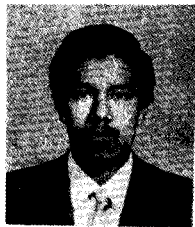


## FACTOR DE AMPLIFICACION DE LA RESPUESTA DE ESTRUCTURAS CON RESISTENCIA ASIMETRICA.



SONIA E. RUIZ<sup>1</sup> Y HECTOR ROSAS<sup>2</sup>

### RESUMEN

Con el fin de estimar la esperanza de demanda de ductilidad de estructuras con asimetría en su resistencia lateral se obtiene una expresión la cual toma en cuenta el contenido de energía del movimiento sísmico, la aceleración de diseño y la duración de la parte intensa del movimiento. Dicha expresión se obtiene a partir del análisis de 115 estructuras de un grado de libertad, excitadas con diez acelerogramas registrados en las zonas blanda y dura de la ciudad de México, y con tres movimientos senoidales modulados.

Los resultados que arroja la expresión calculada en este trabajo se comparan con los correspondientes a las Normas técnicas complementarias para diseño por sismo del Reglamento de construcciones del Distrito Federal de 1987. Estos últimos resultan menos conservadores. Se analizan las razones de esta discrepancia.

### ABSTRACT

In order to estimate the expected value of demands of systems with asymmetric load-deflection curves, an expression is obtained, this considers the energy content of ground motion, the design acceleration and the duration of motion. Such expression is obtained by analyzing 115 single degree of freedom structures, excited with ten accelerograms recorded on soft and hard soils in Mexico City, as well as with three modulated sinusoidal motions.

---

<sup>1</sup> Investigadora titular, Instituto de Ingeniería, UNAM. Apartado postal 70-472, México 04510 D.F.

<sup>2</sup> Becario y estudiante de posgrado, Instituto de Ingeniería, UNAM.

Results obtained from the calculated expression are compared with those specified in the Complementary technical regulations for seismic design (Normas técnicas complementarias para diseño por sismo) of the Federal District code (Reglamento de construcciones del D.F., Mexico), 1987. The latter results are less conservative. Reasons for the discrepancies are studied.

## INTRODUCCION

Es frecuente encontrar estructuras con comportamiento histerético que tienen niveles de fluencia diferentes en sentidos opuestos de una dirección dada, como por ejemplo las estructuras inclinadas o con resistencia asimétrica. Este tipo de comportamiento presenta una respuesta sísmica no lineal distinta a la que tendría si su relación fuerza-desplazamiento fuese simétrica.

La revisión y diseño de estructuras con estas características se consideran actualmente en el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, y las Normas técnicas complementarias para diseño por sismo, ambos emitidos en 1987 (RCDF y NTCS-87, refs 1,2).

Con respecto a la revisión de la seguridad de estructuras existentes, las normas NTCS-87 (sección 11) indican que si el desplome de la construcción de interés excede de 0.01 veces su altura, para tomar en cuenta la asimetría, las fuerzas sísmicas de diseño deben multiplicarse por un factor de amplificación  $F=1+10f$  cuando se use el método simplificado de análisis, o por  $1+5Qf$  cuando se use el método estático o el dinámico modal, siendo  $f$  el desplome de la construcción dividido entre la altura de ésta y  $Q$  el factor de comportamiento sísmico.

Con respecto al diseño de este tipo de estructuras las NTCS-87 (sección 8.11) recomiendan que se dividan los factores de resistencia entre  $1+2.5dQ$ , en que  $d$  es la diferencia en los valores de  $a/Q'$ , expresados como fracción de la gravedad, que causarían la falla o fluencia plástica de la estructura en uno y otro sentido. Aquí  $a$  representa la aceleración de diseño y  $Q'$  es el factor reductivo de fuerzas sísmicas con fines de diseño (refs 1, 2).

Las anteriores recomendaciones fueron hechas con base en la experiencia profesional y en estudios breves. En este trabajo se comparan dichas recomendaciones con las que resultan de analizar sistemas elastoplásticos de un grado de libertad con cierto grado de asimetría excitados con registros correspondientes a sismos de magnitudes iguales o mayores que 6.8 y distancias epicentrales grandes (300-500 km).

