
POTENCIAL DE DAÑOS POR SISMOS

ROBERTO ROCHEL AWAD

- Profesor Ingeniería Civil Universidad EAFIT.

INTRODUCCION

En el Seminario "INGENIERIA SISMICA, DINAMICA ESTRUCTURAL Y HORMIGON ARMADO" organizado por la Universidad del Valle en el mes de Octubre de 1990, tuve la oportunidad de escuchar al Profesor Konstantin Meskouris, de la Universidad de Bochum, Alemania, en su disertación sobre el tema "POTENCIAL DE DAÑO POR SISMO". Al considerar de gran importancia para el medio colombiano el tema tratado, me he tomado la libertad de presentar un resumen de su exposición, el cual acompaño con las figuras que el profesor Meskouris gentilmente me facilitó.

Cualquier imprecisión que pueda presentar este artículo es de mi absoluta responsabilidad.

POTENCIAL DE DAÑOS POR SISAMOS

La filosofía del diseño, para estructuras de hormigón reforzado, en regiones sísmicamente activas, presuponen que las estructuras deben tener suficiente ductilidad de manera que estén en capacidad de eliminar los altos picos de sollicitación mediante plastificaciones locales sin llegar a formar un mecanismo de colapso (CCCSR, Sec. A. 1.1.2.).

En construcciones especiales tales como hospitales, acueductos, estaciones de bomberos y de policía, centrales de comunicación, etc., debe conservarse, además, la funcionabilidad durante y después del sismo (CCCSR Sec. 1.1.2.).

Una posibilidad confiable de evaluar la seguridad proporcionada a una construcción, consiste en evaluar su comportamiento o falla mediante **solicitaciones sísmicas realistas**, con éstos cálculos se pueden detectar los puntos críticos de una estructura y reforzarlos de manera efectiva mediante técnicas constructivas.

En la figura No.1 se indican las demandas de ductilidad en un pórtico de hormigón reforzado calculadas para tres acelerogramas artificiales. Estos valores indican la máxima deformación plástica alcanzada por la sección transversal durante el sismo respectivo y pueden compararse con las ductilidades de sección permisibles para identificar los puntos débiles, en los cuales la demanda sobrepasa la oferta.

Para poder realizar estas investigaciones, la sollicitación sísmica esperada, junto con su potencial

de daño es fundamental. En este artículo nos ocuparemos de algunos interrogantes de seguridad sísmica de pórticos de hormigón reforzado, explicado bajo el análisis de algunos ejemplos concretos.

A manera de ilustración, se toman tres acelerogramas de sismos cuidadosamente seleccionados para compararlos entre sí y en sus efectos sobre las estructuras. Estos sismos corresponden a:

- a) Acelerograma obtenido en Rocca, del sismo de Ancona el 14 de junio de 1972 (aceleración máxima, PGA, igual al 44% de la aceleración de la gravedad, $PGA = 0,44 g$.)
- b) Acelerograma obtenido en PETROVAC del sismo de Montenegro el 15 de abril de 1979 ($PGA = 0,45 g$); véase Fig. No. 2.
- c) Acelerograma obtenido en la estación SCT del sismo de México del 19 de septiembre de 1985 ($PGA = 0,18 g$). Véase Fig. No.2.

Una manera burda de clasificar el riesgo sísmico en un sitio es estimando la máxima aceleración esperada del terreno. Este valor pico (PGA), que aparece como un máximo aislado, no es ningún indicador adecuado para estimar posibles daños en las estructuras, pues la gran inercia de los edificios corrientes absorben sin problemas tales picos de aceleración.

Para comparar los acelerogramas de PETROVAC y de Ciudad de México, se escalan de modo que ambos acelerogramas tengan la misma aceleración máxima, $0,2 g$ (Fig. No. 3). Escalados los acelerogramas se pueden calcular sus espectros de respuesta y luego, someter un pórtico de un edificio de hormigón reforzado a estos dos acelerogramas. Como ejemplo se toma el pórtico de la Fig. No. 4, de dimensiones corrientes y seleccionado de manera que su frecuencia fundamental, correspondiente al primer modo, tenga exactamente tal valor que para este periodo ambos espectros escalados a $0,2 g$ de aceleración máxima tengan la misma ordenada; así que es de esperarse, en el caso lineal, que el comportamiento del pórtico sea el mismo para ambos acelerogramas, PETROVAC y Ciudad de México.

Para comparar la respuesta del pórtico a los dos acelerogramas se calcula la deriva del primer piso, es decir el desplazamiento del primer piso relativo al suelo, con un cálculo paso a paso lineal, los

resultados pueden verse en la Fig. No. 5 y se concluye que tanto para el acelerograma de PETROVAC como el de Ciudad de México, la deriva máxima es de aproximadamente 3 cm. y como es lógico y como se esperaba, para ambos acelerogramas el desplazamiento es el mismo. Ello se debe a que los acelerogramas fueron escalados a la misma aceleración y además el periodo fundamental del pórtico es tal que para este periodo la ordenada de ambos espectros es la misma.

Al hacer ahora un cálculo no lineal de la misma estructura bajo las mismas cargas, es decir, para los acelerogramas de PETROVAC y Ciudad de México, este pórtico colapsa, presenta derivas del orden de los 20 cm. (Véase Fig. No. 6), es decir, ya se ha deformado plásticamente y no regresará a su posición inicial.

Estos son los resultados del cálculo no lineal. Es un hecho que puede observarse cada vez que se realiza un cálculo no lineal. Podemos ahora preguntarnos: ¿Cómo es posible que dos acelerogramas que tengan la misma aceleración máxima y además con una estructura cuya ordenada espectral fué exactamente la misma, tenga un comportamiento tan distinto? ¿tan diferente?.

