún grado de vulnerabilidad llegando incluso al cálculo de la capacidad como último criterio.

El estudio sugiere un proceso de tres etapas sucesivas que aumenta tanto en precisión como en la información requerida. La primera etapa es sumamente simple y pretende identificar sistemas que pueden presentar algún grado de vulnerabilidad, la segunda etapa, tiene como objetivo determinar el tipo de vulnerabilidad en tanto que la tercera y última etapa se refiere propiamente al cálculo de la capacidad del sistema.

VULNERABILIDAD Y CAPACIDAD

El concepto de vulnerabilidad es variable y en muchos casos parece depender tanto del tipo de código al cual se hace referencia como del edificio considerado en cada caso particular, así pues el código de la Asociación de Ingenieros Estructurales de California "SEAOC" (11,12) establece o permite incursiones dentro del rango inelástico para sismos importantes, de tal manera que la estructura puede sufrir daños siempre y cuando no sufra colapso. Estos criterios dejan ver que según dicho código, un edificio que sufra grandes deformaciones y por lo tanto daños en los elementos no estructurales (paredes de mampostería, ventanas, pisos, etc.) no sería vulnerable a menos que colapsara. Sin embargo, en el caso de una estructura hospitalaria los daños que grandes deformaciones pudieran producir, impedirían el normal funcionamiento del mismo después del evento sísmico. Por tanto, desde el punto de vista de función o uso, el edificio en cuestión sería vulnerable. Aún en el caso de edificios dedicados a vivienda que presenten incursiones considerables dentro del rango inelástico durante un evento sísmico -pero que no colapsen ni produzcan pérdidas de vidas- sería un éxito desde el punto de vista del diseño sismo-resistente. Sin embargo, desde el punto de vista del propietario del edificio es vulnerable, pues los daños sufridos en los elementos no estructurales, en definitiva se traducen en grandes gastos posteriores e incluso en la posibilidad de considerar la pérdida total del edificio.

De lo anterior se concluye que una definición de vulnerabilidad debe necesariamente involucrar un planteamiento interdisciplinario en el cual se evalúen todas las implicaciones que los diferentes daños sufridos por el edificio durante un evento pueden causar dentro de la comunidad y no se limite únicamente a aspectos de su comportamiento en situaciones de este tipo.

Es importante, con base en lo anterior, definir ahora los términos de vulnerabilidad y capacidad, los cuales muchas veces son considerados como sinónimos, sin embargo existen ciertas diferencias y limitaciones para el uso de los mismos. Utilizando la teoría de sistemas, es posible considerar a una ciudad como un sistema global independiente y a un edificio particular como un subsistema del mismo, de esta manera podemos definir como un estudio de vulnerabilidad sísmica al estudio de las diferentes interacciones del subsistema edificio dentro del sistema completo cuando un evento sísmico ocurre y/o ha ocurrido, en tanto que en un estudio de capacidad puede ser entendido como un análisis del subsistema particular en el cual solo interesan las características de su comportamiento sin incluir las implicaciones que este produzca en el sistema completo.

PARAMETROS PARA EL DESARROLLO DE METODOLOGIAS

Una metodología para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica bien constituida debe ser capaz de filtrar el inventario completo de una localidad o ciudad y clasificarlos en una serie de grupos con base en ciertos niveles de riesgo definidos dentro de la misma (1).

De manera generalizada se pueden establecer tres aspectos fundamentales para el desarrollo de metodologías:

1. Definición de los focos de evaluación,
2. Establecimiento o definición de fases,
3. Selección de ámbitos para el comportamiento permisible.

La definición de los focos de evaluación se refiere básicamente al establecimiento de criterios sobre los cuales se tomarán decisiones acerca del estado del sistema. Para poder seleccionar estos focos con criterio adecuado se debe tener conocimiento de dos aspectos fundamentales:

1. Característica del material, referida esta tanto a aspectos de resistencia, rigidez y comportamiento elástico e inelástico como de otras deficiencias en su uso para elementos estructurales, así por ejemplo, para el caso particular del concreto, resultan críticas las deficiencias en el confinamiento por medio de acero transversal, debido a las pérdidas de resistencia y rigidez con el agrietamiento bajo cargas cíclicas.
2. Fallas usuales, es necesario tener conocimiento de fallas ocurridas en el pasado, con el fin de poder definir y reconocer posibles errores de estructuración en los diferentes sistemas. Es recomendable el

establecimiento de una clasificación a partir tanto de las características constructivas como sistemas de estructuración básicos, pues la experiencia ha demostrado que ciertos tipos de prácticas constructivas son más vulnerables que otras, así también una clasificación con respecto a aspectos de estructuración es conveniente. Esto permite establecer patrones característicos de comportamiento para cada tipo de sistema resistente. Por ejemplo, edificios a base de muros estructurales, edificios a base de marcos rígidos, así como también edificios a base de marcos rígidos con rellenos de mampostería (6).

