

01163
2ej.
1

**METODO SIMPLIFICADO PARA OBTENER
COEFICIENTES SISMICOS EN TERRAPLENES**

ING. JUAN CARLOS AFANADOR CAYCEDO

TESIS

Presentada a la División de Estudios de
Posgrado de la
FACULTAD DE INGENIERIA
de la
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
como requisito para obtener
el grado de
MAESTRO EN INGENIERIA
(MECANICA DE SUELOS)

CIUDAD UNIVERSITARIA

OCTUBRE 1988

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

TABLA DE SIMBOLOS

- Va.....** Velocidad de propagación de onda de corte.
- H.....** Altura del estrato analizado.
- ω_1** Frecuencia de estratos en campo libre.
- β, ξ ...** Amortiguamiento.
- β_n** Función de Bessels de orden n.
- A_m.....** Aceleración máxima de la señal.
- ω_s** frecuencia predominante de la señal.
- ω_0** frecuencia natural de un terraplén.
- κ** Forma espectral de la señal (agudeza).
- R.....** Relación de frecuencias (señal vs estrato).
- A_s.....** Aceleración en la superficie del estrato.
- a.....** Parámetro de ajuste.
- b.....** Parámetro de ajuste.
- Co.....** Parámetro de ajuste (amplificación en la superficie)
- Do.....** Parámetro de ajuste (amplitud del efecto de onda).
- e.....** Parámetro de ajuste (frecuencia del efecto de onda)
- g.....** Parámetro de ajuste (desfase del efecto de onda)
- f.....** Parámetro de ajuste.
- K'.....** Factor de forma para terraplenses.
- Ff.....** Factor de corrección de frecuencia por efecto de la geometría.
- Fa.....** Factor de amplificación de aceleraciones en la corona de los terraplenses.
- Fs.....** Factor de amplificación en la superficie de la pendiente del terraplén.
- Fr.....** Factor de corrección de frecuencia por efecto de la variación de la rigidez con la profundidad.

METODO SIMPLIFICADO PARA OBTENER COEFICIENTES SISMICOS EN TERRAPLENES

1.	INTRODUCCION.....	1
2	ASPECTOS TEORICOS.....	5
2.1	METODOS DE ANALISIS DE TERRAPLENES.....	5
2.1.1	METODO DE VIGA DE CORTANTE.....	5
2.1.2	METODO DE ELEMENTO FINITO.....	8
2.2	PRINCIPIOS DE LA TEORIA DE VIBRACIONES ALEATORIAS... 0	
2.2.1	CORRELACION Y AUTOCORRELACION.....	10
2.2.2	ANALISIS DE FOURIER.....	11
2.2.3	FUNCION DE DENSIDAD ESPECTRAL.....	12
2.2.4	RESPUESTA DE SISTEMAS LINEALES.....	14
3	SIMULACION DEL MEDIO CON ELEMENTOS FINITOS.....	19
3.1	ANALISIS DE CAMPO LIBRE.....	19
3.1.1	VARIABLES CONSIDERADAS.....	19
3.1.1.1	EXCITACION DINAMICA.....	19
3.1.1.2	SUELO.....	21
3.1.2	RESULTADOS.....	23
3.2	ANALISIS DE TALUDES NATURALES Y TERRAPLENES.....	24
3.2.1	VARIABLES CONSIDERADAS.....	24
3.2.2	RESULTADOS.....	26
4	ANALISIS DE RESULTADOS.....	29
4.1	RESULTADOS DE CAMPO LIBRE.....	29
4.1.1	NORMALIZACION Y AJUSTE DE RESULTADOS.....	29
4.1.2	EFFECTO DE VARIACION DEL AMORTIGUAMIENTO.....	30

4.2	RESULTADOS DE TALUDES NATURALES Y TERRAPLENES.....	31
4.2.1	REVISION DEL TAMAÑO DE LOS ELEMENTOS DE LA MALLA.....	31
4.2.2	FRECUENCIA FUNDAMENTAL DE TERRAPLENES.....	32
4.2.3	AMPLIFICACION DE ACELERACIONES EN LA CORONA.....	33
4.2.4	ACELERACIONES EN LA SUPERFICIE DEL TALUD.....	34
4.2.5	EFFECTO DE LA VARIACION DEL AMORTIGUAMIENTO.....	35
4.2.6	EFFECTO DE LA VARIACION DE LA RIGIDEZ CON LA PROFUNDIDAD.....	36
4.2.7	PROCEDIMIENTO DE AJUSTE DE COEFICIENTES SISMICOS EN TERRAPLENES.....	37
4.3	COMPARACION DE RESULTADOS.....	39
	METODO SIMPLIFICADO VS E. F (CAMPO LIBRE).....	39
	METODO SIMPLIFICADO VS E. F (TERRAPLENES).....	39
	VIGA DE CORTANTE VS E. F.....	40
5	CONCLUSIONES.....	42
6	REFERENCIAS.....	48
7	INDICE DE FIGURAS.....	50

En años recientes los métodos de análisis para evaluar la estabilidad de taludes se han desarrollado rápidamente. Algunos más sofisticados y su aplicación práctica se restringe a estructuras importantes; otros, más simplificados, encuentran su aplicación en estructuras térreas de menor relevancia.

Los diversos métodos de análisis de que dispone la profesión tienen ventajas y limitaciones y su uso debe adecuarse a las características, complejidad e importancia de la estructura térrea en cuestión.

Uno de los procedimientos que ha recibido gran atención últimamente es el método de los elementos finitos (ref 14) que básicamente consiste en representar un medio continuo con elementos discretos, como se indica en la figura 1.1. La precisión de este método depende del grado de fineza con el que la malla define la geometría del problema bajo estudio; otro factor importante en este procedimiento es la caracterización del comportamiento del material que integra la estructura cuando se somete a estados de esfuerzos estáticos y dinámicos. Satisfacer ambas condiciones resulta en general costoso y sólo se justifica para cierto tipo de problemas en los que es de gran importancia calcular los estados de esfuerzos y deformaciones con razonable confianza, con el fin de diseñar (o al menos guiar el criterio de diseño) de obras civiles cuya seguridad es vital.

Existe otro grupo de problemas en los que normalmente no se justifica el análisis detallado con el método de elementos finitos y que incluso es suficiente estudiar con otros procedimientos más simplistas. En esta categoría caen por ejemplo la mayoría de los taludes naturales, muchos terraplenes, cimentaciones, etc.

El problema de la selección del método de análisis se dificulta más cuando interviene el efecto del sismo. Actualmente hay una marcada tendencia hacia el uso de los métodos pseudoestáticos bajo la premisa de que estos son conservadores. Desafortunadamente no se

conoce el grado de conservadurismo en el que se incurre para cada caso específico y se puede caer en muchas ocasiones en situaciones de costos excesivos innecesarios. Por otro lado existen problemas en los que los métodos simplistas pueden conducir a situaciones del lado de la inseguridad sin que el usuario se percate de ello.

Es por todo esto que se justifica explorar la posibilidad de desarrollar procedimientos de análisis intermedios que posean en gran medida las ventajas de los procedimientos sofisticados y los de los simplificados : la buena aproximación de los métodos del elemento finito y la simplicidad de los segundos.

Los procedimientos de análisis dinámico simplificado (métodos pseudoestáticos) hacen uso de la hipótesis de simular la carga sísmica con un coeficiente que depende de la sismicidad de la zona y del peso de la estructura (fig 1.2). En el caso de taludes y terraplenes su estabilidad normalmente se evalúa utilizando el método de Bishop modificado (ref 3) incluyendo en el equilibrio de fuerzas (fig 1.3) las de carácter dinámico , representadas por una carga estática proporcional al peso de la masa de suelo potencialmente deslizante. El factor de seguridad contra el deslizamiento se obtiene de la relación entre las fuerzas resistentes y la fuerza motriz.

Una de la principales limitaciones de los métodos pseudoestáticos es que consideran el coeficiente sísmico constante a lo largo de la superficie potencial de falla . En algunas versiones recientes se intenta incluir la flexibilidad del terraplén suponiendo que el coeficiente sísmico varía con la altura, siguiendo distribuciones que se han obtenido combinando resultados de viga de cortante y del método de los elementos finitos.

Seed y Martin (1966) utilizaron el análisis por viga de corte en presas de tierra sometidas a cargas dinámicas, en la que las frecuencias fundamentales son función de la geometría y de las propiedades dinámicas, asignando coeficientes sísmicos según la relación de frecuencias de la presa y de la frecuencia principal de la señal.

Ambraseys y Sarma (1967) adoptaron la misma filosofía estudiando la respuesta de presas sometidas a una variedad de movimientos sísmicos dados en términos de acelerogramas.

Otros estudios (Makdisi y Seed 1977) se han basado en la misma hipótesis de viga de cortante, pero teniendo en cuenta las variaciones de la señal en términos de espectro de aceleraciones, asignando un valor único para la frecuencia del talud y teniendo en cuenta la importancia de las frecuencias del segundo y tercer modo de vibración.

La consideración de la variación vertical del coeficiente sísmico es un avance en los métodos pseudoestáticos; sin embargo, dado el carácter bi- o tridimensional de los terraplenes es de esperarse que la intensidad de la respuesta varíe espacialmente dentro del cuerpo del terraplén. Es decir, para una elevación dada el coeficiente sísmico seguramente variará a partir del eje central hacia el talud. La forma y magnitud de esta variación depende de la geometría del terraplén, de las propiedades dinámicas de los materiales constitutivos y de las características de las excitaciones sísmicas.

El objetivo de este trabajo es desarrollar un procedimiento sencillo y confiable para definir tal variación del coeficiente sísmico en taludes naturales y terraplenes. Para esto, se realizaron simulaciones numéricas con el método del elemento finito incluyendo como variables la geometría (altura del terraplén, ancho de la corona y pendiente del talud), propiedades dinámicas de los materiales (módulo de rigidez al corte y amortiguamiento) y las características de la excitación dinámica definida en términos de una función espectral. Se consideraron dos condiciones en las propiedades de los materiales: a) que la velocidad de onda de corte es constante y b) que la velocidad de onda de corte varía linealmente con la profundidad en relación de 1 a 3. El amortiguamiento se consideró constante en toda la sección y se tomaron tres valores para el análisis. Para evaluar el efecto de la forma espectral de la excitación en la respuesta se consideraron tres formas: Una representativa de un pulso senoidal

(forma muy aguda), otra equivalente a sismos reales, y una tercera representativa de un ruido blanco (amplitudes espectrales constantes en un intervalo de frecuencia considerado).

Los resultados indican que la estimación de las aceleraciones máximas (coeficientes sísmicos) con el procedimiento simplificado es buena en términos generales, cuando se comparan con las calculadas con el método de los elementos finitos.

En el capítulo dos se presentan brevemente los aspectos teóricos concernientes al tema. Se mencionan algunos de los métodos de análisis que se han utilizado hasta el momento en el estudio de terraplenes y los principios de la teoría de vibraciones aleatorias. El capítulo tres se refiere a las variables que se toman en cuenta en los análisis, se mencionan los valores asignados (geometría y propiedades dinámicas) y se comentan los parámetros adicionales que fue necesario introducir para que el análisis de los resultados fuera consistente. Así mismo, se presentan los resultados de simulaciones numéricas tanto para campo libre como para los taludes naturales y terraplenes. En el capítulo cuatro, se hace referencia a las tendencias de los resultados con la variación de cada parámetro, así como los métodos de ajuste utilizados para simplificar las respuestas obtenidas. El capítulo cinco resume las principales conclusiones.

2 ASPECTOS TEORICOS

2.1 METODOS DE ANALISIS DINAMICO DE TERRAPLENES

El método más simple para el análisis dinámico de terraplenes consiste en considerarlos como Cuerpos Rígidos. En estos casos se supone que toda la masa involucrada tiene una aceleración uniforme e igual a la del suelo en todo momento del sismo, por lo tanto la aceleración de diseño será la aceleración máxima del suelo. Esta consideración es poco realista, ya que se ha observado en distintos que ocurre una amplificación del efecto dinámico.

2.1.1 Método de Viga de Cortantes

Otro método de análisis es el de la viga de Cortante, basada en la teoría de elasticidad, desarrollada por Mononobe, Takata y Matsumura (1930) con base en las siguientes hipótesis:

- a) La presa es de sección triangular simétrica e infinitamente larga y descansa sobre una base rígida.
- b) El material de la presa es homogéneo, de comportamiento elástico lineal con módulo de elasticidad y densidad constantes.
- c) La relación base/altura de la presa es grande, por lo que pueden despreciarse las deformaciones de flexión.
- d) Los esfuerzos cortantes están uniformemente distribuidos en cualquier plano horizontal.
- e) Se desprecia la influencia del agua almacenada.

Considerése el terraplén de la figura 2.1.2 constituido por dovelas horizontales, la ecuación de equilibrio de la dovela que conforma todo el terraplén es (Seed & Martin 1966):

$$u = \frac{G}{\rho} \left[u'' + \frac{1}{Y} u' \right] \quad 2.1.1$$

Que es la ecuación de vibración no amortiguada de la viga de corte unidimensional.

Donde :

G es el módulo de rigidez al cortante.

ρ es la densidad de la masa del material.

$u(y,t)$ es el desplazamiento relativo del nivel Y en la dirección x en el tiempo t .

u' es la velocidad de desplazamiento

u'' es la aceleración del desplazamiento.

\dot{U} es la aceleración de la fuerza externa actuante.

Para las condiciones de frontera siguientes :

$u(H,t)=0$, el desplazamiento relativo de la base es nulo.

$u'(0,t)=0$, el cortante en el vértice es nulo para cualquier t .

La solución es:

$$u(y,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[A_n \sin(\omega_n t) + B_n \cos(\omega_n t) \right] J_0 \left(\beta_n \frac{Y}{H} \right) \quad 2.1.2$$

Donde:

J_0 es la función de Bessel de primera clase y orden cero.

β_n es el parámetro que define las frecuencias fundamentales.

$$(\beta_1 = 2.404, \beta_2 = 5.52, \beta_3 = 8.65, \beta_4 = 11.79)$$

$\omega_n = \beta_n \frac{V_s}{H}$ frecuencias circular natural del n modo.

$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$ velocidad de propagación de la onda de cortante.

Usando las propiedades de ortogonalidad de las configuraciones modales y el principio de superposición de modos (la respuesta total de la estructura es la suma de las respuestas para cada modo, Clough 1961) se obtiene la siguiente ecuación:

$$u(Y,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 J_0(\beta_n Y/H)}{\omega_n \beta_n J_1(\beta_n)} \int_0^t \dot{U}_g(\tau) \sin \omega_n (t-\tau) d\tau \quad 2.1.3$$

Si se tiene en cuenta el amortiguamiento (ξ) y se reorganizan términos se llega a la siguiente expresión:

$$u_n(Y, t) = \phi_n(Y) \frac{V_n(t)}{\omega_n} \quad 2.1.4$$

$$V_n(t) = \int_0^t U(\tau) e^{-\xi \omega_n (t-\tau)} \sin \omega_n (t-\tau) d\tau \quad 2.1.5$$

$$\phi_n(Y) = \frac{2 J_0(\beta_n Y/H)}{\beta_n J_1(\beta_n)} \quad 2.1.6$$

Donde ϕ_n es el factor de participación del modo n y se encuentran representados para los tres primeros modos por medio de la figura 2.1.3

De manera que:

$$u(Y, t) = \sum_{n=1}^{\infty} u_n(Y, t) \quad 2.1.7$$

Se puede demostrar (Esteva y Rosenblueth 1964) que cuando los amortiguamientos son muy pequeños:

$$\ddot{u}_n(Y, t) = \omega_n^2 u_n(Y, t) \quad 2.1.8$$

Y teniendo en cuenta la aceleración en la base (\ddot{u}_g) para calcular las fuerzas inerciales la aceleración absoluta al nivel Y será:

$$\ddot{u}_g = \ddot{u}(Y, t) + \ddot{u}_g \quad 2.1.9$$

Para obtener los valores máximos probables se toma el máximo valor de $\omega_n |V_n(t)|_{\max} = \omega_n V = A$, llamada aceleración espectral.

Rosenblueth y Esteva (1962) demostraron por análisis probabilísticos que es más realista estimar la respuesta total de acuerdo con la siguiente expresión:

$$|u(Y)|_{\max} = \sqrt{\sum |\phi_n(Y) A|^2} \quad 2.1.10$$

2.1.2 Método de Elementos Finitos:

El método de elementos finitos brinda la solución numérica de medios continuos, reemplazándolos por modelos con un número finito de grados de libertad. Este método permite el análisis de modelos con materiales viscoelásticos en dos y tres dimensiones, que es un avance respecto a las soluciones brindadas por la viga de corte.

El método reemplaza la sección del terraplén por una malla de elementos. Las cargas se concentran en los puntos nodales y las ecuaciones de equilibrio se plantean con los desplazamientos de los puntos nodales. En cada elemento se puede plantear el equilibrio relacionando fuerzas y desplazamientos que expresados de manera matricial se presentan a continuación:

$$\langle e \rangle = [A] \langle r \rangle \quad 2.1.11$$

$\langle e \rangle$ son las componentes de deformación de cada elemento.
 $[A]$ es la matriz que define la geometría del elemento.
 $\langle r \rangle$ son los desplazamientos de los puntos nodales.

Además:

$$\langle F \rangle = [B] \langle \sigma \rangle \quad 2.1.12$$

$\langle F \rangle$ son las fuerzas nodales en el elemento.
 $[B]$ matriz que relaciona fuerzas y esfuerzos (geometría).
 $\langle \sigma \rangle$ son las componentes de esfuerzo dentro del elemento.

Utilizando las relaciones esfuerzo deformación:

$$\langle \sigma \rangle = [C] \langle e \rangle \quad 2.1.13$$

$[C]$ es la matriz de deformabilidad de cada elemento.

Reorganizando y sustituyendo las ecuaciones anteriores se obtiene:

$$\langle F \rangle = [B][C][A] \langle r \rangle = [k] \langle r \rangle \quad 2.1.14$$

$[k]$ es la matriz de rigidez.

Superponiendo los efectos de cada elemento de acuerdo a su participación en los grados de libertad adyacentes, se ensambia la ecuación matricial de equilibrio global.

Se puede de igual manera analizar la condición dinámica planteando la ecuación de equilibrio dinámico para vibración libre así:

$$[M]\langle r \rangle + [C]\langle r \rangle + [k]\langle r \rangle = \langle R(t) \rangle \quad 2.1.15$$

[M],[C] y [k] matrices de masa, amortiguamiento y rigidez.
 $\langle r \rangle$ matriz de desplazamientos nodales relativos.
 $\langle R(t) \rangle$ matriz de fuerzas sísmicas actuantes.

En los resultados que se muestran posteriormente se observa que la viga de cortante y los elementos finitos dan soluciones sensiblemente diferentes, principalmente en las secciones que no corresponden a la sección central del terrapién y también se presentan diferencias en cuanto a la definición de la frecuencia natural de la estructura terrea.

Los esfuerzos cortantes obtenidos con el método del elemento finito, muestran que estos no son constantes en las secciones, por lo tanto se recomienda el empleo de la viga de cortante sólo para estimaciones generales del comportamiento de los terrapienes.

2.2 PRINCIPIOS DE LA TEORIA DE VIBRACIONES ALEATORIAS.

Cuando un sistema es sometido a una vibración y su respuesta es impredecible, se dice que el sistema se encuentra en vibración aleatoria. Esta respuesta depende tanto de las características de la excitación (fuerza, dirección, tiempo) como de las propiedades del sistema (masa, rigidez y amortiguamiento).

El estudio de las vibraciones aleatorias consiste en averiguar la relación, en términos estadísticos, del movimiento del sistema estudiado con las características también aleatorias de la excitación y las propiedades (deterministas en este caso) del sistema.

2.2.1 Correlación y Auto correlación.

Teniendo una serie de pares de valores, si estos muestran una tendencia definida, se dice que las variables involucradas están correlacionadas. Sobre estos pares de puntos podremos calcular algunas propiedades estadísticas que permitirían hacer el ajuste adecuadamente.

Estas propiedades son la media $E(X) = \bar{X}$, el valor medio cuadrático $\sigma^2 = E(X^2)$ y el valor medio del producto de X e Y $\sigma_{xy} = E(XY)$.

En vez de pares de puntos se pueden correlacionar funciones entre sí como $X_1(t)$ y $X_2(t)$. Para ello se consideran 2 funciones senoidales con igual frecuencia y amplitud, pero con un desfase ϕ y se calcula el valor medio de su producto:

$$X_1(t) = X_0 \text{sen}(\omega t) \quad 2.2.a$$

$$X_2(t) = X_0 \text{sen}(\omega t + \phi) \quad 2.2.b$$

$$E[X_1(t) X_2(t)] = \int X_0^2 \text{sen}(\omega t) \text{sen}(\omega t + \phi) dt \quad 2.2.c$$

$$E[X_1(t) X_2(t)] = X_0^2 \cos(\phi) / 2 \quad 2.2.d$$

Esto indica que si el ángulo de fase es 0° ó 180° las dos señales están correlacionadas, mientras que si el ángulo de fase es 90° ó 270° son independientes.

Se puede ampliar el concepto y hacer la correlación entre una función cualquiera (aleatoria), por sí misma desfasada un valor (τ), lo cual define la función de autocorrelación ($R(\tau)$).

$$R(\tau) = E[X(t) * X(t-\tau)] \quad 2.2.1$$

Esta función brindará información indirecta del contenido frecuencial de la señal original $X(t)$, será una función par, ya que depende únicamente del desfase (τ) y será no correlacionada para valores de τ tendiendo a infinito (∞).

