

UN MODELO PARA LA PREDICCIÓN DE FUERZAS SÍSMICAS EN ESTRUCTURAS DE EDIFICIOS

Héctor E. Febres Cedillo

Departamento de Estructuras. Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería. Universidad de los Andes.
Mérida - Venezuela

RESUMEN

Se presenta una nueva técnica para la determinación de fuerzas sísmicas. Esta se basa en las correlaciones estadísticas, previamente desarrolladas, entre ciertos parámetros característicos del record sísmico y los coeficientes de un modelo matemático del espectro de respuesta.

Estas relaciones permiten al ingeniero estimar la respuesta máxima de la estructura, teniendo como datos los valores esperados de magnitud Richter y distancia epicentral.

ABSTRACT

A new method for the determination of seismic loads is presented. It is based on statistical correlations between parametric representations of accelerogram records and their response spectra.

Previously developed models are unified in a method relating some characteristic parameters of the strong motion portion of the accelerogram record with the coefficients of the mathematical model for the response spectra. It smoothes out peaks and valleys while giving a good approximation of the response.

This relationships allow the seismic engineer to estimate the maximum response of structures with the sole knowledge of the expected values of parameters such as earthquake magnitude and epicentral distance.

INTRODUCCION

En pocas áreas de su actividad profesional se encuentra el Ingeniero Estructural frente a tantas incertidumbres como en el área de la Ingeniería Sísmica. De hecho, en la mayoría de los problemas estructurales el Ingeniero encuentra suficiente información respecto a las características y condiciones bajo las cuales el sistema estructural debe ser analizado. En Ingeniería Sísmica por el contrario, el Ingeniero carece de la información necesaria acerca de las condiciones, así como de métodos cómodos para tratar la naturaleza aleatoria de movimientos sísmicos.

En los últimos años, se han llevado a cabo cantidad de trabajos que tratan todos los aspectos de la excitación de las estructuras por los terremotos. Se han desarrollado muchos métodos que facilitan la solución de sistemas de ecuaciones diferenciales que gobiernan el movimiento de una estructura. Integración numérica en los dominios tiempo y frecuencia y métodos de superposición modal, permiten la determinación de los detalles de la respuesta. Estos métodos son muy precisos, sin embargo, son complejos, requieren un esfuerzo computacional considerable y requieren la selección de una historia sísmica apropiada (1, 2, 3). Debido a la poquísima probabilidad de que dos sismos tengan acelerogramas idénticos, la apropiada selección del sismo de diseño es muy difícil y se basa mayormente en la experiencia previa del Ingeniero o en las normas de construcción.

La introducción del concepto de espectro de respuesta (4), trajo consigo una simplificación muy esperada para la determinación de los máximos valores de desplazamiento, velocidad y aceleración de una estructura bajo una historia sísmica específica. (Ver figura 1). Para estructuras o sistemas con varios grados de libertad, la aplicación es válida cuando el comportamiento es en el rango elástico. Espectros de

diseño, basados en el promedio de los espectros de respuestas de algunos terremotos, se utilizan generalmente cuando no se conocen datos locales o cuando es requerido por normas de construcción (5-7). Se ha llegado inclusive a extrapolar los espectros de respuestas al rango inelástico (5, 8, 9). El desconocimiento de las características del sismo esperado, ha traído como consecuencia el estudio de métodos numéricos para la simulación de records sísmicos cuyos espectros de respuesta se asemejan a los espectros de diseño (10).

En reportes anteriores (11-14), se presentan procedimientos para la obtención de espectros de diseño basados en los valores de magnitud Richter y distancia epicentral del terremoto que se espera en una determinada región. Utilizando estos procedimientos se ha desarrollado una técnica para la determinación de las fuerzas sísmicas en edificios basados en la "predictabilidad" de ciertos parámetros característicos del sismo esperado de diseño.

Filosofía de Diseño

Los criterios que generalmente se utilizan al momento de seleccionar un sismo de diseño, han sido bien definidos por Clough y Penzien (1).

