

ALGUNAS PARTICULARIDADES DE LOS ESPECTROS DE RESPUESTA

J. Prince*
L. Alonso*
L.F. Hernández*
M.A. Oñate*

RESUMEN

El nivel mínimo de daños que se ha observado durante temblores intensos en la República Mexicana, particularmente en Guerrero y Oaxaca, ha originado estudios que arrojen luz sobre la relación entre los efectos observados, los espectros de respuesta de los sismos y los espectros del Reglamento de Acapulco con que se diseñaron muchas de las estructuras más importantes de esa zona. Como la aparente discrepancia entre causa y efecto llega a manifestarse con ordenadas espectrales de aceleración cerca de diez veces mayores que las utilizadas para diseño (para 5 por ciento del amortiguamiento crítico), en este trabajo se examinan algunas de las particularidades del cálculo de espectros de respuesta de temblores que pudieran explicar en parte las diferencias observadas.

INTRODUCCION

Los acelerógrafos que el Instituto de Ingeniería opera en la zona sísmica del país han registrado algunos temblores importantes, entre los que destacan los obtenidos en Acapulco el 6 de octubre de 1974 y el 18 de marzo de 1978, y en Oaxaca, Oax. el 28 de agosto de 1973, que tuvieron aceleraciones máximas de 0.54 g, 0.85 g y 0.20 g, y duraciones de 9.5, 13.0 y 40.5 seg, respectivamente (Refs 1-3). En vista de que tales niveles de aceleración son muy elevados en relación con aquellos que han producido daños considerables en otros países, incluyendo Japón (Ref 4), y de que en México no se presentaron efectos similares aún entre construcciones de baja o mediana calidad, se plantea la conveniencia de dilucidar las razones por las que dichos sismos resultaron ser de consecuencias tan benignas.

Aunque en la literatura se han propuesto diferentes criterios, aún no se cuenta con una relación ampliamente aceptada entre la capacidad destructiva de un temblor y alguna de las características cuantitativas del movimiento del terreno. Se han empleado los valores máximos de diversas variables, y funciones de ellas o de la historia completa de la aceleración del terreno, pero corresponde al espectro de respuesta uno de los lugares más destacados por ser el concepto que con mayor frecuencia se utiliza para describir la severidad de un temblor. Así, a él se han asociado tanto medidas de la intensidad, como la base de procedimientos de análisis de empleo muy generalizado, por lo que es de particular interés examinar algunas de sus características y los procedimientos utilizados para su cálculo.

*Instituto de Ingeniería, UNAM

La obtención de espectros de respuesta se considera actualmente rutinaria, por tratarse de un proceso de cálculo bien claro y conocido, para el que existen programas estándar de computadora. Sin embargo, se señalarán algunos ejemplos en que los espectros son un tanto engañosos, no sólo en ciertas ordenadas críticas, sino inclusive en su forma general.

VALORES ESPECTRALES PARA AMORTIGUAMIENTO NULO

Aún en las computadoras rápidas de la actualidad (como la B-7800 de la UNAM) toma de 20 a 30 min calcular los espectros de aceleración absoluta y velocidad y desplazamiento relativos de temblores de 30 a 50 seg de duración definidos a intervalos de 0.01 seg, para fracciones β del amortiguamiento crítico (los valores estándar, derivados de la práctica americana, son $\beta = 0, 0.02, 0.05, 0.1$ y 0.2). Estos espectros se calculan para conjuntos de 90 a 100 periodos, generalmente en el intervalo de 0.04 a 10 seg. La separación resultante entre puntos consecutivos hace que se omitan ordenadas espectrales más altas, que incluso pueden llegar a darle una apariencia o forma diferente al espectro. Ejemplos de esta clase se han obtenido al examinar el comportamiento de las ordenadas espectrales de los tres temblores citados.

En las Figs 1 y 2 se presenta los espectros de aceleración absoluta para $\beta = 0$ y 0.02 , respectivamente, de la componente NS del temblor de Aca-pulco del 18 de marzo de 1978. En estas Figs el periodo varía entre 0.060 y 0.100 seg, intervalo en que se encontraron las ordenadas máximas durante el procesamiento rutinario. La separación entre periodos consecutivos es 0.001 seg, varias veces más pequeña que la que se emplea en los cálculos usuales. En la Fig 1 puede observarse que aún para intervalos tan pequeños, el espectro dista de variar suavemente, lo que sí sucede al introducir algo de amortiguamiento, Fig 2.