El establecimiento de una serie de fases secuenciales obedece al hecho de que por limitaciones de tiempo y de dinero, es prácticamente imposible el realizar un estudio minucioso para todos los edificios existentes de una ciudad, por lo tanto es necesario reducir el volumen de edificios que requieren un estudio detallado de su estado actual. Además se debe tener presente el hecho de que edificios que cuenten con algunas deficiencias, no necesariamente requieren un estudio detallado de su estado.

De esta manera particular, se pueden definir tres niveles o fases, las cuales estarán asociadas a ciertos niveles de refinamiento en el análisis y obviamente, también requerirán diferentes volúmenes de información para su desarrollo.

- 1^{ra} Fase: Identificación de sistemas que pueden presentar riesgo potencial,
- 2^{da} Fase: Identificación del tipo de riesgo,
- 3^{ra} Fase: Estudio de la capacidad.

La primera fase de identificación de sistemas que pueden presentar algún nivel de riesgo potencial, por motivos prácticos debe ser rápida sin tener como uno de sus objetivos el brindar medidas correctivas.

Entre los posibles aspectos a considerar dentro de esta etapa de identificación preliminar se recomiendan los siguientes: (1), (4).

- i Tipos de zona. Interesa conocer si el edificio está localizado en una zona reconocida como de actividad sísmica o no.
- ii Fecha de construcción. Referida ésta más que todo a si el edificio fue diseñado siguiendo las normas de un código sísmico o no.
- iii Tipo de construcción. La experiencia ha demostrado que ciertos tipos de construcciones son más propensas a sufrir daños que otras (mayor nivel de vulnerabilidad) como es el caso general de la mampostería sin refuerzo.

- iv Uso del edificio. Clarificación y clasificación de la importancia.
- v Número de ocupantes.
- vi Existencia de elementos estructurales que muestren un nivel considerable de riesgo debido a su deterioro.
- vii Modificaciones. Eliminación de elementos estructurales que originalmente formaban parte del sistema resistente ante cargas laterales.
- viii Existencia de elementos no estructurales que muestren algún grado de peligro.
- ix Elementos interiores que muestren algún nivel de peligro.
- x Irregularidad geométrica.
- xi Discontinuidad en las distribuciones de rigidez tanto en planta como en elevación.

El estudio de los aspectos anteriores permite establecer en forma preliminar si un sistema puede brindar algún grado de riesgo potencial. Sin embargo, es necesario tener claro que las edificaciones que cumplan con todo lo anterior y por lo tanto no sean clasificadas como con riesgo potencial, pueden presentar aun algún grado de peligrosidad.

La segunda etapa de identificación del tipo de riesgo involucra tanto procedimientos cualitativos como cuantitativos; con esto se pretende establecer el nivel riesgo. También se busca hacer una estimación inicial de los posibles daños. Se recomienda un análisis más detallado de los aspectos expuestos en la etapa anterior, así como también la consideración de los siguientes parámetros en forma general

- i Identificación y estudio del sistema estructural primario para cargas laterales y verticales.
- ii Determinación de discontinuidades horizontales y verticales en la estructura, así como distribuciones de masa en altura.
- iii Estudio de la geometría estructural (basada en bosquejos simplificados).
- iv Identificación de elementos no estructurales que puedan participar en la respuesta de la estructura ante un sismo.
- v Estudio de la fundación.

Es importante mencionar que todos los parámetros anteriores pueden ser evaluados por medio de una serie de encuestas o pruebas los cuales pueden ser desarrollados para cada tipo constructivo en particular.

