

### III. ESPECTROS SÍSMICOS DE RESPUESTA INFLUENCIA DEL SUELO LOCAL

#### III. a. ESPECTROS: DEFINICION

La influencia combinada de la amplitud de las aceleraciones del terreno, su contenido de frecuencias y la duración de las sacudidas durante la acción de terremotos, puede representarse en forma conveniente con el auxilio de los espectros de respuesta. Los valores de respuesta (aceleraciones absolutas, velocidades y desplazamientos relativos) de sistemas de un grado de libertad con distintos periodos fundamentales y con una razón de amortiguamiento crítico constante, pueden evaluarse en función del tiempo, y sus valores máximos dibujarse en un gráfico que recibe el nombre de espectro sísmico de respuesta. (Fig.8E).

Se demuestra que la ordenada del espectro de aceleraciones asociada a una estructura con un periodo fundamental  $T=0$  segundos es la aceleración máxima del terreno,  $A_0$ . Por otra parte, el periodo asociado a la máxima ordenada del espectro de aceleraciones recibe el nombre de periodo predominante,  $T_p$ , (ref.24).

A cada acelerograma le corresponde un espectro de respuesta único. De aquí que una forma efectiva de comparar acelerogramas se obtenga mediante una comparación de sus espectros de respuesta correspondientes. Esta comparación resulta más efectiva cuando se comparan los espectros normalizados de aceleración, es decir, aquellos espectros adimensionales que resultan de dividir todas las ordenadas del espectro de aceleración por la aceleración máxima del terreno.

En general, un espectro de respuesta sísmica constituye una herramienta muy eficiente para la evaluación de las fuerzas laterales máximas inducidas en estructuras sometidas a una excitación sísmica conocida.

Así, si la estructura es un sistema de un grado de libertad, la fuerza lateral máxima inducida puede determinarse directamente del espectro de respuesta de aceleraciones si el periodo fundamental de la estructura es conocido. Por otra parte, si la estructura tiene varios grados de libertad, la respuesta máxima del sistema (cortes, desplazamientos, fuerzas laterales, etc.) en cada nivel, puede ser evaluada para un número determinado de modos de vibración, y la máxima total (envolvente) evaluarse mediante alguna combinación apropiada, de los efectos modales, (ref.26).

#### III. b. INFLUENCIA DEL SUELO LOCAL EN LA FORMA DEL ESPECTRO

La influencia que las condiciones del suelo local ejercen en la forma de los espectros de respuesta se ilustra claramente en la serie de 6 espectros normalizados de aceleración de la Fig.9 (ref. 16). De los seis espectros mostrados, cuatro fueron obtenidos en

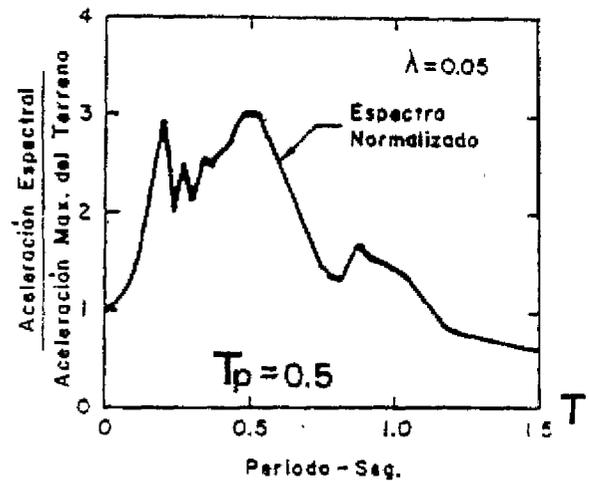
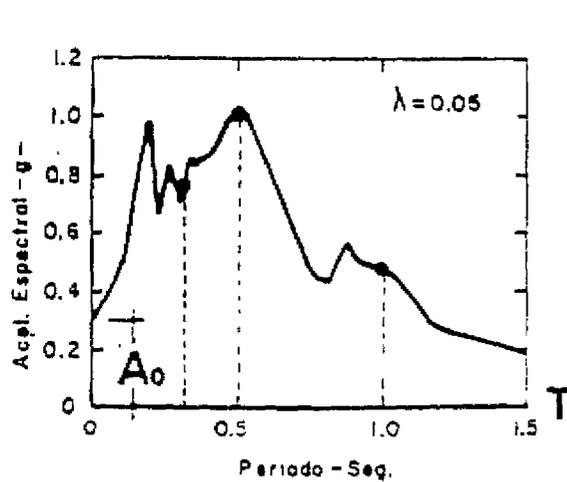
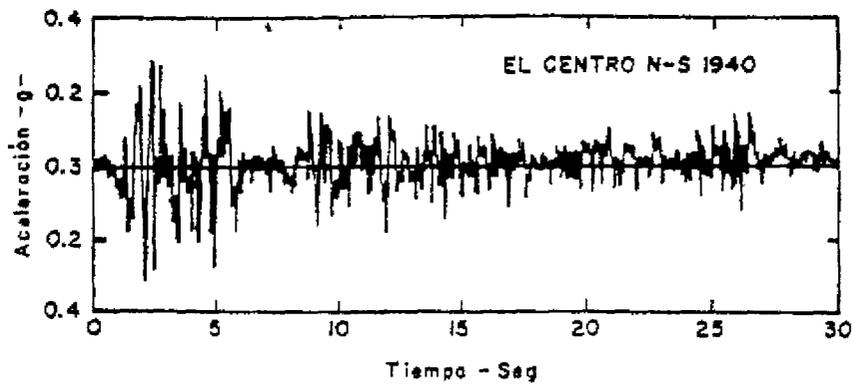
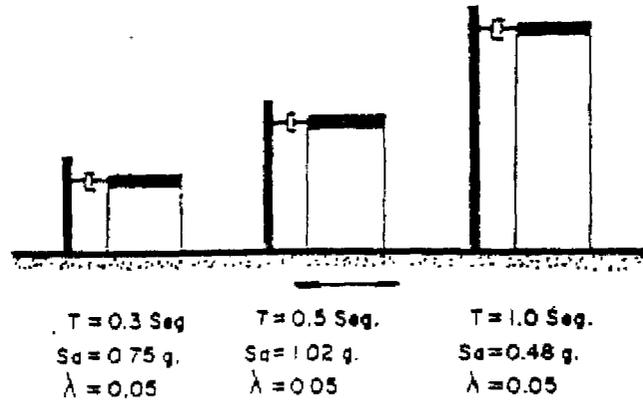


FIG. 8e CONSTRUCCION DE ESPECTROS DE ACELERACION ABSOLUTA Y NORMALIZADO. (TERREMOTO DEL.. CENTRO N-S, 1940).

una misma ciudad durante un mismo terremoto (A, B, C y E), y en general, los seis espectros corresponden a terremotos registrados a grandes distancias epicentrales ( $D \geq 125$  Km).

Los espectros y los perfiles de los depósitos de la Fig.9 están ordenados secuencialmente de A hasta F en orden decreciente de rigidez. Así, por ejemplo el suelo en el sitio A es un suelo rocoso, mientras que el sitio F es un depósito de suelo blando.

Puede observarse que en los depósitos conformados por suelos rígidos las ordenadas pico de los espectros de aceleración, o lo que es lo mismo, sus períodos predominantes  $T_p$  están asociados y períodos bajos (0,3 a 0,5 seg.) mientras que los períodos predominantes de los espectros obtenidos en la superficie de los depósitos de suelo blando tienden a ocurrir entre 1,5 y 2,5 segundos.