El presente estudio puede ser útil para orientar al ingeniero calculista al diseñar o revisar la seguridad de estructuras que presentan asimetría en su nivel de resistencia.

## ANTECEDENTES

### Influencia de las características de los movimientos sísmicos

Previamente se estudió el efecto que tienen distintos tipos de movimientos sísmicos en la demanda de ductilidad de sistemas de un grado de libertad con asimetría en fluencia, ante dos familias de excitaciones simuladas con diferentes características estadísticas (ref 3). La primera corresponde al acelerograma registrado en la SCT, componente EW, en 1985, y la segunda al registrado en El Centro, California, componente NS, en 1940. En dicha referencia se propone una expresión sencilla para calcular la esperanza de la demanda de ductilidad de un sistema asimétrico ( $\bar{\mu}_x$ ) con respecto a la que se desarrollaría si fuese simétrico ( $\bar{\mu}_{x=0}$ ). Dicha expresión es la que se sigue:

$$\frac{\bar{\mu}_x}{\bar{\mu}_{x=0}} = 1 + \alpha \frac{F_e}{F_y} x \quad (1)$$

Aquí  $F_e$  representa la fuerza elástica desarrollada por el sistema,  $F_y$  la fuerza de fluencia de diseño,  $\alpha$  es un parámetro que depende de las características de la excitación, y  $x$  el grado de asimetría expresado como fracción de la gravedad, definido como la mitad de la diferencia que existe entre el valor absoluto de la fuerza de fluencia que presenta el sistema en un sentido y en el opuesto, dividido entre el peso del sistema,  $W$ . El significado del parámetro  $x$  puede inferirse a partir de la fig 1.

En la ref 3 se llega a los valores  $\alpha = 7.4$  y  $\alpha = 23$ , asociados a los sismos de El Centro, 1940 y SCT, 1985, respectivamente. Nótese que el valor de  $\alpha$  que recomiendan las NTCS-87 es igual a  $\alpha = 5$ , y se supone que  $Q = F_e / F_y$ .

### Influencia de la duración del movimiento

En una etapa posterior (ref 4) se estudió la influencia de la duración de la parte intensa del movimiento sísmico y de las características del comportamiento histerético en este tipo de estructuras. De dicho estudio se deduce que: 1) el tiempo

necesario para que un sistema con asimetría alcance su desplazamiento máximo crece a medida que los periodos de la excitación y de la estructura son más cercanos entre sí; 2) a mayor nivel de asimetría, mayor es la influencia que tiene la forma del registro de aceleraciones; 3) la influencia de la duración de la parte intensa de la excitación es más significativa cuando los sistemas presentan periodos lejanos al de la excitación; y 4) la duración de la fase intensa que se requiere para que un sistema alcance su respuesta máxima aumenta cuando crece el grado de asimetría de la estructura.

#### INFLUENCIA DEL CONTENIDO DE ENERGIA DE LA EXCITACION

En el presente trabajo se analizan sistemas elastoplásticos de un grado de libertad, con distintos periodos iniciales  $T$ , coeficientes de diseño sísmico  $C_y$ , y grados de asimetría  $x$ , excitados con diez sismos reales registrados en las zonas blanda y dura de la ciudad de México, y con tres senoides moduladas. Las características de estos movimientos se presentan en la tabla I. Sus respectivos espectros de respuesta para 5% de amortiguamiento se muestran en las figs 2, 3 y 4.

Las características de las senoides moduladas son: periodo de 2 s, duración de 100 s y aceleración máxima de 0.1 g. Cada función se modula con una envolvente distinta. La primera consiste en un triángulo con vértice en 10 s (movimiento I), la segunda es trapecial con amplitud máxima entre 10 y 30 s, a partir de donde varía linealmente hacia sus extremos (movimiento II), y la tercera es igual a la anterior pero con amplitud máxima entre 10 y 70 s (movimiento III).