Las líneas que unen el extremo superior de las barras verticales de las Figs 1 y 2, son las que usualmente se presentan como espectros y que corresponden a los siguientes conjuntos de datos:

Conjunto A- Este conjunto tiende a aproximar un espaciamiento geométrico uniforme en una escala logarítmica (empleado en México), y

Conjunto B- Este ha sido definido con valores a espaciamientos numéricos uniformes en diferentes intervalos (cálculo rutinario en E.U. Ref 5).

Los dos grupos de periodos de la Fig 1 dejan fuera el de 0.91 seg, para el que se obtiene la ordenada espectral máxima, lo que resulta tanto en un error superior a 60 por ciento, si se interpolara linealmente entre las ordenadas para $T = 0.9$ seg y $T = 0.95$ seg, como en un cambio notable a la forma del espectro en esa zona. A pesar de lo importante de esta

discrepancia, es claro que podrían obtenerse mayores ordenadas para otros valores diferentes de los mostrados. Se observa además en la Fig 1 que el conjunto B daría una mejor representación rutinaria que el conjunto A; en cambio, en la Fig 3 la del conjunto A sería mejor que la del conjunto B, que contiene un error de aproximadamente 50 por ciento en la ordenada espectral máxima. Al introducir 2 por ciento del amortiguamiento crítico, la variación es más suave, pero en la cercanía de $T = 0.1$ seg, ambos conjuntos rutinarios A y B quedan todavía cortos en aproximadamente 20 por ciento.

MAXIMOS EN LA HISTORIA DE RESPUESTA

El máximo valor absoluto en la historia de la respuesta es la ordenada espectral para el periodo y el amortiguamiento correspondientes. Esta definición ignora si el máximo proviene de un pico aislado en la respuesta, mucho más alto que cualquier otro o si es precedido y seguido por otros casi tan grandes, lo que indicaría muchos más "ciclos de aplicación de carga elevada", con los que sería de esperarse que los efectos en la estructura fueran diferentes. Como ejemplo, la parte inferior de las figs 4 y 5 muestra el intervalo de periodos de ordenadas máximas del espectro de aceleración absoluta, para las dos componentes del temblor registrado en Oaxaca, Oax. La parte superior de estas Figs muestra una gráfica de $N_{0.7}$ vs T (periodo) para el mismo intervalo. (Las barras verticales en las partes superior e inferior coinciden en periodo). $N_{0.7}$ es el número de máximos en la historia de la respuesta que exceden αR_{\max} , donde α es una constante (aquí = 0.7) y R_{\max} es la respuesta máxima, igual al valor espectral.

La fig 4 muestra que $N_{0.7}$ es considerablemente mayor, hasta cerca de dos veces más, para la mayoría de los periodos adyacentes al del máximo S_a . En la Fig 5 se observa que $N_{0.7}$ es relativamente pequeño para la abscisa del máximo espectral en comparación con los tres periodos a cada lado, a los que corresponden valores sólo ligeramente inferiores al máximo. Dado que los efectos que sufre una estructura dependen no solo del máximo de la respuesta sino de la historia completa, no es claro aún cuales estructuras resultarían más afectadas, si las que tienen asociado un máximo más grande, pero aislado, o las que experimentan varios ciclos de carga de nivel muy parecido al de un máximo algo menor.

Con objeto de incorporar en una gráfica información sobre la magnitud de los máximos que acompañan en la historia de la respuesta al mayor de todos (único que pasa a formar parte del espectro), se han preparado las Figs 6 a 8, que contienen algunos resultados preliminares de investigaciones en curso. En estas Figs las ordenadas representan la relación $\lambda = N_\alpha / N_0$, y las abscisas son periodos (N_0 es el número total de máximos en la respuesta). El límite superior ($\lambda=1$) representa todos los máximos de la respuesta; el límite inferior corresponde a $1/N_0$ que representa la información proporcionada por el espectro.