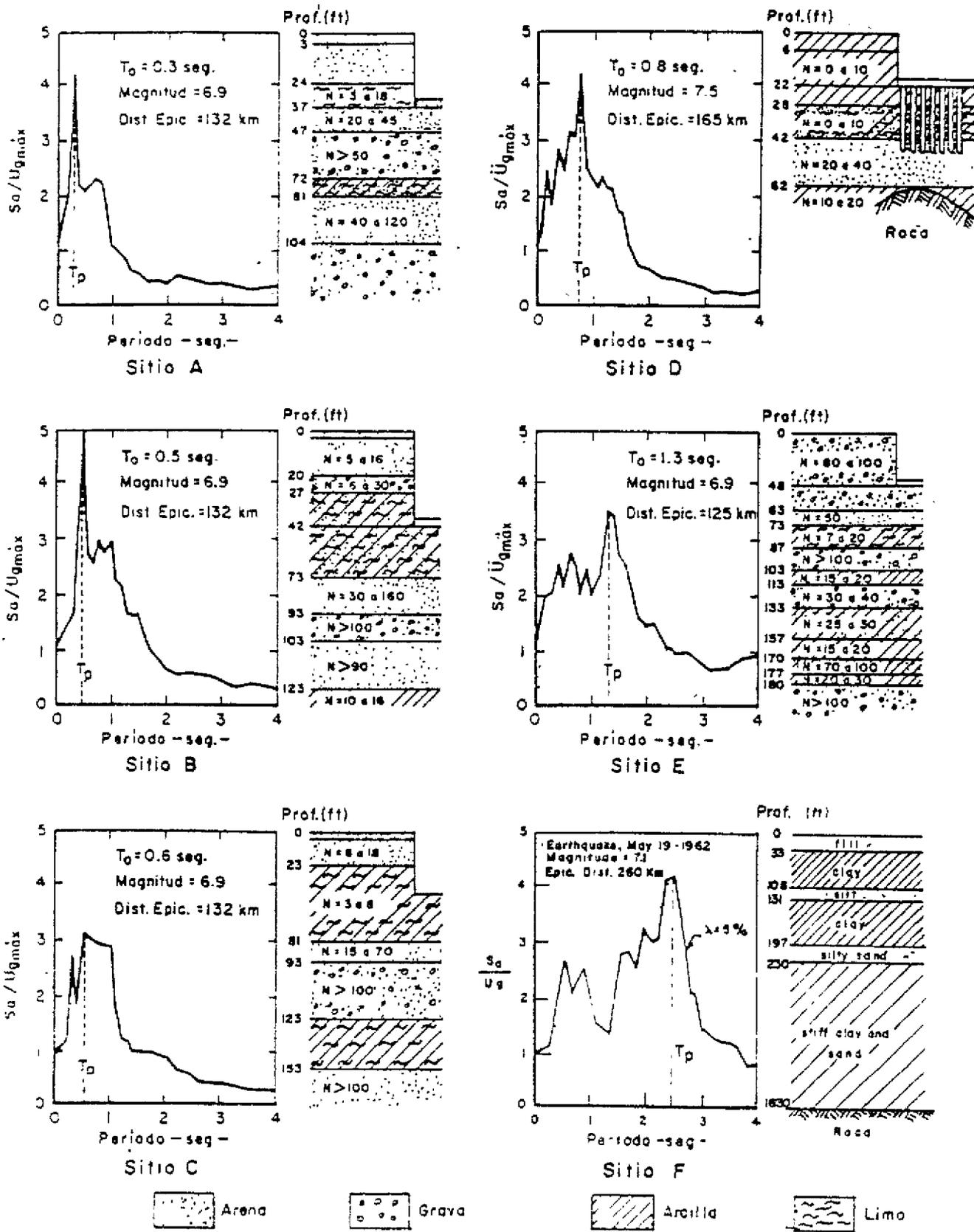
La Fig.9a por ejemplo, muestra en un perfil geológico, las variaciones de la aceleración máxima del terreno registradas en la superficie de depósitos de suelos con características distintas durante el terremoto de San Francisco de 1.957. Todos los puntos de interés señalados en el perfil distaban aproximadamente la misma distancia de la zona de disipación de energía (15 km.). Sin embargo, las aceleraciones registradas en la superficie variaron en algunos casos hasta en un 100%.

En la Fig.9a se observan también diferencias notables en las ordenadas de los espectros de aceleración. En efecto, puede observarse que la aceleración espectral registrada para un período  $T=1.2$  segundos en el depósito E es aproximadamente 3 veces mayor que la registrada en el depósito D para el mismo período, aún y cuando la aceleración máxima del terreno registrada en la superficie de ambos depósitos es idéntica. Por otra parte, y para el mismo período estructural  $T=1.2$  seg., la ordenada de la aceleración espectral en la superficie del depósito E (aluvión) resultó ser 3 veces mayor que la obtenida para ese mismo período en el sitio F (rocal) aún y cuando la máxima aceleración registraba en la roca (sitio F) fue 2 veces mayor que la registrada en la superficie del depósito E (aluvión).

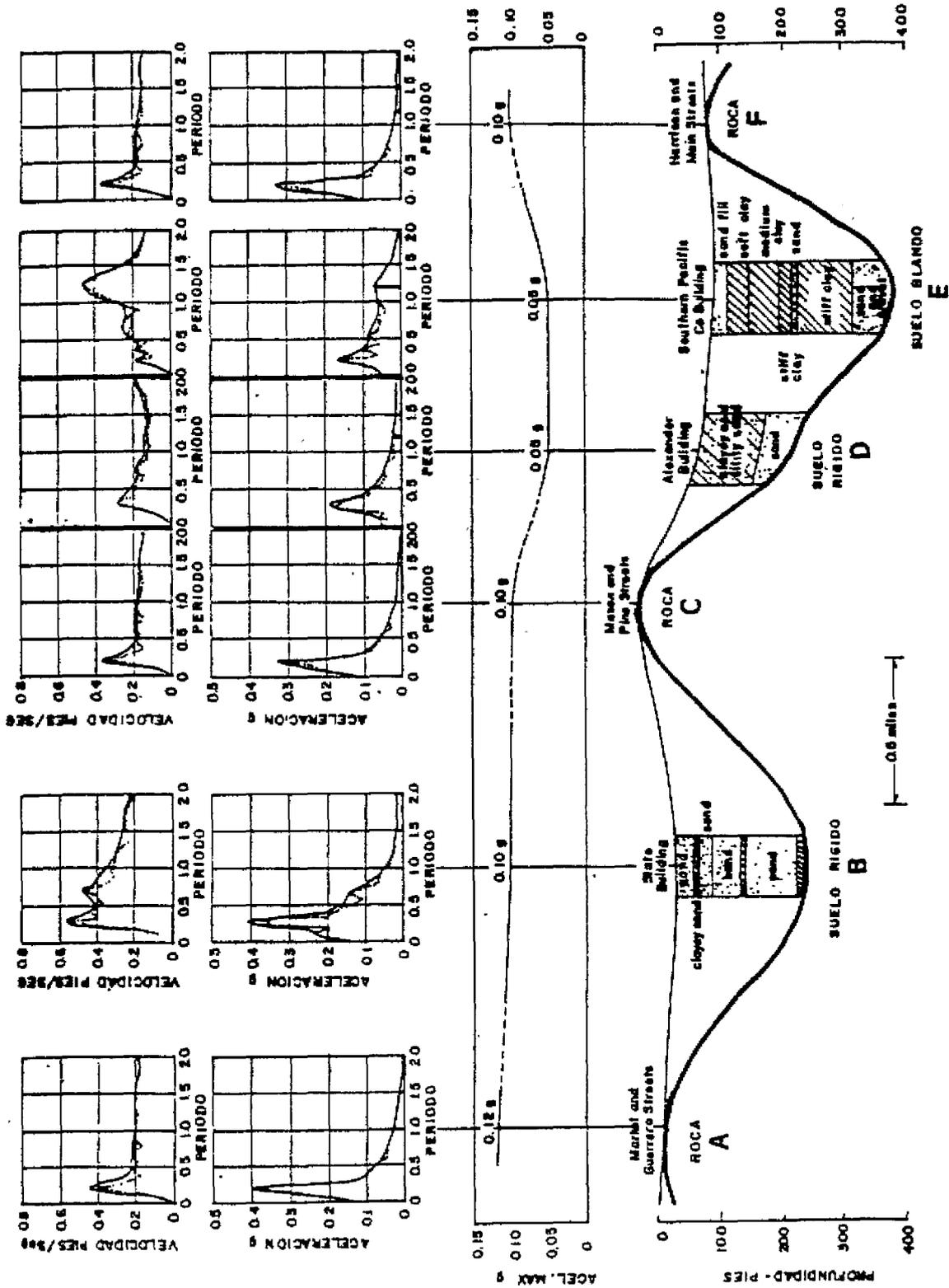
La Fig.9b muestra la gran diferencia que existe en la forma de los espectros de aceleración obtenidos directamente de los registros de movimiento de la superficie de 2 depósitos distintos solicitados por 2 terremotos, también distintos pero en los que la aceleración máxima del terreno fue, en ambos casos, virtualmente la misma.