"Para tratar efectivamente esta combinación de carga extrema y baja probabilidad, usualmente se adopta una estrategia basada en un criterio dual:

- 1) Un sismo moderado que razonablemente puede esperarse en el sitio de construcción durante la vida útil de la construcción, debe tomarse como base para el diseño. El edificio debe ser diseñado para resistir este sismo sin presentar daños significativos en su estructura.*

- 2) *El sismo más severo que debe esperarse en el sitio de construcción debe tomarse como una prueba de seguridad estructural. Debido a que la posibilidad de ocurrencia de este sismo es muy remota, se justifica desde el punto de vista económico, que el diseñador permita que este sismo cause daños importantes a la estructura; sin embargo, deben evitarse el colapso y pérdida de vidas."*

Con estos criterios en mente, se han propuesto espectros de diseño basados en sismos con aceleraciones máximas de 0.24g y 0.28g cuyas probabilidades de ocurrencia son de 50% y 10% durante una vida de la estructura de 70 años (15) (Ver figuras 2 y 3).

Para determinar las características del sismo esperado, debe llevarse a cabo un estudio sismológico que tenga en cuenta la historia sísmica de la región. Citando de nuevo a Clough y Penzien (1):

"El resultado final del estudio sismológico es la definición del sismo de diseño y del sismo máximo posible en términos de sus magnitudes y distancias epicentrales desde el sitio de construcción. Por ejemplo, puede predecirse que un sismo de magnitud 7 puede ocurrir en una falla a una distancia de digamos, 25 km. durante los 50 años de vida de la estructura. Para el mismo sitio, el máximo sismo podría tener una magnitud de 6.5 a una distancia de, tal vez, solo 10 km. Por supuesto, la magnitud y distancia al sitio de la construcción del sismo de diseño no indican directamente bajo cuál sismo específico se debe diseñar la estructura. Para establecer los requerimientos de diseño, es necesario relacionar estos datos sismológicos a la intensidad y otras características de las aceleraciones esperadas en el sitio".

Utilizando los modelos desarrollados en las referencias (11-14), es posible determinar el espectro de diseño basándose exclusivamente en la magnitud Richter y la distancia epicentral desde el sitio de construcción. Los valores de los coeficientes de estos modelos fueron derivados utilizando los records de 25 sismos de la costa del Pacífico de los Estados Unidos. Nuevos valores pueden obtenerse para otros sitios del mundo siguiendo los procedimientos indicados en dichas referencias. El procedimiento para definir el espectro de respuesta y posteriormente las fuerzas sísmicas se indica a continuación.

Respuesta de Edificios bajo cargas sísmicas.

El cálculo de la respuesta sísmica de los sistemas de muchos grados de libertad, puede llevarse a cabo aplicando el método de superposición modal (1, 2, 3) (Ver figura 4). Los pasos a seguirse para los diseños elástico e inelástico son:

Determinación de Fuerzas Sísmicas. Análisis Elástico

Los pasos para el análisis dinámico de un sistema de muchos grados de libertad en el rango elástico son:

1. Llevar a cabo un diseño preliminar, utilizando cualquier técnica considerada apropiada, para determinar las dimensiones de las vigas y columnas.
2. Determine los períodos fundamentales (T_n) y formas modales (ϕ_n) de la estructura. Se recomienda generalmente, que por lo menos se tomen en cuenta los tres primeros modos en cada dirección.
3. Determine los factores de participación modal (η)

$$\eta_n = \frac{\phi_n^T m \mathbf{1}}{\omega_n^2}$$

donde ϕ_n^T es la n -ésima forma modal, m es la matriz

de masas de piso y $\tilde{1}$ es un vector cuyos elementos son todos iguales a 1.

4. Determine el valor de la Intensidad Arias (16) del sismo de diseño mediante la utilización de una fórmula basada en la magnitud Richter y la distancia epicentral del sismo esperado (12):

$$\log I_A = 4.858 - 0.014R + 0.589M \quad (2)$$

donde R = distancia epicentral, y

M = magnitud Richter del sismo esperado.