Los sismos registrados en la ciudad de México que se emplean aquí son de magnitud mayor o igual a 6.8, con foco en el suroeste de la República Mexicana.

Utilizando los tres grupos de acelerogramas se obtuvieron demandas medias de ductilidad  $\bar{\mu}_x$  normalizadas con respecto a demandas de los mismos sistemas si estos fuesen simétricos,  $\bar{\mu}_{x=0}$ . A partir de los resultados se propuso la siguiente expresión para estimar la relación  $\bar{\mu}_x / \bar{\mu}_{x=0}$ :

$$\frac{\bar{\mu}_x}{\bar{\mu}_{x=0}} = 1 + \beta \ln \left[ \delta + \frac{\varepsilon I}{(t_b - t_a) a_y^2} \right]^n \left( \frac{F_e}{F_y} \right) \quad x = 1 + Dx \quad (2)$$

donde los límites de la integral  $I = \int_{t_a}^{t_b} a^2 dt$  corresponden a la parte intensa de la excitación,  $s = t_b - t_a$ . En este estudio se refiere a la duración de la parte intensa del movimiento, la cual contiene el 90% de la energía ( $s_{90}$ );  $a_y = C_y g$  es la aceleración de diseño,  $F_e / F_y$  ya se definió;  $\beta$ ,  $n$ ,  $\epsilon$  y  $\delta$  son parámetros por ajustar a partir de las respuestas, y  $x$  es el grado de asimetría.

Comparando la ec. 1, con la ec. 2 se observa que esta última incluye términos que consideran la influencia del contenido de energía del movimiento basal normalizado con respecto a la aceleración de diseño y la duración. Para valores positivos de los parámetros  $n$  y  $\beta$  esto implica que mientras más grande es la relación  $I / s a_y^2$  mayor es la relación de demandas de ductilidad  $\bar{\mu}_x / \bar{\mu}_{x=0}$ . Asimismo, mientras más grande es el valor de  $F_e / F_y$  la relación de demandas de ductilidades se incrementa.

### Factor de amplificación

En este trabajo se analizaron 53 sistemas excitados con registros reales y 62 con funciones senoidales moduladas. Dentro de cada conjunto se estudiaron casos con relaciones  $F_e / F_y$  comprendidas entre 1 y 6, correspondientes a sistemas con distintos periodos de vibración ( $0.5 \text{ s} \leq T \leq 3 \text{ s}$ ), diferentes coeficientes de diseño sísmico ( $0.06 \leq C_y \leq 0.4$ ) y tres grados de asimetría ( $x = 0, 0.01$  y  $0.02$ ). A partir de los casos estudiados se efectuaron regresiones numéricas mediante el criterio de mínimos cuadrados. Los valores de los parámetros que resultan son:  $\beta = 4426$ ,  $\delta = 0.90$ ,  $\epsilon = 15$  y  $n = 0.074$ . En la figura 5 se presentan los resultados y el ajuste de la curva de regresión siguiente:

$$\frac{D}{(F_e / F_y)} = 4426 \ln \left[ 0.9 + 15 \left( \frac{I}{s a_y^2} \right)^{0.074} \right], \quad (3)$$

donde,

$$\frac{I}{s a_y^2} \geq 0.0067$$

Se obtuvieron las desviaciones estandar de los resultados divididos entre los correspondientes valores de cada una de las curvas de regresión para los siguientes grupos de valores:  $1 < F_e/F_y \leq 2$ ,  $2 < F_e/F_y \leq 3$ ,  $3 < F_e/F_y \leq 4$ ,  $4 < F_e/F_y \leq 5$  y  $5 < F_e/F_y \leq 6$ , y se calcularon los respectivos coeficientes de variación. Los resultados se presentan en la tabla II. Se observa que se presentan coeficientes de variación más altos para valores  $1 < F_e/F_y \leq 2$  que para relaciones  $F_e/F_y$  mayores. La expresión (3) es válida para valores  $I/sa_y^2$  superiores a 0.0067. Valores menores que esta relación generalmente son de poco interés para el diseño sísmico de estructuras.