2.2.2 Análisis de Fourier.

Es conocido en ingeniería el concepto de una señal (periódica) en el dominio de la frecuencia, por descomposición de ella en términos de sus componentes armónicas o como una suma de términos trigonométricos de la forma:

$$X(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \left[a_k \cos(2\pi kt/T) + b_k \sin(2\pi kt/T) \right] \quad 2.2.2$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} X(t) dt \quad 2.2.3$$

$$a_k = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} X(t) \cos(2\pi kt/T) dt \quad 2.2.3$$

$$b_k = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} X(t) \sin(2\pi kt/T) dt \quad 2.2.5$$

La única restricción importante para este desarrollo es que para funciones $X(t)$ discontinuas, la serie dará como respuesta para ese punto, el valor medio $E(X(t))$

A medida que disminuimos T (intervalo entre dos coeficientes) llegaremos a formar con los coeficientes una función continua en el dominio de la frecuencia convirtiendo la sumatoria en una integral, llamada Transformada de Fourier. Además es muy común en teoría de vibraciones aleatorias utilizar la forma compleja de la Transformada de Fourier, empleando ciertas relaciones conocidas de variable compleja:

$$e^{i\theta} = \cos(\theta) + i\sin(\theta) \quad 2.2.6$$

Se define:

$$X(\omega) = A(\omega) - iB(\omega) \quad 2.2.7$$

$$X(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(t) [\cos(\omega t) - i\sin(\omega t)] dt \quad 2.2.8$$

$$X(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(t) e^{-i\omega t} dt \quad 2.2.9$$

$$X(t) = \int X(\omega) e^{-i\omega t} d\omega \quad 2.2.10$$

Donde la ec 2.2.10 sería la representación de la señal en términos de la Transformada de Fourier, que debe cumplir la condición:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |X(t)| dt < \infty \quad 2.2.11$$

2.2.3 Densidad Espectral o Espectro De Potencia

En la naturaleza, las señales de tipo aleatorio no son periódicas y por lo tanto no pueden ser representadas por medio de series o la Transformada de Fourier, además ese tipo de señales son continuas indefinidamente y no cumplen con la condición planteada en la ec 2.2.11.

Estos inconvenientes los podremos evitar no analizando la excitación sino tomando la función de autocorrelación de ella. Esta función cumple con la periodicidad y como se comentó tiende a cero para valores de desfase muy grandes (ω). Brinda además información directa de los contenidos frecuenciales de la excitación original tomándola en términos de la Transformada de Fourier.

Aplicando estos conceptos a una señal cualquiera tenemos:

$y = X(t)$ la señal original. 2.2.12

$R(\tau) = E\{X(t) \cdot X(t+\tau)\}$ función de autocorrelación. 2.2.13

$P(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau$ Transformada de Fourier de la función de autocorrelación. 2.2.14

$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega$ función de autocorrelación en términos de la transformada de Fourier. 2.2.15

Donde $P(\omega)$ es la llamada densidad espectral o espectro de potencia y se puede escribir:

$P(\omega) = A(\omega) - iB(\omega)$ 2.2.16

$A(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau$ 2.2.17

$B(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) \sin(\omega\tau) d\tau$ 2.2.18

El espectro de potencia es real porque la función de autocorrelación es función par e igual a $\cos(\omega\tau)$, mientras que la función $\sin(\omega\tau)$ es impar y, por lo tanto, la integral dada en la ecuación 2.2.18 es nula, quedando el espectro simplificado a:

$P(\omega) = A(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau$ 2.2.19

lo que fue demostrado por Davenport (1958). Esta manera de representación de señales es muy poderosa pues permite la aplicación de algunos resultados importantes en la teoría de sistemas lineales sujetos a vibraciones aleatorias (Crandall y Mark 1963).

Si en la ecuación 2.2.13 se toma el valor para $(\tau=0)$ se tiene:

$$R(\tau=0) = \int_{-\infty}^{\infty} P(\omega) d\omega \quad 2.2.20$$

$$R(\tau=0) = E[X(t)X(t+\tau)] = E[X^2] \quad 2.2.21$$

$$\sigma^2 = E[X^2] = \int_{-\infty}^{\infty} P(\omega) d\omega \quad 2.2.22$$

El valor dado en la ec 2.2.22 (valor medio cuadrático) está directamente relacionado con el contenido de energía de la señal y con la aceleración máxima de esta.

2.2.4 Respuesta de Sistemas Lineales.

Existen varios métodos para calcular la respuesta de una señal en un sistema específico, uno de ellos es determinando la respuesta del sistema a una entrada senoidal de amplitud y frecuencia constantes dada por:

$$X(t) = X_0 \text{sen}(\omega t) \quad 2.2.23$$

y cuya salida (y) será una onda similar, con la misma frecuencia (ω) que la señal de la entrada y con un retraso o fase (ϕ) respecto a esta, dada por:

$$y(t) = y_0 \text{sen}(\omega t + \phi) \quad 2.2.24$$

La relación de las amplitudes (y_0/X_0), y el ángulo de fase (ϕ) son los datos que definen las características de transmisión del sistema a una frecuencia fija (ω), de manera que conociendo estas características para algunos puntos determinados se pueden obtener gráficas de la relación de amplitudes y del ángulo de fase en función de dicha frecuencia.

Se toma como ejemplo un sistema de vibración cuyo movimiento está regido por un resorte de rigidez (k) y un amortiguador viscoso lineal de coeficiente (c), dado por la ecuación :

$$cy' + ky = X(t) \quad 2.2.25$$

Sustituyendo las ecs 2.2.23 y 2.2.24 en esta última y agrupando términos se tiene:

$$\frac{X_0}{Y_0} = (c^2 \omega^2 + k^2)^{1/2} \quad \text{y} \quad \tan(\phi) = \frac{c\omega}{k} \quad 2.2.26$$

En lugar de considerar estos dos términos como magnitudes independientes, es habitual en teoría de vibraciones utilizar un único número complejo para representarlos y que es conocido como "FUNCION DE TRASFERENCIA" ($H(\omega)$) de manera que:

$$H(\omega) = A C \omega - i B C \omega \quad 2.2.27$$

$$|H(\omega)| = (A^2 + B^2)^{1/2} = X_0/Y_0 \quad 2.2.28$$

$$B/A = \tan(\phi) \quad 2.2.29$$

En notación exponencial compleja podremos relacionar la entrada y la salida como:

$$y(t) = H(\omega) X_0 e^{i\omega t} \quad 2.2.30$$

y que es válida para cualquier señal de entrada $X(t)$ armónica.

Otro método para calcular la función de transferencia consiste en medir la respuesta a una señal transitoria (un pulso) hasta que se alcance de nuevo el equilibrio estático, de manera que la información registrada caracteriza el comportamiento dinámico del sistema. La señal adecuada es aquella que por su corta duración no perturbe la respuesta.

Si en la ecuación 2.2.25 colocamos en la señal $X(t)$ el pulso descrito, de manera que :

$$X(t) = \delta(t) \quad \text{y} \quad \delta(t) = 0 \quad \text{para} \quad t > 0 \quad 2.2.31$$

Sustituyendo en la ec 2.2.25

$$cy' + ky = 0 \quad 2.2.32$$

cuya solución es:

$$y(t) = h(t) = Ce^{-kt/c} \quad 2.2.33$$

siendo C es una constante que depende de las condiciones iniciales. Entonces la respuesta $y(t)$ de un sistema sometido a una excitación $X(t)$ se podrá dar en términos de la ec 2.2.33, como la integración de la respuesta a una serie de pulsos y conocida como la integral de Duhamel:

$$y(t) = \int_0^T y(t) h(t-\tau) d\tau \quad 2.2.34$$

En ambos casos mencionados se caracteriza dinámicamente el sistema y es lógico que ambas soluciones se relacionen. Esta relación se obtiene por medio de la Transformada de Fourier, que permite obtener de una función aperiódica su espectro en el dominio de la frecuencia de manera que se obtiene:

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad 2.2.35$$

Ahora, si las señales de entrada $X(t)$ y salida $y(t)$ las tomamos en términos de sus Transformadas de Fourier $X(\omega)$ e $Y(\omega)$ la ec 2.2.30 quedará:

$$Y(\omega) = H(\omega) X(\omega) \quad 2.2.36$$

Por otra parte la función de autocorrelación de la salida está dada por:

$$R(\tau)_y = E\{y(t) y(t-\tau)\} \quad 2.2.37$$

que al pasarla al dominio de la frecuencia se obtiene el espectro de potencia de la respuesta,

$$P_y(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau)_y e^{-j\omega\tau} d\tau \quad 2.2.38$$

que relaciona, por medio de la función de transferencia, los espectros de potencia, de entrada y de salida.

$$P_y(\omega) = |H(\omega)|^2 P_x(\omega) \quad 2.2.39$$

3. SIMULACION DEL MEDIO CON ELEMENTOS FINITOS.

Como se comentó anteriormente, el objetivo de este estudio es desarrollar un procedimiento simplificado para estimar las distribuciones espaciales de aceleraciones (coeficientes sísmicos) en taludes naturales y terraplenes, con el propósito de que los análisis que se llevan a cabo con procedimientos pseudoestáticos consideren condiciones más apegadas a la realidad, conduciendo a resultados más confiables.

Para desarrollar el procedimiento simplificado se recurrió a la modelación numérica con elementos finitos y los resultados se normalizaron y extendieron utilizando análisis dimensional. Se encontró que la forma más consistente para lograr el objetivo propuesto fue partir de las condiciones de campo libre (depósitos de suelo) para luego correlacionarlos con los obtenidos en taludes naturales y terraplenes. A continuación se presentan los resultados de los análisis realizados.

3.1 ANALISIS DE CAMPO LIBRE.

3.1.1 Variables Consideradas.

EXCITACION DINAMICA

La excitación que se utilizó en el análisis dinámico se da en términos del espectro de potencia de la señal [$P(\omega)$], que permite controlar la aceleración máxima de la excitación y la frecuencia predominante de la señal. Se considera que la duración equivalente del proceso estocástico se igual a 30s. Sólo se incluye en los análisis ondas de corte horizontal, SH, con incidencia vertical en la base del modelo.

Se tomó una forma espectral determinada y se varió la frecuencia predominante de la señal entre 1 y 5 Hz (En la fig 3.1a se muestran los espectros de potencia y en la figura 3.1b se presentan los

espectros de potencia correspondientes). Posteriormente se modificó la forma del espectro de potencia de la señal, de manera que representen tres casos particulares: el primero una señal muy aguda a manera de una onda senoidal; el segundo caso simula formas espectrales típicas de sismos reales y un tercer caso que representa un ruido blanco (igual valor del espectro en el rango de las frecuencias de interés), como se indica en la figura 3.2a. Los espectros de respuesta correspondientes se encuentran en la figura 3.2b.

Para identificar la señal (excitación), se proponen los siguientes parámetros:

Aceleración máxima:

$$A_m = \delta \left[\int_0^{\omega_0} P(\omega) d\omega \right]^{1/2} \quad 3.1.1$$

Que está relacionada directamente con el contenido de energía. El parámetro δ depende de la forma espectral, pero para fines prácticos su valor se puede tomar entre $1.1 < \delta < 1.4$. Las aceleraciones máximas de las respuestas se normalizarán con respecto a la aceleración máxima de la excitación.

Frecuencia característica:

$$\omega_e = \omega [P(\omega)]_{\max} \quad 3.1.2$$

Indica la frecuencia en la que se encuentra concentrada la energía y se define como la frecuencia donde el espectro de potencia tiene su valor máximo. Se escogió este valor en vez del centro de gravedad del espectro, debido a que en este punto, un estrato con igual frecuencia tiene su máxima amplificación.

Forma espectral:

$$x = \frac{\int_0^{\omega_0} P(\omega) d\omega}{\omega_0 P(\omega_e)} \quad 3.1.3$$

Parámetro que nos indica la forma del espectro, su valor varía desde cero para una delta de altura infinita hasta uno correspondiente al ruido blanco. Los términos que intervienen en la ecuación anterior son:

$$\int_0^{\omega_0} P(\omega) d\omega \quad \text{que define el área del espectro de potencia}$$

$P(\omega_0)$ que es el valor del espectro correspondiente a la frecuencia del espectro (ω_0).

ω_0 que es el rango de frecuencias de interés y en el que está definido el espectro de la señal.

Los espectros escogidos tienen una aceleración máxima (A_m) de 0.1g y todos los resultados de aceleraciones se normalizaron respecto a este valor, se seleccionó la forma espectral (n) tomando tres valores 1, 0.4 y 0.1 (fig 3.2). Los espectros utilizados se relacionan en la tabla 3.1 dada a continuación:

TABLA 3.1

NOMBRE DEL ESPECTRO	FRECUENCIA ω_0	FORMA n
EPP1	1	0.1
EPP3	3	0.1
EPP5	5	0.1
EP1	1	0.4
EP2	2	0.4
EP3	3	0.4
EP4	4	0.4
EP5	5	0.4
EPBLC	5	1.0

En los resultados que se obtuvieron se observó que las aceleraciones máximas tienen la misma tendencia en estratos cuyas relaciones de frecuencia (ω excitación / ω estrato) son iguales, (fig 3.3 Y 3.4) por lo tanto para completar el análisis de esta sección, se propone un parámetro adicional que relaciona la frecuencia de la

excitación y la frecuencia fundamental del estrato analizado. Este parámetro se denominará R y está dado por:

relación de frecuencias:

$$R = \omega_e / \omega_{cl} \quad 3.1.4$$

Donde ω_e es la frecuencia de la excitación y ω_{cl} es la frecuencia del estrato en campo libre.

SUELO

Para iniciar el estudio se calcularon las respuestas en términos de aceleraciones, de estratos homogéneos elásticos lineales cuyas propiedades no tendrán variación durante el efecto sísmico (degradación), sometidos a diferentes excitaciones sísmicas. A estos estratos se les variaron sus propiedades (rigidez y amortiguamiento) y su geometría (altura).

Como la frecuencia natural de un estrato homogéneo se define por medio de la relación :

$$\omega_{cl} = \frac{V_s}{4H} \quad 3.1.5$$

donde V_s es la velocidad de propagación de las ondas de corte en el medio y H es la profundidad del estrato; se buscó analizar las respuestas de dos estratos con igual frecuencia pero diferente profundidad, sometidos a una misma excitación. Para ello se definió la altura normalizada Y dada por:

$$Y = y/H \quad 3.1.6$$

donde y es la altura del estrato cuyo origen se encuentra en la base rígida y se modelaron dos casos : El primero con altura de 50m y una velocidad de corte de 150m/s, y un segundo caso con profundidad 100m y

velocidad de corte 300m/s. En este punto se observó que la variación de las aceleraciones normalizadas con la profundidad normalizada Y del estrato son idénticas en ambos casos (fig 3.5). Esto permite disminuir el número de análisis tomando estratos con una profundidad de 50m y cuya variación de frecuencia se obtendría mediante la modificación de la velocidad de propagación de onda de corte, V_s , con valores entre 40 y 2000 m/s según la frecuencia del espectro utilizado (tabla 3.2). Los resultados de los análisis para cada excitación se presentan en las figs 3.7, en las que se observa la variación de la respuesta de varios estratos sometidos a la misma señal y cuyas frecuencias varían alrededor de la frecuencia de la señal.

TABLA 3.2

FRECUENCIA DEL ESPECTRO ω_e (Hz)	VELOCIDAD DE CORTE V_s (m/s) RELACIONES DE FRECUENCIA (R)					
	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	5.0
1	400	200	133	100	66	40
2	800	400	266	200	133	80
3	1200	600	400	300	200	120
4	1600	800	533	400	266	160
5	2000	1000	666	500	333	200

El efecto de la variación del amortiguamiento (β) se tomó en cuenta tomando dicho parámetro con valores de 5%, 10% y 15% del amortiguamiento crítico (fig 3.6), para las relaciones de frecuencia 0.5, 1, 1.5, 2, 3 y 5 y todas las excitaciones definidas. Se puede observar que al disminuir el amortiguamiento aumenta la amplificación, llegando a valores de cuatro para amortiguamiento del 5%.

Los análisis de elemento finito se realizaron con el programa PLUSH, (Romo 1977) en los que se debe de tener cuidado de no filtrar frecuencias altas, al utilizar en la modelación del medio elementos muy rígidos (grandes). Para evitar esto, se debe cumplir con la siguiente condición:

$$h = \frac{V_e}{5\omega_0}$$

3.1.6

donde h es el tamaño máximo (altura) de los elementos finitos, V_e es la velocidad de propagación de onda del elemento, y ω_0 es la frecuencia máxima que se quiere incluir en los análisis. En este análisis se modelaron los estratos con 15 capas, a excepción de aquellos cuya velocidad de corte fue inferior a 100m/s, que se analizaron modelándolos con 30 capas.

Los resultados de variación de aceleraciones normalizadas (amplificaciones) con la profundidad se encuentran en las figuras 3.7.1 a 3.7.9. las funciones de amplificación para los diferentes casos (profundidades) se muestran en la figura (fig 3.7.10).

3.1.2 Resultados.

En la figura 3.3 se presentan las variaciones de las amplificaciones de las aceleraciones respecto a la profundidad. En estos casos la forma espectral de la excitación es constante ($\kappa=0.4$) y se varía la frecuencia desde 1 hasta 5 Hz, manteniendo siempre la misma relación de frecuencias ($R=1$). Se observa que en todos los casos la forma es muy similar y es posible normalizar, respecto a la aceleración máxima en la superficie.

En la figura 3.4 se muestra el efecto en la variación de la forma espectral en las aceleraciones máximas manteniendo la frecuencia constante ($\omega_0 = 5$ Hz), de manera que cuando el espectro es más agudo, las aceleraciones normalizadas presentan un efecto a manera de onda con una amplitud mayor.

En la figura 3.5 se observa que las aceleraciones máximas para dos estratos con igual frecuencia natural pero diferente geometría y velocidad de onda de corte promedio, son iguales si se colocan en

función de la profundidad normalizada (Y).

En las figuras 3.6 se presenta el efecto del amortiguamiento en las aceleraciones normalizadas. Se observa que a medida que el amortiguamiento disminuye, las aceleraciones aumentan y viceversa.

En las figuras 3.7 se encuentran las distribuciones de aceleraciones de los distintos estratos analizados, indicando en cada caso la frecuencia del estrato. Se observa que cuando la frecuencia de la excitación y de la señal coinciden, la aceleración en la superficie es máxima a excepción de los casos excitados con el espectro EPI ya que el centro de gravedad de este está muy desplazado a la derecha por que no se define en frecuencias negativas. Además cuando la frecuencia normalizada del estrato (respecto a la frecuencia de la excitación) es igual, las formas que se presentan son muy similares.

Es importante observar que no siempre el suelo amplifica los efectos dinámicos. En los casos en que la frecuencia de la excitación es mayor que la frecuencia natural del estrato, puede presentarse una atenuación del efecto dinámico como es el caso de los espectros con forma espectral ($\alpha=0.4$) (figuras 3.7.1 a 5) y por lo tanto si no se tienen en cuenta estos resultados, se pueden presentar casos de sobrediseño.

La variación de la función de amplificación con la profundidad se presenta en la figura 3.7.10, en la que se observa que la amplitud de los picos cambia con la profundidad. Aquella correspondiente al primer pico disminuye con la profundidad; pero la amplitud del segundo pico tiende a amplificarse.

3.2 ANALISIS DE TALUDES NATURALES Y TERRAPLENES.

3.2.1 Variables Consideradas

Basados en los parámetros y variables de la sección anterior, se relacionaron los resultados de distribuciones de aceleraciones en los taludes, con las obtenidas en estratos homogéneos, tomando los valores de las variables que se mencionan a continuación.

Respecto a la propiedades del material se tomaron terraplenes con velocidad de propagación de onda de 80,100,133,200 y 400m/s, y un amortiguamiento, β , del 10% .

En cuanto a la geometría se consideró que los resultados quedarían completamente comprendidos analizando terraplenes simétricos con las siguientes variaciones:

- a- Altura, H, de 50m en el centro del talud (igual a la seleccionada en campo libre).
- b- Pendiente del talud de una relación horizontal:vertical de 1:1, 2:1, 3:1 y 4:1
- c- Semiancho de corona (B) con valores de 5m , 25m y 50m.

por lo tanto, se propuso que los parámetros que indiquen la variación de la geometría fueran: la pendiente del talud (relación horizontal:vertical) y un parámetro K' definido como:

$$K' = h/H$$

3.2.1

donde:

h es la altura del triángulo truncado

H es la altura total del triángulo (fig 3.8)

Para asegurar que no se filtran frecuencias altas se verificó que el tamaño de los elementos de las mallas seleccionadas (5 divisiones en la corona y 15 capas) fueran las adecuadas (fig 3.11) comparando los resultados de:

a-Incremento de divisiones de la corona de 5 a 15 en un talud con ancho de corona 50m y talud 1:1. fig 3.12.a

b-Incremento de numero de divisiones en el talud de 15 a 25 para un talud con ancho de corona 5m y pendiente 4:1. fig 3.12.b

En cuanto a la excitación, la señal que se utilizó fue el espectro EP2. Para analizar el efecto de la variación de la señal en los coeficientes sísmicos se tomaron tres casos cuya relación de frecuencias es dos ($R=2$) según se muestra en la tabla 3.2.1 y cuyos resultados se presentan en la figura 3.13

TABLA 3.2.1

EXCITACION			TALUD	
FRECUENCIA ω_e	FORMA N	ACELERACION A_m	GEOMETRIA B M:V	VELOCIDAD V_s
2	0.40	0.1	25 2:1	100
2	0.10	0.1	25 2:1	100
4	0.40	0.1	25 2:1	200

Con el fin de extrapolar los resultados obtenidos en campo libre respecto a la variación del amortiguamiento, se analizaron tres casos de taludes (5%, 10% y 15%), con altura (H) de 50m, un semiancho de corona (B) de 25m, pendiente del talud 2:1, velocidad de propagación de onda (V_s) de 200m/s, excitados con el espectro nombrado como EP2 (fig 4.14).

Adicional a los análisis anteriores se compararon los coeficientes sísmicos y las funciones de amplificación de un talud (H=50m ,B=25m , pendiente2:1) y de un estrato de campo libre, los cuales tienen una variación lineal de su rigidez con la profundidad en relación de 1 a 3 (V_s variando de 100m/s a 300m/s).

3.2.2 RESULTADOS.

En este estudio se deseaba conocer la distribución espacial de coeficientes sísmicos para taludes naturales y terraplenes, ya que con la hipótesis de Viga de Cortante (capítulo 2) resulta que las aceleraciones son iguales en cualquier plano horizontal de los terraplenes.

Los resultados de los taludes analizados se encuentran representados por medio de curvas de igual coeficiente sísmico (definido como la aceleración máxima entre la aceleración de la gravedad) (figs 3.0.1-5), y de las funciones de amplificación en el centro de la corona y en tres puntos sobre la superficie del talud correspondientes al vertice, el medio y la cuarta parte de la longitud de la pendiente (figs 3.10a-1).