En las Figs 6 a 8 se han incluido tres valores de α : 0.5, 0.7 y 0.9 (Cabe observar que en estas Figs las curvas no se cruzan, pero sí pueden coincidir en 1 ó más puntos). Por ejemplo, en la Fig 6 se aprecia que

hay un solo punto ($T=0.34$) que excede 70 por ciento del máximo ($\alpha=0.7$) y es éste mismo. Igual sucede para $\alpha=0.9$ en el intervalo de periodos de 0.50 a 0.86 seg.

El efecto de un aumento en el amortiguamiento puede apreciarse al comparar las Figs 6 y 7, que se refieren a $\beta=0.02$ y 0.05, respectivamente. En estas Figs se observa que: a) el límite inferior es prácticamente el mismo en las dos gráficas, lo que indica que el número de picos en la respuesta se mantiene casi constante; b) cerca de $T = 0.70$ hay menor número de picos para $\alpha=0.7$, inclusive dos únicos y, c) la banda que contiene todos los puntos de la gráfica es más angosta para $\beta=0.05$.

La Fig 8 corresponde a un sismo de duración 5 a 6 veces mayor que el de las Figs 6 y 7 para $\beta=0.02$ es más directamente comparable con la primera de éstas). En esta Fig puede apreciarse: a) un límite inferior más bajo (más picos en la respuesta como es de esperarse); b) el total de puntos de la gráfica abarca una banda considerablemente más ancha; c) salvo algunas pocas excepciones, el número de picos para una cierta α es considerablemente mayor y, quizá lo más significativo, d) la proporción de picos que exceden los niveles indicados de α en la respuesta es significativamente más alto.

Se han iniciado ya intentos dirigidos a sentar algunas bases para relacionar la posición de los puntos definidos en el plano $\lambda-T$ (y en otras representaciones similares) con los efectos observados en estructuras, y así enriquecer la interpretación de los espectros de respuesta.

CONCLUSIONES

1. El cálculo rutinario de espectros de respuesta para amortiguamiento nulo puede omitir máximos considerablemente mayores, dependiendo del conjunto de periodos que se utilicen. Para amortiguamientos reducidos, del orden del 2 por ciento del crítico, los errores correspondientes disminuyen pero aún pueden ser importantes.

2. Las ordenadas espectrales por sí mismas no son en la mayoría de los casos indicativas de la capacidad destructiva de un temblor, entre otros factores, porque solo proporcionan información sobre un punto único de la respuesta, sin considerar la magnitud de todos los demás máximos que ocurren en la historia completa.

REFERENCIAS

1. Prince, J. and Navarro, I., (1979) "Espectros de Diseño y de Respuesta en Acapulco, Gro.", Proc. V Nat'l Conf. on Earthq. Eng., Guadalajara, México.
2. Figueroa, J., (1974) "Sismicidad en Puebla. Macrosismo del 28 de Agosto de 1973. Instituto de Ingeniería, No 343, México.
3. Prince, J. and Alonso, L., (1980) "The Relatively Light Damage Produced by two Strong Motion Earthquake in Southern Mexico. Proc. VII WCEE, Istanbul, Turkey.

4. Katayama, T., "An Engineering Prediction Model of Acceleration Response Spectra and its Application to Seismic Hazard Mapping". Earthq. Eng. and Struct. Dynamics, Vol 10, No 1, 1982.

5. Trifunac, M.D. and Lee, V., (1973) "Routine Computer Processing of Strong-Motion Accelerograms". EERL 73-03, Caltech, Pasadena.