#### EJEMPLO ILUSTRATIVO

Enseguida se encuentran el valor esperado del factor de amplificación de la demanda de ductilidad (ec. 2) correspondiente a un sistema de un grado de libertad con periodo igual a 1.9 s, diseñado con un coeficiente de diseño sísmico  $C_y = 0.2$ , sometido a un sismo igual al registrado en Tláhuac el 21 de septiembre de 1985 (TLHD-850921T). De la tabla I y la fig 2 se encuentran los siguientes valores:  $I/a_y^2 = 0.974$ ,  $F_e/F_y = 6.25$ ,  $s = 43.85s$  por lo tanto  $D = 428$  (ec. 3). Suponiendo  $x = 0.01$ , entonces  $\bar{\mu}_x/\bar{\mu}_{x=0} = 1 + 4.28 = 5.28$ ; es decir, se espera que la demanda de ductilidad del sistema asimétrico sea 5.28 veces la que desarrollaría si fuese simétrico.

Si se calcula el factor de amplificación a partir de las recomendaciones que establecen las NTCS-87 se obtiene  $\bar{\mu}_x/\bar{\mu}_{x=0} = 1 + 5 (6.25) (0.01) = 1.31$ . Este valor resulta menor que el encontrado en el párrafo anterior, debido a que las normas técnicas en cuestión toman en cuenta que las capacidades de las estructuras son mayores que sus valores nominales supuestos en el diseño. Las normas recomiendan factores de carga y resistencia que no se toman en cuenta en los análisis efectuados en este trabajo. Además, en los casos estudiados se supone un comportamiento elastoplástico sin deterioro, mientras que las estructuras ante movimientos fuertes tienden a sufrir degradación tanto de su rigidez como de su resistencia.

Por otro lado, es común que las estructuras presenten sobrerresistencia en su diseño. No es raro que los factores de sobrerresistencia FS tengan valores entre 1.1 y 3 (refs 5, 6). Si la ec 3 se afecta por el factor FS, el valor de la pendiente D también se debe alterar por dicho factor. Suponiendo  $FS = 1.5$  en el ejemplo presentado antes se obtiene  $D = 64.43$ , por lo tanto el valor  $\bar{\mu}_x/\bar{\mu}_{x=0}$  resulta igual a 1.64. Esta relación también es mayor que la que se obtiene de las NTCS-87, aunque la diferencia

es menos significativa

## CONCLUSIONES

Se resumen los resultados de un estudio realizado en el Instituto de Ingeniería, UNAM, sobre el comportamiento sísmico de sistemas estructurales con asimetría en su curva fuerza-desplazamiento.

Se deducen una expresión (ec 2) sobre el factor esperado de amplificación de las fuerzas sísmicas de diseño con el fin de tomar en cuenta la asimetría en fluencia de las estructuras. Tal ecuación indica que el contenido de energía del movimiento sísmico (I) normalizada con respecto al producto de la aceleración de diseño al cuadrado ( $a_y^2$ ) por la duración (s) es proporcional a la demanda de ductilidad esperada en una estructura con nivel de asimetría  $x$  normalizada con respecto a la demanda de la misma si el sistema fuese simétrico.

Comparando los resultados de la ec. 2 con los calculados a partir de las NTCS-87 se concluye que la expresión que se obtiene en el presente estudio es más conservadora. Esto se atribuye a las simplificaciones que se adoptan en los modelos estructurales aquí analizados, las cuales se mencionan en la sección anterior. Se hace notar que las recomendaciones propuestas en las NTCS-87 son optimistas, por lo que se sugiere que se modifiquen las secciones pertinentes de las NTCS-87 de manera que se tomen en cuenta los resultados obtenidos en este estudio. Para el ejemplo presentado, un valor de  $\alpha = 10$  (ec. 1) conduciría a resultados parecidos a los obtenidos con la ec. 2 si se toma en cuenta un factor de sobrerresistencia  $FS = 1.5$ .