Si se observa en las figuras 3.0.1 la anterior simplificación es aproximadamente válida sólo para casos en los que la relación de frecuencias (R) es cercana a uno, a medida que esta relación (R) es mayor (figuras 3.0.2-3.0.5), es evidente que esta simplificación no es correcta; sin embargo al aumentar R la severidad de la excitación disminuye, las magnitudes de los coeficientes sísmicos decrecen aun cuando la hipótesis de considerar los coeficientes sísmicos constantes en planos horizontales sea poco conservadora. Los resultados de estos análisis se encuentran representados en curvas de igual coeficiente sísmico en las figs 3.0.

Es interesante señalar que, en los casos en que la relación de frecuencias es alta ($R > 2$), un talud con mayor pendiente que otro será sometido a fuerzas sísmicas mayores (figs 3.0.1-3.0.5) ya que a medida que se tiende la pendiente, las secciones de este permitirán que se desarrolle una condición similar a la de campo libre, en una sección que tendrá una frecuencia igual a la de la excitación. Estos resultados indican que sólo efectuando un análisis de estabilidad, se podrá comprobar que un talud más tendido sea más seguro que otro con pendiente menor, bajo el efecto de acciones sísmicas.

En las figs 3.10a-3.10l se presentan las funciones de amplificación en cuatro puntos en la superficie del terraplén que son: el centro de la corona, el vertice del talud y dos puntos intermedios sobre la pendiente del talud. Se observa que al aumentar la pendiente del talud la frecuencia natural de los taludes disminuye. Similarmente al aumentarse el ancho de la corona los terraplenes tienden a ser más flexibles aspecto congruente con el hecho que un estrato de suelo es menos rígido que un terraplén de igual altura. Además se ve que a medida que nos acercamos al pie del talud (puntos 130 y 160) ocurre algo similar al efecto de variación con la profundidad que ocurre en campo libre (fig 3.7.10) ya que el segundo modo cobra más importancia relativa que el primero.

El efecto de la variación del amortiguamiento se presenta en las figuras 3.14 a y b, de nuevo se observa que al aumentar el amortiguamiento los coeficientes sísmicos disminuyen y viceversa, con una tendencia igual a la que se obtuvo en los resultados de campo libre.

El efecto en la variación de la señal en los coeficientes sísmicos se presenta en las figuras 3.13, se observa que la variación del espectro (según tabla 3.2.1) no es significativo en la distribución y magnitud de los coeficientes sísmicos normalizados al menos en los casos considerados.

4. ANALISIS DE RESULTADOS.

4.1 RESULTADOS EN CAMPO LIBRE.

4.1.1 Normalización y ajuste de resultados

Analizando los resultados con amortiguamiento $\beta=10\%$ y la forma espectral ($\alpha=0.4$) se observó que las distribuciones de aceleraciones normalizadas (respecto a la profundidad del estrato HD) con una misma relación de frecuencias (R) eran similares. Al desplazar el espectro a la derecha en la frecuencia, manteniendo el mismo valor de la relación (R), se produce una amplificación mayor. sin embargo resulta que dichas distribuciones conservan la misma forma y son normalizables respecto a la aceleración máxima en la superficie.

Esto sugiere que una ecuación en función de los parámetros antes mencionados (inciso 3.2) es factible y puede tener la siguiente forma.

$$\left[\frac{a}{A_m}(y) \right] = \left[\frac{-\frac{a}{b} Co + 1}{y^b + 1} \right] \left[1 + Do y^f \sin(ey+g) \right] \quad 4.1.1$$

Esta ecuación permite encontrar las distribuciones de aceleraciones normalizadas con errores en porciento y en valor absoluto menores del 10%, comparadas con los resultados obtenidos por el método del elemento finito (figs 4.19a-f). Por lo tanto, se procedió a ajustar las curvas para las formas espectrales escogidas ($\alpha=1, 0.4$ y 0.1).

Los parámetros a, b, Co, Do, e, f y g incluidos en la ec 4.1.1 son función de la relación de frecuencias (R).

Los parámetros a y b nos dan la forma principal de la curva, ya sea concava o convexa. (fig 4.1a y 4.1b) y son importantes para relaciones de frecuencia menores de uno ($R < 1$)

El parámetro Co es el que nos da el efecto de amplificación o atenuación y es función también del espectro utilizado en la excitación (fig 4.1c). Para obtenerlo, es necesario aplicar la siguiente ecuación:

$$C_0 = 2 \left[\frac{A_s}{1 + D_0 \sin(e+g)} - 1 \right] \quad 4.1.2$$

Donde las variables involucradas son los parámetros D_0 , g y e , además de la aceleración en la superficie A_s .

El parámetro D_0 es el que hace que la curva presente en ciertos puntos una forma de onda, y da la amplitud de dicho efecto, este parámetro al igual que el C_0 depende de la excitación, y se incrementa a medida que la forma espectral (κ) es menor (espectro más agudo) o que la frecuencia de la excitación (ω_0) aumente (fig 4.1d).

El parámetro e también se encuentra relacionado con el efecto de onda y significa la frecuencia de dicho efecto en las distribuciones de aceleraciones. Es importante observar que este parámetro aumenta en forma lineal con la relación de frecuencias R (fig 4.1e). Su valor se da mediante la siguiente ecuación:

$$e = 2R + 2.5 \quad 4.1.3$$

El parámetro f (fig 4.1f) indica la importancia del efecto de onda para profundidades altas.

Por último el parámetro g (fig 4.1.g) significa el desfase del efecto de onda, tiene un comportamiento muy parecido al parámetro e y está dado por la siguiente ecuación:

$$g = 2R + 1 \quad 4.1.4$$

4.1.2 Efecto de la variación del amortiguamiento.

Partiendo de los resultados anteriores se buscó relacionar la variación del amortiguamiento con la variación de los coeficientes sísmicos. Se graficaron los correspondientes valores obtenidos con los amortiguamientos (5% y 15%) contra los de amortiguamiento (10% y

se observó que correspondían prácticamente a rectas (fig 4.2a y 4.2b), o sea que para averiguar la distribución de aceleraciones de un amortiguamiento cualquiera se procedía multiplicando la distribución para $\beta=10\%$ por un factor, pero teniendo en cuenta la altura ya que a una altura cero ($Y=0$) la amplificación era nula. Para esto se correlacionaron los valores no en forma global sino individualmente para cada altura (Y) normalizada (fig 4.3a).

Estos valores de amplificación para cada altura (Y) se graficaron en escala natural (fig 4.4a) y doble logarítmica (fig 4.4b) observándose en esta última una recta y simplificando los resultados a una variable (a_s) (fig 4.3b) que es función únicamente de la altura normalizada (Y).

Por lo tanto, el efecto en la variación del amortiguamiento quedó reducido a la siguiente expresión.

$$a(Y, \beta) = a(y, \beta=10\%) = \left[\frac{10}{\beta} \right]^{a_s(Y)} \quad 4.1.3$$

4.2 RESULTADOS DE TALUDES NATURALES Y TERRAPLENES.

4.2.1 Revisión del Tamaño de los Elementos de la Malla.

Para analizar los resultados de aceleraciones en taludes, como se comentó en el capítulo 3 se debía estar seguro que los valores obtenidos eran correctos, por ello se aumentó el número de elementos de la malla y se concluyó que el tamaño de bloques empleado era el adecuado para el análisis. Como se observa en las fig 4.5a y b las aceleraciones en los diferentes casos no difieren de una manera significativa al usar 15 y 25 divisiones. Por lo tanto se usaron cinco divisiones en la zona de la corona y 15 divisiones en el talud.

4.2.2

Frecuencia fundamental de terraplenes.

La frecuencia natural de una presa o de un talud natural se define comunmente como aquella donde se encuentra el primer pico de la función de amplificación del centro de la corona del terraplén. Si se observan las funciones de amplificación para las diferentes geometrias analizadas (figs 3.10a-1) y comparamos con la correspondiente en campo libre con las mismas propiedades (fig 3.7.10) se observa que estas no coinciden ni en la frecuencia del primer pico, ni en su amplitud; además, las mismas variaciones en la pendiente del talud (fig 4.6b) o en el ancho de corona (fig 4.6a) producen variaciones en la forma de la función de amplificación. Esto condujo a hacer una corrección de la frecuencia de campo libre, para que teniendo en cuenta la geometria, se obtuvieran los valores reales de la frecuencia de los terraplenes, dando como resultado las gráficas (4.7a y b), en las que se presenta el factor que se llamó factor de frecuencia (Ff), por el que se debe multiplicar la frecuencia de un estrato en campo libre (ω_0) con las propiedades dadas y así obtener la frecuencia real de los taludes. De manera que la frecuencia de un terraplén (ω) se obtiene por medio de la siguiente ecuación:

$$\omega = \omega_0 \cdot Ff$$

4.2.1

Este procedimiento se realizó de la misma manera para el pico correspondiente al segundo modo y se debe de utilizar en la corrección cuando la frecuencia de la señal se encuentre a la derecha del segundo pico ($R > 4$) de la función de amplificación (ω_2).

El resultado es la rigidización del medio por el efecto de la geometria para el primer pico y una pérdida de rigidez para el segundo modo. Este efecto se pierde a medida que nos acercamos a la condición de campo libre ya sea aumentando el ancho de corona, o aumentando la pendiente.

En términos generales, se puede afirmar que el aumento de la corona del terraplén producirá una disminución de la frecuencia del mismo, mientras que la variación de la pendiente del talud no es importante a excepción de que el ancho de corona sea menor que el 10% de la altura (H). La frecuencia del segundo modo variará con los distintos valores de ancho de corona y con las diferentes pendientes de acuerdo con la figura 4.6b: al disminuir la pendiente decrece la frecuencia del segundo modo y tiende a aumentar la amplitud. A partir de la pendiente 3:1 la amplitud del pico correspondiente a la segunda frecuencia natural del terraplén tiende a disminuir.

4.2.3 Amplificación de Aceleraciones en la Corona.

Como se comentó, al comparar las funciones de amplificación de los taludes y del campo libre no coinciden en la amplitud de los picos y por lo tanto, las distribuciones de aceleraciones son diferentes. Para corregir esta magnitud, se comparó la aceleración en el centro de la corona del talud (figs 4.10a-15a) y la aceleración en la superficie de un estrato con la misma frecuencia que la del terraplén (fig 4.1c), obteniendo un Factor de amplificación (Fa) que es función de la relación de frecuencias (R) y del semiancho de corona (B).

$$F_a = A_s(\text{corona}) / A_s(\text{campo libre})$$

4.2.2

Donde $A_s()$ son las aceleraciones de talud en la corona y del campo libre en la superficie. Estos valores se presentan en la fig 4.8, se observa que la amplificación aumenta cuando el ancho de la corona disminuye alcanzándose una amplificación del orden del 100% para $B = 0.1H$, cuando las relaciones de frecuencia son cercanas a $R=3$. Se concluye, por lo tanto, que los anchos de corona pequeños no son convenientes debido al efecto de amplificación que inducen. Esto es congruente con estructuras que tienden a amplificar más los movimientos sísmicos al incrementarse al esbeltez

Es importante notar que para fines prácticos, si observamos las aceleraciones en toda la corona para las distintas relaciones de frecuencia (R) y para las diferentes geometrías, su variación respecto a su valor promedio es despreciable y por lo tanto podremos tomar este valor medio igual en toda la corona. (figs 4.10a-15a).

4.2.4 Aceleraciones en la Superficie del Talud.

Continuando con el análisis, el siguiente paso fue calcular las aceleraciones en la superficie del talud y se utilizó la información de la sección anterior para ello. En la fig 4.10a se observa que cuando la relación de frecuencias (R) es uno o cercana a este valor, las aceleraciones en la superficie del talud varían en forma aproximadamente lineal de la corona, al pie del talud y, por lo tanto, esto sirvió de base para normalizar las aceleraciones en los distintos casos respecto a la variación lineal. En la fig 4.9 se muestra la manera en que se procedió para hacer esta normalización.

Las curvas que se obtuvieron por medio de este procedimiento (fig 4.10b-15b), nos dejan entrever detalles importantes para el diseño de un terraplén.

Se observa que a medida que la frecuencia del talud es menor que la frecuencia de la excitación ($R > 1$), la amplificación que ocurre es mayor.

De nuevo, cuando la relación de frecuencias es mayor a uno y se comparan los resultados de dos taludes con diferente pendiente, se observa que al incrementarse esta se tiene una amplificación mayor.

La máxima amplificación se presenta siempre a una distancia aproximadamente igual a 0.25 del pie del talud, independientemente del valor de la relación de frecuencias y de la geometría, como se observa en las figs 4.11 a 4.14.

Estas curvas de amplificación presentan variación para un mismo valor de R según la geometría. Si se mantiene constante el valor del ancho de la corona, el límite superior corresponde a pendientes

tendidas (4:1) y el límite inferior a pendientes empinadas (1:1) fig 4.14). Si ahora se mantiene la pendiente constante y se varia el ancho de la corona, se observa que el límite superior corresponde a los anchos de corona mayores, mientras que los anchos de corona pequeños (0.1H) definen el límite inferior (fig 4.14).

A medida que se incrementa el ancho de la corona, estas curvas tienden a un valor máximo. Cuando el ancho de la corona es mayor al 50% de la altura del terrapién se considera que las curvas de amplificación de aceleraciones en la superficie de la pendiente son iguales a la definida por el ancho de corona igual al 50% de la altura.

Se deja a consideración del lector, el tomar un valor único para cada pendiente, ya que si se toma un valor promedio de los límites superior e inferior definidos por la variación del ancho de corona, los resultados no difieren en más del 10% respecto al valor medio.

El efecto de la forma del espectro (inciso 3.2.1) se muestra en las figuras 4.15a y b, e indican que en los casos analizados, las aceleraciones normalizadas en la superficie y el factor de multiplicación no sufren variaciones significativas.

4.2.5 Efecto de la Variación del Amortiguamiento.

En la sección 4.1.2 se calculó la variación en campo libre de los coeficientes sísmicos con el amortiguamiento, afectando las aceleraciones para $\beta=10\%$ por un factor de multiplicación. Con el fin de observar si dicha variación se conserva en los resultados bidimensionales de taludes, se analizaron dos casos y se graficaron de igual manera que los resultados de campo libre (fig 4.16a y 4.16b). Se pudo observar que el coeficiente de multiplicación es igual en ambos casos y varia en función de la altura normalizada, de manera que los resultados de campo libre son extrapolables a los resultados de taludes.

4.2.6 Efecto de la Variación de la Rigidez con la Profundidad.

Los casos hasta aquí analizados fueron homogéneos (rigidez constante). Para acercarnos a condiciones más representativas de terraplenes reales se efectuaron modelaciones con elemento finito variando linealmente la rigidez con la profundidad. En la figura 4.17.a se comparan las funciones de amplificación de: a) Un talud con rigidez variando linealmente con la profundidad. b) Un talud con propiedades constantes y cuyo valor de rigidez es igual al valor promedio del caso anterior. c) Un estrato de campo libre cuya estratigrafía es igual al caso a. d) Un estrato de campo libre cuya estratigrafía es igual al caso b.. Se observa que las funciones de amplificación en los casos con variación de rigidez se encuentran a la izquierda de los correspondientes a la condición homogénea.

En la figura 4.17.b se colocaron las mismas funciones de amplificación, pero a las correspondientes a la condición homogénea se les afectó la frecuencia por (0.76) desplazando las funciones a la izquierda. Como se observa, el primer pico coincide tanto en magnitud como en frecuencia y el segundo pico es ligeramente mayor para las condiciones de variación lineal de la rigidez.

Según lo anterior se puede decir lo siguiente:

a- la variación lineal de la rigidez con la profundidad producirá una disminución de la frecuencia respecto a un talud homogéneo cuya rigidez sea igual al valor promedio. En este caso (variación lineal de la rigidez de 1 a 3) la frecuencia disminuyó en 25% respecto al caso homogéneo (w con variación = 0.76 w homogéneo).

b- Los coeficientes sísmicos variarán respecto a los casos homogéneos. Debido a la variación de las funciones de amplificación (fig 4.17b), se presenta una amplificación en el efecto de onda importante para relaciones de frecuencias altas. En este caso particular el parámetro que indica la amplitud del efecto de onda se multiplicó por 1.6.

En la figura 4.18a se comparan los resultados de las distribuciones de aceleraciones de: a) la sección central del talud con variación de rigidez; b) el caso de campo libre con la misma frecuencia que el talud (campo libre homogéneo) y c) las aceleraciones generadas en un estrato con las mismas propiedades de variación de rigidez que el terraplén (campo libre con variación). Estas dos últimas (b y c) por el efecto de geometría tienen variación, ya que las frecuencias correspondientes no son iguales, mientras que los casos a y b tienen la misma frecuencia, pero no la misma amplitud. Si la condición de campo libre homogénea se afecta por los coeficientes antes mencionados, se obtiene el ajuste que se compara en la misma figura y que proporciona una solución que no difiere en más del 5% respecto a la del elemento finito.

4.2.7 Procedimiento de ajuste de Coeficientes Sísmicos en Terraplenes

Se observó que las distribuciones de coeficientes sísmicos de una sección cualquiera del talud son en forma muy similares a las dadas en campo libre, aunque varían en la magnitud. Conociendo los parámetros de ajuste en campo libre, los factores de corrección de frecuencia, de amplificación en la corona del terraplén, y los factores que proporcionan las aceleraciones en la superficie de la pendiente, se procedió a efectuar los ajustes de los coeficientes sísmicos de la siguiente manera:

a-Sección Central.

a.1 Obtener el Factor de frecuencia (fig 4.7. a y b) y corregir la frecuencia correspondiente a campo libre dada por la ecuación 3.1.8.

a.2 Obtener los parámetros de ajuste (a, b, D_o, e, f y g) correspondientes a la frecuencia del talud ya corregida por el factor de frecuencia (F_f) fig (4.7a y b).

a.3 Calcular la aceleración en la corona del talud por medio de

la aceleración en la superficie de campo libre ($A_s(c1)$) (fig 4.1.c) y el factor de amplificación (F_a) por medio de la figura 4.8

a.4 Calcular el parámetro C_0 por medio de la ecuación 4.1.2

a.5 Calcular las distribuciones de aceleraciones en la sección por medio de la ecuación 4.1.1

b-Secciones de la Corona.

b1. Para fines prácticos se considera que las aceleraciones en estas secciones son iguales a las dadas por la sección central (fig 4.10a-15a).

C-Secciones del talud.

c.1 Obtener las aceleraciones en la superficie del talud por medio de las gráficas 4.10a-15a.

c.2 Obtener los parámetros de ajuste a y b correspondientes a la frecuencia de la sección corregida con el factor de frecuencia F_f .

c.3 Obtener los parámetros de ajuste e y g correspondientes a la frecuencia de la sección corregida respecto al factor de frecuencia F_f del primer modo.

c.4 El parámetro f se tomará en todos los casos igual al valor correspondiente para la relación de frecuencias $R=1$.

c.5 El parámetro D_0 se variará según la relación de frecuencias (R): Para relaciones $R < 3.5$ será de forma lineal de la sección del vertice de la corona hasta el pie del talud y para relaciones $R > 3.5$ el valor de este parámetro se conservará constante desde la sección del vertice de la corona hasta la sección correspondiente a la mitad del talud y luego se variará de manera lineal hasta el pie del talud.

c.6 Se Calcula el parámetro C_0 por medio de la ecuación 4.1.2 para las secciones a lo largo de la pendiente del talud.

c.7 Se se calculan las distribuciones de aceleraciones para las secciones de interés, normalizando la altura de la sección correspondiente en el talud.

La comparación de los resultados así obtenidos con los calculados por el programa de elementos finitos se observan en las figuras 4.19 y 4.20.

4.3 COMPARACION DE RESULTADOS

Método simplificado Vs método de elemento finito (campo libre).

Para comparar los resultados del elemento finito con los del método simplificado se tomaron los siguientes casos:

CASO	SEÑAL	RELACION R
1	EP8	0.5
2	EP4	4.0
3	EP4	1.5
4	EP8	5.0
5	EPP8	5.0
6	EPP8	5.0

TABLA.4.3.1

Los resultados se presentan en las figuras 4.19a-f junto con una curva en la que se presenta el error en porciento del método simplificado respecto al método del elemento finito. Se puede observar que la aproximación es bastante buena.

Método simplificado Vs método de elemento finito (terraplenes)

Para comparar los resultados de elemento finito con los del método simplificado se comparan los casos que se presentan en la tabla 4.3.2

CASO	CORONA	PENDIENTE	RELACION
1	5	1:1	2
2	5	3:1	2
3	50	2:1	2
4	50	1:1	2
5	5	2:1	4
6	50	1:1	4
7	50	4:1	4

TABLA 4.3.2

Los resultados se presentan en la figura 4.20a-g, en los que el error es la desviación que tienen los puntos respecto a la línea recta que los cruza y se observa que son menores al 15%, lo cual significa una buena aproximación.

Método de viga de cortante Vs elemento finito

Las soluciones en la sección central de los terraplenes obtenidas por el método de elemento finito, se compararon con las que proporciona el método de viga de corte. Se analizaron algunos casos particulares de manera que se observara la importancia de cada uno de los modos de vibración.

Estos casos se presentan a continuación:

CASO	pendiente	corona	Vs	FRECUENCIAS			ACELERACIONES		
				ω_1	ω_2	ω_3	a1	a2	a3
1	1:1	50	400	3.0	7.0	11.0	0.25	0.21	0.20
2	1:1	5	200	1.5	3.5	5.5	0.20	0.26	0.23
3	4:1	50	133	1.0	2.33	3.6	0.10	0.26	0.23
4	4:1	5	100	0.76	1.57	2.75	0.05	0.14	0.26

TABLA 4.3.3

Para hacer la comparación se utilizaron las ecs 2.1.7 y 2.1.10 que sirven para sumar las respuestas totales de cada modo. La primera por medio de suma directa, y la segunda por medio de la suma

cuadrática de los términos así:

$$UCY) = \sum_{n=1}^p \phi_n CY)A \quad 2.1.7$$

$$|UCY)| = \sqrt{\sum_{n=1}^p |\phi_n CY)A|^2} \quad 2.1.10$$

Los valores de las aceleraciones espectrales máximas (A) se obtuvieron del espectro de aceleraciones de la señal EP2 que se presenta en la figura 3.1b.

Los resultados (fig 4.21a-d) se obtuvieron superponiendo los efectos de las tres primeras formas modales cuyos factores de participación (ϕ) se encuentran en la figura 2.1.3. En general se observa que la respuesta dada por el elemento finito, se encuentra abarcada entre las dos soluciones de viga de cortante. La solución dada por la ec 2.1.10, en general proporciona valores mayores a los obtenidos en estos análisis y por lo tanto se podría incurrir en sobrediseños innecesarios. Por el contrario, la suma directa (ec 2.1.7) da valores en general menores en la mitad superior del terrapién y mayores en la parte inferior, y su efecto en la estabilidad dependerá de la geometría y de las propiedades dinámicas.