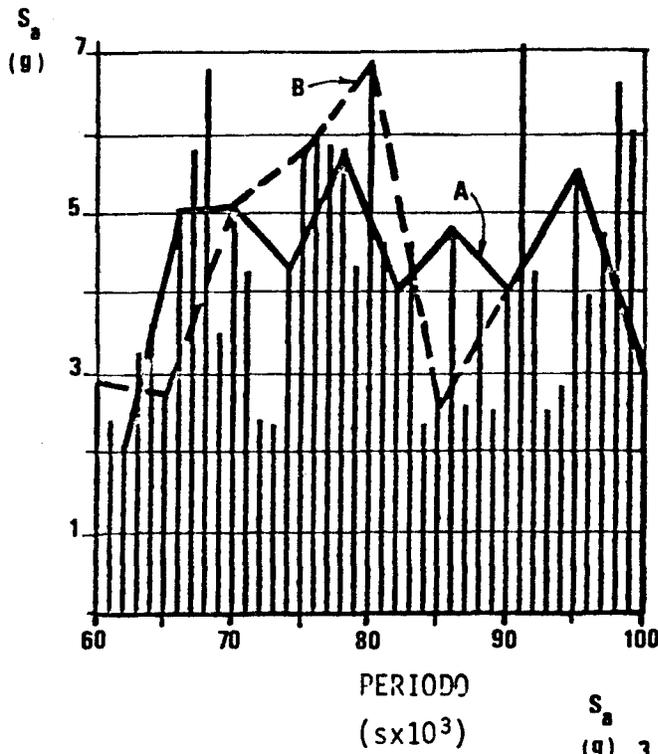


Fig 1
180378 Comp NS
 $\beta=0$

Fig 2
180378 Comp NS
 $\beta=0.02$

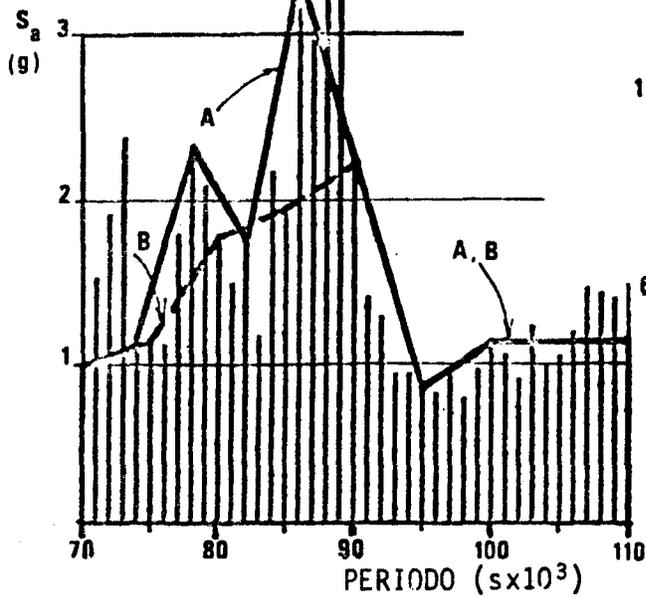
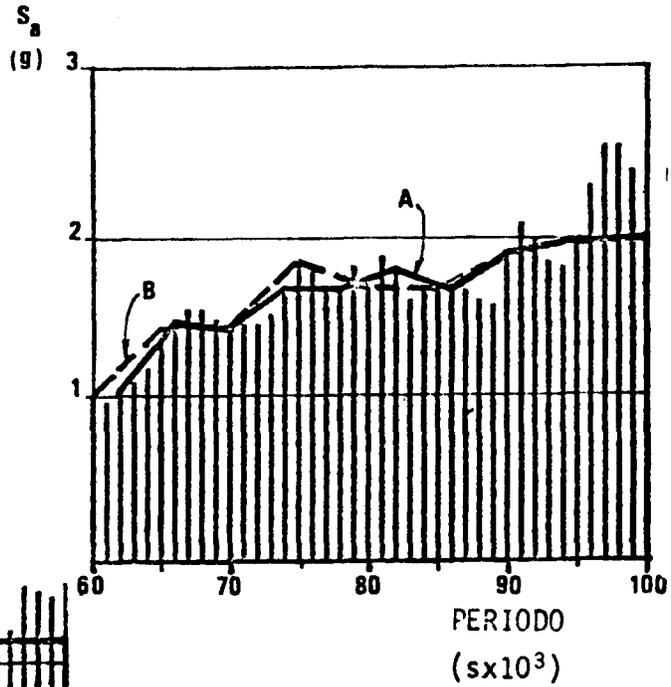


Fig 3
061074 Comp NS
 $\beta=0$

Figs 1-3 Espectros de aceleración absoluta (S_a) de sismos registrados en Acapulco, Gro.