5. Encuentre los máximos desplazamientos modales para cada modo. Use los factores de participación modal y el Desplazamiento Espectral del sismo esperado.

$$\tilde{y}_n \max = \tilde{\phi}_n^T \frac{\eta_n}{M_n} S_{d,n} \quad (3)$$

donde M_n la enésima masa modal, que es obtenida a partir de:

$$M_n = \tilde{\phi}_n^T m \tilde{\phi}_n \quad (4)$$

El Desplazamiento Espectral Modal, $S_{d,n}$, depende del coeficiente de amortiguamiento ξ y del período T_n del enésimo modo de vibración y es determinada mediante la ecuación:

$$S_{d,n} = b_0 T_n^{b_1} \quad (5)$$

donde b_0 y b_1 son constantes numéricas que son determinadas, para un coeficiente de amortiguamiento ξ igual a 0.02, por las ecuaciones:

$$b_0 = 16.5553 I_A^{0.5916} \quad (6)$$

$$b_1 = 1.6361 I_A^{0.0785} \quad (7)$$

Los desplazamientos espectrales determinados mediante la utilización de las ecuaciones (5), (6) y (7) están expresados en pulgadas.

6. Determine los desplazamientos máximos relativos. Como los desplazamientos modales máximos $\chi_{n,max}$ no ocurren la mismo tiempo, la respuesta máxima total no puede ser obtenida por simple adición de los máximos modales. Una manera muy utilizada para obtener la respuesta es mediante la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las respuestas de los modos significativos.

$$\chi_{max} = \sqrt{(y_{1,max}^2 + y_{2,max}^2 + \dots)} \quad (8)$$

7. Determine las fuerzas modales. Para determinar las fuerzas inerciales modales que actúan sobre cada piso, se usa la expresión

$$\underline{\phi}_{p,n} = m \underline{\phi}_n \frac{\eta}{M_n} S_{a,n} \quad (9)$$

donde $\underline{\phi}_{p,n}$ es el vector de fuerza de piso correspondiente al enésimo modo, y $S_{a,n}$ la Aceleración Espectral, depende del coeficiente de amortiguamiento ξ y del período T_n del enésimo modo

de vibración y es determinada mediante la ecuación (5):

$$S_{a,n} = 4\pi^2 b_0 T_n^{-2} \quad (10)$$

la cantidad $\frac{\eta_n}{M_n}$ o $\frac{\eta_n^2}{M_n}$ es llamada la

enésima masa modal efectiva.

8. Combine las fuerzas modales de piso, definiendo la fuerza máxima de piso a cualquier nivel como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las fuerzas de los modos considerados:

$$\tilde{f}_{p,max} = \sqrt{(\tilde{f}_{p,1}^2 + \tilde{f}_{p,2}^2 + \dots)} \quad (11)$$

9. Determine los cortes basales debidos al modo n. La ecuación a utilizar es:

$$V_{0,n} = \frac{\eta_n^2}{M_n} S_{a,n} \quad (12)$$

10. Determine la fuerza de corte de la base. Como las fuerzas basales modales no pueden ser sumadas, el corte máximo en la base puede encontrarse como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los cortes basales de los modos considerados:

$$V_{0,max} = \sqrt{(v_{0,1}^2 + v_{0,2}^2 + \dots)} \quad (13)$$

- ii. Lleve a cabo un análisis estático del pórtico utilizando las fuerzas sísmicas definidas en el paso 7 así como las cargas verticales muertas y vivas.

Es oportuno hacer notar que las fuerzas sísmicas determinadas mediante este método, no son las cargas reales causadas por el sismo. Sin embargo, ellas imponen sobre la estructura esfuerzos y deformaciones equivalentes.

Determinación de Fuerzas Sísmicas. Análisis Inelástico.

La manera correcta para calcular la respuesta no lineal, es mediante la integración numérica, paso a paso, del sistema de ecuaciones que gobierna el comportamiento dinámico del sistema bajo la acción de movimientos sísmicos. Estas ecuaciones deben ser integradas en su forma original, ya que el desacoplamiento no es posible. Sin embargo, este método es complejo, laborioso, costoso y dependiente de las suposiciones hechas al momento de modelar la estructura.

La aproximación Newmark-Hill del espectro de respuesta inelástica (17-19), es el método más utilizado y práctico que se ha desarrollado hasta el presente para la determinación de la respuesta inelástica de estructuras de edificios.