La Fig.9c, por el contrario muestra la enorme influencia que las condiciones del suelo local ejercen en la respuesta de depósitos de distinta rigidez y composición litológica, aún y cuando la sollicitación sísmica en el lecho rocoso sea la misma, (la aceleración máxima en la roca = 0.178g). (ref.34)

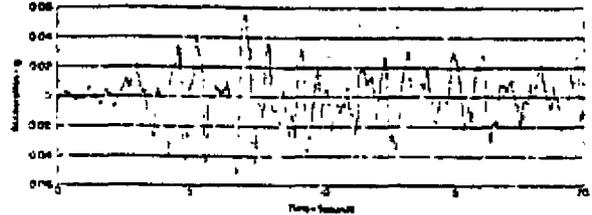
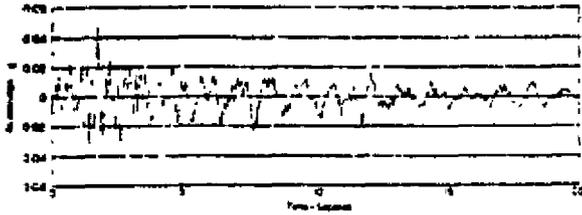
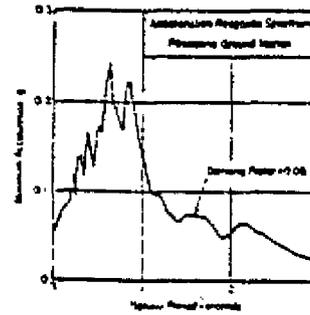
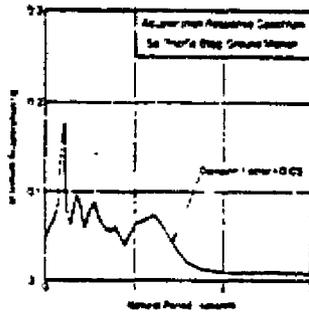
La Fig.9d muestra un estudio comparativo de la respuesta diná-



• FIG. 9 INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES DE SUELO LOCAL EN LA FORMA DE LOS ESPECTROS (Seed, Idriss, 1969)



**Fig. 9a** ESPECTROS DE RESPUESTA EVALUADOS EN LA SUPERFICIE DE DEPOSITOS DE DISTINTA COMPOSICION LITOLOGICA EN LA CIUDAD DE SAN FRANCISCO EN EL TERREMOTO DE