La tercera y última etapa referida propiamente al cálculo de la capacidad, involucra estudios cuantitativos del comportamiento del sistema. Se hace uso de métodos y procedimientos más elaborados tales como estudios de respuesta espectral, tipo modal de respuesta, análisis inelástico incremental o por etapas, etc., con los cuales se puede estimar en mejor medida tanto los posibles daños como los requerimientos de resistencia y ductilidad. Es importante en esta fase definir el rango permisible de comportamiento con el fin de no abusar en el uso de la ductilidad, pues como se mencionó anteriormente, las grandes deformaciones pueden producir grandes daños en los elementos no estructurales.

CALCULO DE LA CAPACIDAD

Como se mencionó anteriormente, un estudio de vulnerabilidad debe presentar, como un último criterio para determinar el posible estado de un sistema, el cálculo de la capacidad disponible en el mismo. A continuación se describen brevemente dos metodologías bien definidas que han sido desarrolladas y utilizadas en diferentes regiones:

1. Método Multi-Piso (Japón),
2. Espectro de Capacidad (Estados Unidos)

1. Método Multi-piso (3), (7), (12)

El método japonés, denominado "Normas para la Evaluación de la Capacidad en Estructuras Existentes de Concreto Reforzado", fue desarrollado por el Ministerio de Construcción de Japón, y es utilizado para la evaluación de estructuras de concreto hasta de siete pisos. Esta limitación se debe a que el método hace uso de un proceso estático equivalente por lo cual es necesario evitar el abuso del mismo.

El método consta de tres niveles de procedimiento, los cuales envuelven el cálculo del parámetro denominado como Índice Sísmico. Este se define como

$$I_s = E_0 G S_D T$$

donde $E_0 = \phi C F$ es el índice sísmico básico. El término C representa un factor que depende de la resistencia, F está relacionado con aspectos de ductilidad y ϕ es un índice de piso que relaciona la respuesta para un sistema de un grado de libertad con cada piso del sistema. Este método evalúa tanto resistencia como ductilidad y expresa el resultado " E_0 " como el producto de estas capacidades.

Las otras definiciones necesarias son G := índice geológico, S_D := índice de diseño estructural el cual varía de 0.4 a 1.2, y T := índice de tiempo que varía entre 0.5 y 1.0 con el cual se

pretende cubrir daños previos de agrietamiento y otros efectos de deterioro de la estructura con el tiempo.

El primer nivel del procedimiento es sumamente fácil y se basa en la determinación de promedios de resistencia para columnas y muros. Es adecuado para estructuras dominadas por muros, pero resulta ser conservador para edificios a base de marcos dúctiles.

El segundo nivel del procedimiento concentra el problema únicamente en los elementos verticales identificando cinco tipos descritos a continuación: columnas cortas extremadamente frágiles, columnas críticas en cortante, muros de cortante, columnas críticas en flexión y muros flexibles. El método brinda ecuaciones para cada tipo de elemento en particular.

El tercer nivel del método incluye las posibles contribuciones de las vigas y otros tipos de elementos horizontales en la disipación y almacenamiento de energía para lo cual establece tres tipos adicionales de elementos verticales: columnas gobernadas por cortante en las vigas, columnas gobernadas por flexión en las vigas y muros de rotación. Se dan ecuaciones para cada tipo de elemento.

El método considera la capacidad del sistema como la capacidad en cortante del mismo para cada nivel considerado. Con base en la clasificación establecida en cada etapa con respecto a los tipos de elementos se modela cada piso como compuesto por diferentes elementos unidos en paralelo de tal manera que el desplazamiento angular sea el mismo para todos los miembros verticales de un mismo nivel. Ver figura 2. Para poder determinar el nivel de resistencia desarrollado por los elementos dúctiles en el momento en que los elementos más frágiles fallan, el método propone la utilización de factores de participación, los cuales han sido determinados en forma experimental con base en la observación de los patrones de falla de diferentes componentes durante eventos sísmicos pasados. Ver figura 1.

2. Espectro de Capacidad (11),(12)

El método considerado en este caso ha sido desarrollado por Sigmund Freeman (12). Este se basa en la publicación denominada "Seismic Design for Buildings 1982", más comúnmente conocida como el "Tri-Services Manual" el cual brinda criterios y recomendaciones tanto para análisis de un sistema como también requisitos de diseño.