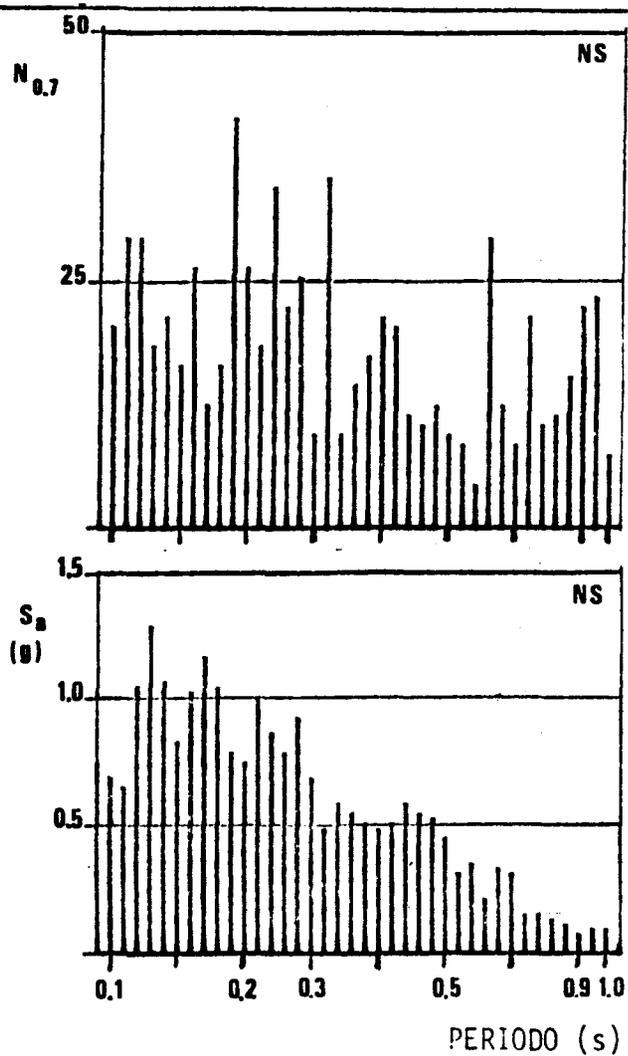


Fig 4 (NS)

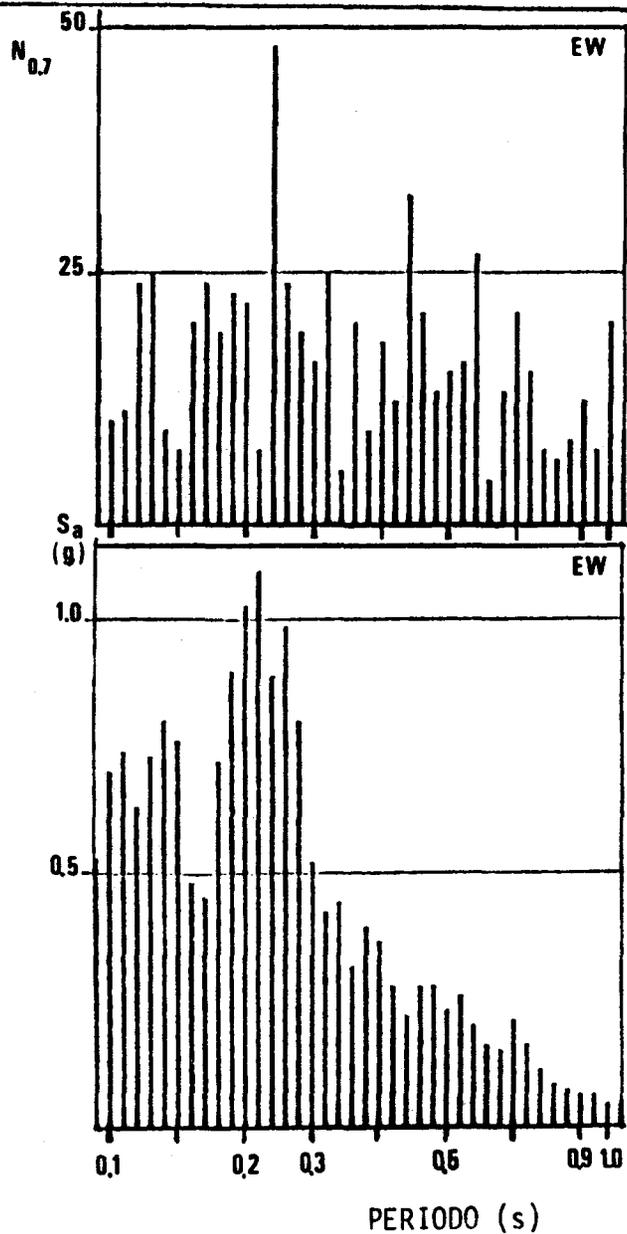


Fig 5 (EW)