La anterior pregunta es muy corriente y la respuesta es más o menos conocida. Lo que se ha visto es la desventaja de los espectros elásticos lineales, pues estos espectros dan solamente el valor máximo para un oscilador de cierta frecuencia, bajo una sollicitación de un acelerograma, pero no proporcionan información si este máximo fué alcanzado una sola vez y todos los demás cuasi-máximos eran mucho más pequeños o que si teníamos picos con magnitud casi igual a la máxima.

Podemos ahora analizar la respuesta de un oscilador no lineal tomando el 80% de su desplazamiento máximo como límite elástico, los resultados se muestran en la Fig. No. 7 donde se indican las incursiones en el rango plásticos para los acelerogramas de PETROVAC y Ciudad de México, ambos escalados al mismo máximo de aceleración (0,2 g), se puede observar un comportamiento similar porque la ductibilidad máxima no es muy grande, se trata de un oscilador casi lineal con el 80% de su máximo desplazamiento como límite elástico.

Veamos ahora qué sucede si el límite elástico del oscilador no lineal se toma como el 50% de su desplazamiento máximo, se ve en la Fig. No. 8 que

para el caso de PETROVAC, que es un acelerograma más o menos corto, de unos 20 segundos, se tiene mucho menos picos que para Ciudad de México que tiene más incursiones plásticas. Analizando los ciclos histeréticos, Fig. No. 9, para este caso del 50% del desplazamiento máximo como límite elástico del desplazamiento, se observa que para Ciudad de México se presenta una acción plástica mucho más severa, mucho más fuerte.

Este ejemplo con un oscilador muy sencillo tiene la ventaja de poder reconocer los efectos por lo que son, lo cual no es tan fácil en edificios mucho más grandes. Con un oscilador de un grado de libertad todo es muy claro, se entiende porque un acelerograma que tiene mayor duración puede causar daños plásticos más severos que un acelerograma más corto, es claro porque hay más ciclos de incursiones plásticas.

Observando ahora la energía que el sismo entrega a la estructura, se sabe que hay varios tipos de energía que ocurren en el caso de un sismo, la suma de todos los tipos de energía debe ser igual a la energía que el sismo entrega a la estructura. La energía de entrada (I.E.) es igual a la suma de la energía elástica, la energía cinética, la energía histerética (H.E.) y la energía que se disipa por efecto del amortiguamiento viscoso de la estructura. En la Fig. No. 10 calculada para un sistema de un grado de libertad, con límite elástico igual al 50% de su desplazamiento máximo en el caso lineal, se puede observar la importancia que tiene la energía histerética en el caso no lineal.

Comparando las energías suministradas por los Sismos de PETROVAC y de Ciudad de México, a estas estructuras y a los sistemas de un grado de libertad, la energía suministrada se calcula como la integral de la fuerza cortante en la base multiplicada por la velocidad del suelo integrada en el tiempo. Los resultados muestran que para el 80% la diferencia no es muy grande porque la ductilidad no es muy alta, pero para el 50% como límite elástico se ve que la energía es muy distinta para el acelerograma de PETROVAC y Ciudad de México. (Ver Figuras No. 11 y 12).

Todo esto enseña que el potencial de daño de un acelerograma no depende de su aceleración máxima sino también de otros factores, entre los cuales el más importante es la duración efectiva del evento, que nos sirve para calcular los daños que un sismo posiblemente causará en un edificio, ésto,

como se ha dicho, es porque con una duración más larga es posible que se presenten muchos más ciclos inelásticos en la construcción. El problema del hormigón reforzado es que después de unos muy pocos ciclos (2, 3 ó 4) la rigidez y la resistencia van disminuyéndose muy rápidamente. Por ser el hormigón un material inhomogéneo se necesita acero para tomar los esfuerzos tensionales, así que cuando se tiene una sollicitación sísmica en la región donde antes había compresión, después tendrá tensión; y donde hubo tensión, después tiene compresión y luego de unos ciclos se puede ver que las fisuras se van ampliando muchísimo y después de unos pocos ciclos las secciones se rompen, así que la resistencia y la rigidez están disminuyendo muy rápidamente con el número de ciclos de sollicitación que se tenga.

Por esta causa en Alemania se propone clasificar los acelerogramas para un sitio en tres tipos (S de Short, L de large y M de Mediu), dependiendo de la duración de su fase más fuerte y según otros parámetros, como el cociente entre la aceleración máxima del suelo a , y su velocidad máxima v , el período central T_0 correspondiente al número promedio por segundo de pasos por cero del registro de aceleración, de valores negativos a positivos.

Tipo S : Para sismos cortos, de poca energía y alto contenido de frecuencia. Para ellos:

- * Duración efectiva < 10 seg.
- * T_0 < 10 seg.
- * a/v > 10 g/m/seg.

Tipo L : Para sismos largos, de alta energía y alto contenido de frecuencia. Para ellos:

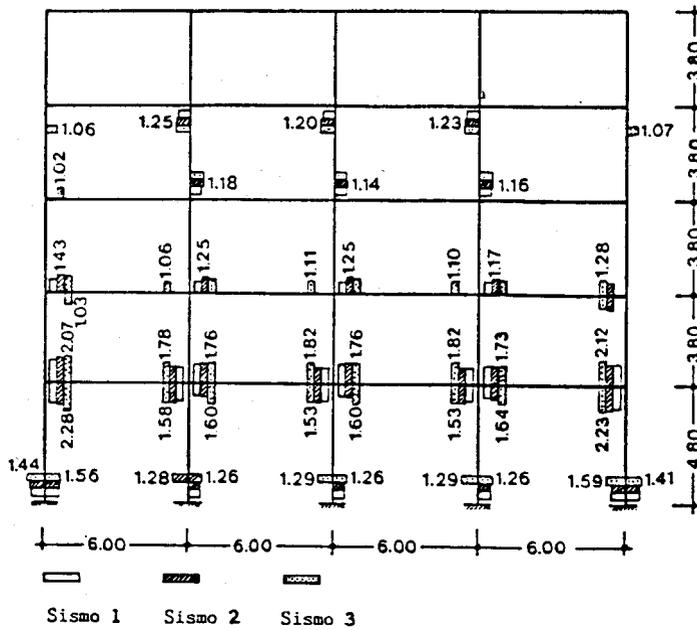
- * Duración efectiva > 15 seg.
- * T_0 < 1.2 seg.
- * a/v > 0.8 g/m/seg.