5 RESUMEN Y CONCLUSIONES

De las simulaciones numéricas con el método de los elementos finitos y de la interpretación de los resultados, se estableció un procedimiento simple que permite definir la variación espacial de coeficientes sísmicos en terrapienes. Comparando los resultados obtenidos con el método simplificado con los determinados con el elemento finito, se demostró que el procedimiento aquí propuesto permite evaluar los coeficientes sísmicos con diferencias menores del 15%. Por lo tanto, se puede utilizar con fines de evaluar la estabilidad sísmica utilizando procedimientos pseudoestáticos.

Los parámetros involucrados en el análisis son:

De la señal:

frecuencia ω_e .

Aceleración máxima A_m .

Forma espectral (agudeza) α .

De las propiedades:

Velocidad de propagación de onda de cortante V_s .

Amortiguamiento β .

De la geometría:

Altura del terraplén (H)

Semi ancho de corona (B)

Pendiente del talud (H:V)

En conjunto:

Frecuencia de campo libre $\omega_{cl} = \frac{V_s}{4H}$

Frecuencia de terraplén $\omega = \omega_{cl} \cdot F_f$

La relación de frecuencias $R = \frac{\omega_e}{\omega_{cl}}$

5.1 RESULTADOS DE CAMPO LIBRE

Los coeficientes sísmicos se pueden obtener por medio de la siguiente expresión:

$$\frac{a(Y)}{A_m} = \left[\frac{y^a}{y^b + 1} C_0 \right] \left[1 + D_0 y^f \sin(\epsilon y + g) \right]$$

Donde los parámetros a, b, C₀, D₀ y f son los que se presentan en las figuras 4.1a- g y son función de la relación de frecuencias R y de la forma espectral de la excitación (x). Los parámetros e y g que corresponden a la frecuencia y al desfase del efecto de onda, tienen un comportamiento lineal respecto a la relación de frecuencias y sus ecuaciones se presentan en las gráficas correspondientes.

El efecto de la variación del amortiguamiento se reduce a la siguiente expresión:

$$a(\beta) = a(\beta=10\%) \times \left[\frac{10}{\beta} \right]^{a_1(Y)}$$

Donde a₁(Y) es un parámetro que varía con la altura normalizada (Y) y se encuentra en la figura 4.3b, de manera que cuando se disminuye el amortiguamiento, los coeficientes sísmicos son mayores y viceversa.

Respecto a las tendencias de los resultados se puede comentar lo siguiente:

Las formas de las distribuciones de aceleraciones para una misma relación de frecuencias R serán similares.

Las distribuciones de aceleraciones se pueden descomponer en dos movimientos: el primero, importante para relaciones de frecuencia menores que uno (R < 1) y muestra la concavidad o convexidad de las distribuciones y el segundo, cobra importancia para relaciones de frecuencia mayores de uno (R > 1) y se denominó efecto de onda.

Para una misma relación de frecuencias R, al aumentar la frecuencia de la excitación se tiene una mayor amplificación de los movimientos en la superficie (fig 4.1.c).

La amplitud del efecto de onda se intensifica cuando para una misma relación de frecuencia (R) se disminuye el valor de la forma

espectral (α) (espectros más agudos), o se incrementa el valor de la frecuencia de la excitación (ω_e) (fig 4.1.d).

5.2 RESULTADOS DE TALUDES NATURALES Y TERRAPLENES

Los coeficientes sísmicos en taludes naturales y terraplenes se pueden calcular por medio de un método simplificado, en el que las variaciones respecto a los resultados del elemento finito son menores al 15% (figuras 3.20a-g).

La frecuencia fundamental de los terraplenes varía según la geometría del terraplén analizado, de manera que la frecuencia de un talud se puede obtener multiplicando la frecuencia de un estrato en campo libre (con iguales propiedades y altura) por un factor, denominado factor de frecuencia (F_f) el cual se presenta en las figuras 4.7a y b.

El primer pico de la función de amplificación varía para los distintos valores del ancho de corona, al aumentar este la frecuencia disminuye (fig 4.6a) y se mantiene constante para las distintas pendientes, excepto cuando el ancho de corona es menor al 10% de la altura del terraplén. (fig 4.6.b).

EL segundo pico de la función de amplificación varía tanto en magnitud y forma con la pendiente del talud y con el ancho de corona, aunque ciertas variaciones pueden achacarse al efecto de suavización que se define por el incremento de frecuencias unaso en los análisis.

La frecuencia del primer pico de la función de amplificación es aproximadamente igual en todos los puntos que se analizaron en la superficie del talud (figuras 3.10.a-g).

En general, las frecuencias que asigna este método simplificado son siempre menores que las que se obtienen aplicando viga de corte (identificada con una V) como se observa en las figuras 4.7 en las que se presenta la variación de Factor de Frecuencia (F_f) con la geometría de manera que cada curva corresponde a una pendiente (1:1 a 4:1)

Las aceleraciones en la corona de los taludes son mayores que las de un estrato en campo libre con la misma frecuencia. Para obtener la aceleración adecuada se debe multiplicar la aceleración de un estrato de campo libre con la misma frecuencia que el terrapién por el factor de amplificación (Fa) que se encuentra en la figura 4.8.

Esta amplificación es mayor a medida que el ancho de la corona disminuye y cuando la relación de frecuencias tiende a tres

Las máximas amplificaciones respecto a la variación lineal de aceleraciones en la superficie se presentan aproximadamente a 0.25 del pie del talud.

A medida que la relación de frecuencias es mayor la amplificación en la superficie del talud se incrementa.

Para relaciones de frecuencias mayores de dos, a medida que la pendiente del talud se tiende, la amplificación de aceleraciones en la superficie es mayor

La variación de la forma espectral (ω) y de la frecuencia del espectro (ω_e) en un caso con igual relación de frecuencia (R), no produce variación significativa en la amplificación de aceleraciones en la superficie del talud.

La variación del amortiguamiento se considera de la misma forma que la utilizada para analizar los estratos en campo libre.

La variación de la rigidez con la profundidad produce un efecto de desplazamiento de la frecuencia fundamental del talud a la izquierda (menos rígido), y la corrección dependerá de la pendiente del incremento de la rigidez con la profundidad.

Los coeficientes sísmicos respecto a la condición homogénea variarán, debido a que la amplitud del efecto de onda se amplifica, pero la aceleración en la corona se mantiene.

Respecto a la variación espacial de los coeficientes sísmicos se concluye que sólo en relaciones de frecuencia cercanas a uno se puede

considerar que las aceleraciones son aproximadamente iguales en los planos horizontales; sin embargo, a medida que el talud es más extendido y la relación de frecuencias R es mayor, las aceleraciones en el pie del talud se incrementan e inclusive hay casos en los que los coeficientes sísmicos son mayores que aquellos que se encuentran en la corona del terraplén.

Es interesante comentar que el trabajo permite observar la importancia en la respuesta de cada una de las variables involucradas de la excitación y de las propiedades del terraplén. Estas variaciones se presentan resumidas en la tabla 5.1

TABLA 5.1

EFECTO DE LAS VARIABLES EN LA RESPUESTA			
VARIABLE	VARIACION	EFEECTO	CONDICION
SEÑAL			
ω_0	INCREMENTO	AMPLIFICACION DE LA ACELERACION EN SUPERFICIE	IGUAL R
ω	DISMINUCION	AMPLIFICACION DE LA ACELERACION EN SUPERFICIE	$R \approx 2N-1$
A_m	INCREMENTO	INCREMENTO DE LOS COEFICIENTES SISMICOS	
PROPIEDADES			
V_s	INCREMENTO	INCREMENTO DE LA FRECUENCIA	
β	INCREMENTO	DISMINUCION DE LOS COEFICIENTES SISMICOS	
GEOMETRIA			
B	DISMINUCION	INCREMENTO DE LA AMPLIFICACION EN CORONA DISMINUCION DE LA FRECUENCIA DEL TERRAPLEN	
H	INCREMENTO	DISMINUCION DE LA FRECUENCIA DEL TERRAPLEN	
H: V	INCREMENTO	INCREMENTO DE LAS ACELERACIONES EN LA PENDIENTE DEL TERRAPLEN	$R > 1$
EN CONJUNTO			
R	INCREMENTO	INCREMENTO EN EL EFECTO DE ONDA	

6 REFERENCIAS

- 1- Ambraseys, N.N
The Seismic Stability Of Earth Dams.
2nd W.C.E.E Tokio 1960.
- 2- Ambraseys, N.N
The Shear Response of Two Dimensional Truncated Wedge
Subjected To An Arbitrari Disturbance.
B. S. S. A.:50 1960.
- 3- Bishop, A.W & Morgenstein, R.N
Stability Coefficients for Earth Slopes
Geotechnique volume 10 1960.
- 4- Clough, R.H.
Dynamic Effects of Earthquakes
Trans ASCE volume 126. 1961
- 5- Crandall S, M.W
Random Vibration in Mechanical System.
Academic Press, New York 1963
- 6- Esteva, y Rosenblueth, E.
Espectros de Diseño a Distancias Moderadas Y Grandes.
Boletín Sociedad Mexicana De ingeniería Sísmica 1964.
- 7- Makdishi, F.I & Bolton Seed, H
A Simplied Procedure For Estimating Earthquake
Induced Deformations in Dams and Embankments.
Earthquake engineering research center.
Report No UBC/EERC-77/19 august 1977.
- 8- Newland, D.E.
Vibraciones Aleatorias y análisis Espectral
Editorial A.C Madrid España 1983
- 9- Romo, O. M.P & Chen, J.H & Lysmer, J & Bolton Seed, H
A computer Program for Probabilistic Finite Element Analysis
Of Soil Structure Interaction
Earthquake engineering research center.
Report No UBC/EERC-77/01 september 1980.
- 10- Romo, O. M.P & Villarraga, H. R.
Modelo Analítico Para el Comportamiento Sísmico de la
Presa el Infiernillo.
Instituto de Ingeniería Unam enero 1988.

- 11- Rosenblueth, E. Y Esteva, L.
Folleto Complementario: Diseño Sísmico de edificios.
Ingeniería 1962.
- 12- Sarma, S.K.
A Simplified Method For The Earthquake resistant design
of Earth Dams.
Dams & Earthquakes proceedings conference oct 1980.
- 13- Seed, H.B and Martin, G.R.
The Seismic Coefficient in Earth Dam
Journal of the soil Mechanics and Foundation division ASCE.
Vol 92 , No sm3, mayo 1966.
- 14- Zienkiewicz O.C. y Cheung Y.K
The Finite Element Method in Structural and Continuum
Mechanics.
McGraw-Hill New York 1967.

INDICE DE FIGURAS

- FIGURA 1.1 Método del elemento finito (modelación).
- FIGURA 1.2 Representación del método simplificado.
- FIGURA 1.3 Simplificación del efecto dinámico.
- FIGURA 2.1.1 Curva esfuerzo deformación en carga cíclica.
- FIGURA 2.1.2 Esquema del método de viga de cortante.
- FIGURA 2.1.3 Factores de participación del método de viga de cortante.
- FIGURA 2.1.4 Correlación de dos variables por medio de una recta.
- FIGURA 3.1a Variación de la frecuencia del espectro (espectro de potencia).
- FIGURA 3.1b Variación de la frecuencia del espectro (espectro de aceleraciones).
- FIGURA 3.2a Variación de la forma del espectro (espectro de potencia).
- FIGURA 3.2b Variación de la forma del espectro (espectro de aceleraciones).
- FIGURA 3.3 Efecto de la variación de la frecuencia del espectro.
- FIGURA 3.4 Efecto de la variación de la forma espectral.
- FIGURA 3.5 Efecto de la variación de la geometría.
- FIGURA 3.6a Efecto de la variación de amortiguamiento.
- FIGURA 3.7.1 Respuesta de estratos sometidos a la excitación EP1
- FIGURA 3.7.2 Respuesta de estratos sometidos a la excitación EP2
- FIGURA 3.7.3 Respuesta de estratos sometidos a la excitación EP3
- FIGURA 3.7.4 Respuesta de estratos sometidos a la excitación EP4
- FIGURA 3.7.5 Respuesta de estratos sometidos a la excitación EP5
- FIGURA 3.7.6 Respuesta de estratos sometidos a la excitación EP6LC
- FIGURA 3.7.7 Respuesta de estratos sometidos a la excitación EPF1
- FIGURA 3.7.8 Respuesta de estratos sometidos a la excitación EPF2
- FIGURA 3.7.9 Respuesta de estratos sometidos a la excitación EPF3
- FIGURA 3.7.10 Variación de la función de amplificación con la profundidad.
- FIGURA 3.8 Definición del factor de forma K'

FIGURAS 3.9. Coeficientes sísmicos en terraplenes para las diferentes geometrias y relaciones de frecuencia.

- FIGURA 3.10a** Variación de la función de amplificación en la superficie de los terraplenes (talud 1:1 B=5).
- FIGURA 3.10b** Variación de la función de amplificación en la superficie de los terraplenes (talud 2:1 B=5).
- FIGURA 3.10c** Variación de la función de amplificación en la superficie de los terraplenes (talud 3:1 B=5).
- FIGURA 3.10d** Variación de la función de amplificación en la superficie de los terraplenes (talud 4:1 B=5).
- FIGURA 3.10e** Variación de la función de amplificación en la superficie de los terraplenes (talud 1:1 B=25).
- FIGURA 3.10f** Variación de la función de amplificación en la superficie de los terraplenes (talud 2:1 B=25).
- FIGURA 3.10g** Variación de la función de amplificación en la superficie de los terraplenes (talud 3:1 B=25).
- FIGURA 3.10h** Variación de la función de amplificación en la superficie de los terraplenes (talud 4:1 B=25).
- FIGURA 3.10i** Variación de la función de amplificación en la superficie de los terraplenes (talud 1:1 B=50).
- FIGURA 3.10j** Variación de la función de amplificación en la superficie de los terraplenes (talud 2:1 B=50).
- FIGURA 3.10k** Variación de la función de amplificación en la superficie de los terraplenes (talud 3:1 B=50).
- FIGURA 3.10l** Variación de la función de amplificación en la superficie de los terraplenes (talud 4:1 B=50).
- FIGURA 3.11** Esquemas para revisión del tamaño de la malla
- FIGURA 3.12** Resultados de las diferentes mallas.
- FIGURA 3.13** Resultados de la variación de la señal
- FIGURA 3.14** Resultados de la variación del amortiguamiento.
- FIGURA 4.1a** Parámetro de ajuste a.
- FIGURA 4.1b** Parámetro de ajuste b
- FIGURA 4.1c** Aceleraciones en la superficie A_s .
- FIGURA 4.1d** Parámetro de ajuste D_0

- FIGURA 4.1e Parámetro de ajuste e
- FIGURA 4.1f Parámetro de ajuste f
- FIGURA 4.1g Parámetro de ajuste g
- FIGURA 4.2a Comparación de aceleraciones de amortiguamiento 10% respecto a las de 5% y 15% para alturas entre $0.3 > Y > 1$.
- FIGURA 4.2b Comparación de aceleraciones de amortiguamiento 10% respecto a las de 5% y 15% para alturas entre $0.3 > Y > 1$.
- FIGURA 4.3a Multiplicadores respecto a los resultados con amortiguamiento 10% para obtener resultados con 5 y 15%
- FIGURA 4.3b Parámetro α para obtener la variación por efecto del amortiguamiento (β)
- FIGURA 4.4a Representación de los factores de amortiguamiento en escala natural ($Y=1$).
- FIGURA 4.4b Representación de los factores de amortiguamiento en escala doble logarítmica ($Y=1$).
- FIGURA 4.5a Comparación de resultados con 5 y 15 divisiones en la corona (revisión del tamaño de los elementos).
- FIGURA 4.5b Comparación de resultados con 15 y 25 divisiones en la pendiente (revisión del tamaño de los elementos).
- FIGURA 4.6a Variación de la función de amplificación por cambios del ancho de corona.
- FIGURA 4.6b Variación de la función de amplificación por cambios de la pendiente del talud.
- FIGURA 4.7a Factores de corrección de la frecuencia de campo libre variación con la pendiente (modo 1)
- FIGURA 4.7b Factores de corrección de la frecuencia de campo libre variación con la pendiente (modo 2)
- FIGURA 4.8 Factor de amplificación en la corona del terraplén.
- FIGURA 4.9 Definición del factor de amplificación en la superficie.
- FIGURA 4.10a Aceleraciones en la superficie según geometría. $R=1$
- FIGURA 4.10b Factor de amplificación en la superficie $R=1$
- FIGURA 4.11a Aceleraciones en la superficie según geometría. $R=2$
- FIGURA 4.11b Factor de amplificación en la superficie $R=2$
- FIGURA 4.12a Aceleraciones en la superficie según geometría. $R=3$
- FIGURA 4.12b Factor de amplificación en la superficie $R=3$

- FIGURA 4.13a Aceleraciones en la superficie según geometría. R=4
- FIGURA 4.13b Factor de amplificación en la superficie .R=4
- FIGURA 4.14a Aceleraciones en la superficie según geometría. R=5
- FIGURA 4.14b Factor de amplificación en la superficie .R=5
- FIGURA 4.15a Efecto en la variación del espectro en la aceleración en la superficie. (As)
- FIGURA 4.15b Efecto en la variación del espectro en el factor de amplificación de superficie (Fs)
- FIGURA 4.16a Efecto en la variación del amortiguamiento en la sección central del terraplén (Talud 2:1 B=5m).
- FIGURA 4.16b Comparación de aceleraciones de amortiguamiento 10% respecto a las de 5% y 15% para alturas entre 0.3 > Y > 1.
- FIGURA 4.17a Cambio de la función de amplificación con la variación de la rigidez con la profundidad.
- FIGURA 4.17b cambio de la función de amplificación con la variación de la rigidez con la profundidad.
- FIGURA 4.18a Cambio de las aceleraciones máximas con la variación de la rigidez con la profundidad.
- FIGURA 4.18b Comparación de coeficientes sísmicos del talud con rigidez variable y talud con rigidez constante.
- FIGURA 4.19a Comparación de coeficientes sísmicos (método simplificado Vs E.F) caso 1 en campo libre (R=0.4 EP2).
- FIGURA 4.19b Comparación de coeficientes sísmicos (método simplificado Vs E.F) caso 2 en campo libre (R=4.4 EP4)
- FIGURA 4.19c Comparación de coeficientes sísmicos (método simplificado Vs E.F) caso 3 en campo libre (R=1.4 EP4)
- FIGURA 4.19d Comparación de coeficientes sísmicos (método simplificado Vs E.F) caso 4 en campo libre (R=5 EP3)
- FIGURA 4.19e Comparación de coeficientes sísmicos (método simplificado Vs E.F) caso 5 en campo libre (R=3 EP3)
- FIGURA 4.19f Comparación de coeficientes sísmicos (método simplificado Vs E.F) caso 6 en campo libre (R=3 EPP2)
- FIGURA 4.20a Comparación de coeficientes sísmicos (método simplificado Vs E.F) caso 1 en taludes. (TALUD 1:1 B=5 R=2)
- FIGURA 4.20b Comparación de coeficientes sísmicos (método simplificado

Vs E.F) caso 2 en taludes.(TALUD 3:1 B=5 R=2)

- FIGURA 4.20c Comparación de coeficientes sísmicos (método simplificado Vs E.F) caso 3 en taludes.(TALUD 2:1 B=50 R=2)
- FIGURA 4.20d Comparación de coeficientes sísmicos (método simplificado Vs E.F) caso 4 en taludes.(TALUD 1:1 B=50 R=2)
- FIGURA 4.20e Comparación de coeficientes sísmicos (método simplificado Vs E.F) caso 5 en taludes.(TALUD 2:1 B=5 R=4)
- FIGURA 4.20f Comparación de coeficientes sísmicos (método simplificado Vs E.F) caso 6 en taludes.(TALUD 1:1 B=50 R=4)
- FIGURA 4.20g Comparación de coeficientes sísmicos (método simplificado Vs E.F) caso 6 en taludes.(TALUD 4:1 B=50 R=4)
- FIGURA 4.21a Comparación de coeficientes sísmicos (viga de corte vs E.F) caso 1.
- FIGURA 4.21b Comparación de coeficientes sísmicos (viga de corte vs E.F) caso 2.
- FIGURA 4.21c Comparación de coeficientes sísmicos (viga de corte vs E.F) caso 3.
- FIGURA 4.21d Comparación de coeficientes sísmicos (viga de corte vs E.F) caso 4.