El procedimiento se resume en el estudio de la respuesta del sistema estructural en cuestión para un sismo EQ-I de mediana intensidad (sismo con probabilidad de excedencia del 50% en 50 años) y la revisión para otro sismo EQ-II de características considerablemente mayores (sismo con probabilidad de excedencia del 10% en 100 años).

El método se centra en la construcción de una curva aproximada de capacidad tanto elástica como inelástica del sistema a partir del historial de cedencias en la estructura. Primero, la estructura es analizada para determinar el nivel de fuerza lateral requerido para causar la primera cedencia considerable. Se revisan luego las características del sistema

(distribución de rótulas plásticas) con el objetivo de cuantificar variaciones en las características de la estructura. Se incrementa nuevamente el nivel de carga lateral hasta que se produzca la segunda cedencia importante y se repite el procedimiento hasta que el sistema se convierta en un mecanismo ó sufra grandes distorsiones. Al finalizar el proceso anterior se cuenta con una curva de capacidad que relaciona el cortante en planta con los desplazamientos en el nivel superior (figura 3). El paso siguiente consiste en transformar la mencionada relación en una curva de capacidad espectral. Esto es una curva que relacione la aceleración espectral equivalente al cortante en la plante con un cierto período de oscilación que produzca un desplazamiento máximo equivalente. La capacidad de la estructura puede ser ahora directamente comparada con la demanda, la cual es representada por el espectro de respuesta seleccionado a partir de las características mencionadas anteriormente para los sismos seleccionados EQ-I y EQ-II (figura 4).

CONCLUSIONES

La experiencias acumuladas en el Japón y los Estados Unidos en cuanto al establecimiento de metodologías de evaluación de vulnerabilidad de estructuras existentes son ya de varios años.

En Costa Rica no existe una guía clara para la determinación y reducción de la amenaza asociada con edificios de alto riesgo sísmico. A menos de que se desarrollen urgentemente normas prácticas de provada necesidad, estrechamente vinculadas con la realidad económica y social, continuará la insatisfactoria falta de claridad estatutaria, así como también la variedad de normas e interpretaciones con que trabajan los diferentes grupos involucrados. La principal conclusión que resulta de este trabajo es la necesidad de definir los criterios que mas se ajustan a nuestro medio.

REFERENCIAS

1. Poland, C.D., "Evaluating the Seismic Resistance of Existing Building", ATC- 14, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1987.
2. Applied Technology Council, "Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings," ATC-3-06, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1984.
3. Aoyama, H., "A method for the evaluation of the seismic capacity of existing reinforced concrete buildings in Japan", Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, Vol 14, No. 3, Setiembre 1981.
4. Bresler, B., "State of the Art Assessment", in Proceedings of the Workshop for Reducing Seismic Hazards of Existing Buildings," Report FEMA 91, Earthquake Hazards Reduction Series 15, Federal Emergency Management Agency, Washington, D. C. 1985.

5. Brunndon, D. y Priestley, M.J.N. "Assessment of Seismic Performance Characteristics of Reinforced Concrete Buildings Constructed Between 1936 and 1975", Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, Vol 17, No. 3, Setiembre 1984.
6. Feld, J., Fallas Técnicas en Construcción, Editorial Limusa S. A., primera edición, México D. F., 1983.
7. Hirosawa, M., "Criterion on the Evaluation of Seismic Safety of Existing Reinforced Concrete Buildings", Proceedings of the Second U. S. - Japan Seminar on Repair and Retrofit of Structures, University of Michigan, Ann Arbor, MI, Mayo 1981.
8. Mahin, S., Bertero, V., "An Evaluation of Inelastic Seismic Desing Spectra", Journal of Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol 107, No. ST9, Setiembre 1981.
9. Scholl, R. E., ed., "Proceedings of the Workshop for Reducing Seismic Hazards of Existing Buildings," Report FEMA 91, Earthquake Hazards Reduction Series 15, Federal Emergency Management Agency, Washington, D. C. 1985.
10. Sugano, S., "Seismic Strengthening of Existing Reinforced Concrete Buildings in Japan", Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, vol. 14, No. 4, December, 1981.
11. White, R.N. y Gergely, P., eds., "Proceedings of the First Workshop on Seismic Performance of Existing Buildings," Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Cornell, Nueva York, Abril 1985.
12. White, R.N. y Gergely, P., eds., "Proceedings of the Third Workshop on Seismic Performance of Existing Buildings," Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Cornell, Nueva York, Diciembre 1986.