Tipo M : Para valores de acelerogramas intermedios.

¿Para qué sirve esta clasificación de los acelerogramas? Es muy importante saber qué tipo de acelerogramas tenemos que esperar para un cierto sitio, si se tiene un lugar en el cual el tipo probable es el S entonces se pueden usar métodos estáticos de análisis o cuasi estático sin necesidad de métodos dinámicos no lineales. Al otro extremo si tenemos un lugar como Ciudad de México, con acelerogramas del tipo L, un cálculo dinámico no lineal es casi indispensable para construcciones cuyo financiamiento después de un sismo es necesario, tal es el caso de hospitales, estaciones de bomberos, etc., como se ha visto en este caso, el terremoto causa gran número de ciclos inelásticos con el efecto de una caída dramática de la resistencia y de la rigidez de la estructura, y esta caída dramática nunca puede ser calculada por métodos no lineales, tales como paso a paso.

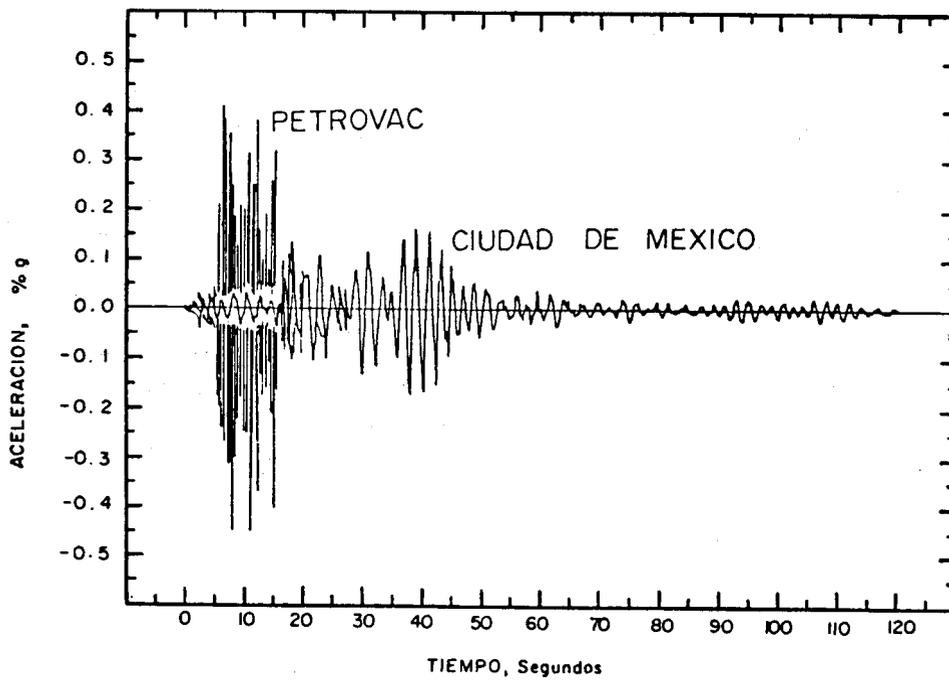
Un acelerograma del tipo S, es el de ROCCA, Fig. No. 13, característicos de sismos europeos, son de corta duración, poca energía y de contenido alto en frecuencias. PETROVAC pertenece al tipo M y Ciudad de México, al tipo L.

Comparando los espectros de aceleración lineal de ROCCA y de PETROVAC se puede ver, con mucha claridad, como el contenido de frecuencias de estos dos sismos, de Tipo S y M son diferentes, esto es una verificación de lo antes expuesto, no basta definir el riesgo sísmico por el valor máximo de aceleración, sino también con los espectros para ver en qué región de frecuencias o de periodo se concentra la energía suministrada por un sismo, y después dando un valor para la duración efectiva probable, definir si se trata de un acelerograma del tipo S, M o L, para determinar el método de cálculo apropiado.