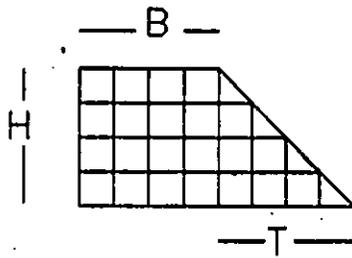


FIGURA 1.1 METODO DEL ELEMENTO FINITO

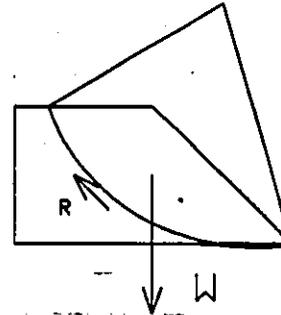
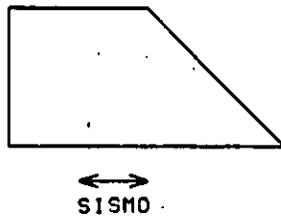


FIGURA 1.2 METODO SIMPLIFICADO



=

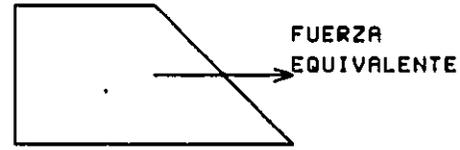
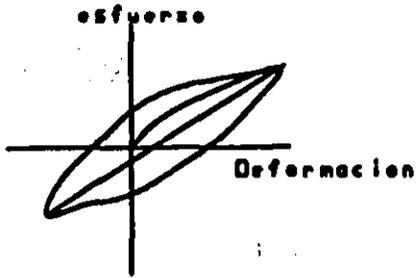
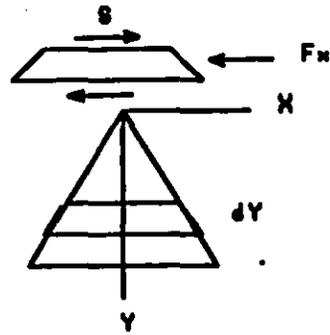


FIGURA 1.3 SIMPLIFICACION DE EFECTO DINAMICO



Curva Esfuerzo Deformacion
figura 2.1



Modelo De Viga De Corte
figura 2.1

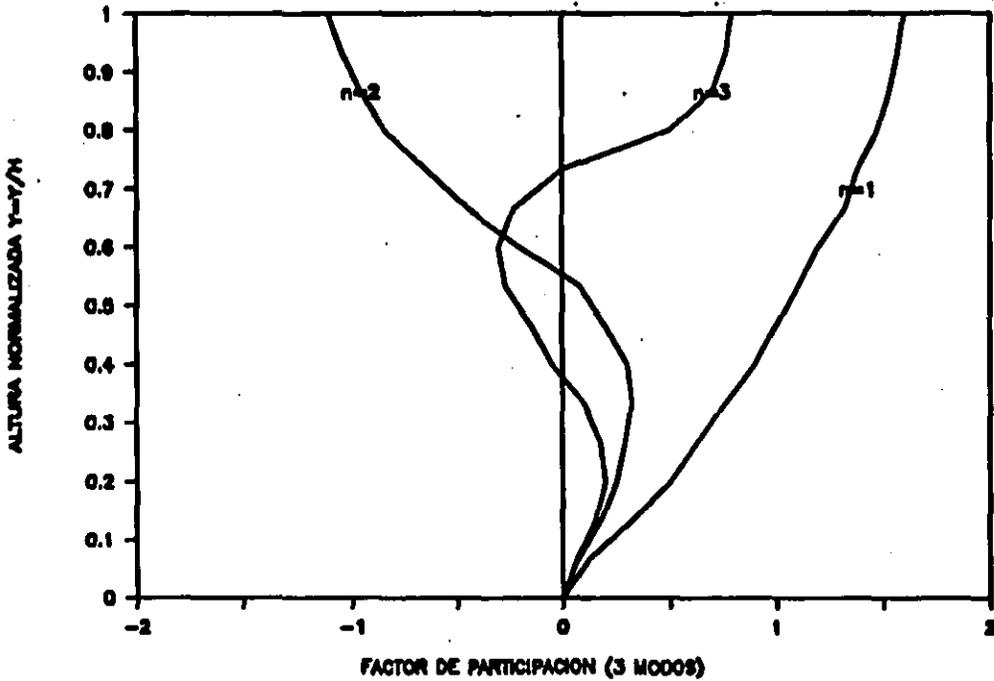


FIGURA 2.1.3 Factores de participación del método de viga de cortante.

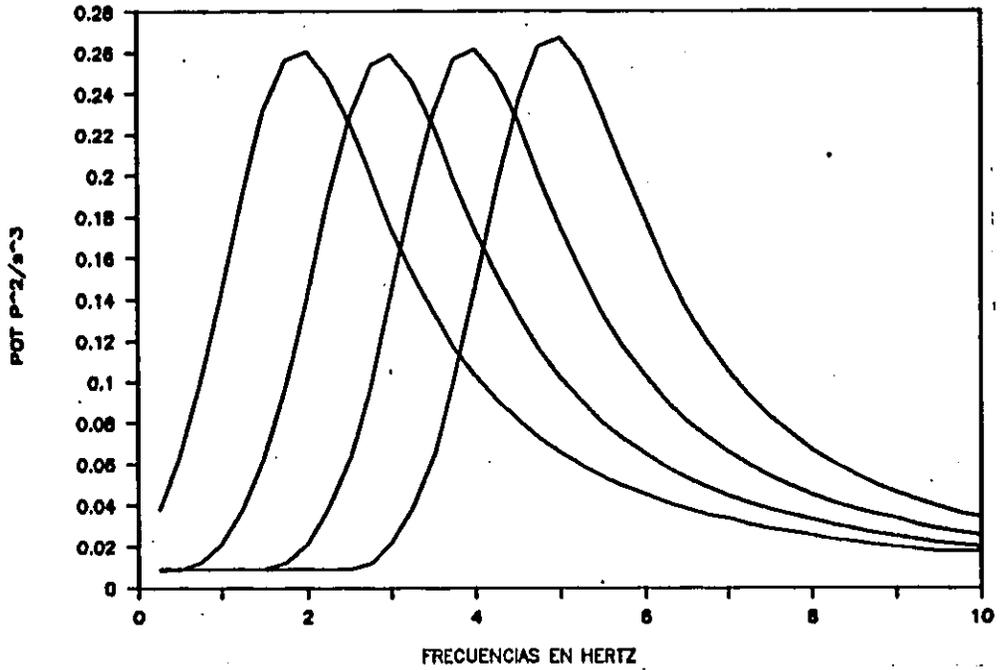


FIGURA 3.1a Variación de la frecuencia del espectro (espectro de potencia).

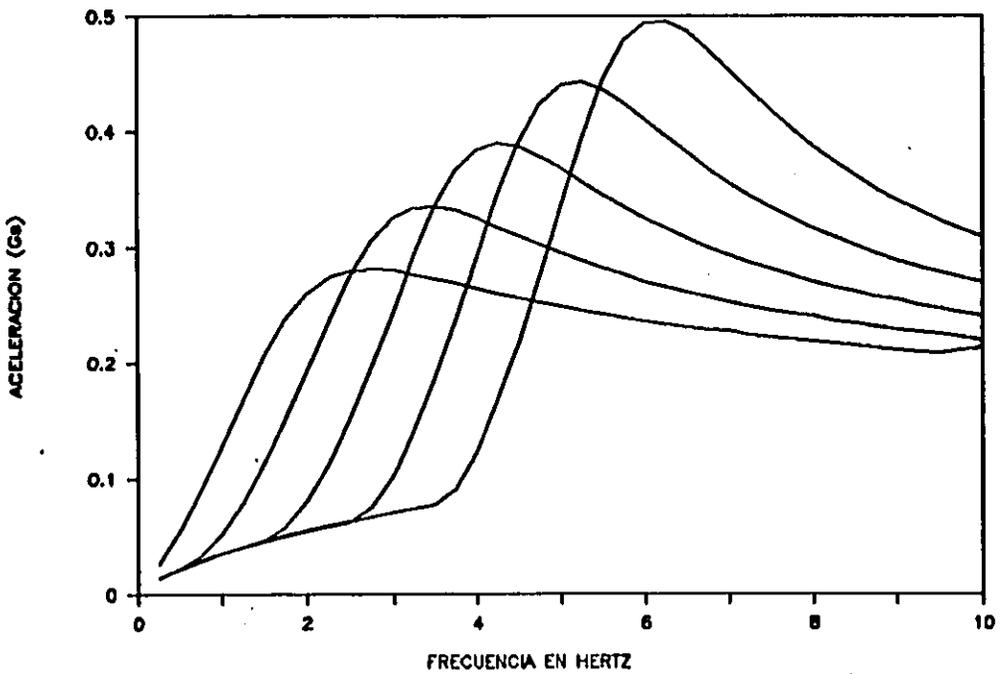


FIGURA 3.1b Variación de la frecuencia del espectro (espectro de aceleraciones).

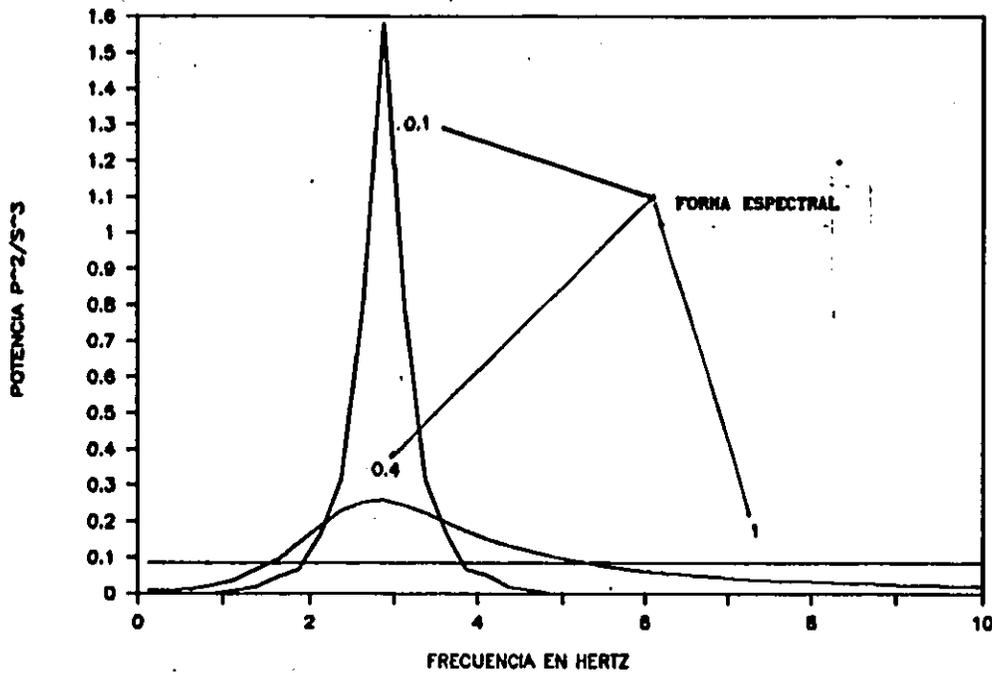


FIGURA 3.2a Variación de la forma del espectro (espectro de potencia).

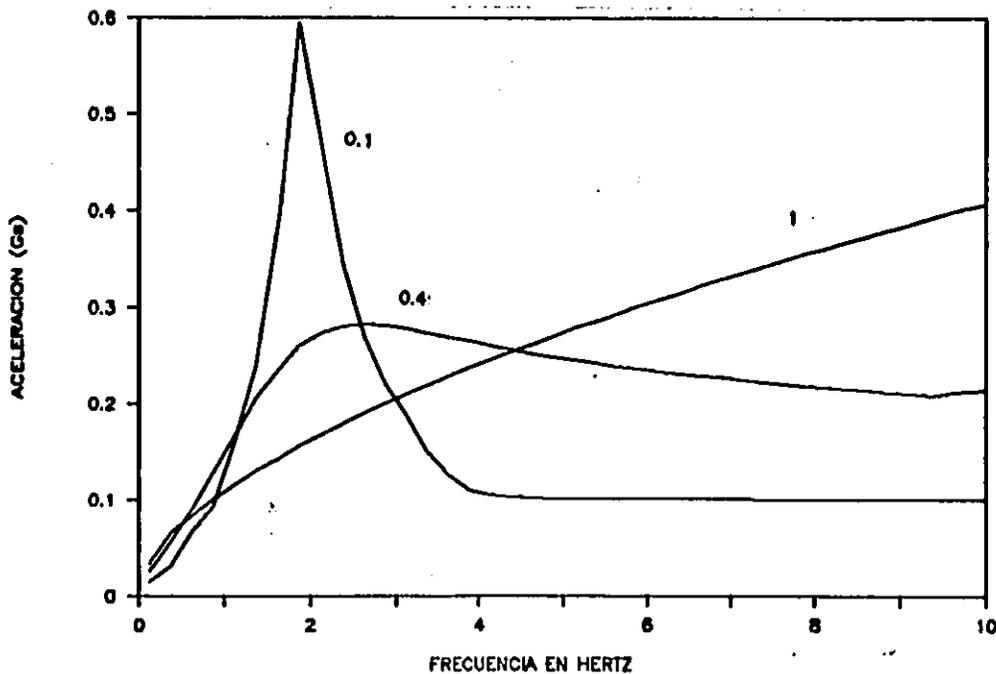


FIGURA 3.2b Variación de la forma del espectro (espectro de aceleraciones).

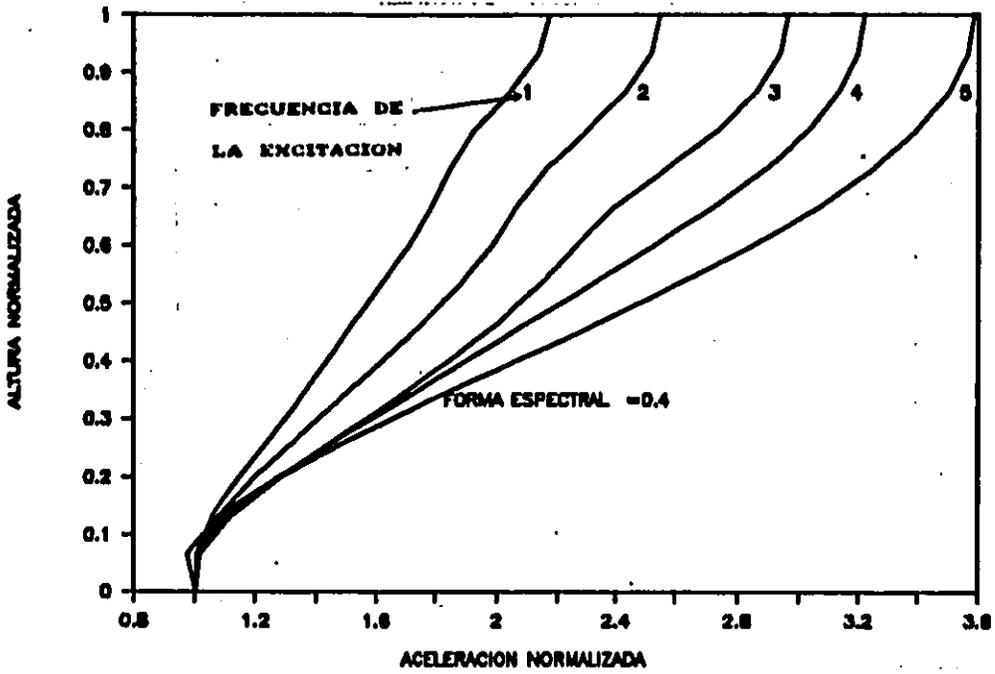


FIGURA 3.3 Efecto de la variación de la frecuencia del espectro.

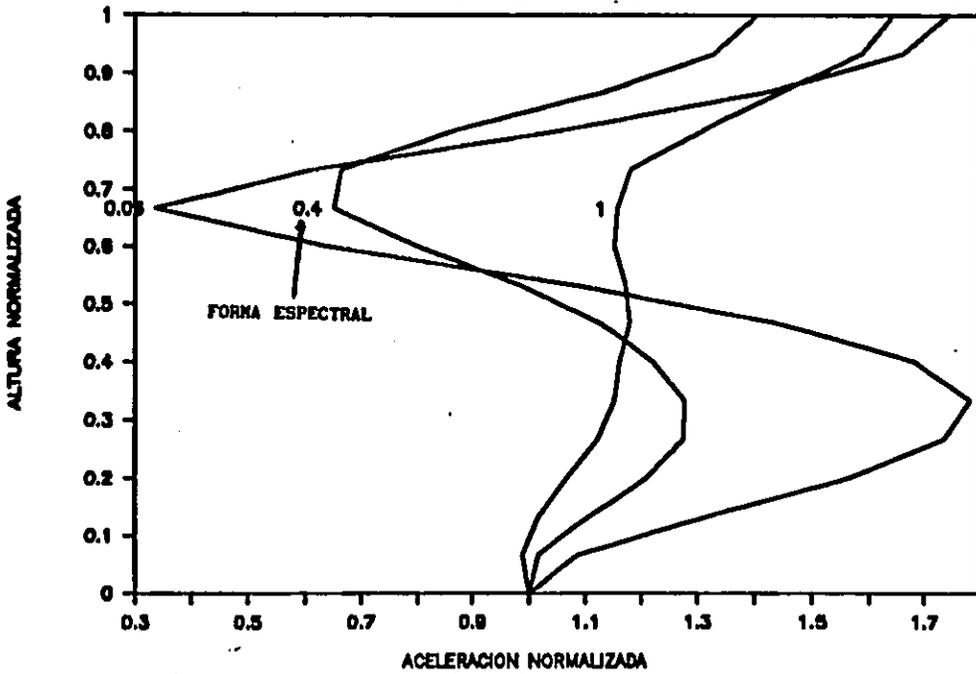


FIGURA 3.4 Efecto de la variación de la forma espectral.

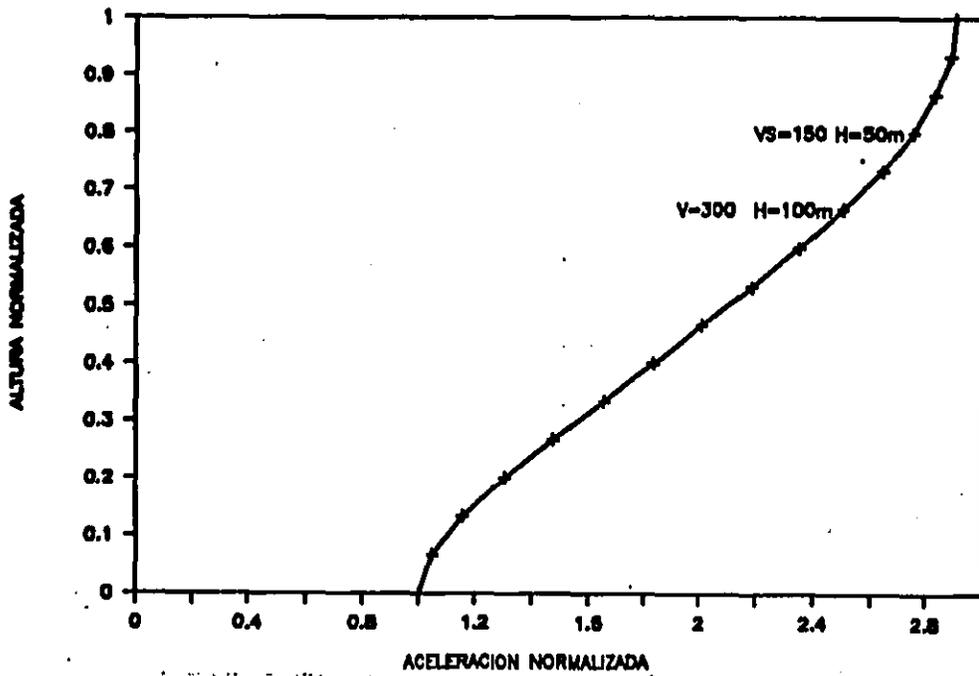


FIGURA 3.5 Efecto de la variación de la geometría.

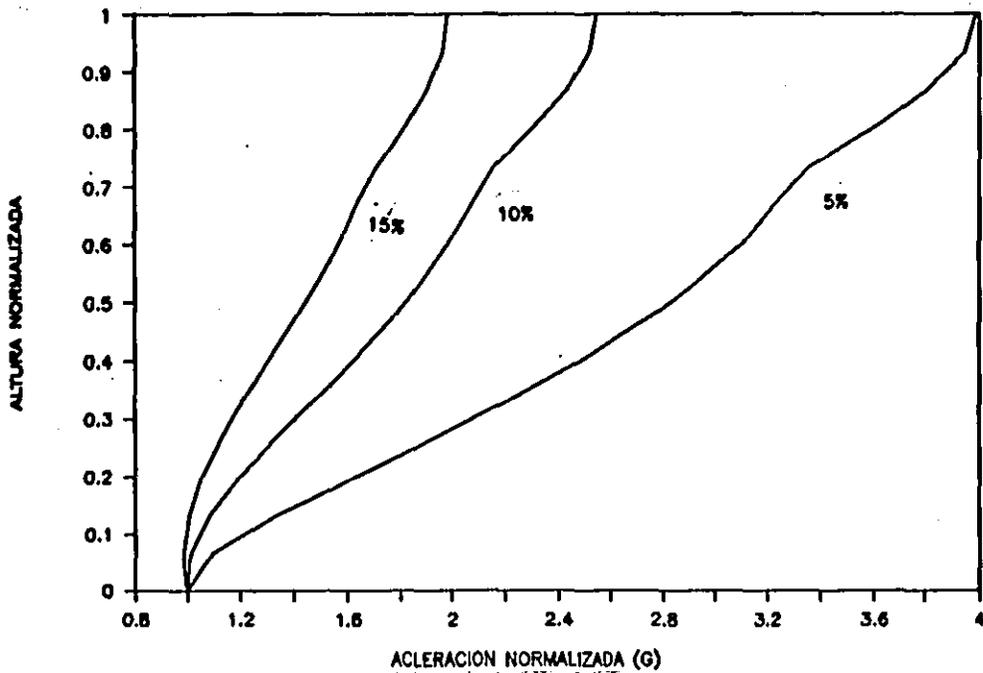


FIGURA 3.6 Efecto de la variación de amortiguamiento.