Figs 4,5. Espectro de aceleración absoluta (S_a) y número de picos ($N_{0.7}$) que exceden $0.7 S_a$ en la historia de la respuesta ($\beta=0.02$) (Acelerograma de Oaxaca, Oax., 280873)

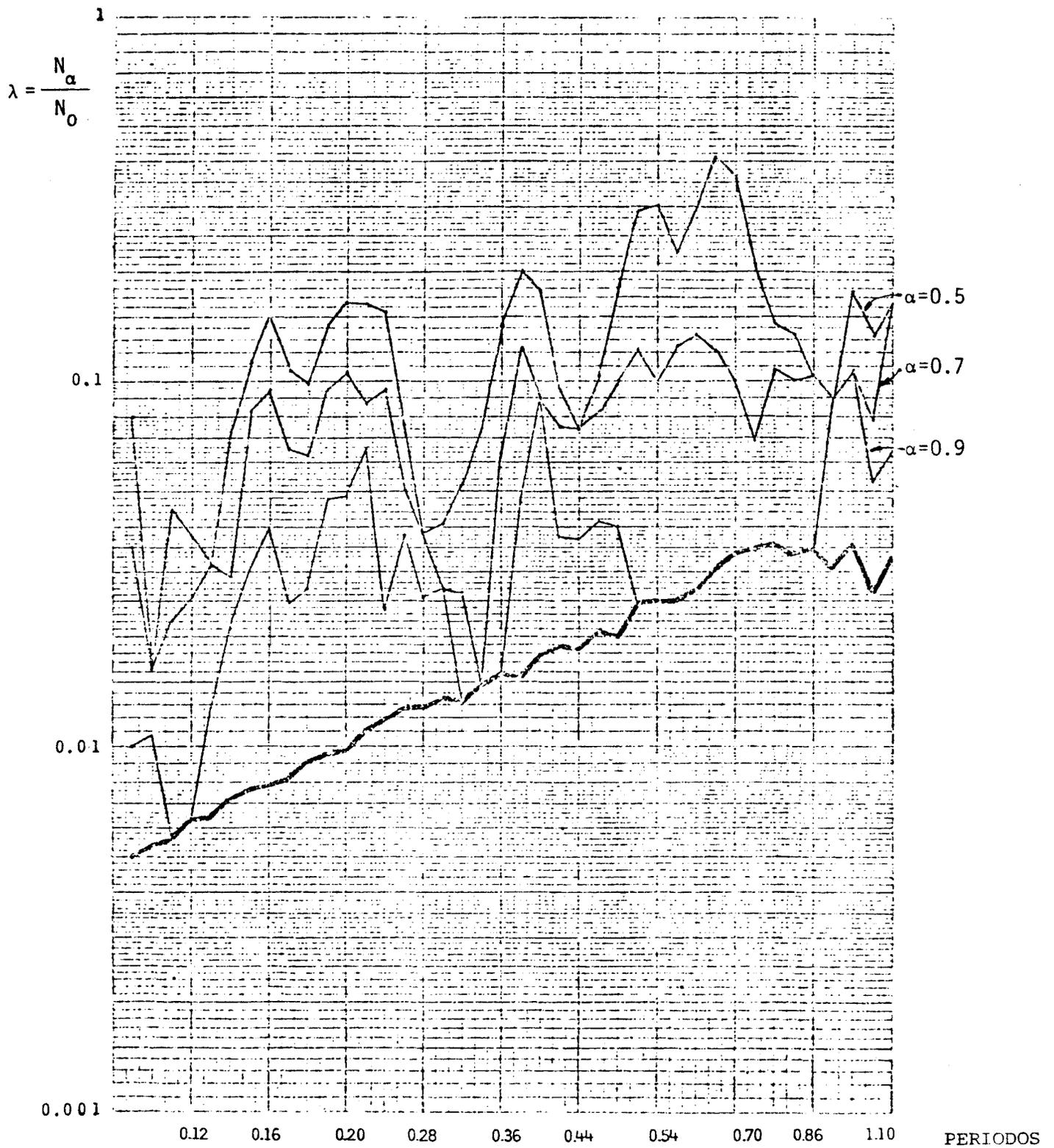


Fig 6 Número relativo de máximos que exceden diversas fracciones del valor espectral de aceleración para $\beta=0.02$
 Sismo Acapulco 061074. Componente EW.