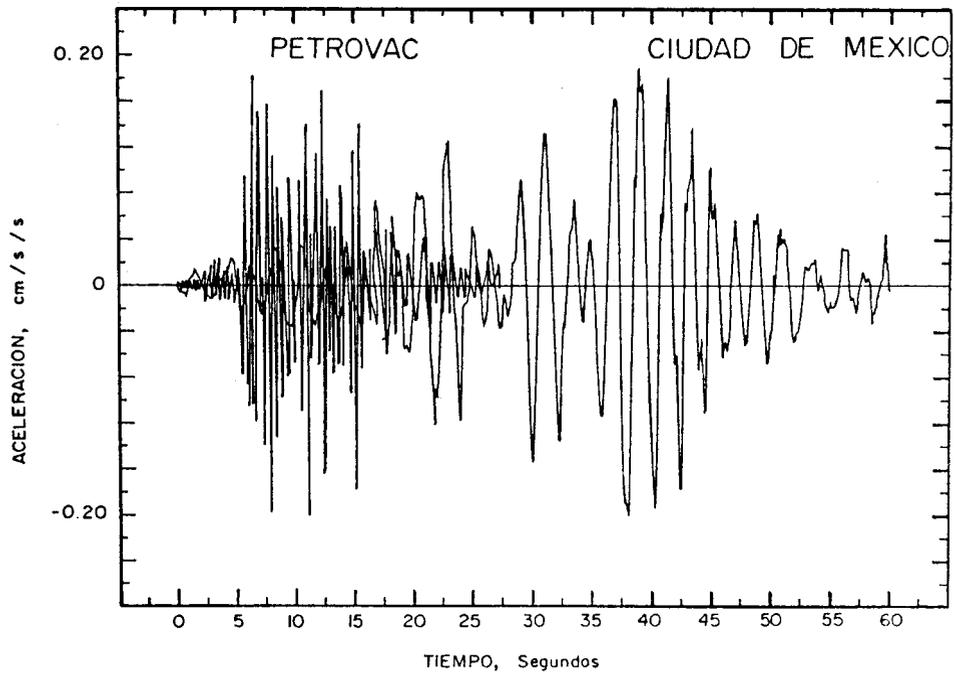
VALORES DE DUCTIBILIDAD MAXIMA ALCANZADOS DURANTE TRES SISMOS

Figura No. 1



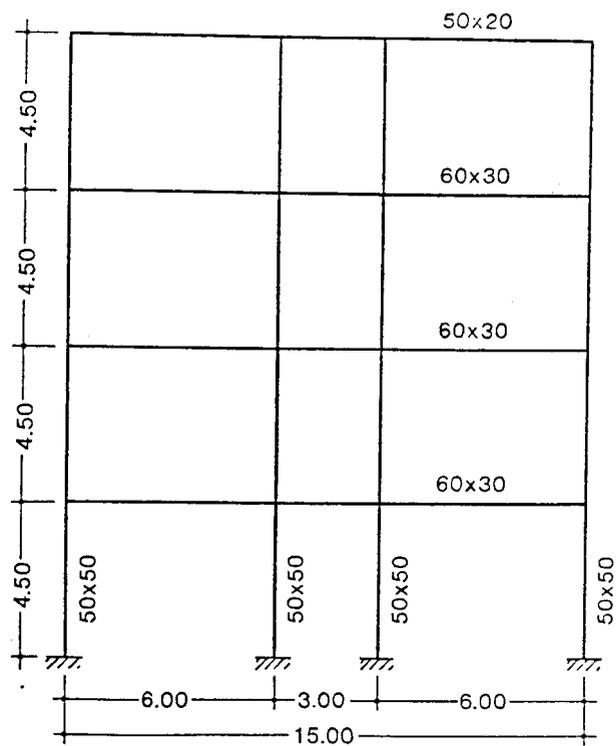
ACELEROGRAMAS DE PETROVAC Y CIUDAD DE MEXICO

Figura No. 2



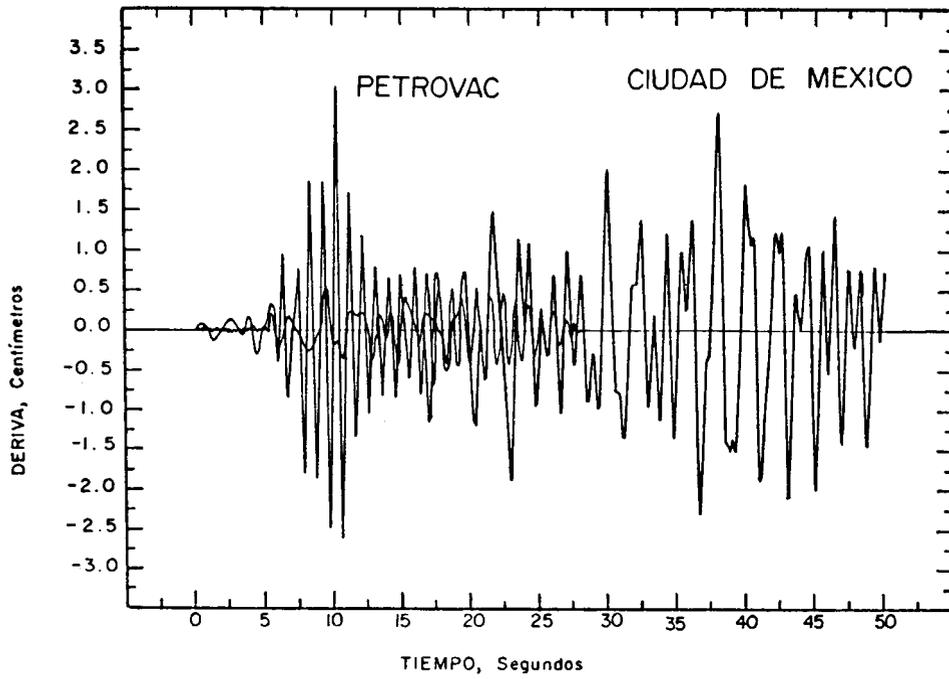
ACELEROGRAMAS ESCALADOS A 0.2 g.