## RECONOCIMIENTOS

Se agradecen a E. Rosenblueth y L. Esteva sus valiosos comentarios y sugerencias. La participación de J. Ortega y R. Diederich en las primeras etapas del proyecto fue de gran ayuda.

## REFERENCIAS

1. Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. Gaceta oficial del Departamento del Distrito Federal, No 9, julio 1987, México, D.F.
2. Normas técnicas complementarias para diseño por sismo, Gaceta oficial del Departamento del Distrito Federal, No 38, noviembre 1987, México, D.F.
3. Ruiz, S. E. Rosenblueth, E. y Dieredich, R., "Respuesta sísmica de estructuras con asimetría en fluencia", VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, C45-C59, Querétaro, Qro, 1987.
4. Ortega, J, Ruiz, S. E, y Dieredich, R., "Demandas de ductilidad de sistemas estructurales con relaciones carga-deformación asimétrica. Influencia de la duración del movimiento", VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica y VII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Vol. I, B158-B168, Acapulco, Gro, 1989.
5. Miranda, E. y Bertero, V. V, "The Mexico earthquake of september 19, 1985-Performarce of low-rise buildings in Mexico city", Earthquake Spectra, Vol. 5 No. 1, pp 121-143, 1989.
6. Bertero, V. V., "Lessones learned from earthquakes and research and implications for earthquake resistant design of building structures in the United States", Earthquake Spectra, Vol. 2, No. 4, pp 825-858, 1986.



Tabla I

CARACTERISTICAS DE LOS SISMOS UTILIZADOS EN ESTE ESTUDIO

Excitación	Máx. acel. /g	$\int a^2 dt$ (m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> )	Magnitud M <sub>s</sub>	Dur. (s) S <sub>90</sub>
TLHD-85-09-21L	0.103	3.62	7.6	36.7
TLHD-85-09-21T	0.092	3.75	7.6	43.8
SCT-89-04-25T	0.038	0.81	6.8	67.0
SCT-89-04-25L	0.038	0.72	6.8	72.0
TLHB-89-04-25T	0.049	1.17	6.8	59.0
TLHB-89-04-25L	0.035	0.98	6.8	67.0
CU01-89-09-19L	0.029	0.42	8.1	72.0
CU01-89-09-19T	0.032	0.46	8.1	59.0
CUMV-85-09-19L	0.039	0.43	8.1	35.0
CUMV-85-09-19T	0.040	0.34	8.1	37.0

Tabla II

COEFICIENTES DE VARIACION

	Coeficiente de variación (CV)
$F_o / F_y$ ec.	$D / (F_o / F_y) = 4426 \ln(0.9 + I / s a_y^2)^{0.074}$
1-2	1.05
2-3	0.51
3-4	0.37
4-5	0.58
5-6	0.48