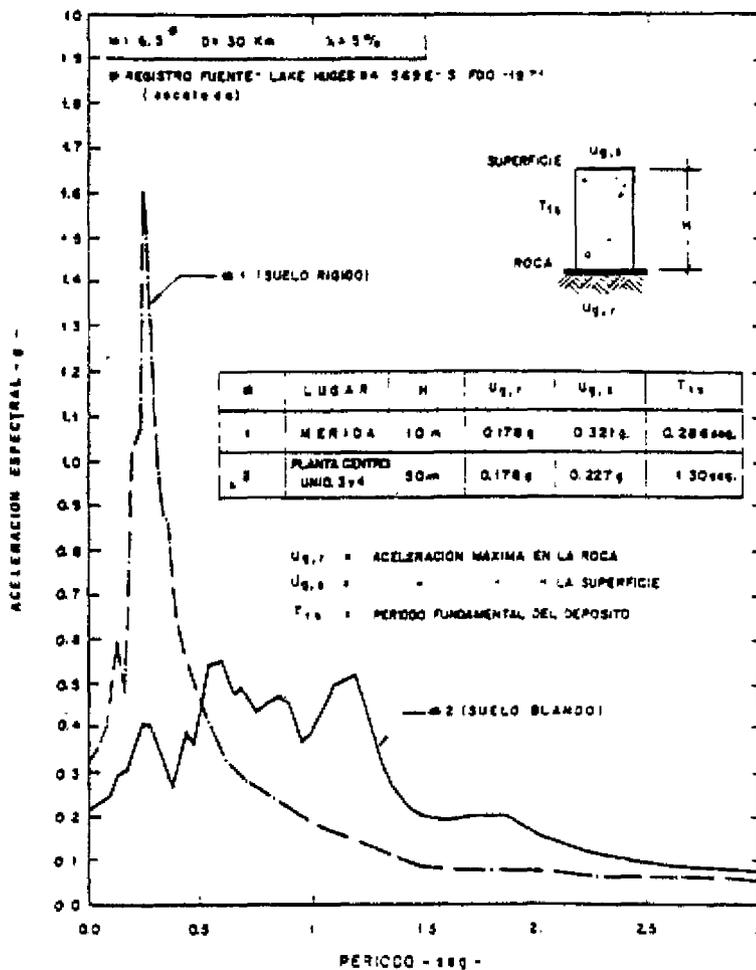


Accelerogram - San Francisco Earthquake, March 22, 1907

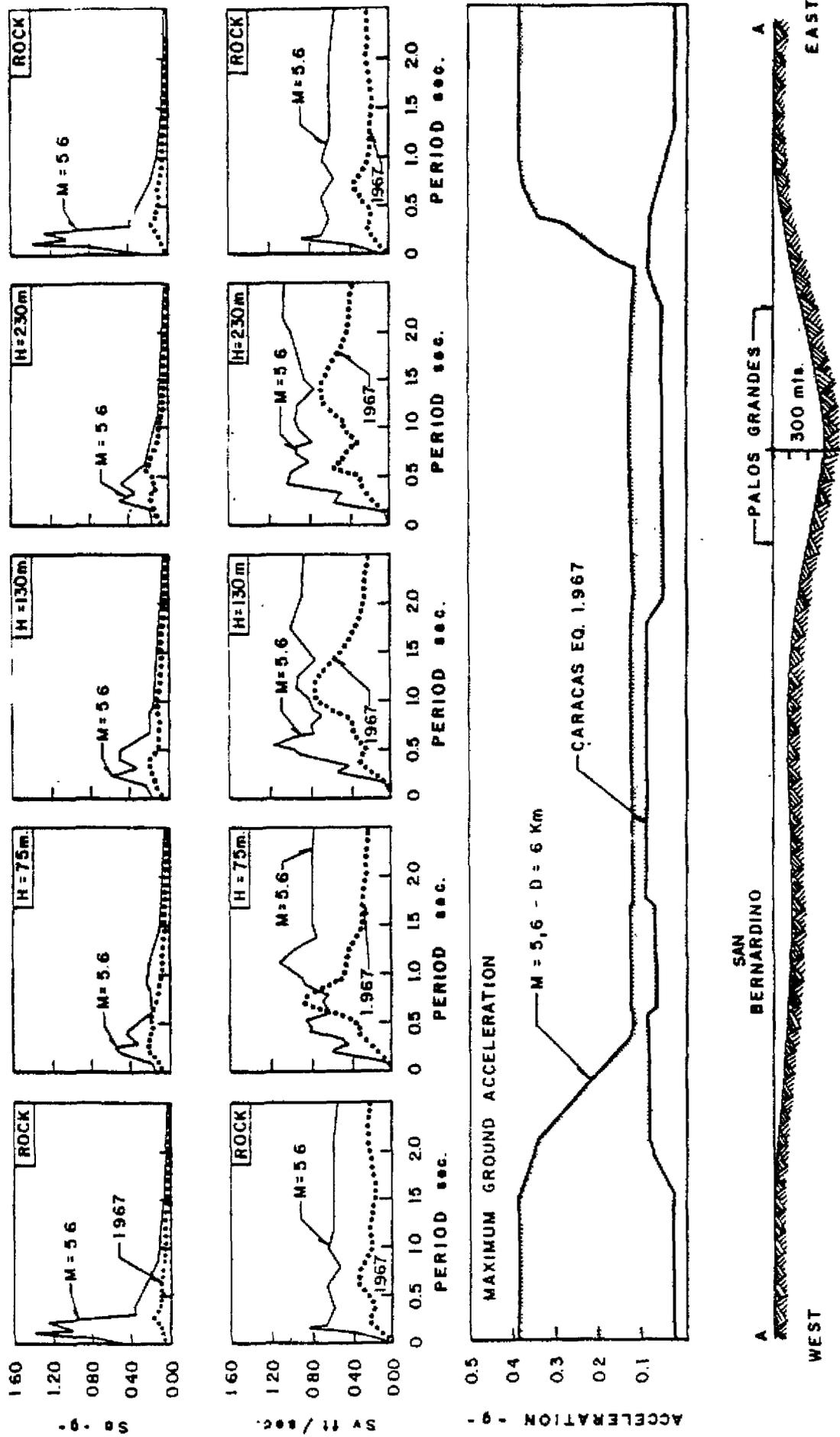
Accelerogram - Pasadena, Kern County, California Earthquake, July 21, 1932

**Fig. 9b**

ACCELEROGRAMS AND ACCELERATION RESPONSE SPECTRA FOR TWO GROUND MOTIONS WITH COMPARABLE MAXIMUM ACCELERATIONS



**Fig. 9c** INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES DEL SUELO LOCAL EN LA RESPUESTA DE DEPÓSITOS SOMETIDOS A UNA MISMA EXCITACION SISMICA (J. L. ALONSO 1978)



**Fig. 9d** COMPARISON OF COMPUTED DISTRIBUTION OF GROUND SURFACE, MOTION CHARACTERISTICS ALONG THE CARACAS VALLEY DETERMINED FOR TWO DIFFERENT EARTHQUAKES ( $\lambda = 5\%$ ) - (Alonso J.L., 1.975)

mica de los depósitos, evaluada analíticamente en la superficie del Valle de Caracas a lo largo de una sección Este-Oeste de la misma para dos solicitaciones distintas: el terremoto de Caracas de 1.967 (M=6,3 D=56 Km.) y un terremoto de magnitud 5,6 a una distancia epicentral de 6 Km originado en la falla de Tacagua - El Avila. (ref.2ª

De esta figura pueden sacarse conclusiones muy interesantes. En efecto, puede observarse que:

- a) En el terremoto de Caracas de 1.967 la aceleración máxima de los registros generados en la superficie fué amplificada por la presencia del aluvión. De hecho, se observa que esta amplificación es en general del orden de 2,5 con respecto a la aceleración máxima de la roca y se mantiene casi uniforme para el rango de profundidades aluvionales comprendidas entre los 30 mts. y los 130 mts. Para profundidades superiores a los 130 mts. la razón de amplificación se reduce un poco (2 a 1), pero permanece casi constante hasta profundidades superiores a los 230 mts
- b) Por el contrario, en el caso de que la solicitación sea producida por el terremoto de magnitud 5,6 a 6 km de distancia, las aceleraciones máximas del terremoto ocurren en la roca y en depósitos aluvionales de muy poco espesor, decreciendo violentamente del valor 0,38g (roca) hasta 0,146g (75 mts).

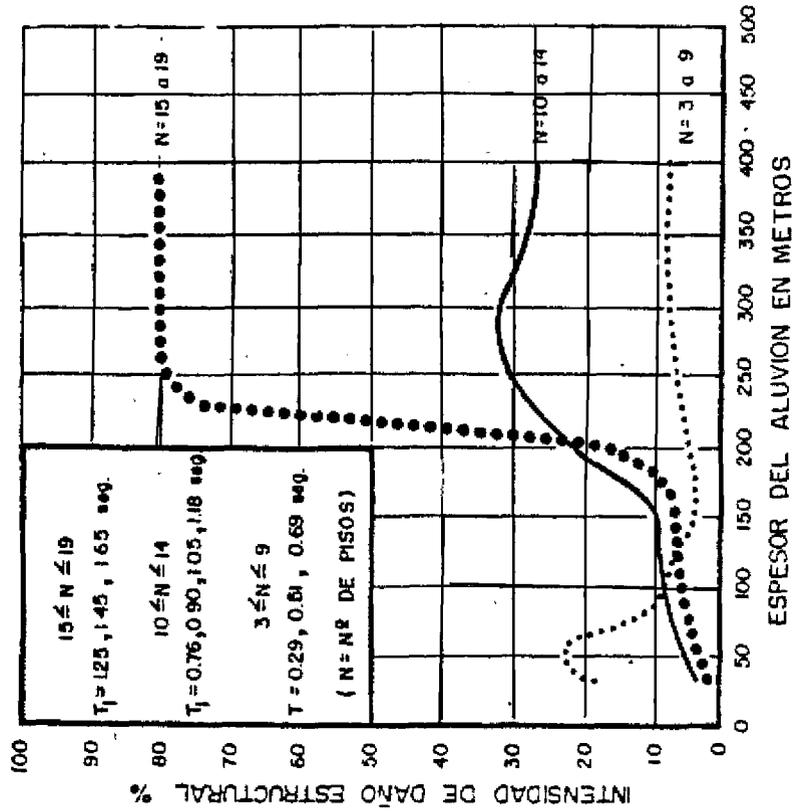
Para depósitos con profundidades superiores a 75 mts., la aceleración máxima de la superficie se mantiene prácticamente constante hasta profundidades superiores a los 230 mts.

De todo lo anterior se desprende que la respuesta dinámica de los edificios del Valle de Caracas debe necesariamente ser completamente distinta para las dos solicitaciones sísmicas recién comparadas.