Figura No. 3



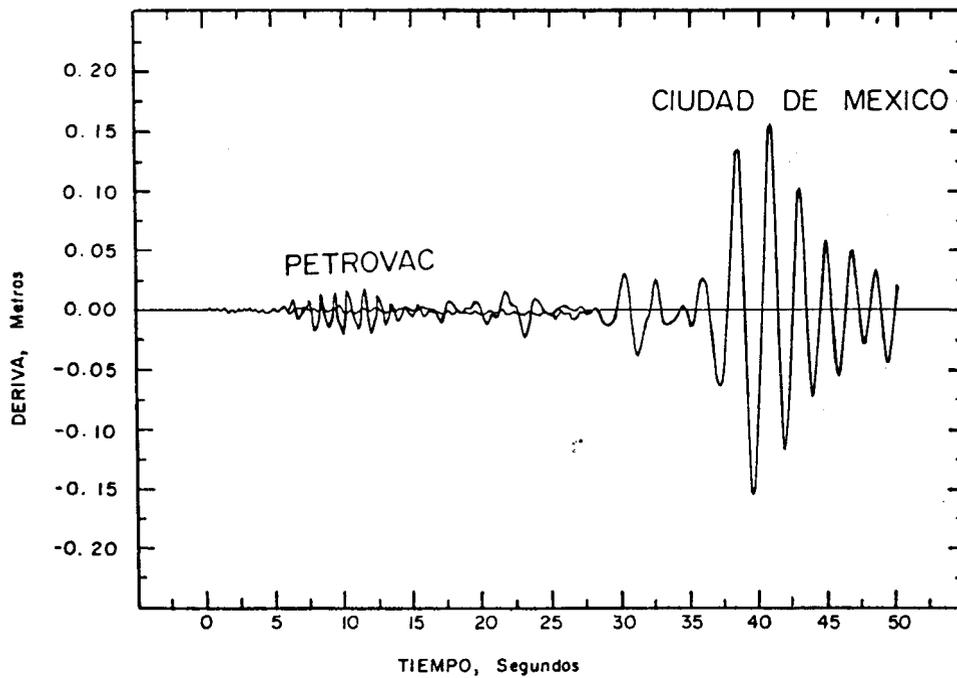
SISTEMA

Figura No. 4



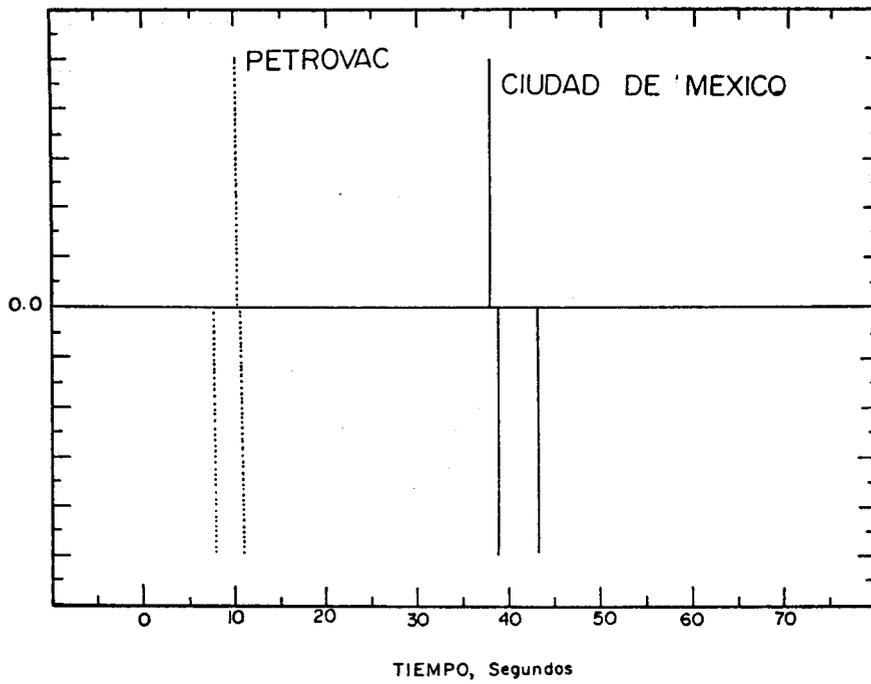
DERIVA LINEAL PRIMER PISO

Figura No. 5



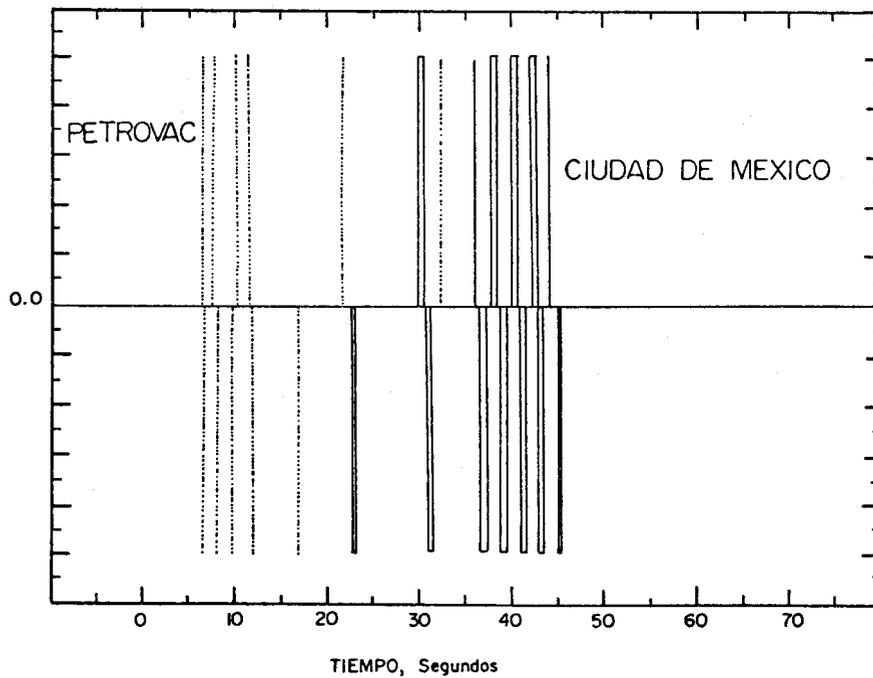
DERIVAS PRIMER PISO, 0.2 g.