FACTORES DE PARTICIPACION $\alpha_{i/ii}$

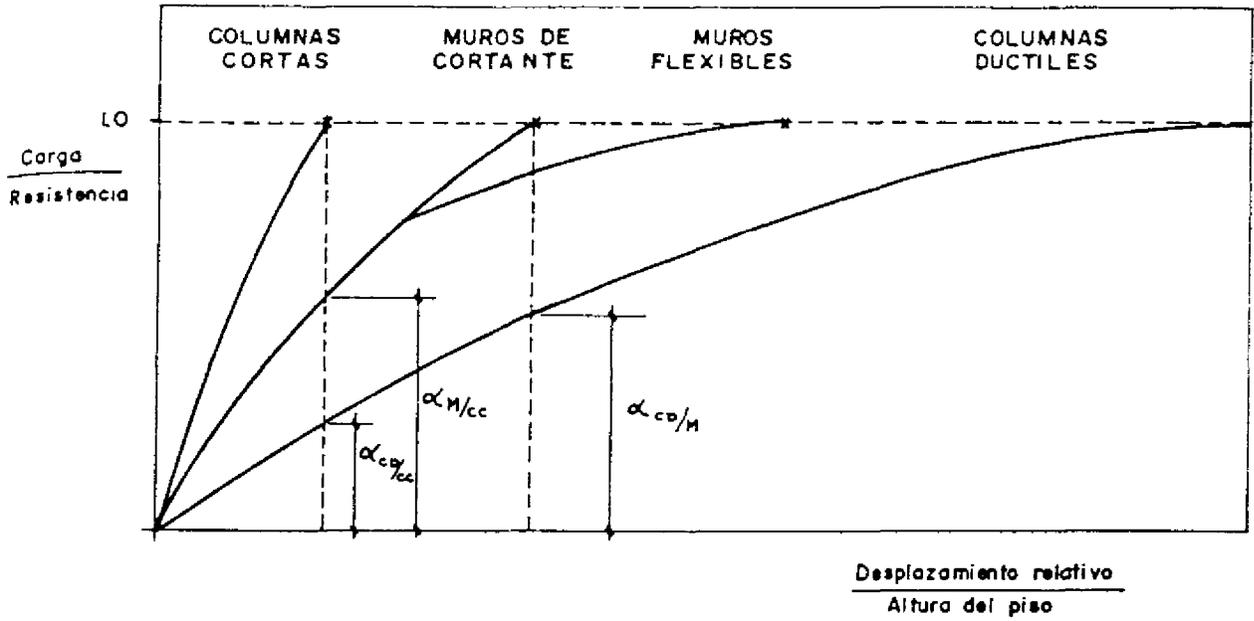


Figura 1.

IDEALIZACION DEL PISO DE UN EDIFICIO

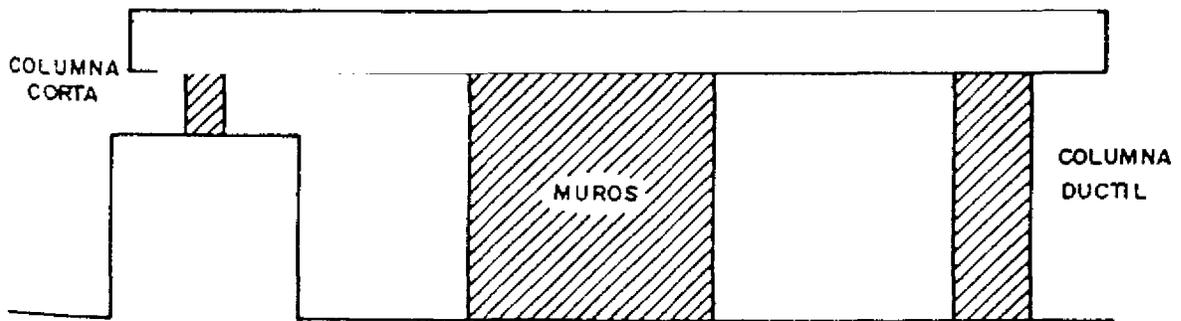


Figura 2.