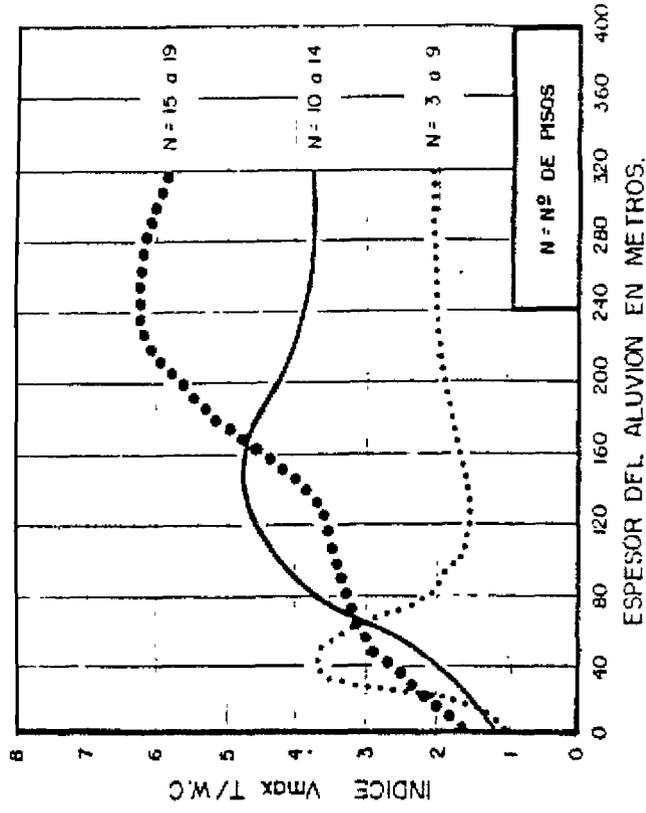
### III. c. INFLUENCIA DEL SUELO LOCAL EN LOS DAÑOS

Numerosas investigaciones recientes han demostrado, que aún en una misma localidad, las variaciones de las características del suelo local ejercen una enorme influencia en el patrón de distribución de daños de edificios y en la amplitud y contenido de frecuencias - de los movimientos del terreno registrados en la superficie de los depósitos ante la acción de un terremoto (ref.16, 17).

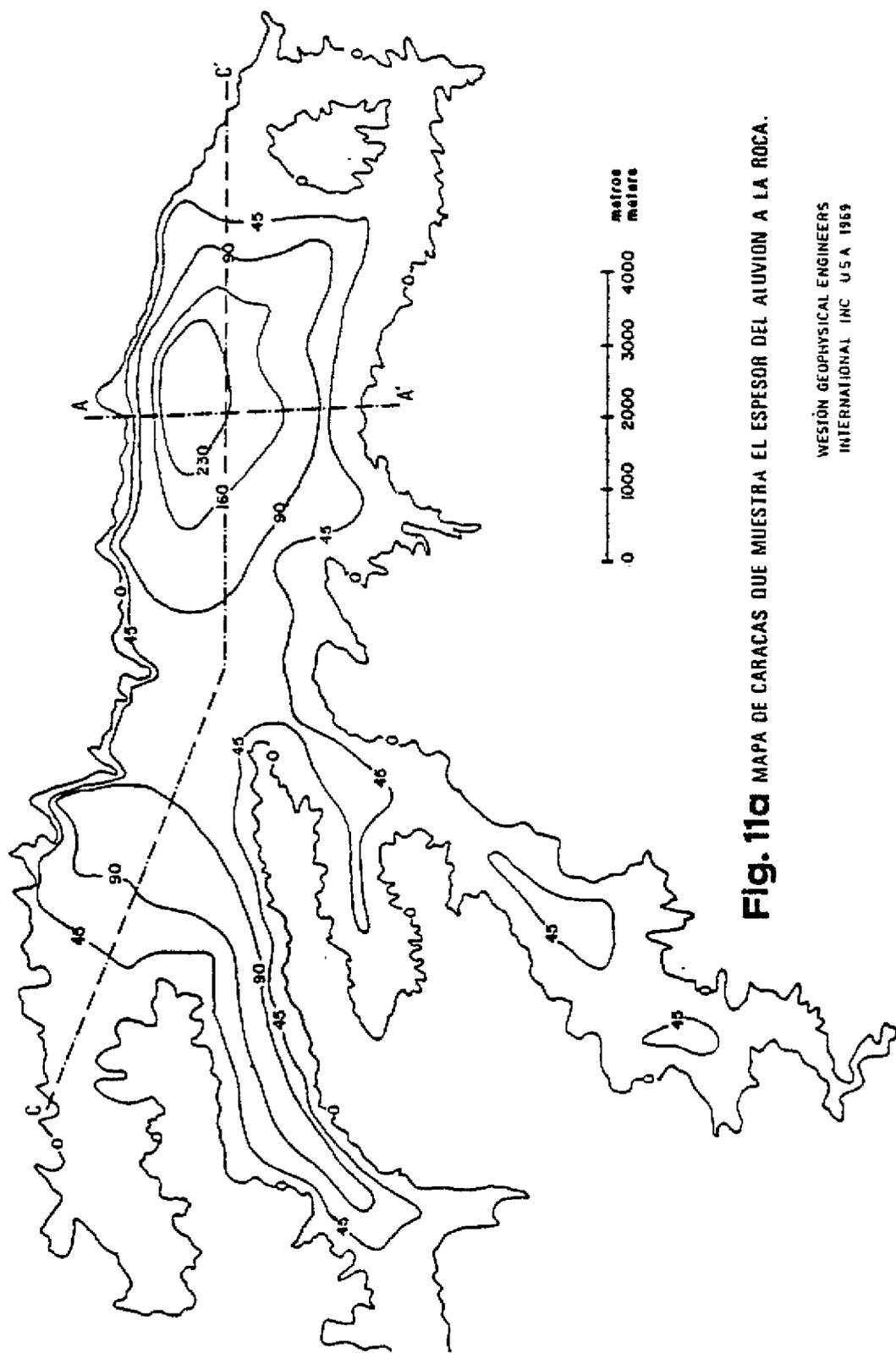
Así por ejemplo, en zonas en las que los depósitos están formados por materiales granulares sueltos saturados, su tendencia a compactarse puede originar presiones hidrostáticas excesivas capaces de producir licuefacción del suelo, dando como resultado grandes asentamientos y volcamientos de estructuras tal y como se observó - en el terremoto de Niigata, Japón en 1.964, y/o en deslizamientos de taludes como los que se produjeron en la terraza de Turnagain en la ciudad de Anchorage, Alaska, durante el terremoto del 27 de marzo de 1.964. Es evidente que los urbanistas e ingenieros desconocían el peligro potencial del suelo de fundación escogido.



• FIG. 10 DATOS RECOPILADOS EN OBSERVACIONES DE CAMPO. TERREMOTO DE CARACAS DE 1967



• FIG. 11 RESULTADOS DE ESTUDIOS ANALITICOS. TERREMOTO DE CARACAS DE 1967 ( See d, Alonzo, 1973 )



**Fig. 11a** MAPA DE CARACAS QUE MUESTRA EL ESPESOR DEL ALUVION A LA ROCA.

WESTON GEOPHYSICAL ENGINEERS  
INTERNATIONAL INC U S A 1969

Es importante observar que en la planificación urbana debe tomarse muy en cuenta el peligro potencial que supone construir en la vecindad de zonas geológicamente inestables, o en terrazas propensas a deslizamiento, aunque a primera vista no lo sean.

Del terremoto de Caracas de 1.967, por ejemplo (ver Fig.10 11 y 11a) claramente se desprende que para depósitos aluvionales con espesores inferiores a los 100 metros, la intensidad de daños fue mayor para edificios comprendidos en el rango de 3 a 9 pisos, mientras que para profundidades aluvionales mayores a los 150 metros, la intensidad de daño estructural observada en edificios de más de 10 pisos fue mucho mayor que la observada en la misma zona para edificios de 3 a 9 pisos de altura (ref.18).