Figura No. 6



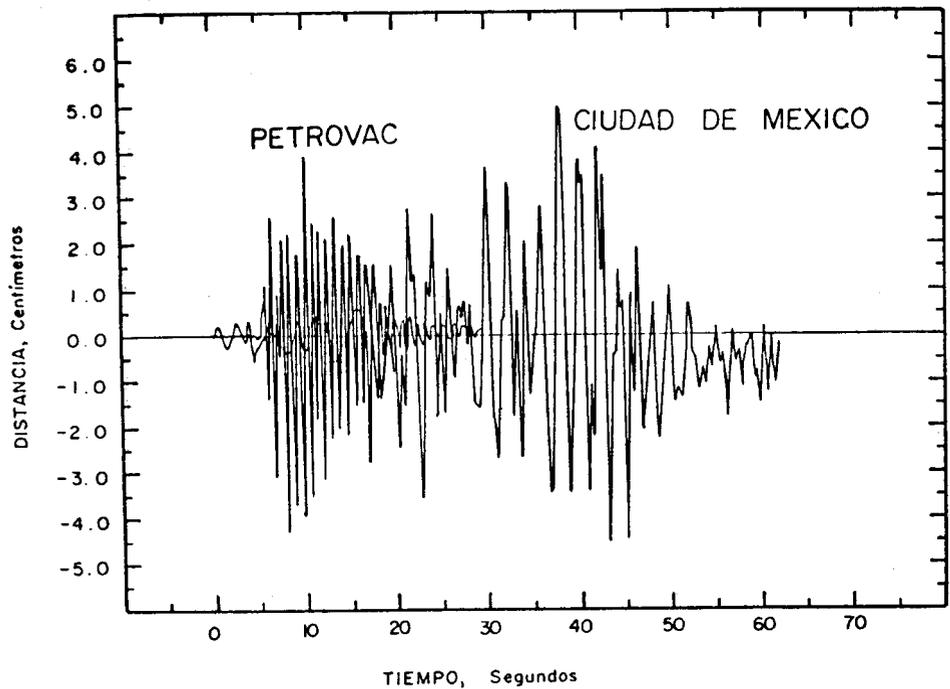
INCURSIONES PLASTICAS, 80% Sd.

Figura No. 7



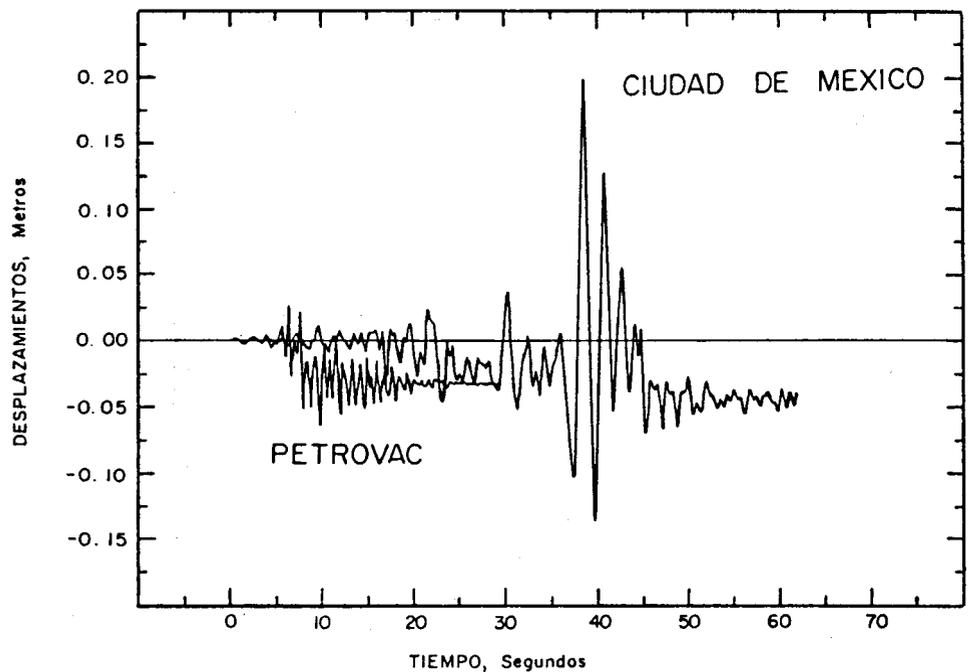
INCURSIONES PLASTICAS, 50% Sd.

Figura No. 8



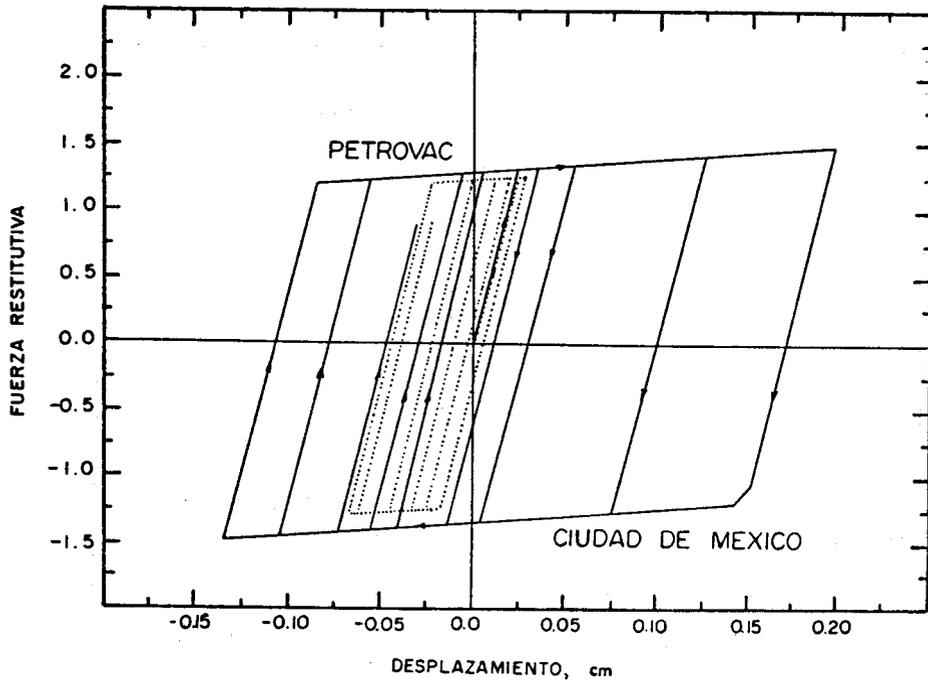
DESPLAZAMIENTO PARA 80% DE Sd.