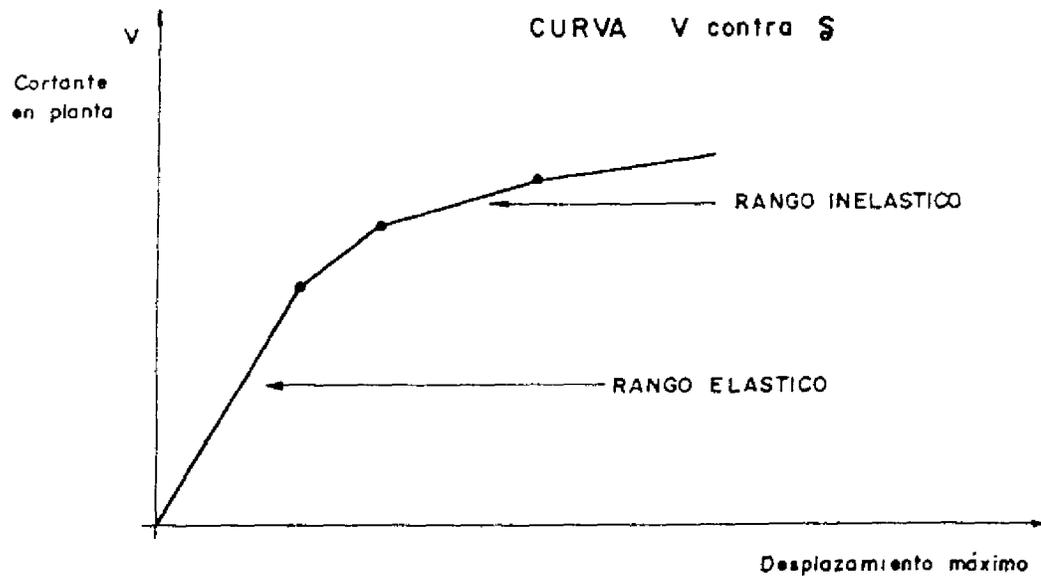


Figura 3

DEMANDAS Y CURVA DE CAPACIDAD

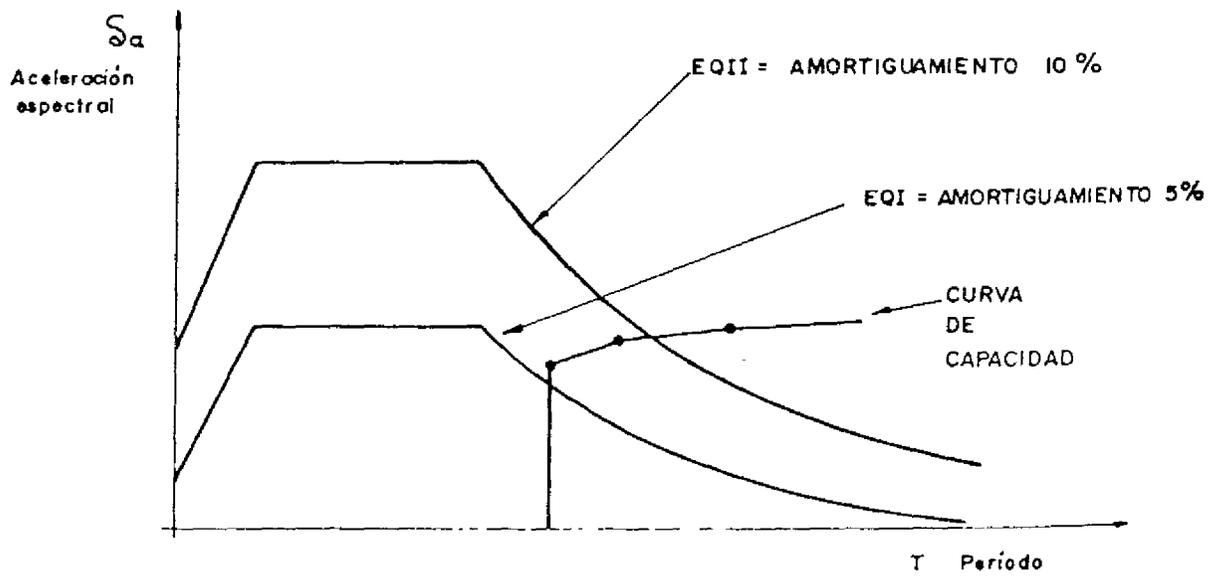


Figura 4