El análisis sísmico de estructuras en el rango no elástico, sigue básicamente los mismos pasos que el análisis elástico, con las siguientes diferencias:

1. En la determinación de las deformaciones, las deformaciones del modelo inelástico son iguales a las correspondientes deformaciones elásticas de la estructura.
2. En la determinación de esfuerzos, los esfuerzos del modelo lineal difieren de los del modelo inelástico en un factor constante ν . Este factor, llamado factor de ductilidad, se define como la relación entre las máximas deformaciones y las deformaciones al límite elástico.

$$\nu = \frac{\delta_{\max}}{\delta_e} \quad (14)$$

DISCUSION

Con la finalidad de mostrar la validez de los valores obtenidos, el espectro de respuesta obtenido a partir de los records sísmicos. -El Centro 1940NS- presentado en la referencia 20, es comparado con el espectro de respuesta obtenido mediante las ecuaciones 2, 5, 6 y 7 para un sismo de magnitud 6.7 con una distancia epicentral de 9.3 km.

La intensidad Arias esperada para un sismo con estas características es:

$$\log I_A = -4.858 - 0.014(9.3) + 0.587(6.7) = -1.0419 \quad (15)$$

$$I_A = 0.091$$

Los valores de los parámetros b_0 y b_1 son:

$$b_0 = 16.5553(0.091)^{0.5916} = 4.00 \quad (16)$$

$$b_1 = 1.6364(0.091)^{0.0765} = 1.36 \quad (17)$$

Los espectros de respuesta esperados de desplazamiento y aceleración se definen entonces como:

$$S_{d,n} = 4.00 T_n^{1.36} \quad (18)$$

$$S_{a,n} = 16 \times 2 T_n^{-0.64} \quad (19)$$

La figura 5 muestra los espectros de desplazamiento para un valor de coeficiente de amortiguamiento ξ igual a 0.02. Como se puede observar, los valores obtenidos por ambos métodos se comparan satisfactoriamente.

Los resultados obtenidos muestran lo práctico de esta técnica para determinar las fuerzas sísmicas a partir de un espectro de respuesta consistente con ciertos parámetros de diseño, como lo son la distancia epicentral desde el sitio de la construcción y la magnitud Richter del sismo esperado. Referencia (14) presenta una comparación detallada de la respuesta estructural calculada mediante esta nueva técnica y otras que aparecen en la literatura. La figura 6 muestra las respuestas de un edificio de once pisos calculadas mediante la ecuación 18 y usando los espectros de diseño DTRS y CTRS (15). También muestra la respuesta del edificio bajo el sismo de El Centro 1940 NS, obtenida mediante un análisis dinámico modal y la calculada utilizando las normas UBC (21).

Debe recordarse que los modelos se han desarrollado teniendo como base de datos, sismos ocurridos en la región occidental de los Estados Unidos. Es más, los coeficientes numéricos corresponden a un coeficiente de amortiguamiento del 2%. Para otras partes del mundo y otros valores de ξ , deben derivarse coeficientes numéricos apropiados, utilizando records sísmicos de la zona siguiendo los procedimientos presentados en la referencia 11.

Podemos concluir, que la principal ventaja de esta técnica, es que las ecuaciones propuestas indican directamente el nivel de resistencia sísmica a proveerse, y que además las ecuaciones pueden ser "particularizadas" a cualquier grupo de sismos reales ocurridos en cualquier región del mundo.