Figura No. 7 A



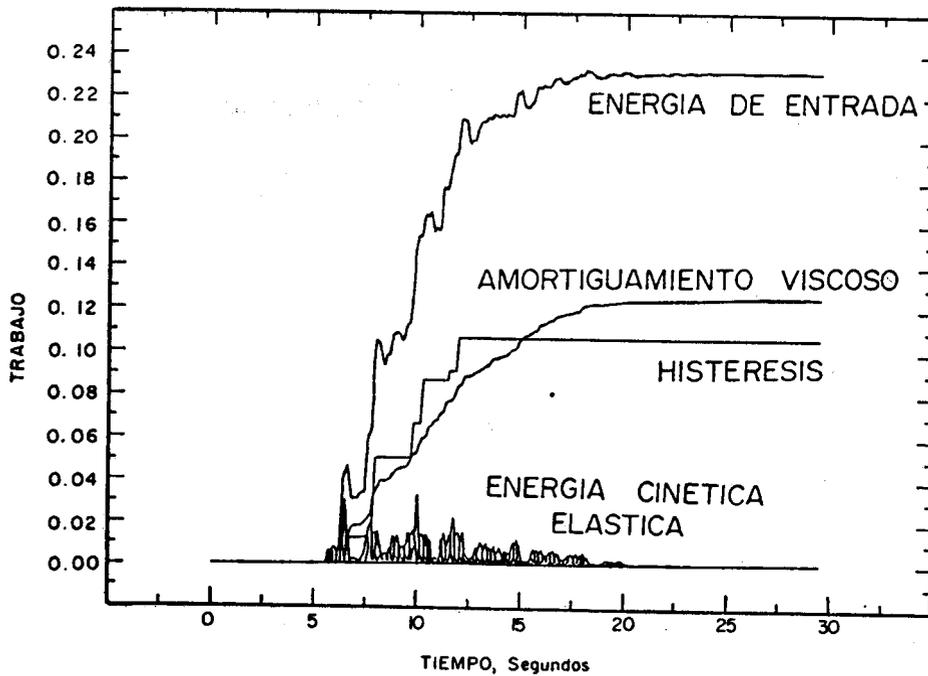
DESPLAZAMIENTOS PARA 50% DE Sd.

Figura No. 8 A



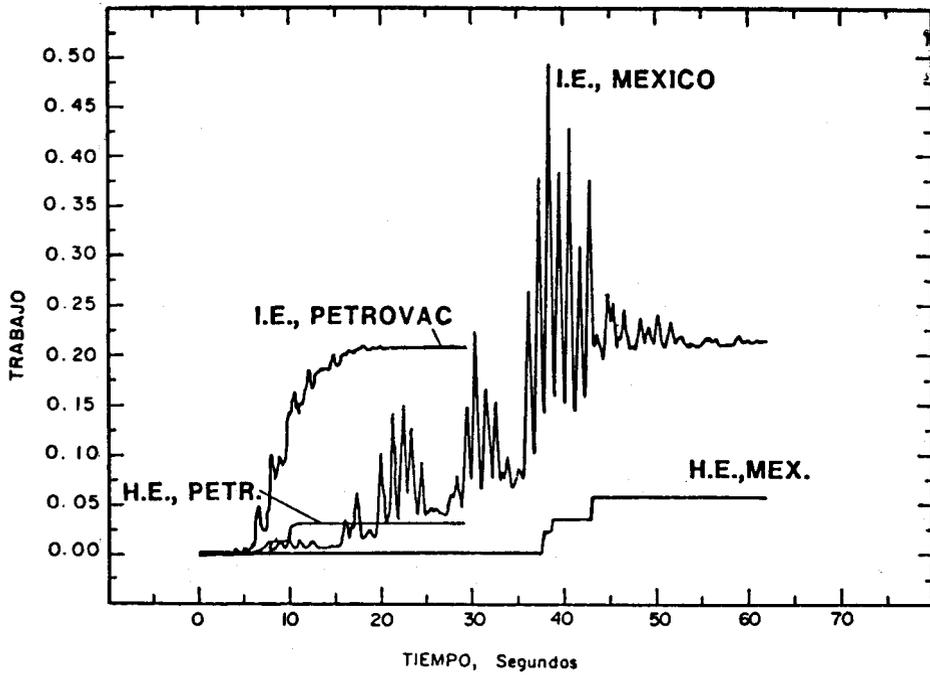
CICLOS HISTERETICOS, 50% Sd.

Figura No. 9



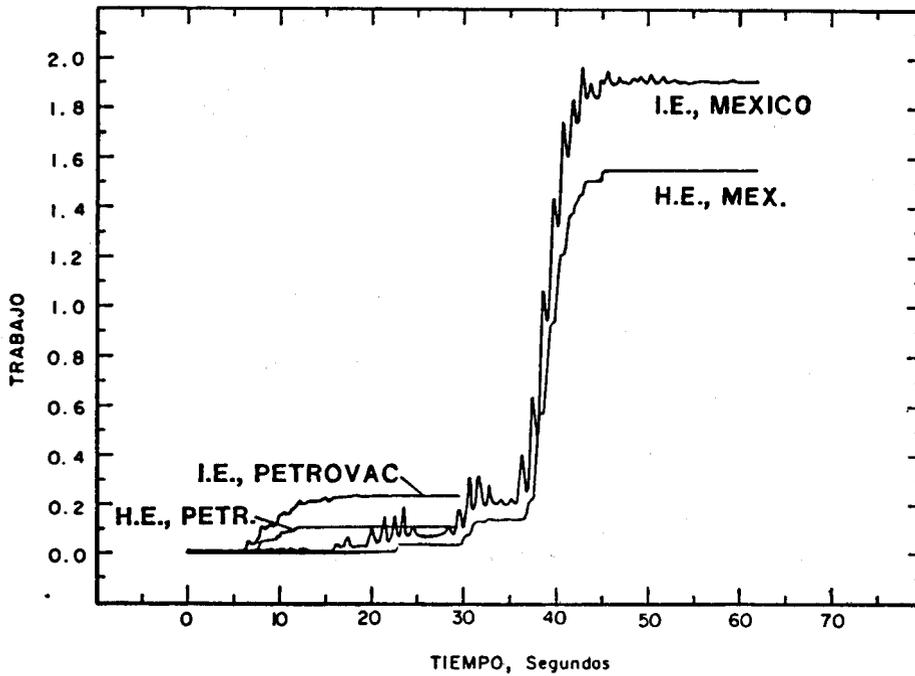
ENERGIA PARA PETROVAC CON 0.5 Sd.