$$\lambda = \frac{N_a}{N_0}$$

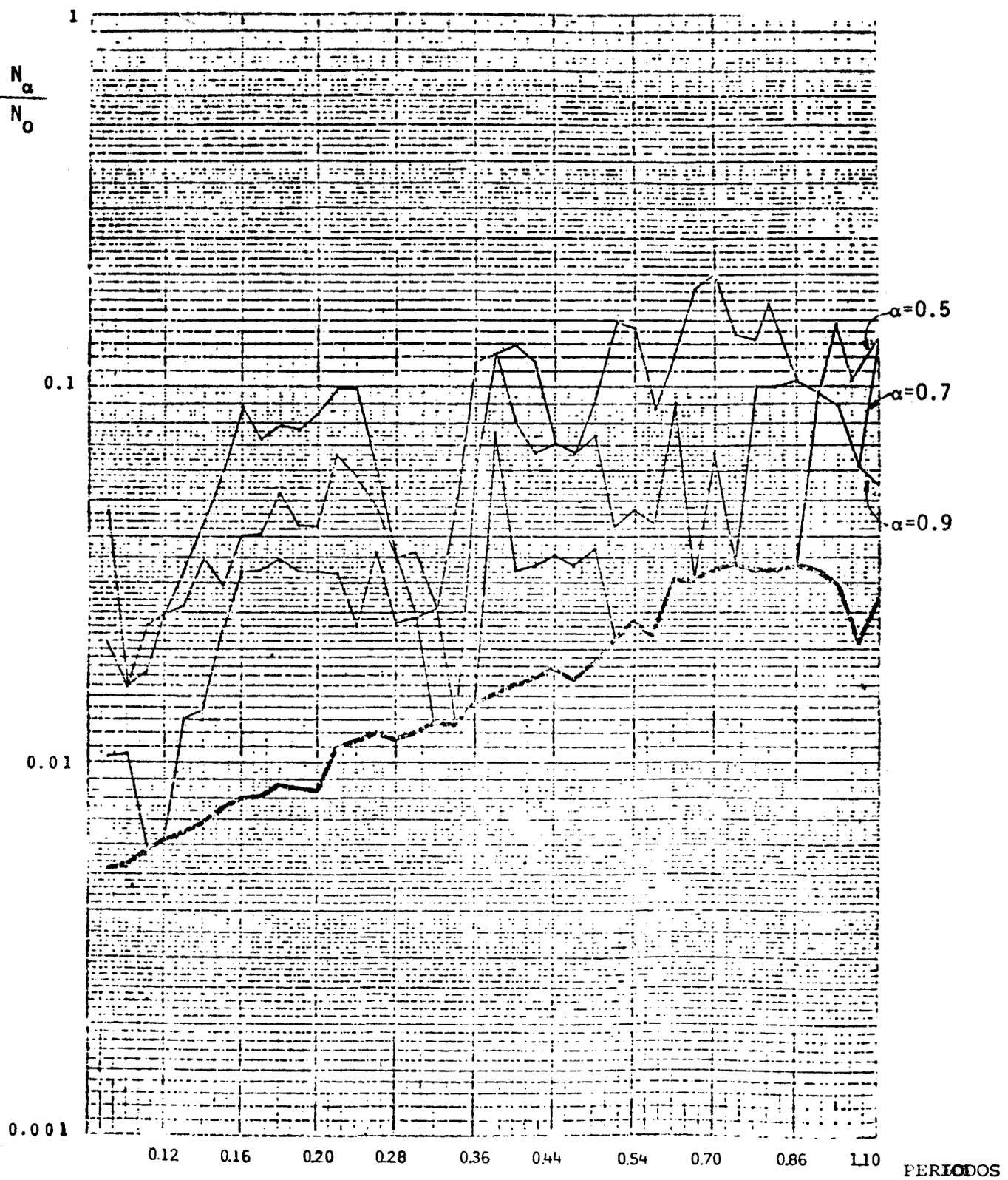


Fig 7 Número relativo de máximos que exceden diversas fracciones del valor espectral de aceleración para $\beta=0.05$ Sismo Acapulco 061074. Componente EW.