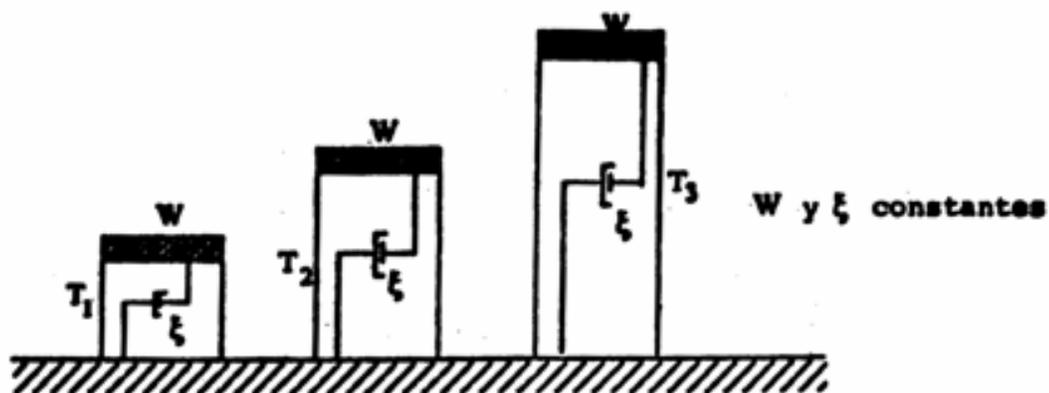
En la actualidad se están desarrollando ecuaciones en las que el tipo de suelo sea uno de los parámetros a ser considerados junto con la magnitud y distancia epicentral, así como para otros coeficientes de amortiguamiento.

REFERENCIAS

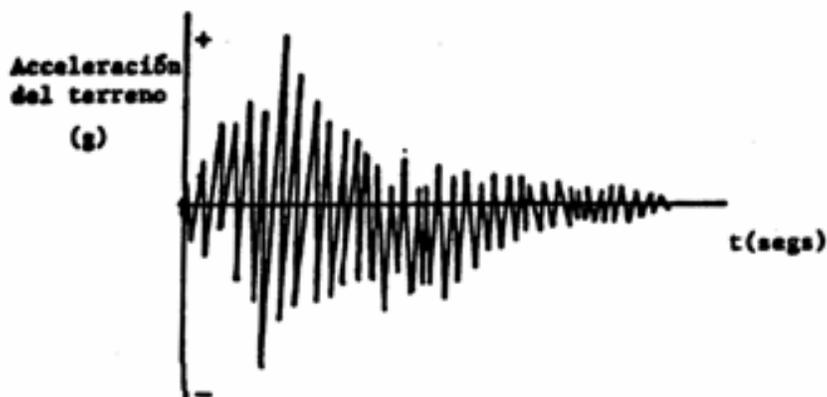
1. CLOUGH R. W. , PENZIEN J. ; **Dynamics of Structures**, McGraw- Hill, New York (1975).
2. CRAIG R. R. ; **Structural Dynamics**, John Wiley & Sons, New York (1981).
3. NEWMARK N. M. , ROSENBLUETH E. ; **Fundamentals of Earthquake Engineering**. Prentice-Hall, Inc. , Englewood Cliffs, N. J. (1971).
4. HOUSNER G. W. ; "Behavior of Structures during earthquakes". **Proceedings, A. S. C. E.** Vol. 85 nº EM-4, October (1959).
5. HOUSNER G. W. ; "Design Spectrum", Ch. 5 en **Earthquake Engineering** (Ed. R. L. Weige), Prentice-Hall, Inc. , Englewood Cliffs, N. J. pp. 93-106 (1970).
6. LIN J. S. , TYAN J. Y. ; "Equivalent stationary motion and average response spectra". **Earthquake Engineering and Structural Dynamics** Vol. 14, pp. 267-279 (1986).
7. ATOMIC ENERGY COMMISSION. "Design response spectra for seismic design of nuclear power plants". **Regulatory Guide 1-60**, Directorate of Regulatory Standards, Washington, D. C. (1973).
8. MOSTAGHELNI, HERNRIED A. G. ; "Seismic inelastic design spectra". **Earthquake engineering and Structural Dynamics**, Vol. 14, pp. 379-389 (1986).
9. ELGHADAMSI F. E. , MOHRAZ B. ; "Inelastic earthquake spectra". **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, Vol. 12, pp. 91-104 (1987).
10. PREUMONTA, A. ; "The generation of spectrum compatible accelerograms for the design of nuclear power plants". **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, Vol. 12, pp. 481-497 (1987).