Estos resultados, que entre paréntesis están basados únicamente en la observación ocular de daños ocasionados por el terremoto de 1.967, indican claramente que las condiciones del suelo del Valle de Caracas ejercieron, entre otras, una enorme influencia en la distribución y magnitud de daños observada en edificios, produciéndose fuertes amplificaciones de respuesta estructural cuando el período fundamental de la estructura es similar al período fundamental del depósito de fundación.

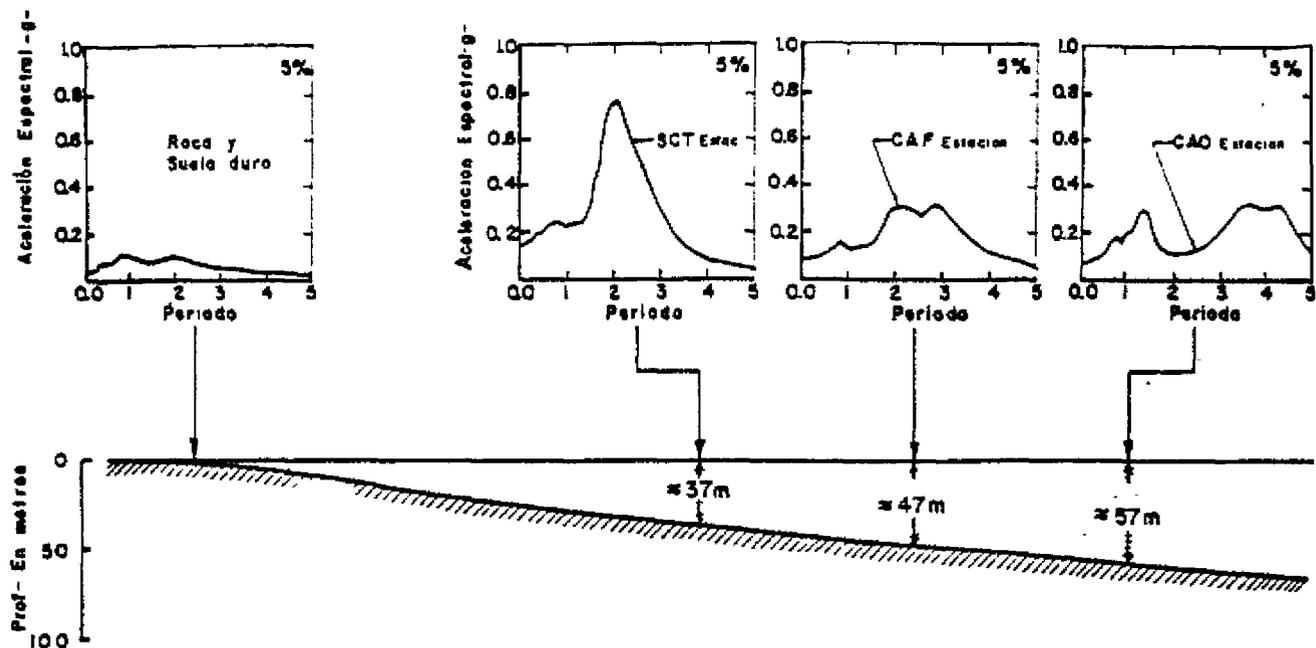
La variación del contenido de frecuencias de los acelerogramas obtenidos en la superficie de depósitos como consecuencia de variar las condiciones del suelo local, aún para un mismo terreno en la roca, se traducen en variaciones de la respuesta estructural que algunas veces pueden llegar a un 500%. (Ver Fig.12 y 13; ref. 19).

Así, la Fig.12 contiene un perfil geológico del suelo de Ciudad de México en donde se indican además los espectros promedio de aceleración registrados en la superficie de depósitos con profundidades distintas durante el terremoto del 19 de Septiembre de 1.985.

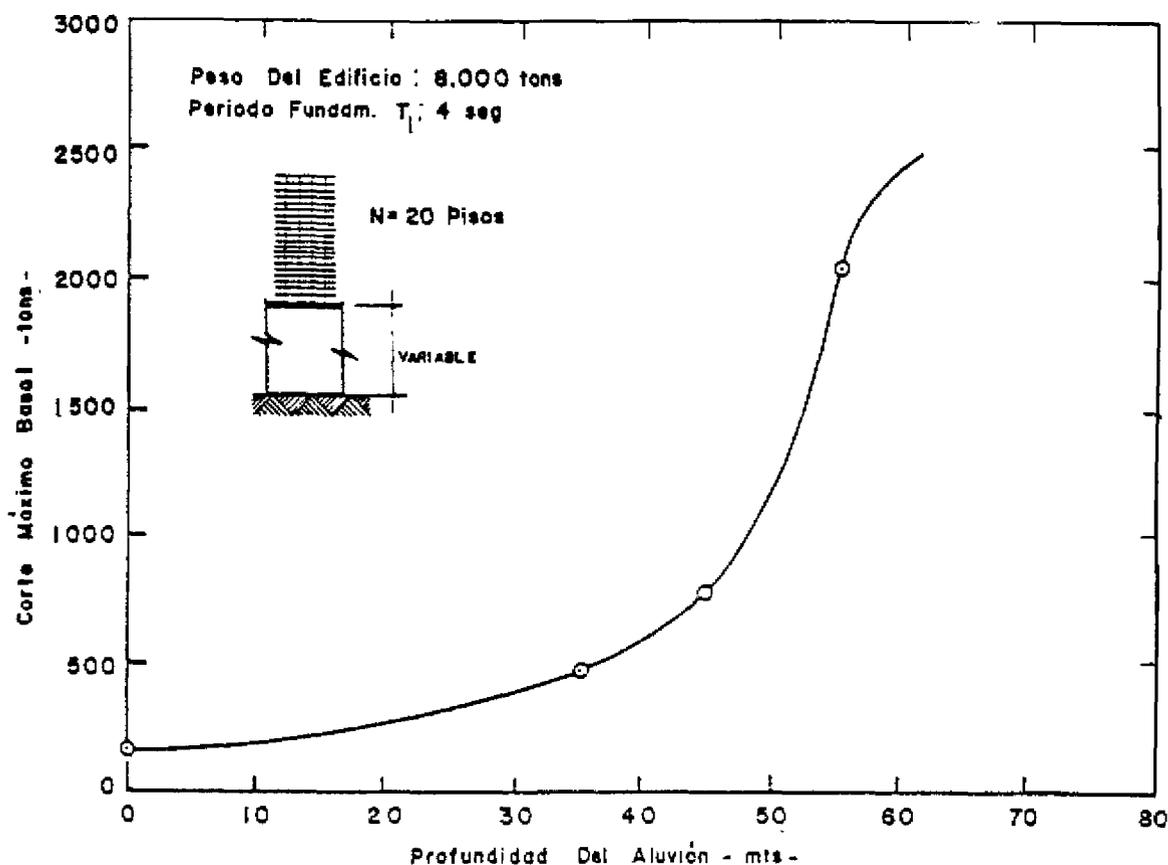
En la Fig.13 se demuestra claramente la enorme variación del corte máximo basal inducido en un edificio típico de Ciudad de México (20 pisos) con un período fundamental próximo a los 4 segundos. Obsérvese que el corte basal aumenta a medida que aumenta la profundidad del depósito.

En general, la respuesta sísmica de depósitos de suelo rígido con espesores relativamente pequeños ( $H \leq 30$  metros), es propensa a sufrir severas amplificaciones de aceleración en la superficie básicamente debido al pobre amortiguamiento desarrollado durante el comportamiento no-lineal de este tipo específico de depósitos. Un ejemplo típico de esta situación puede observarse en la Fig.13b (ref.14). Otro ejemplo similar se observó en la Ciudad de Mérida, Fig.13a (ref. 34 ).