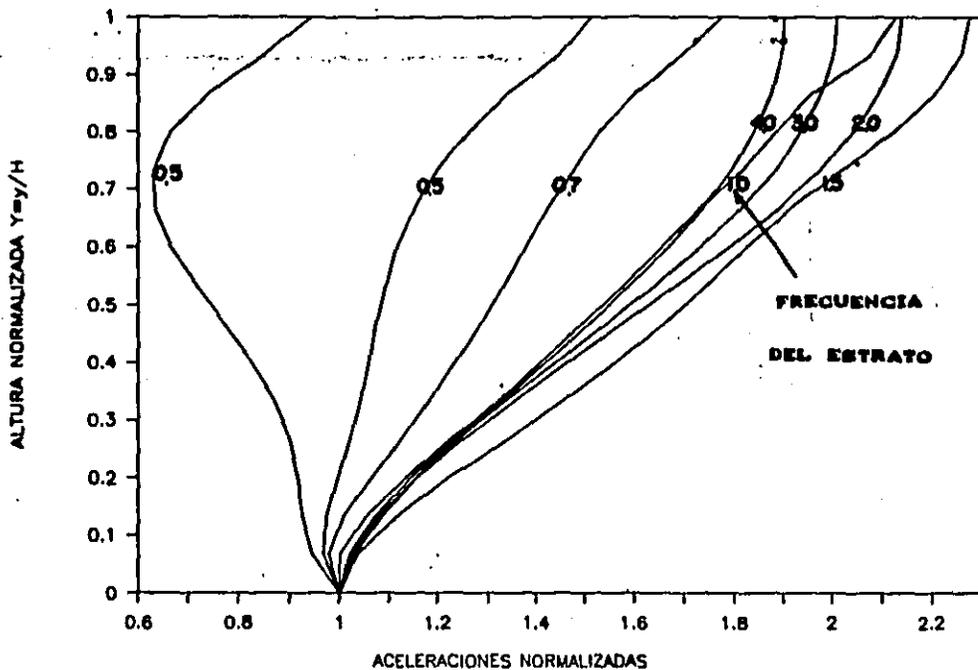


FIGURA 3.7.1 Respuesta de estratos sometidos a la excitación EPI

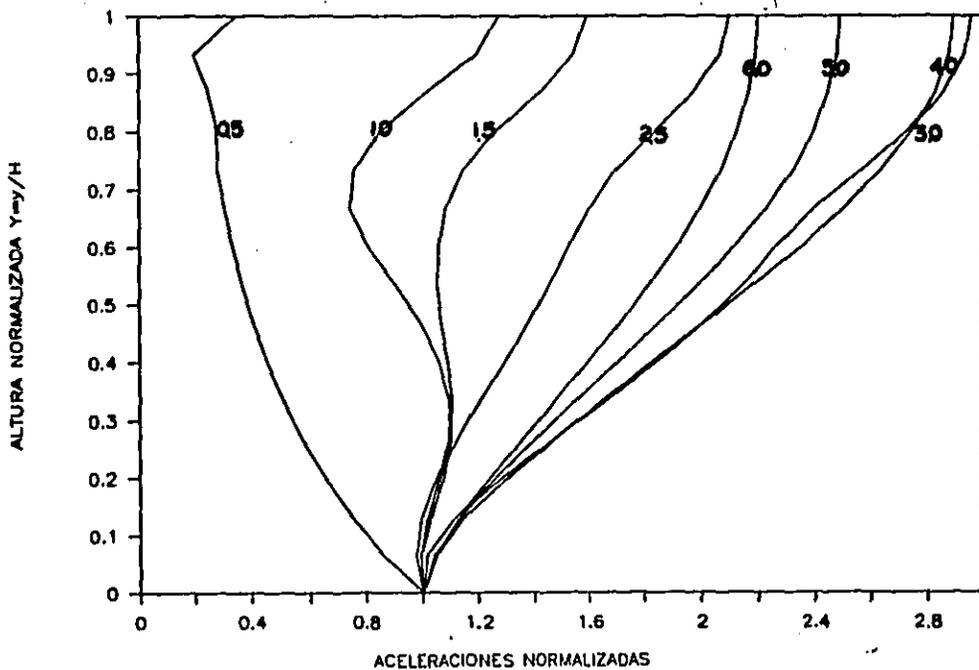


FIGURA 3.7.2 Respuesta de estratos sometidos a la excitación EP3

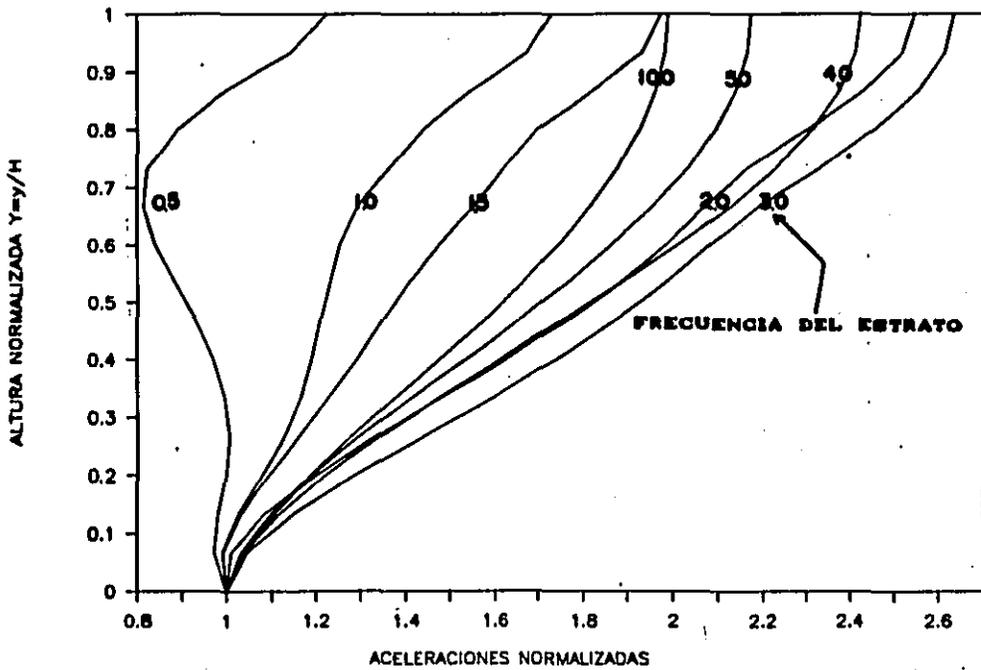


FIGURA 3.7.3 Respuesta de estratos sometidos a la excitación EP2

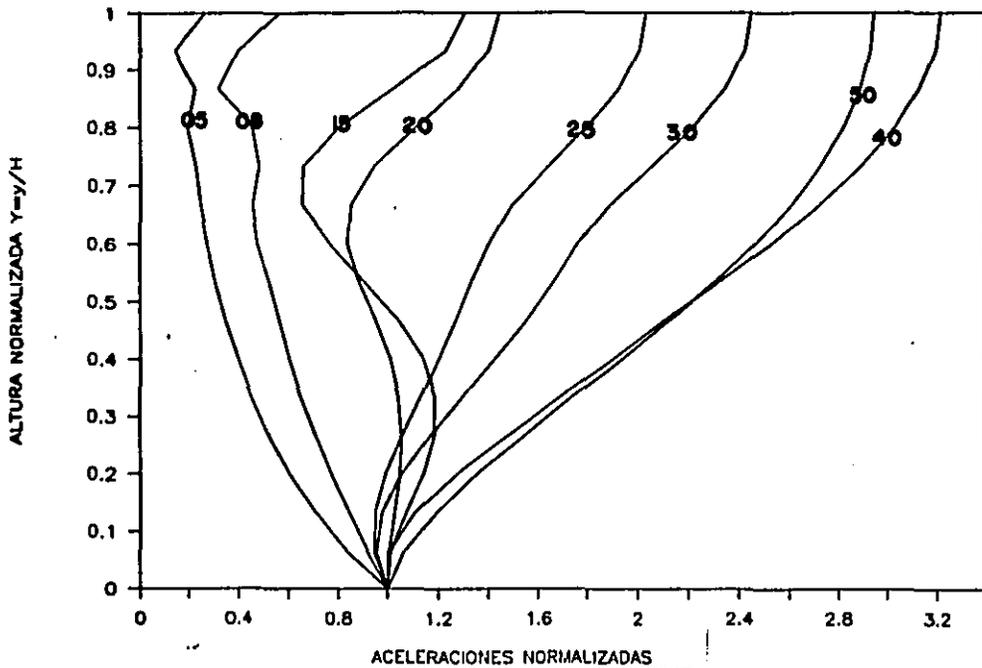


FIGURA 3.7.4 Respuesta de estratos sometidos a la excitación EP4

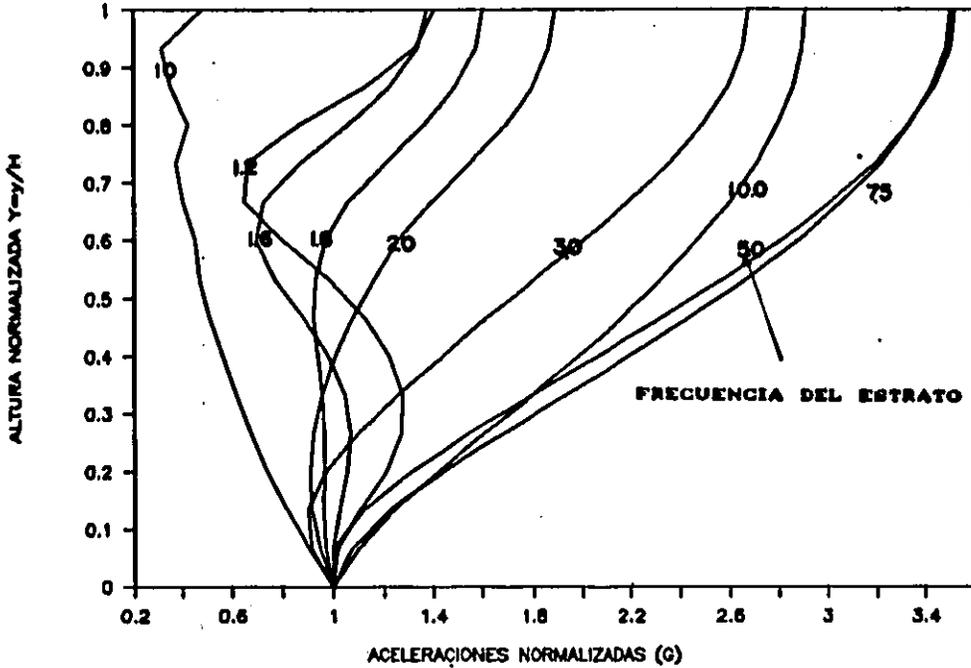


FIGURA 3.7.5 Respuesta de estratos sometidos a la excitación EPS

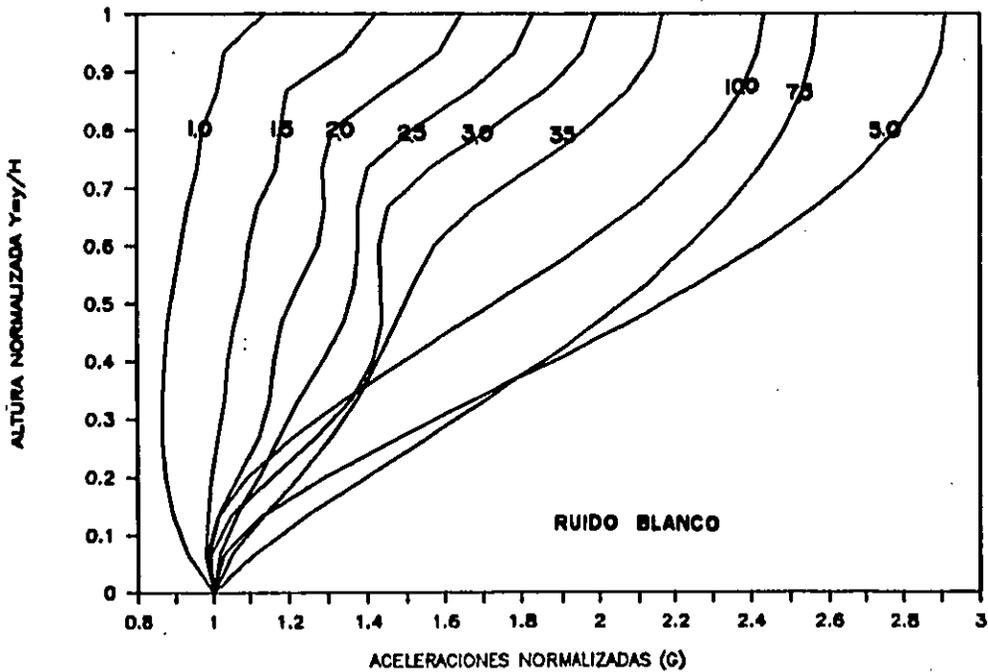


FIGURA 3.7.6 Respuesta de estratos sometidos a la excitación EPBLC

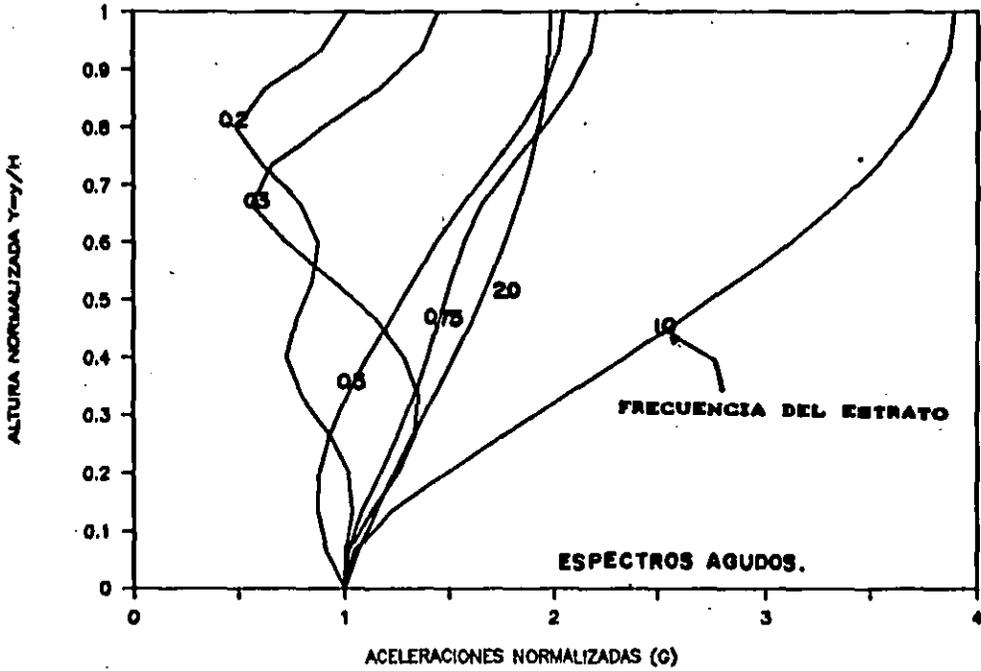


FIGURA 3.7.7 Respuesta de estratos sometidos a la excitación EPP1

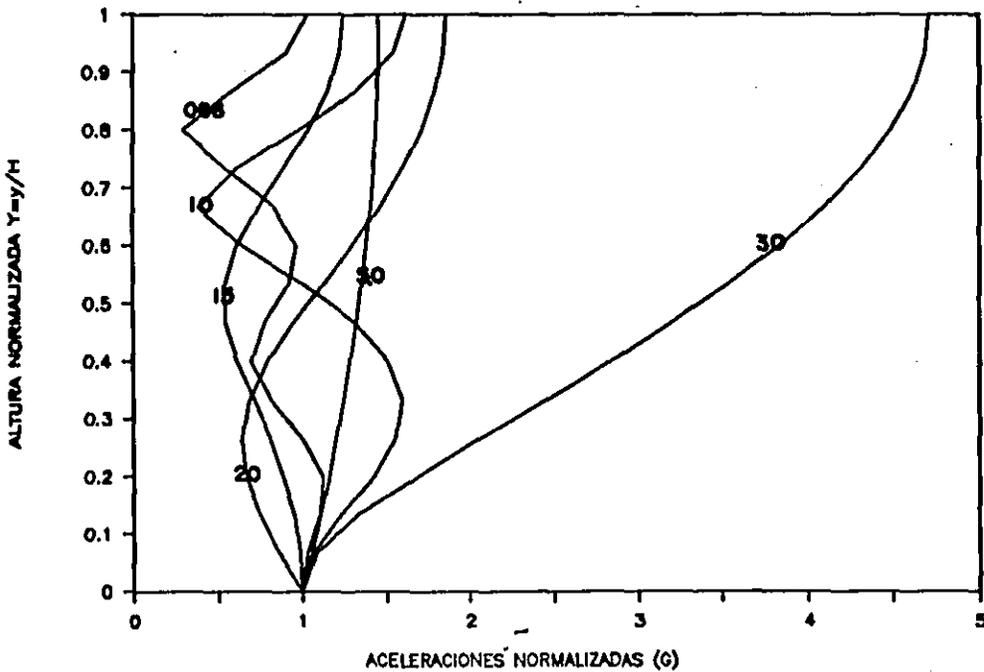


FIGURA 3.7.8 Respuesta de estratos sometidos a la excitación EPP3

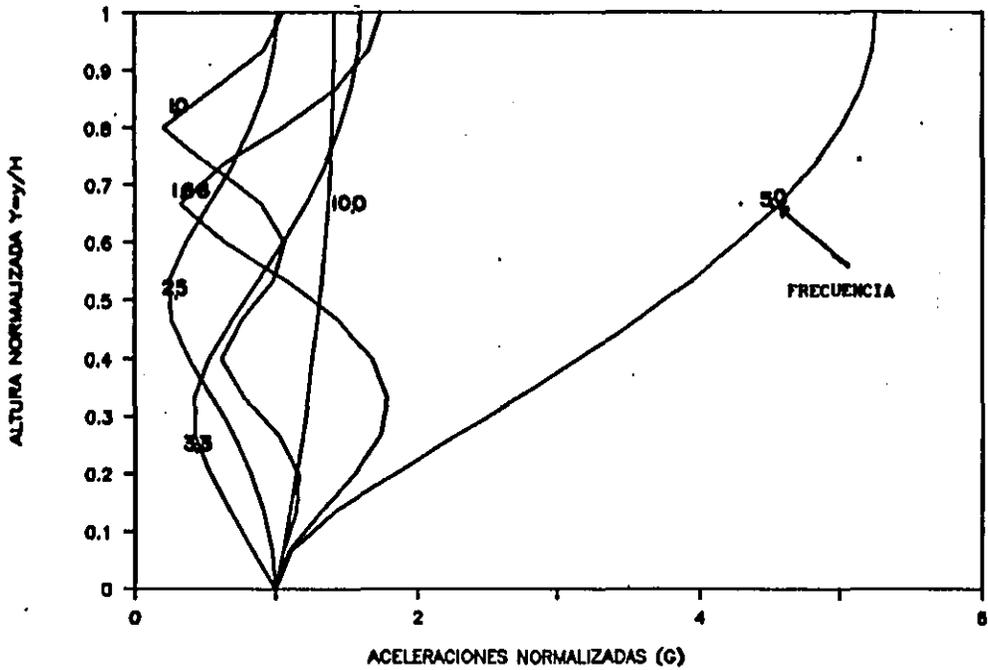


FIGURA 3.7.9 Respuesta de estratos sometidos a la excitación EPPS

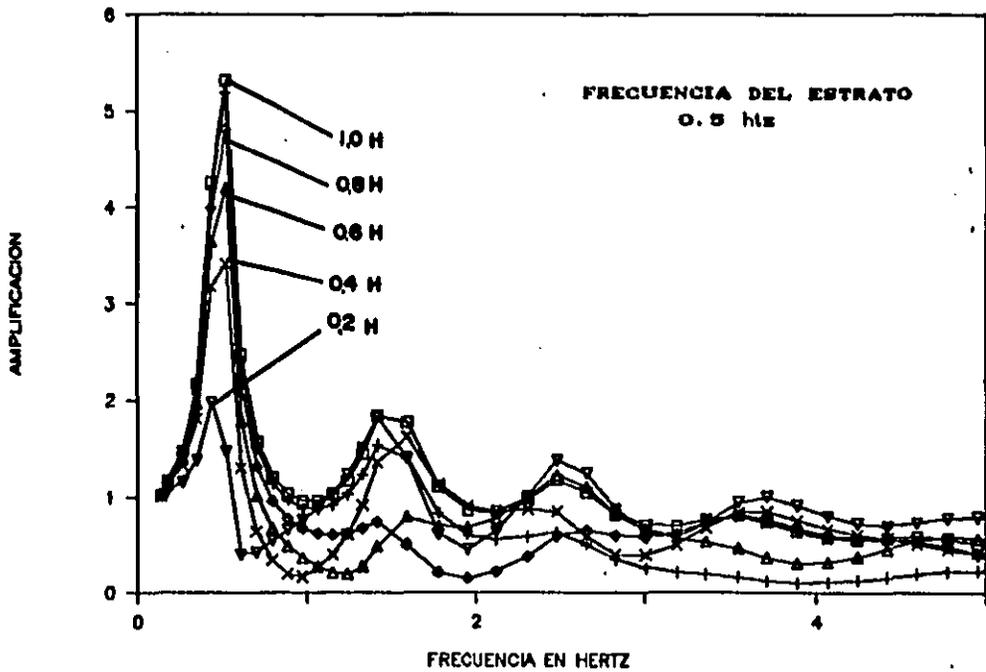


FIGURA 3.7.10 Variación de la función de amplificación con la profundidad.