11. BHATTI M. A. , FEBRES-CEDILLO, H. E. ; "An engineering definition of strong motion portion of an accelerogram", presentado para su publicación en **Earthquake Spectra**, Nov. (1987).
12. FEBRES-CEDILLO H. E. , BHATTI M. A. , "Parametric modelling of earthquake response spectra", presentado para su publicación en **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**. Feb. (1987).
13. BHATTI M. A. FEBRES CEDILLO, H. E. ; "A model for design response spectra consistent with predictable earthquake characteristics", presentado para su publicación en **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**. Nov. (1987).
14. FEBRES-CEDILLO H. E. , BHATTI M. A. ; "Seismic analysis using design spectra consistent with predictable earthquake characteristics", presentado para su publicación en **Earthquake Spectra**. Nov. (1987).
15. N. B. C. ; **An evaluation of Response Spectrum Approach to Seismic Design of Buildings**. Report to National Bureau of Standards, Applied Technology Council, San Francisco C. A. (1974).
16. ARIAS A. ; "A measure of earthquake intensity", en **Seismic Design for Nuclear Power Plants**. (Ed. R. J. Hansen) MIT Press, Cambridge, Mass, pp. 438-483 (1970).
17. NEWMARK N. M. , HALL W. J. ; "Procedures and criteria for earthquake resistant design, building practices for disaster mitigation". National Bureau of Standards, BSS46, pp. 209-236 (1973).
18. JOYNER W. , BODRE D. M. ; "Peak horizontal acceleration and velocity from strong motion records", **Bull, seism. soc. A**. Vol 71, pp. 2011-2038 (1981).

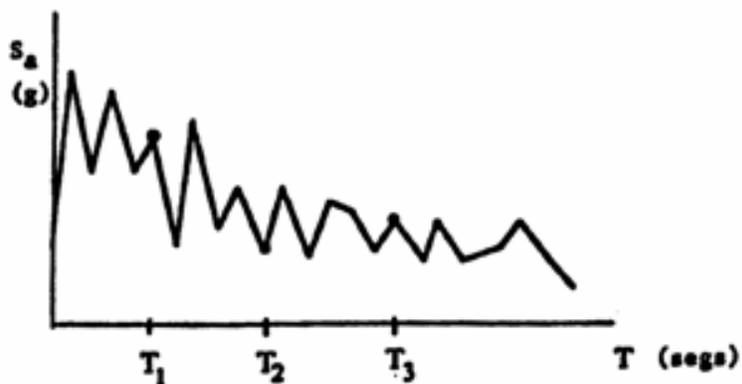
19. **NEWMARK N. N. ; "Current Trends in the Seismic Analysis and Design of Highrise Structures", Ch. 16 in Earthquake Engineering (Ed. R. L. Weigel), Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J., pp. 403-424 (1970).**
20. **CLOUGH R. W. ; "Earthquake Response of Structures", Ch. 12 en Earthquake Engineering. (Ed. R. L. Weigel), Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, N. J. (1970).**
21. **UNIFORM BUILDING CODE. International Conference of Building Officials, Whittier C. A. (1976).**



a) Péndulos simples con diferentes períodos de vibración



b) Historia sísmica (accelerograma)



c) Espectro de respuesta de aceleraciones

Figura 1: Diagrama de la respuesta obtenida a partir de una historia sísmica.