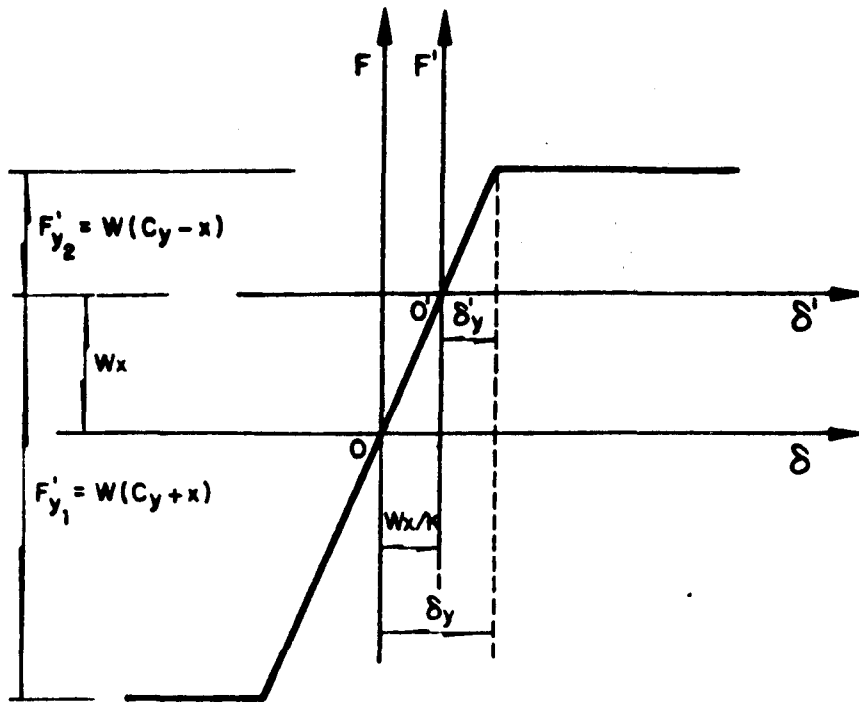
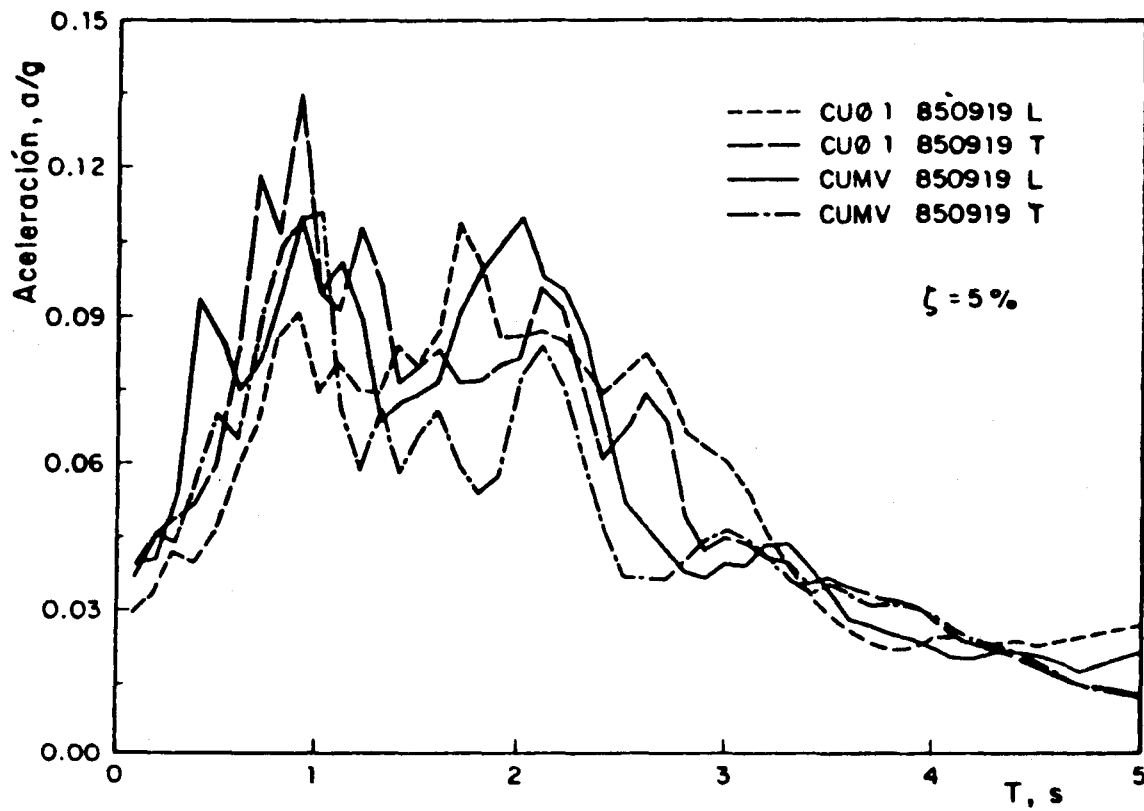