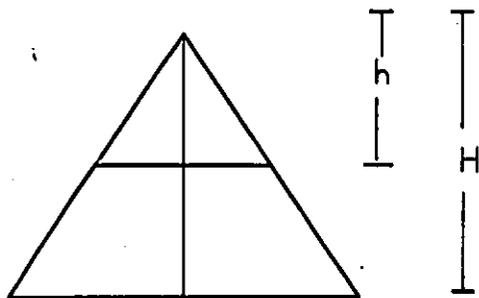
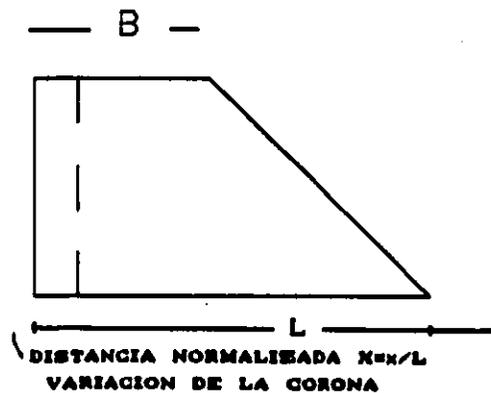
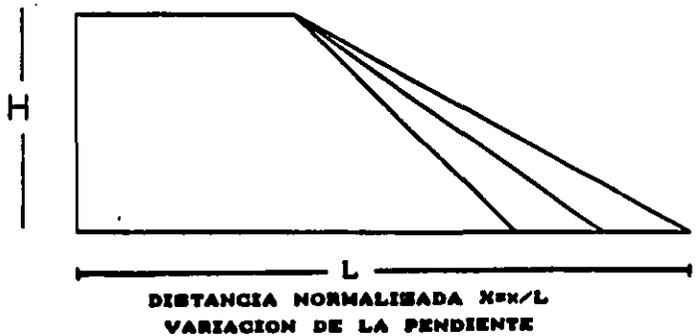


FIGURA 3.8 FACTOR DE FORMA
 $K' = h/H$

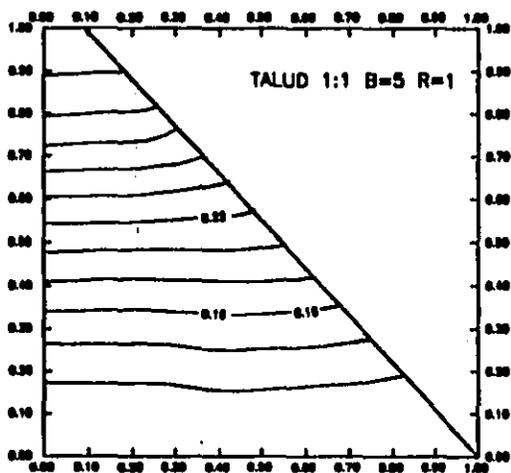


FIGURA 3.9.1a Coeficientes sísmicos R=1

ALTURA NORMALIZADA $Y=y/H$

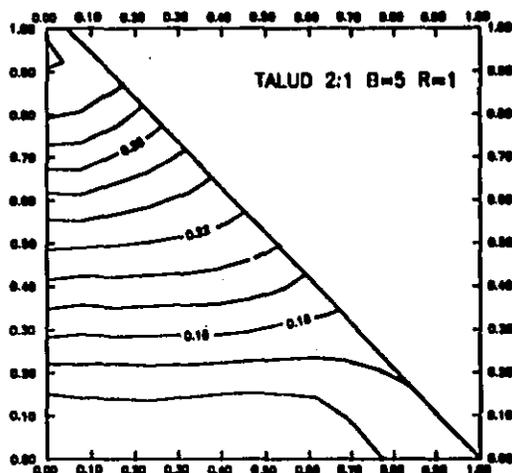
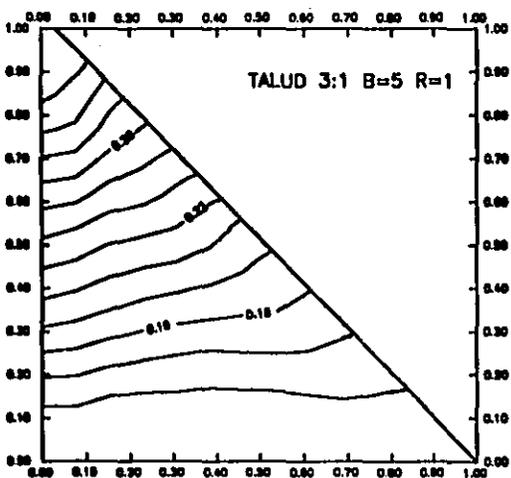