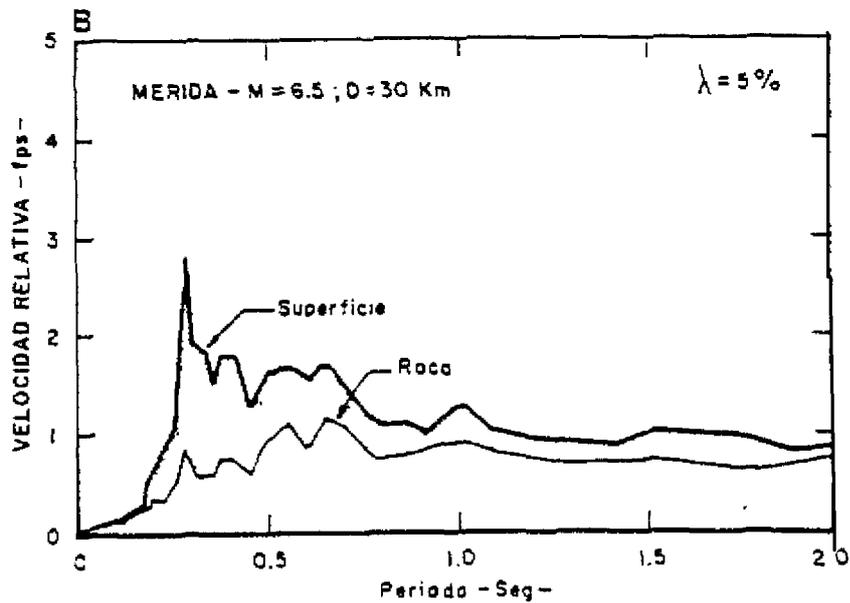
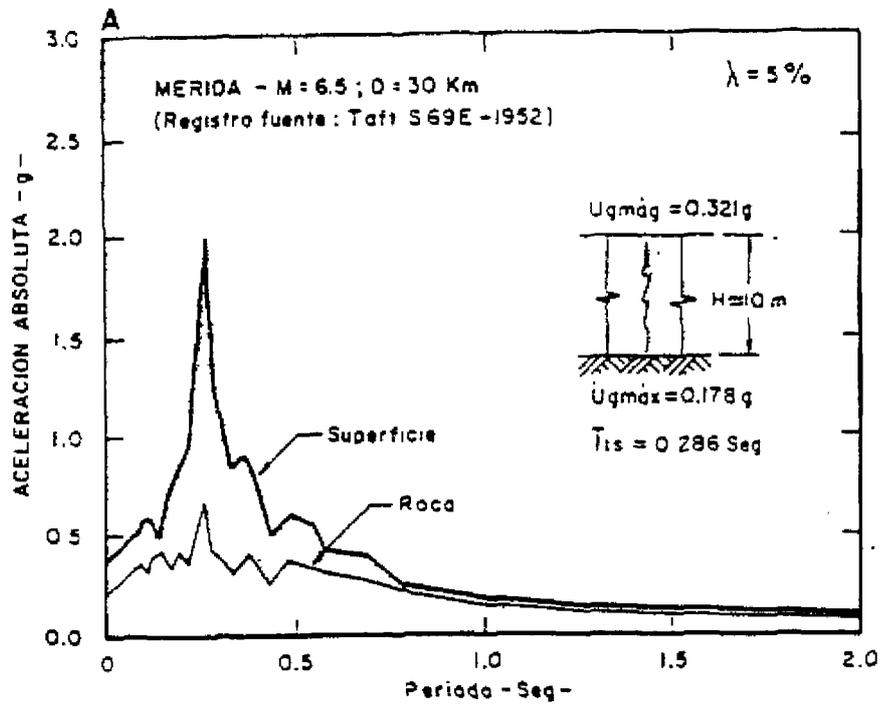
La Fig.13c muestra un perfil de suelo realmente especial e interesante. En efecto el depósito experimenta súbitamente un cambio brusco de profundidad de 40 a 280 pies. Pues bien, durante el



• FIG. 12 PERFIL DEL SUELO EN CIUDAD DE MEXICO QUE MUESTRA ESPECTROS PROMEDIO DE ACELERACION REGISTRADOS DURANTE EL TERREMOTO DEL 19 DE SEPT. DE 1985 (Saad, 1987)



• FIG. 13 CORTE MAXIMO BASAL PARA UN EDIFICIO TIPICO DE 20 PISOS EN CIUDAD DE MEXICO. TERREMOTO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 1985



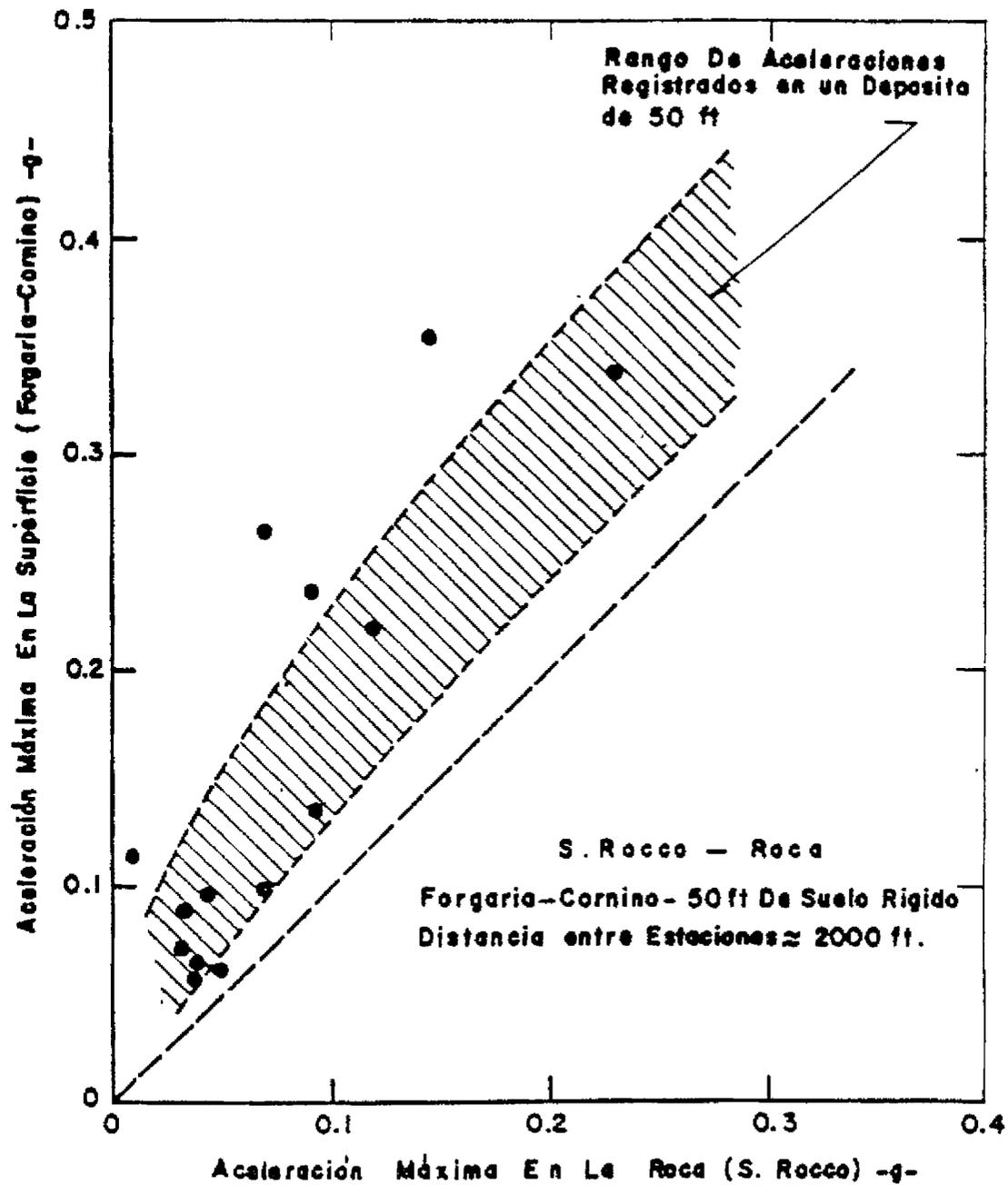
ESPECTROS SISMICOS DE RESPUESTA EN  
LA ROCA Y EN LA SUPERFICIE CORRESPONDIENTES  
A UN TERREMOTO DE MAGNITUD 6.5 A 30 Km