Figura No. 10



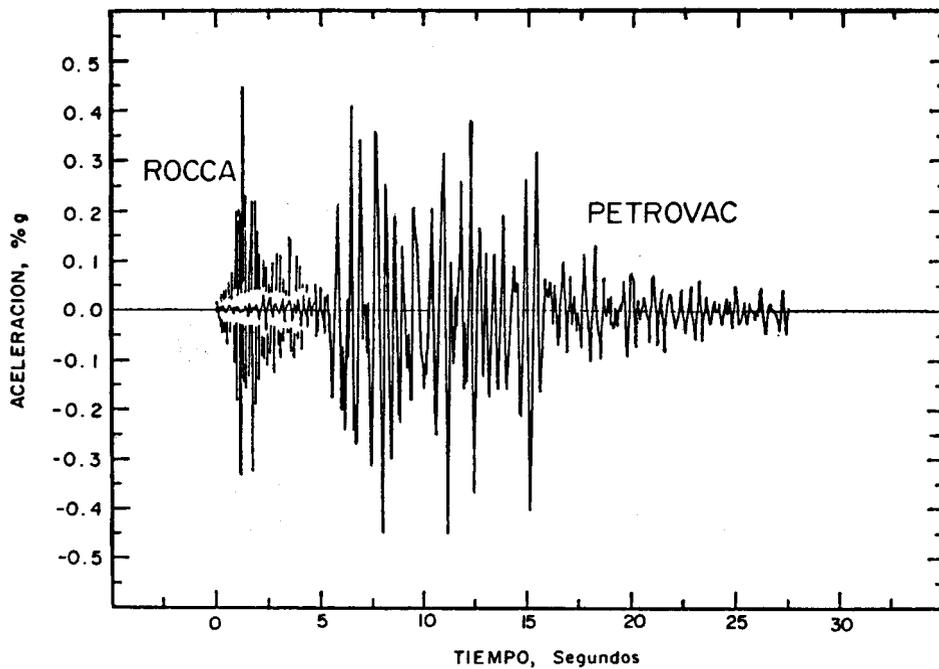
ENERGIA TOTAL E HISTERETICA PARA 0.8 Sd.

Figura No. 11



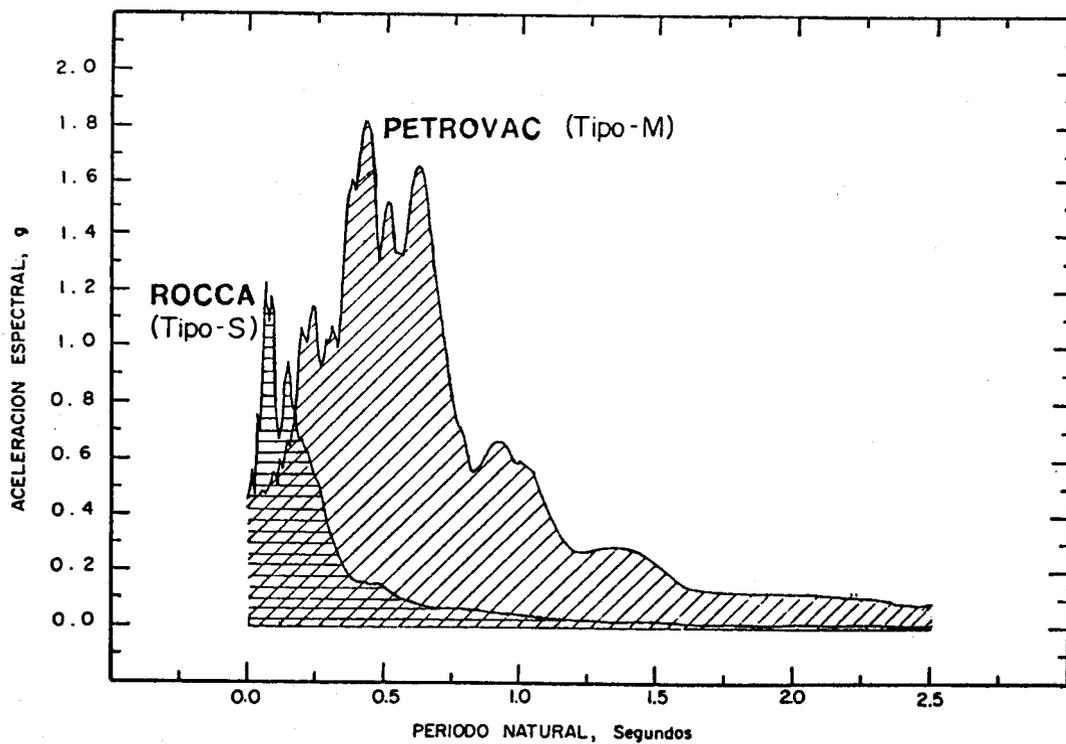
ENERGIA TOTAL E HISTERETICA PARA 0.5 Sd.

Figura No. 12



ACELEROGAMAS DE ROCCA Y PETROVAC

Figura No. 13



ESPECTRO DE RESPUESTA, 5% DE AMORTIGUAMIENTO

Figura No. 14