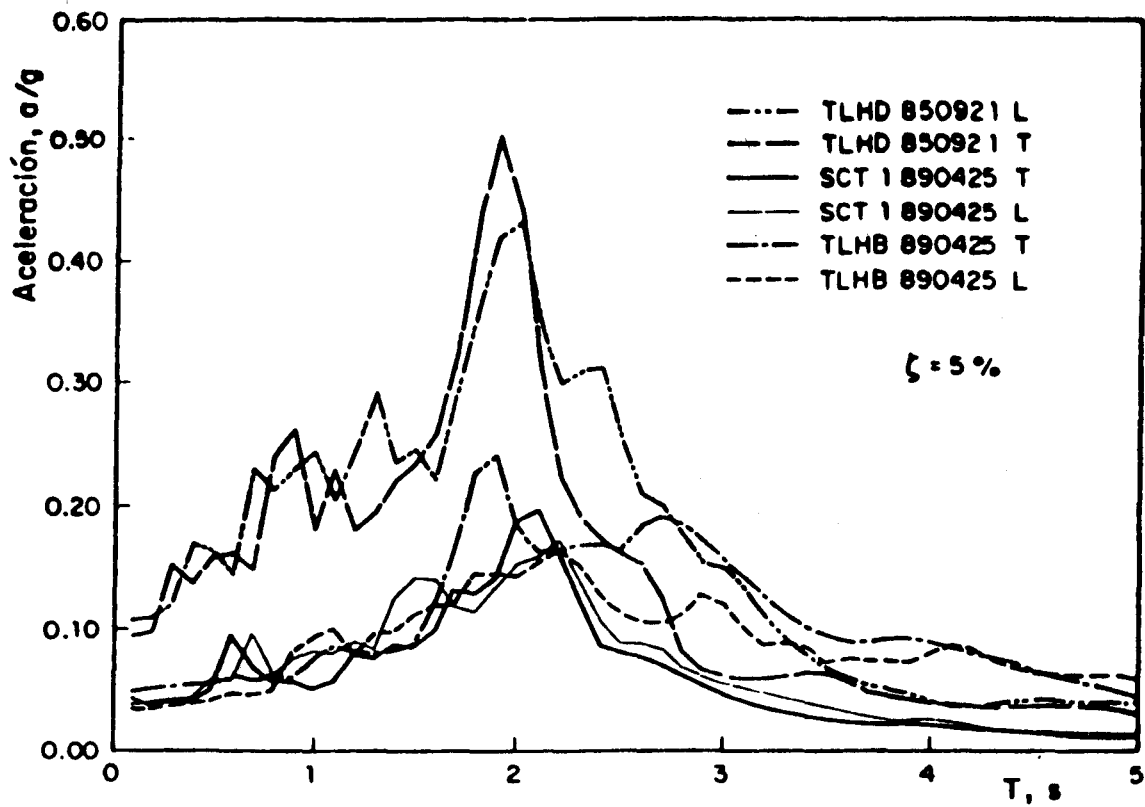