LEYENDA

$U_{g\max}$  Acel. maxima -g-  
 $T_{1s}$  Periodo fund del deposito

MICROZONIFICACION SISMICA DE MERIDA  
AMPLIFICACION DE LA RESPUESTA ESPECTRAL  
EN LA MESETA DE MERIDA. (ALONSO J.L 1977)

FIG. N°  
13a



**FIG.13b** AMPLIFICACION DE LAS ACELERACIONES PICO DE LA ROCA OBSERVADOS POR LA PRESENCIA DE UN DEPOSITO POCO PROFUNDO DE SUELO

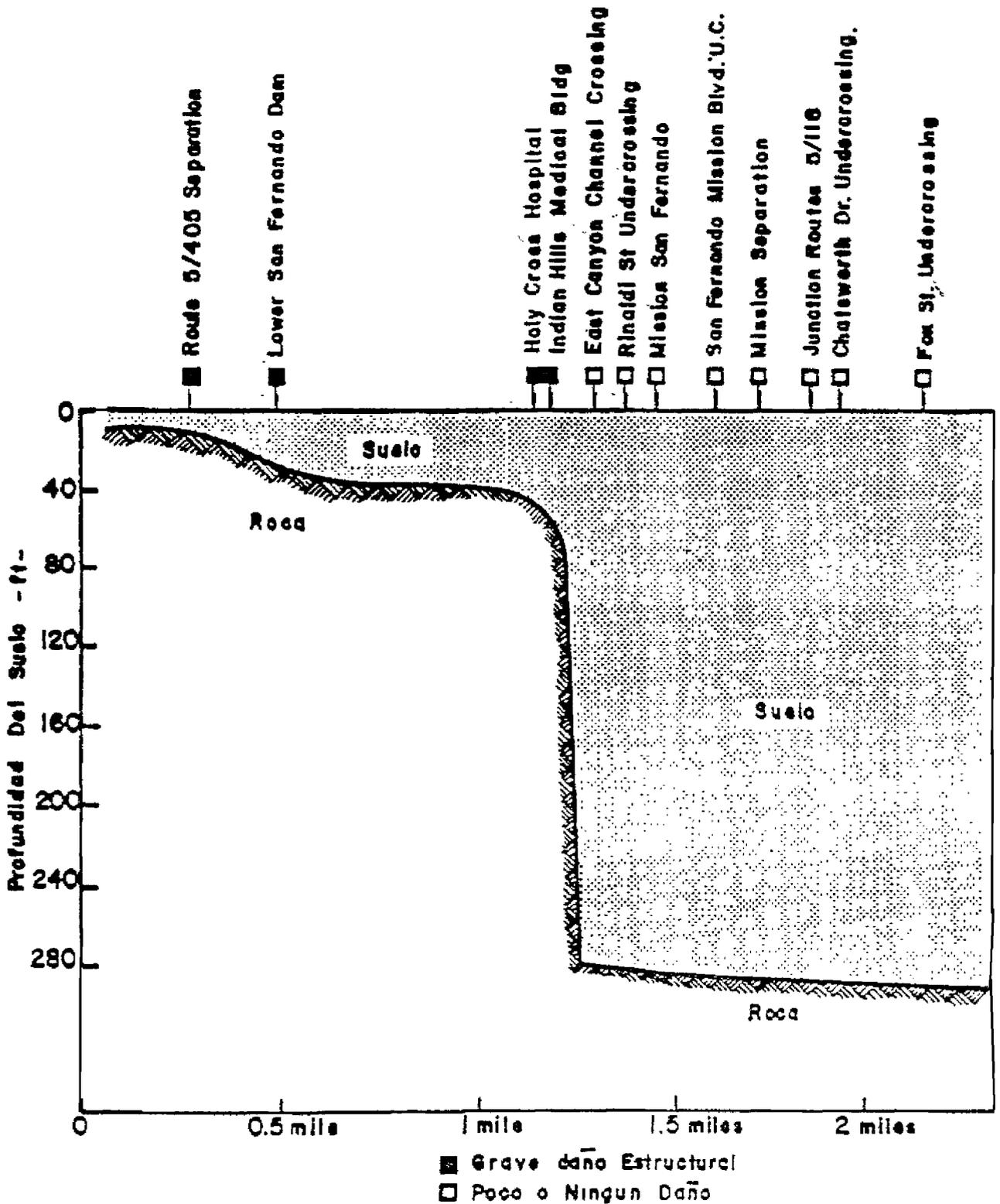


FIG. 13c CONDICIONES DEL SUELO -VS- DAÑO OBSERVADO EN ESTRUCTURAS A LO LARGO DE LA RUTA 5 EN SAN FERNANDO

terremoto de 1.971 en San Fernando, se pudo constatar que en la zona de poco espesor aluvional, 2 hospitales y un puente de una autopista sufrieron grave daño estructural; en la zona de gran espesor aluvional, por el contrario, el daño estructural fué prácticamente nulo, aún y cuando existía sobre esta zona de gran espesor un puente construído hace unos 200 años, (ref. 14 ).

Resulta notable observar que el daño estructural fué precisamente mayor en los casos en los que el período fundamental de las columnas de los depósitos de poco espesor coincidieron con los períodos fundamentales de las estructuras y puentes afectados.

La aceleración máxima del terreno no es el único factor que determina por si solo el daño ocasionado en estructuras civiles durante la acción de un terremoto. El daño, en general, depende de la velocidad y de la duración de las sacudidas. Por ejemplo, una aceleración muy alta desarrollada durante un intervalo de tiempo muy corto causará poco daño estructural.

En efecto, en los terremotos acaecidos en Parkfield, California el 27 de Junio de 1.966 y en Malendy Ranch, Stone Cayon el 4 de Septiembre de 1.974, se registraron instrumentalmente aceleraciones máximas del terreno de 0,5g y 0,6g respectivamente con duraciones de estas aceleraciones pico de 1,5 y 1,2 segundos. En ninguno de estos eventos se registraron daños de importancia en edificaciones vecinas.

Por el contrario, un movimiento del terreno con amplitud de aceleraciones relativamente bajas pero continuas que se mantienen uniformes durante un intervalo de tiempo de varios segundos pueden ocasionar daños considerables en cierto tipo de estructuras. Este efecto se puso de manifiesto durante el reciente terremoto de Ciudad de México en Septiembre de 1.985. En ese evento la aceleración máxima registrada varió entre 0,05 g y 0,10 g, pero las características del contenido de frecuencias y la duración de las sacudidas fueron suficientes para causar el completo colapso de 256 edificios de varios pisos. La magnitud del terremoto alcanzó 8,1 en la escala de Richter y la distancia epicentral fué superior a 380 kilómetros.