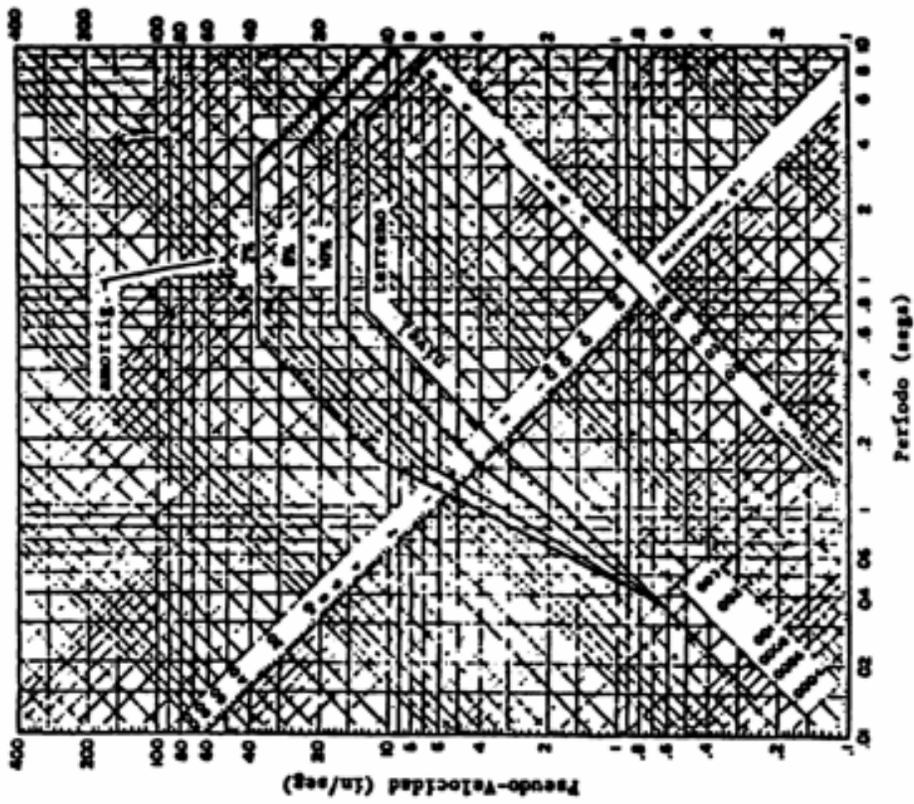


Figura 3: Espectro de diseño CTR5: Aceleración máxima del terreno 0.28g, probabilidad de ocurrencia 10%.

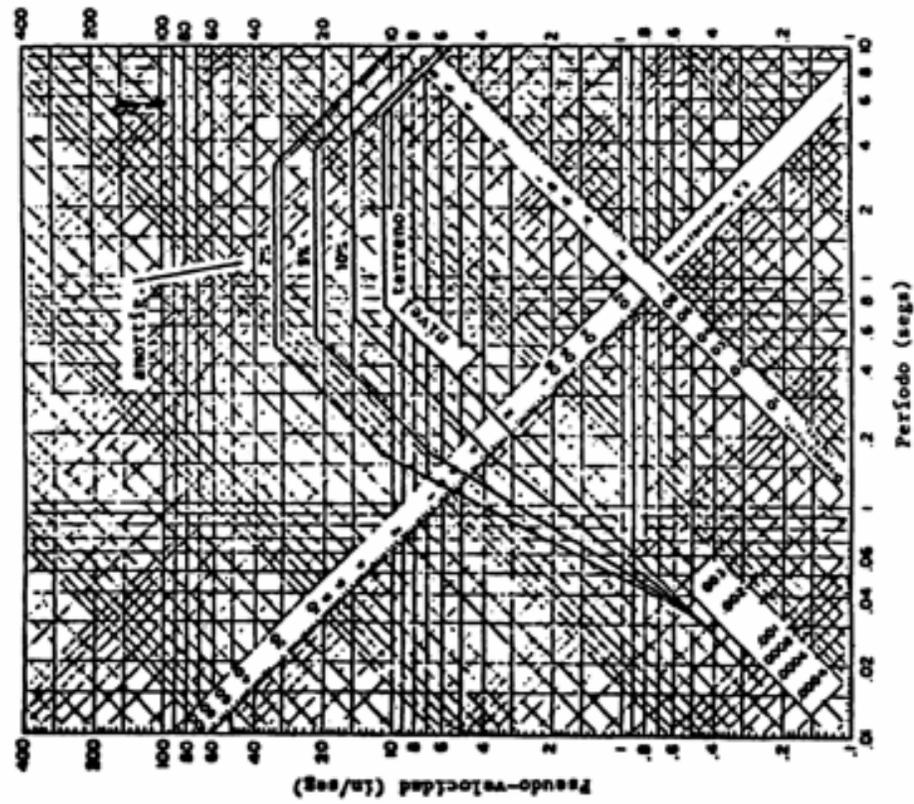


Figura 2: Espectro de diseño DTR5: Aceleración máxima del terreno 0.24g, probabilidad de ocurrencia 50%.