Fig 1 Relación fuerza-desplazamiento de los sistemas analizados



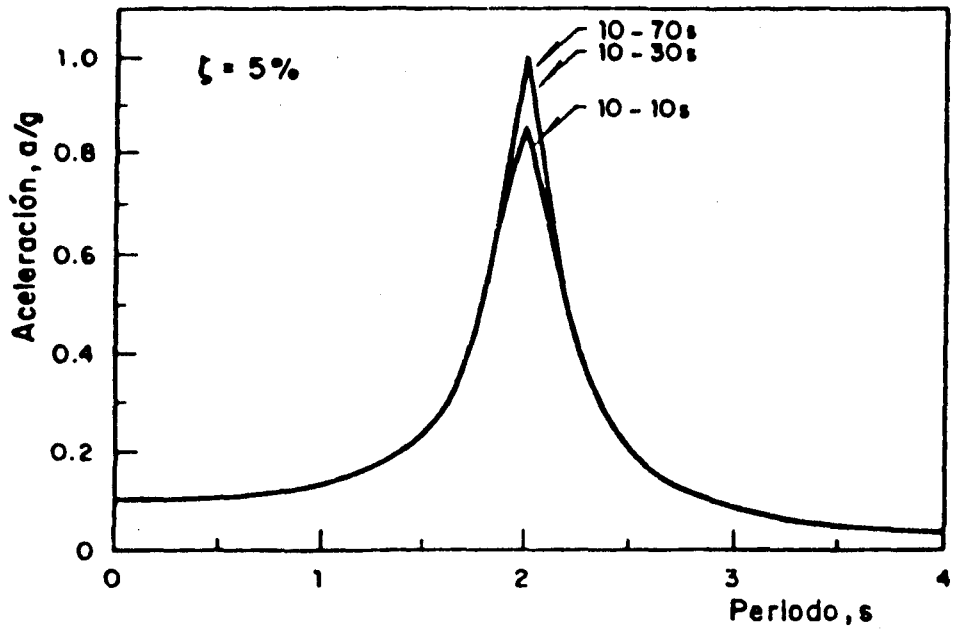


Fig 4 Espectro de respuesta de los movimientos I, II y III

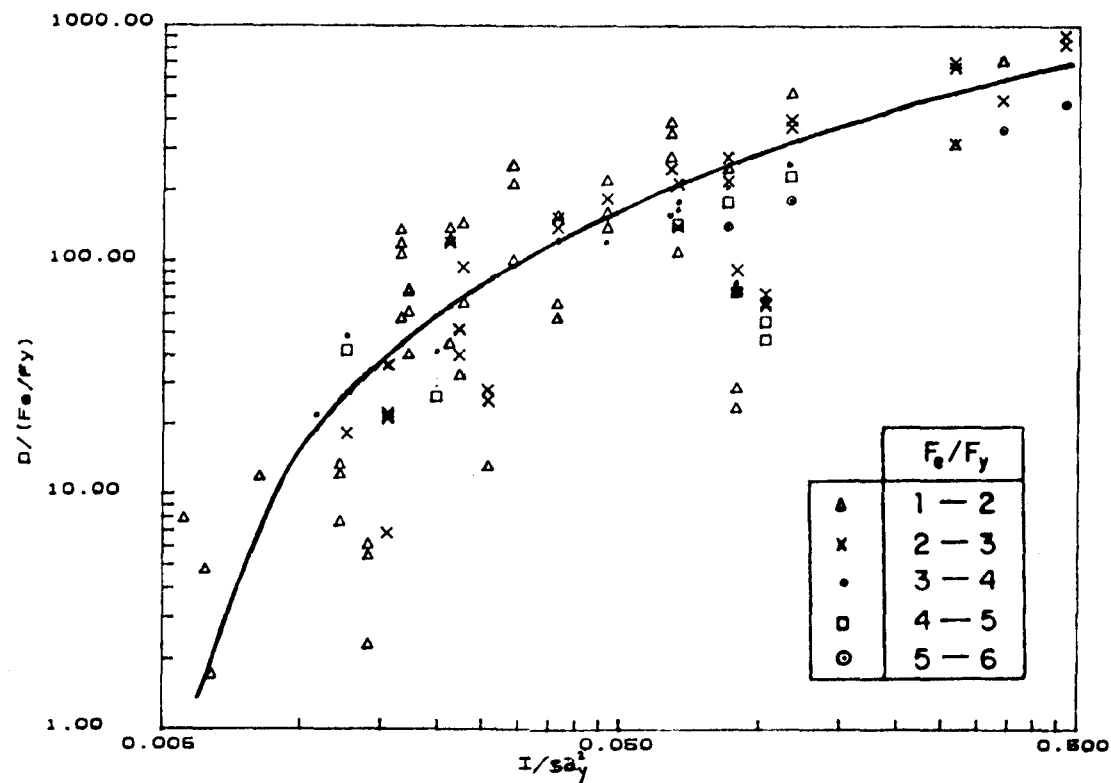


Fig 5 Curva de regresión y respuestas calculadas, considerando la duración del movimiento