$$\lambda = \frac{N_{\alpha}}{N_0}$$

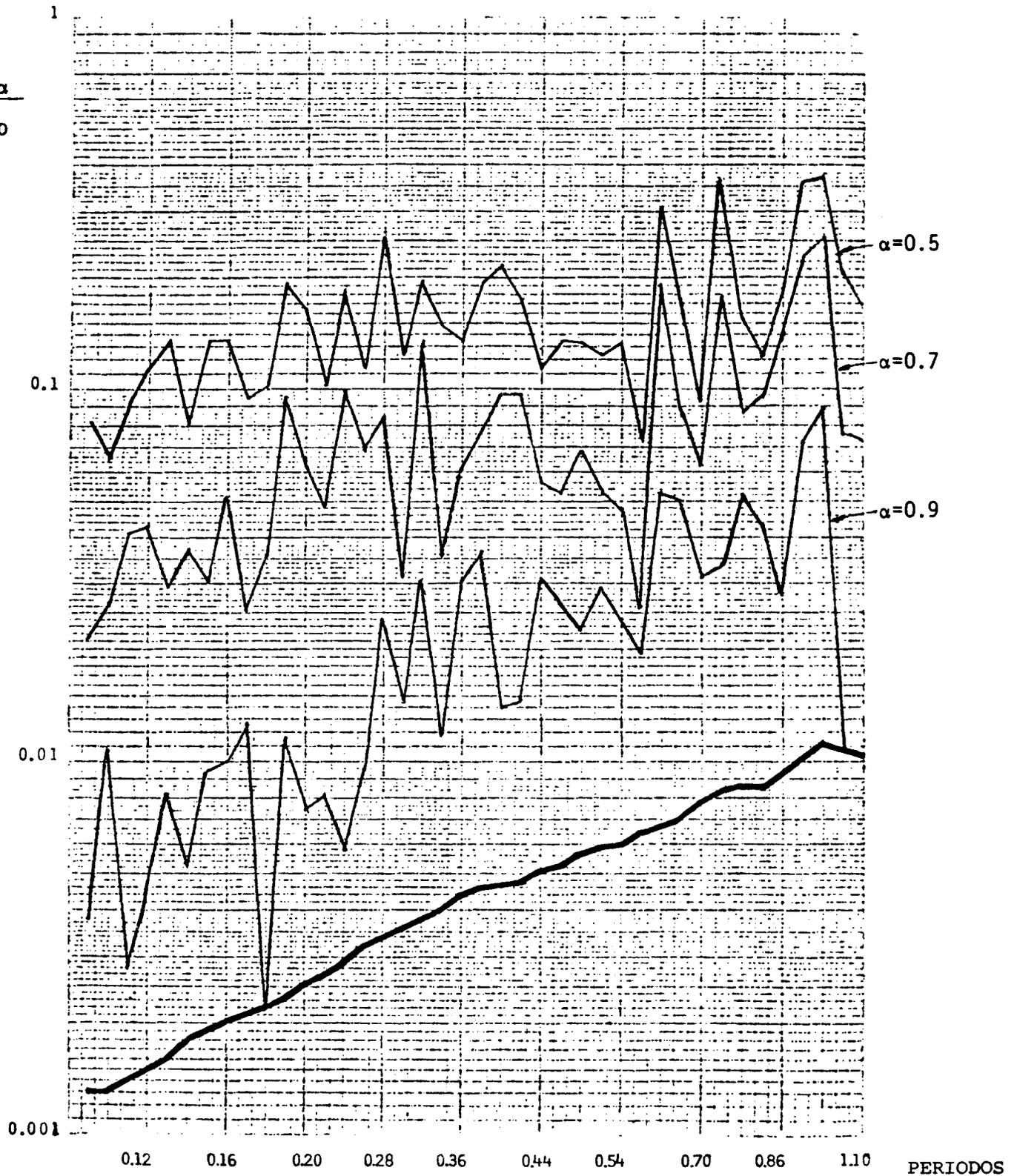


Fig 8 Número relativo de máximos que exceden diversas fracciones del valor espectral de aceleración para $\beta=0.02$ Sismo Orizaba/Oaxaca 280873. Componente NS.