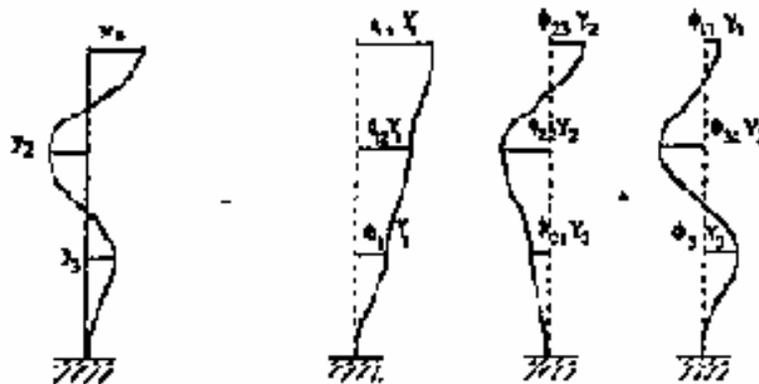


Figura 4: Distribución de desplazamientos modales.

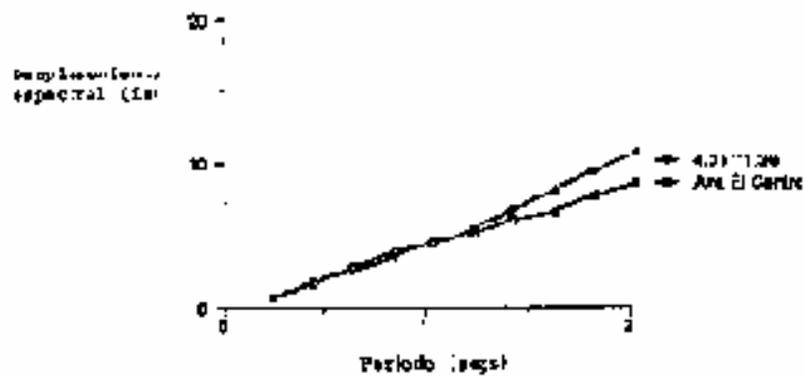


Figura 5: Comparación entre espectros de respuesta real y equivalente para el sismo El Centro 1940 Ms.

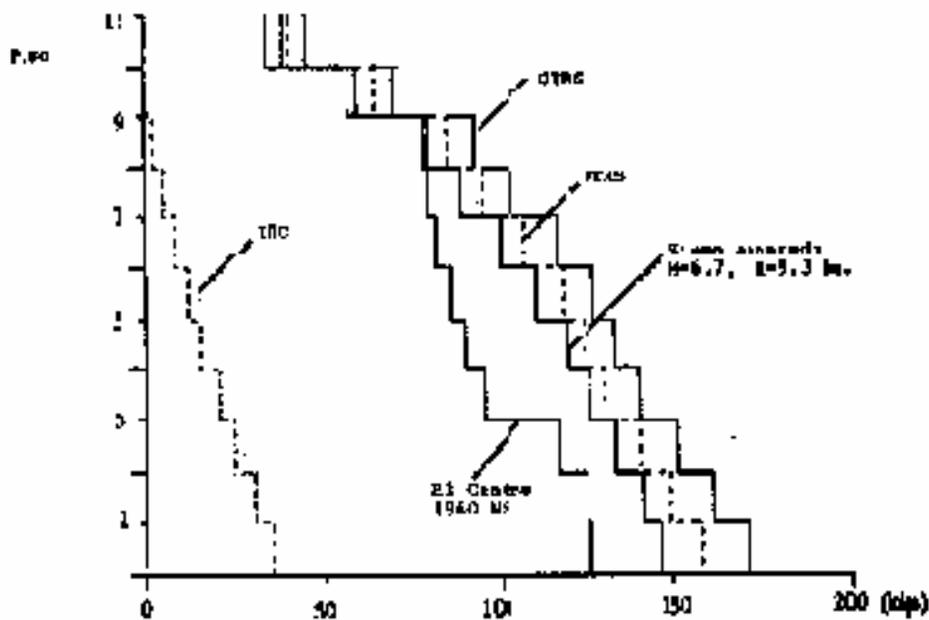


Figura 6: Distribución de fuerzas de corte en un edificio de dos pisos.