FIGURA 3.9.1b Coeficientes sísmicos R=1



ALTURA NORMALIZADA $Y=y/H$

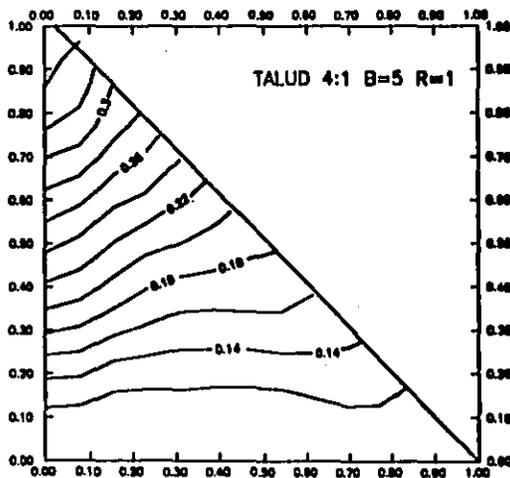


FIGURA 3.9.1d Coeficientes sísmicos R=1

FIGURA 3.9.1c Coeficientes sísmicos R=1

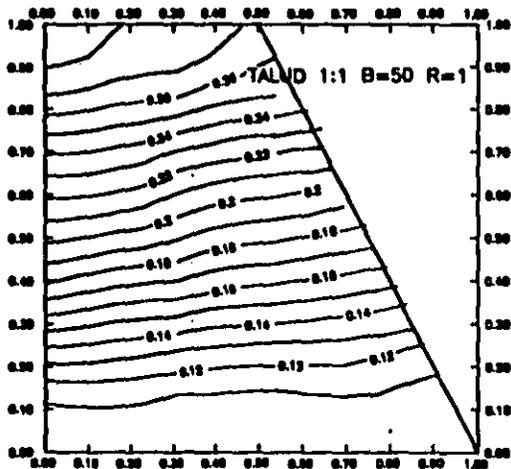


FIGURA 3.8.1a Coeficientes sísmicos R=1

ALTURA NORMALIZADA $Y=y/H$

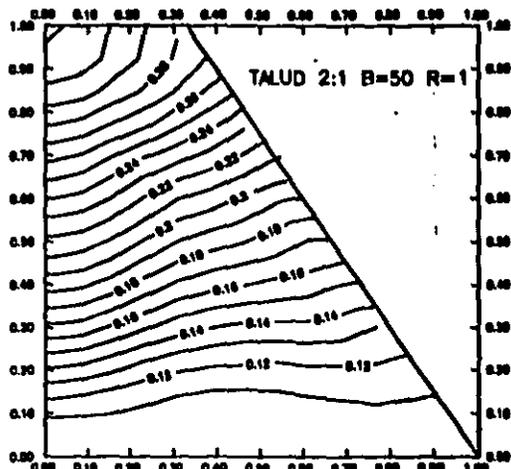


FIGURA 3.8.1f Coeficientes sísmicos R=1

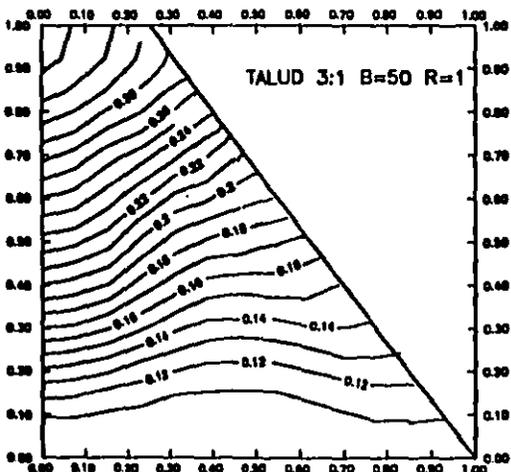


FIGURA 3.8.1g Coeficientes sísmicos R=1

ALTURA NORMALIZADA $Y=y/H$

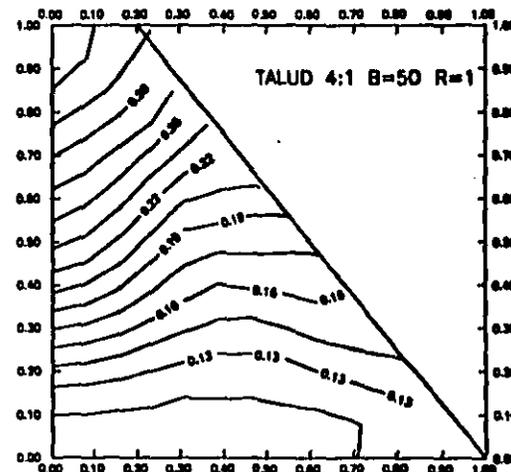


FIGURA 3.8.1h Coeficientes sísmicos R=1

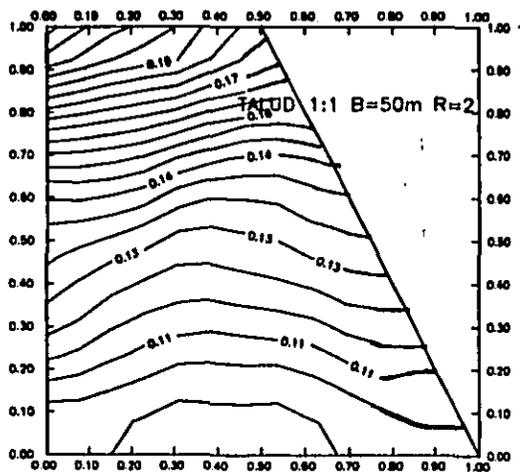


FIGURA 3.9.2a Coeficientes sísmicos R=2

ALtura NORMALIZADA Y=y/H

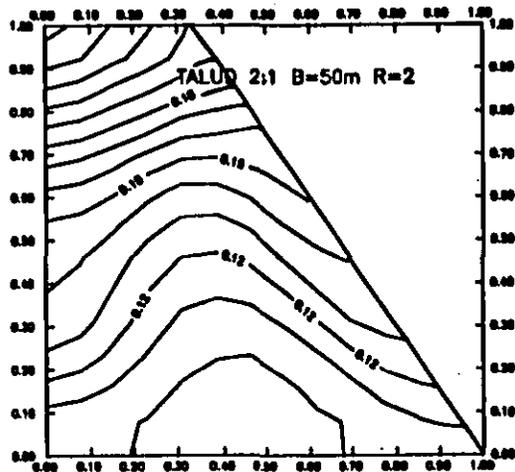


FIGURA 3.9.2b Coeficientes sísmicos R=2

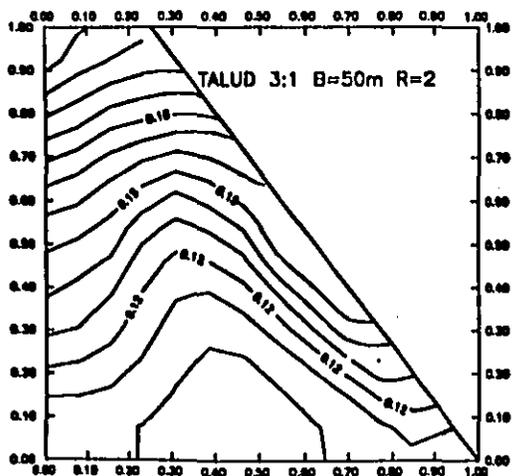


FIGURA 3.9.2c Coeficientes sísmicos R=2

ALtura NORMALIZADA Y=y/H

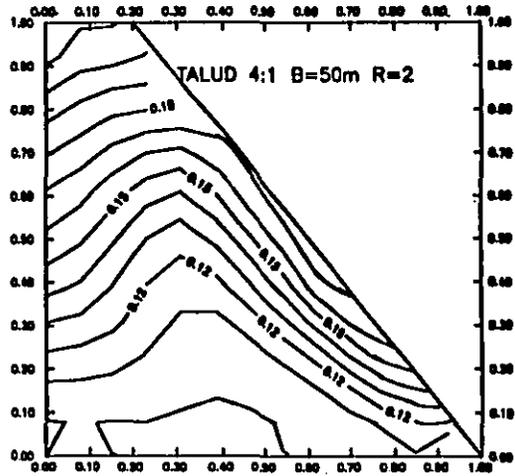


FIGURA 3.9.2d Coeficientes sísmicos R=2

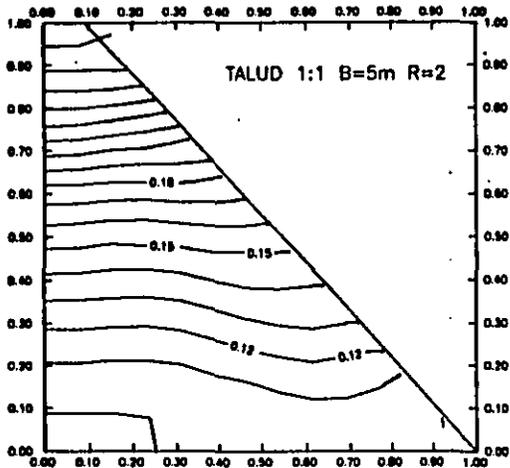


FIGURA 3.9.2a Coeficientes sísmicos R=2

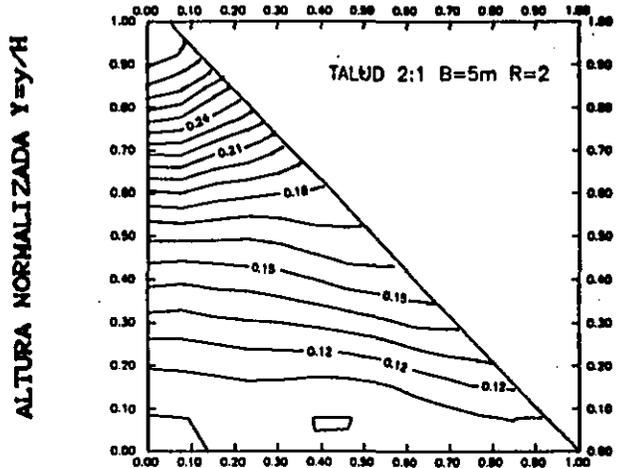


FIGURA 3.9.2r Coeficientes sísmicos R=2

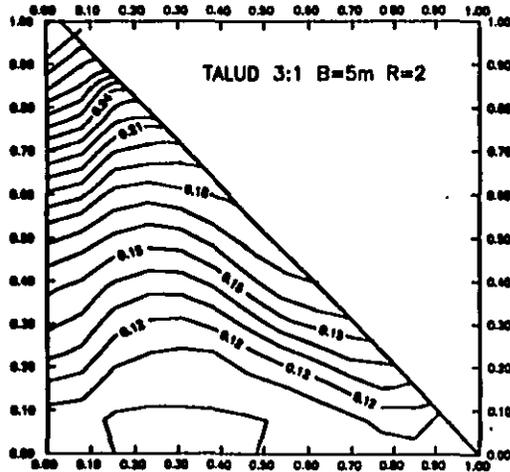


FIGURA 3.9.2g Coeficientes sísmicos R=2

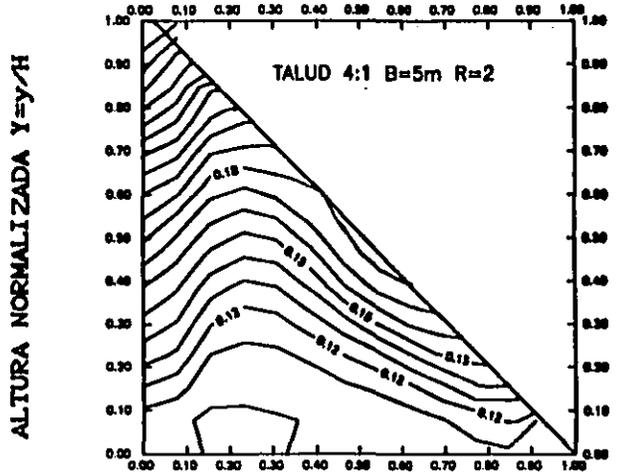


FIGURA 3.9.2h Coeficientes sísmicos R=2

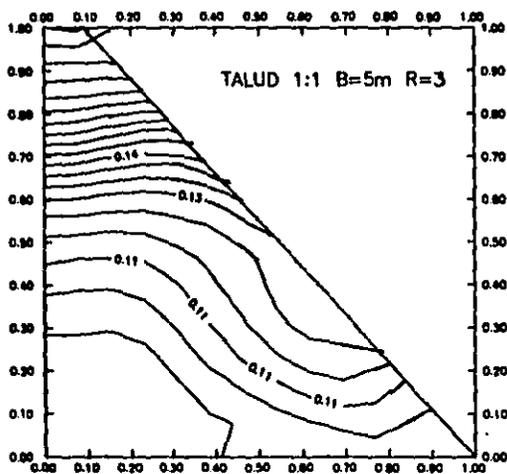


FIGURA 3.9.3a Coeficientes sísmicos R=3

ALTURA NORMALIZADA $Y=y/H$

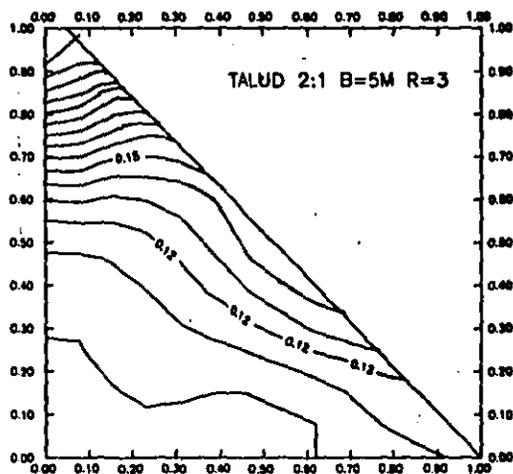


FIGURA 3.9.3b Coeficientes sísmicos R=3

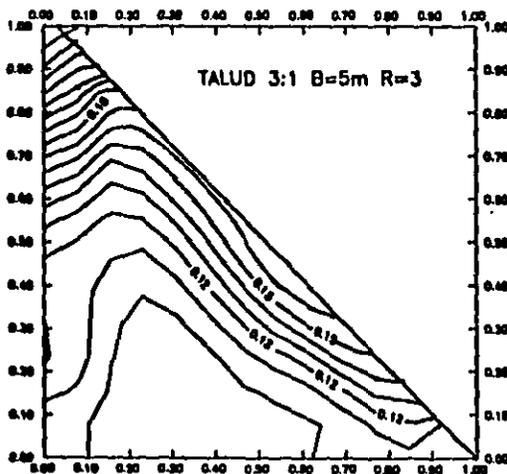


FIGURA 3.9.3c Coeficientes sísmicos R=3

ALTURA NORMALIZADA $Y=y/H$

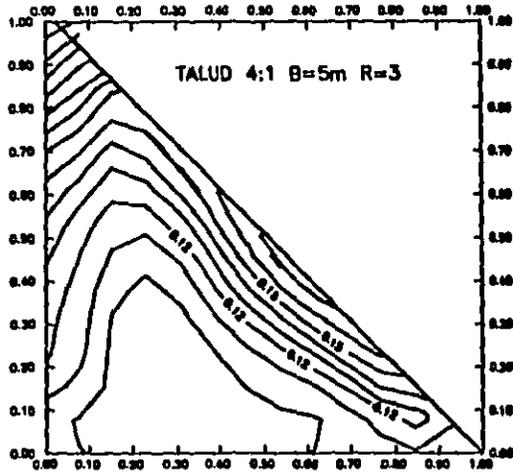


FIGURA 3.9.3d Coeficientes sísmicos R=3

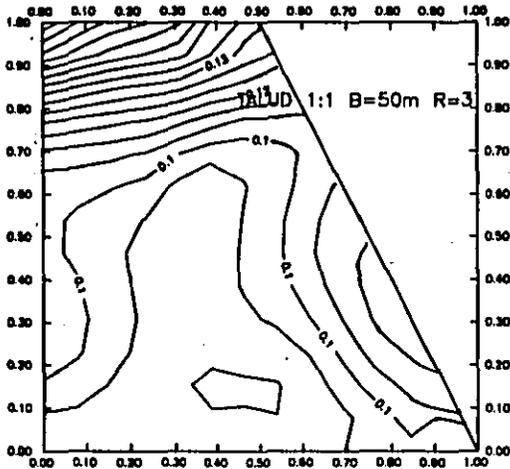


FIGURA 3.9.3a Coeficientes sísmicos R=3

ALtura NORMALIZADA $Y=y/H$

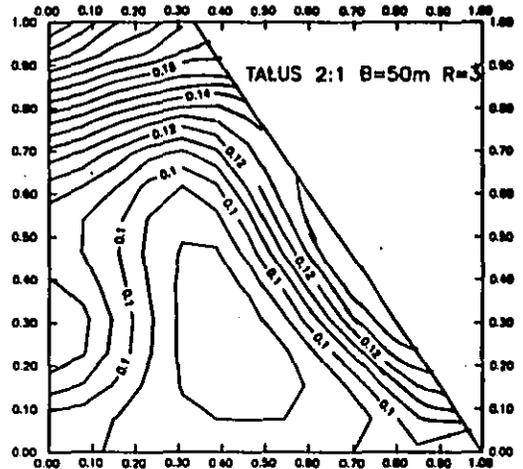


FIGURA 3.9.3c Coeficientes sísmicos R=3

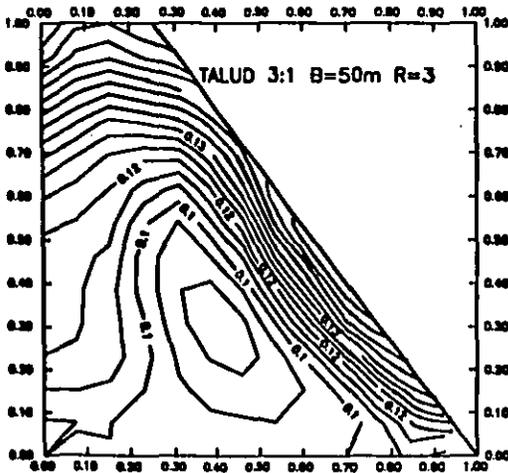


FIGURA 3.9.3g Coeficientes sísmicos R=3

ALtura NORMALIZADA $Y=y/H$

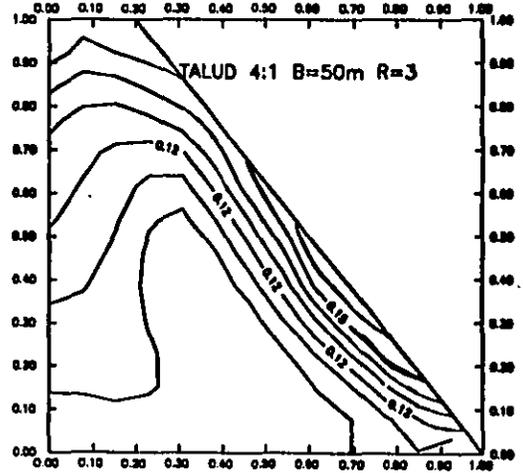


FIGURA 3.9.3h Coeficientes sísmicos R=3

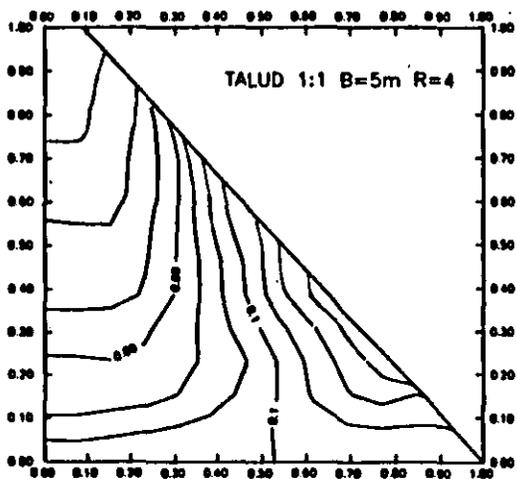


FIGURA 3.9.4a Coeficientes sísmicos R=4

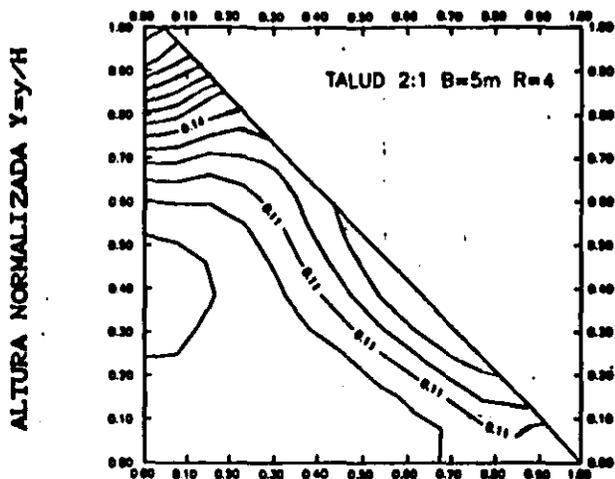


FIGURA 3.9.4b Coeficientes sísmicos R=4

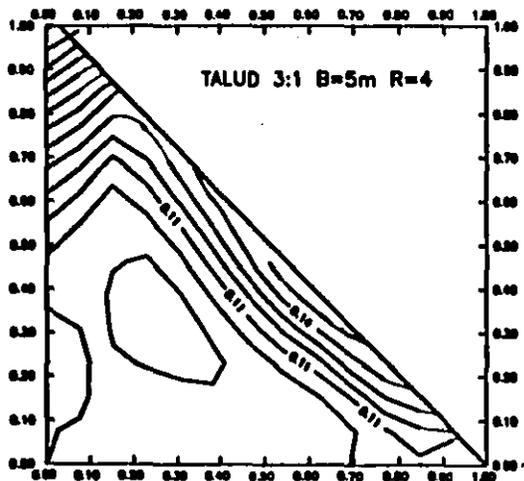


FIGURA 3.9.4c Coeficientes sísmicos R=4

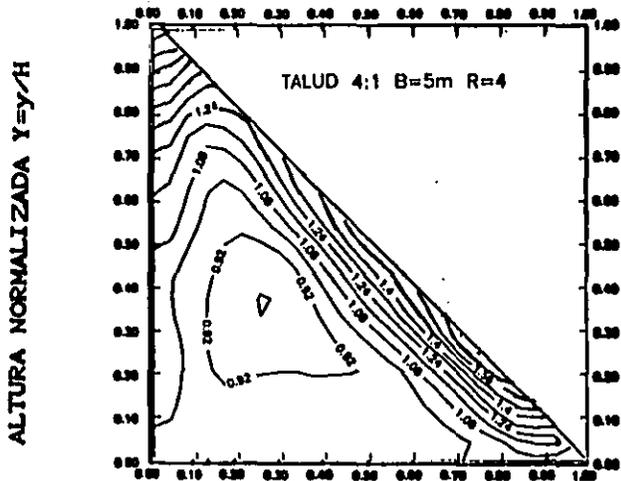


FIGURA 3.9.4d Coeficientes sísmicos R=4

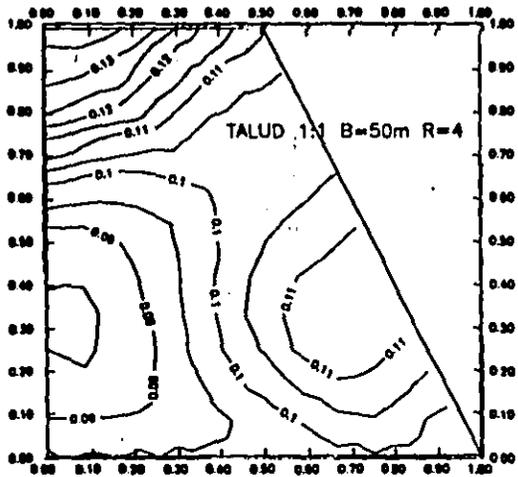


FIGURA 3.9.4e Coeficientes sísmicos R=4

ALTURA NORMALIZADA $Y=y/H$

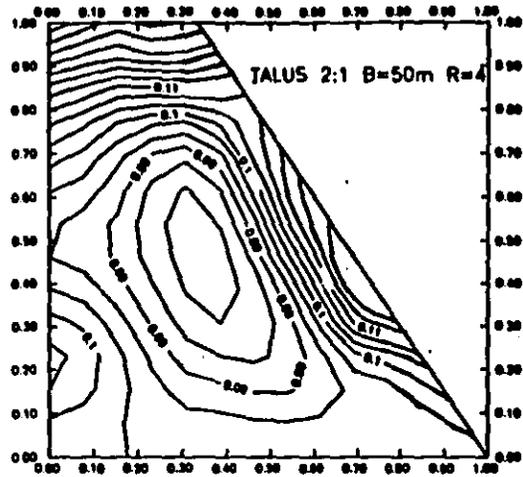


FIGURA 3.9.4r Coeficientes sísmicos R=4

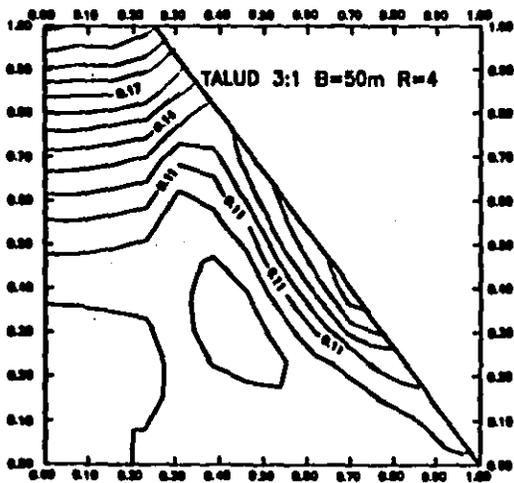


FIGURA 3.9.4g Coeficientes sísmicos R=4

ALTURA NORMALIZADA $Y=y/H$

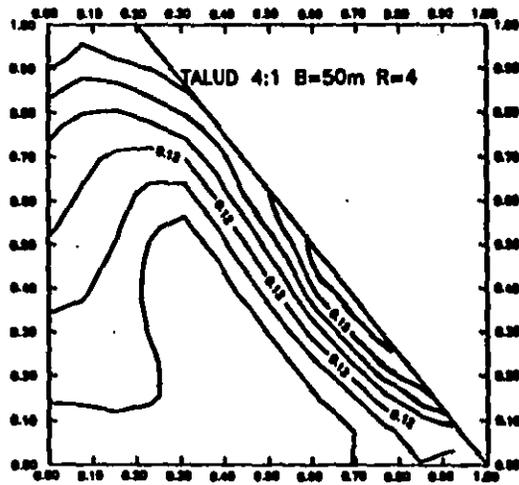


FIGURA 3.9.4h Coeficientes sísmicos R=4

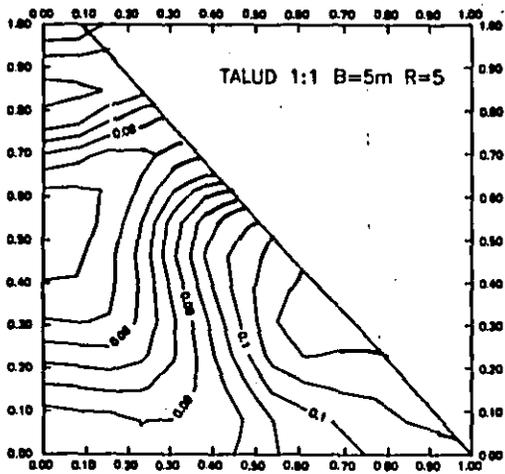


FIGURA 3.9.5a Coeficientes sísmicos R=5

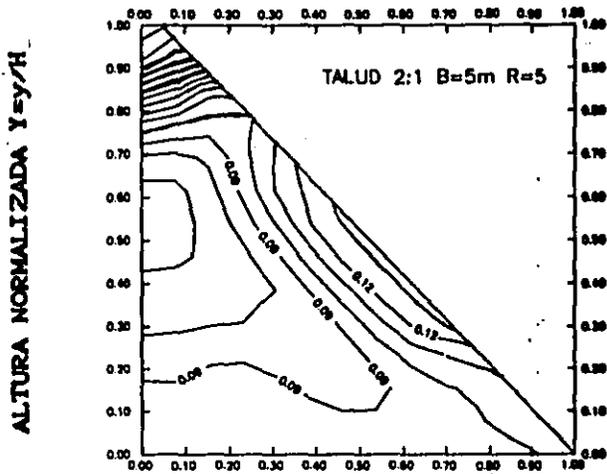


FIGURA 3.9.5b Coeficientes sísmicos R=5

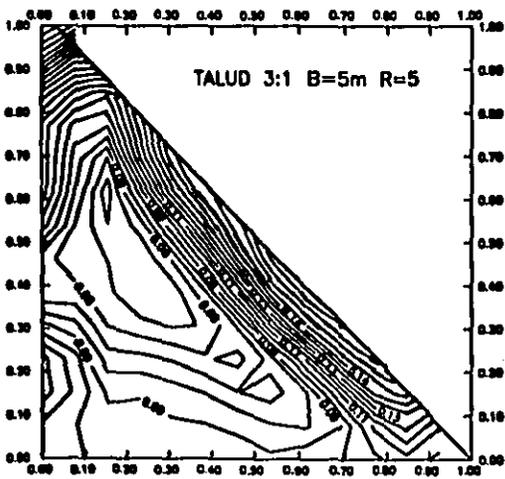


FIGURA 3.9.5c Coeficientes sísmicos R=5

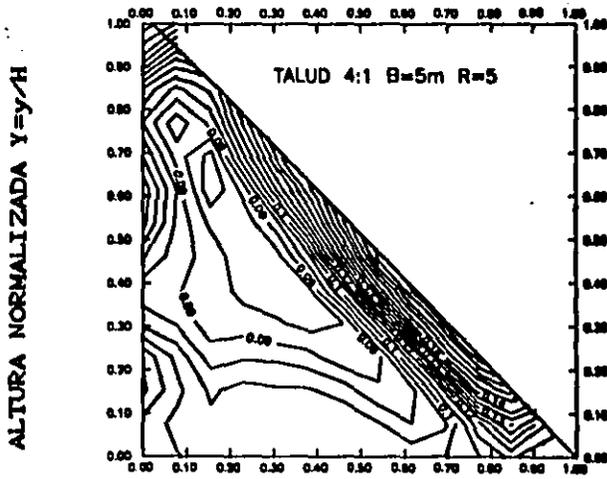


FIGURA 3.9.5d Coeficientes sísmicos R=5

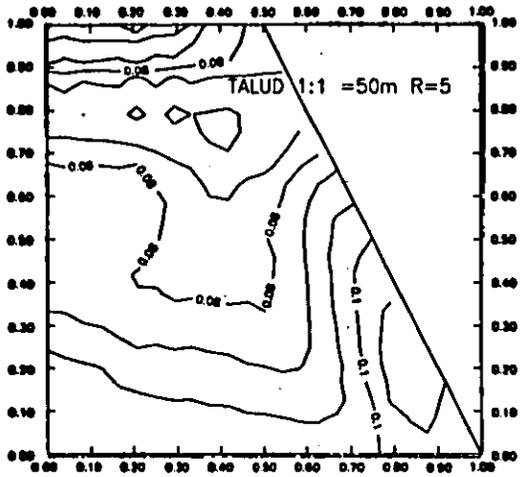


FIGURA 3.9.5e Coeficientes sísmicos R=5

ALTURA NORMALIZADA $Y=y/H$

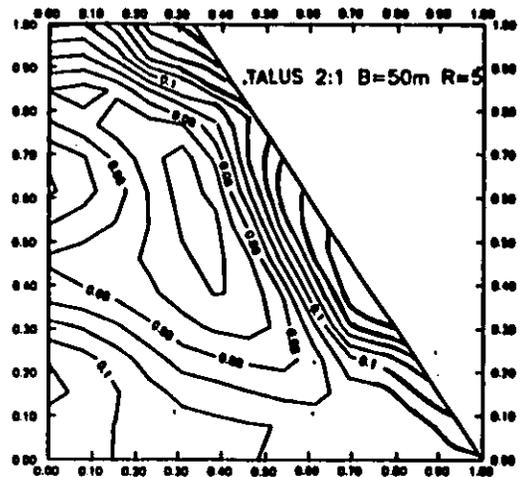


FIGURA 3.9.5f Coeficientes sísmicos R=5

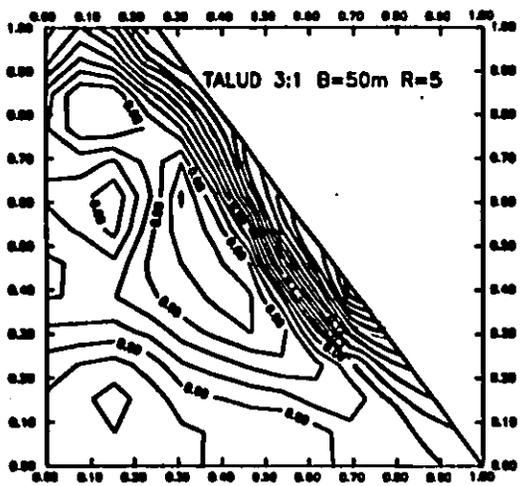


FIGURA 3.9.5g Coeficientes sísmicos R=5

ALTURA NORMALIZADA $Y=y/H$

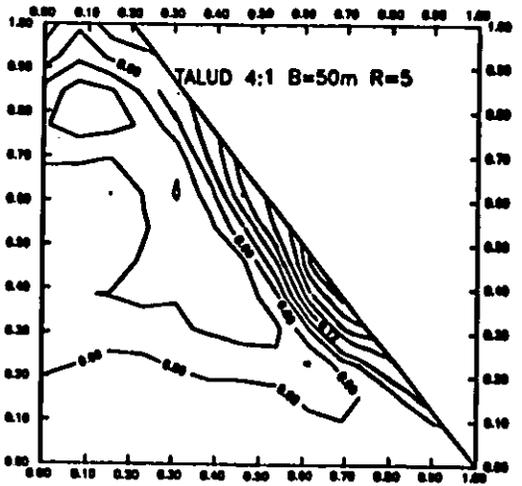


FIGURA 3.9.5h Coeficientes sísmicos R=5

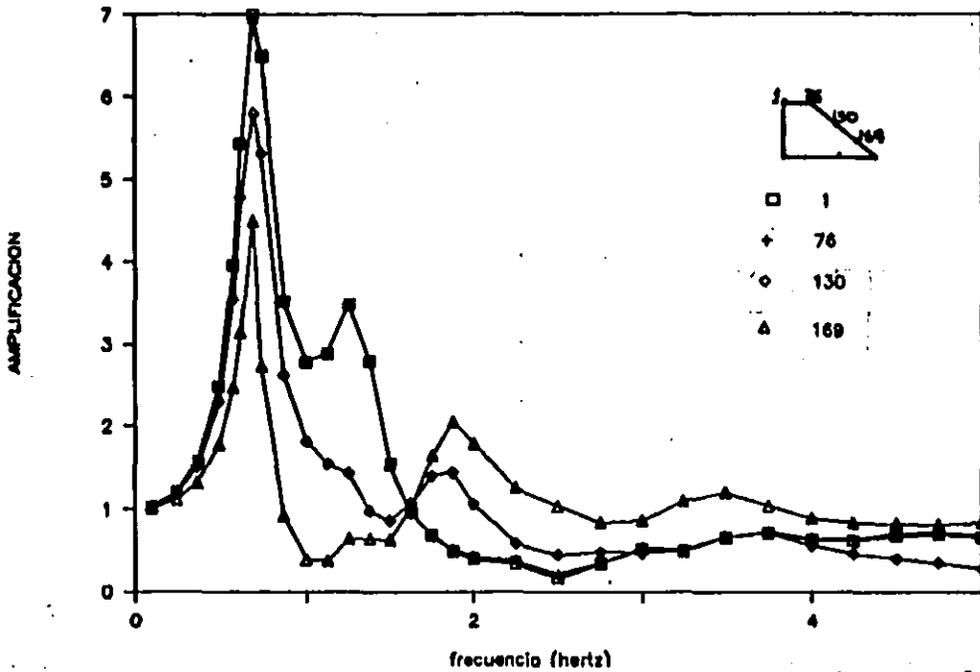


FIGURA 3.10a Variación de la función de amplificación en la superficie de los terraplenes (talud 1:1 B=5).

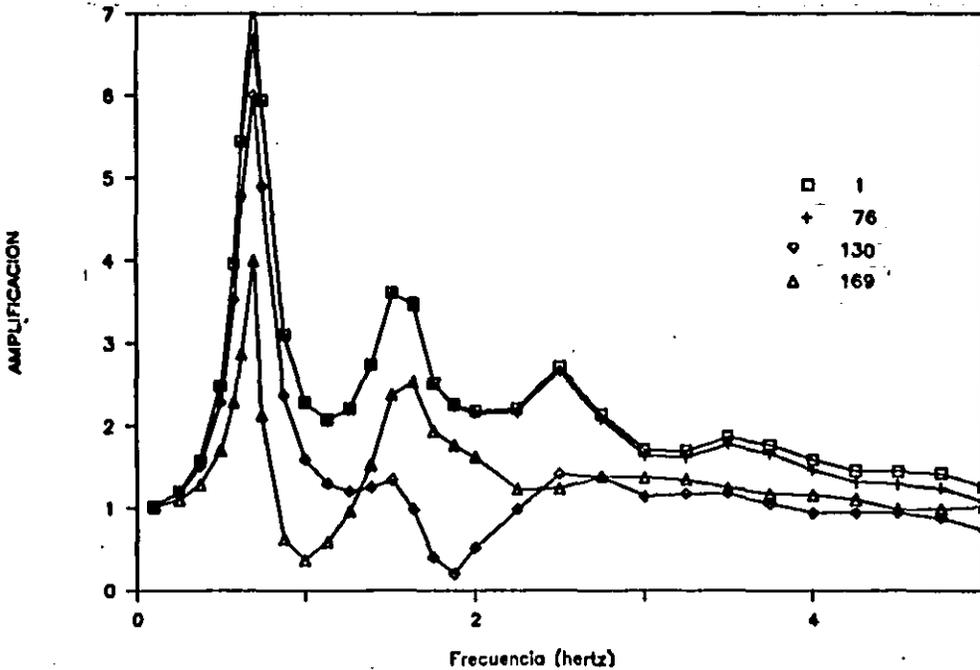


FIGURA 3.10b Variación de la función de amplificación en la superficie de los terraplenes (talud 2:1 B=5).

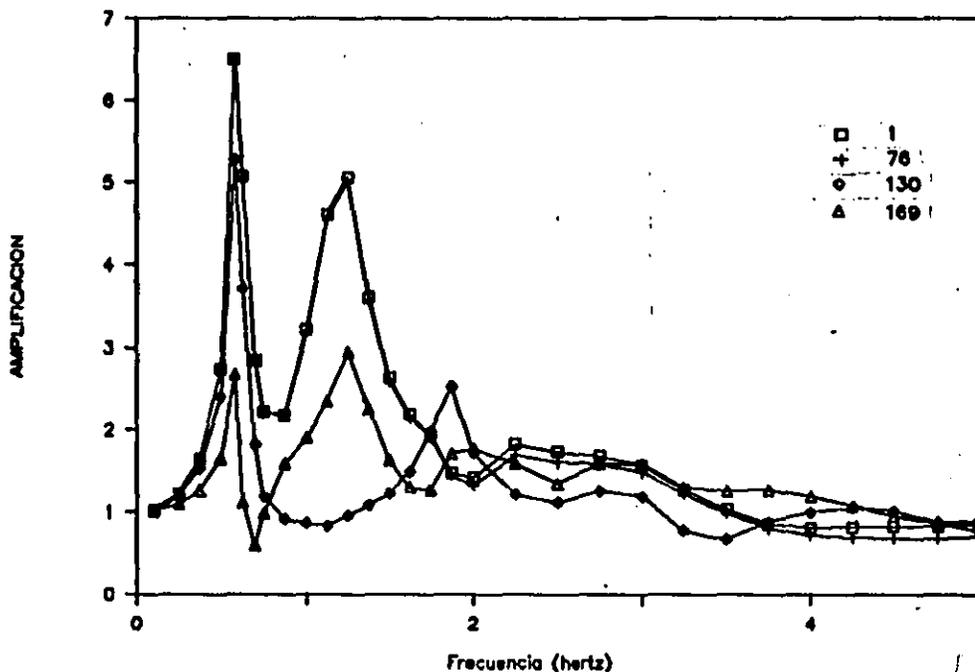


FIGURA 3.10c Variación de la función de amplificación en la superficie de los terraplenes (talud 3:1 B=5).

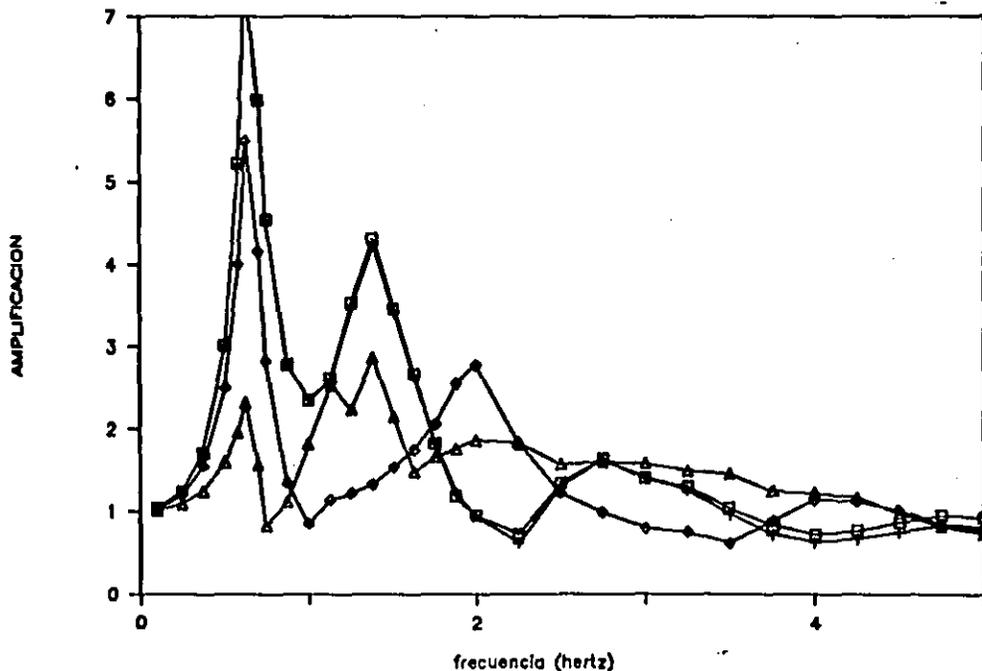


FIGURA 3.10d Variación de la función de amplificación en la superficie de los terraplenes (talud 4:1 B=5).

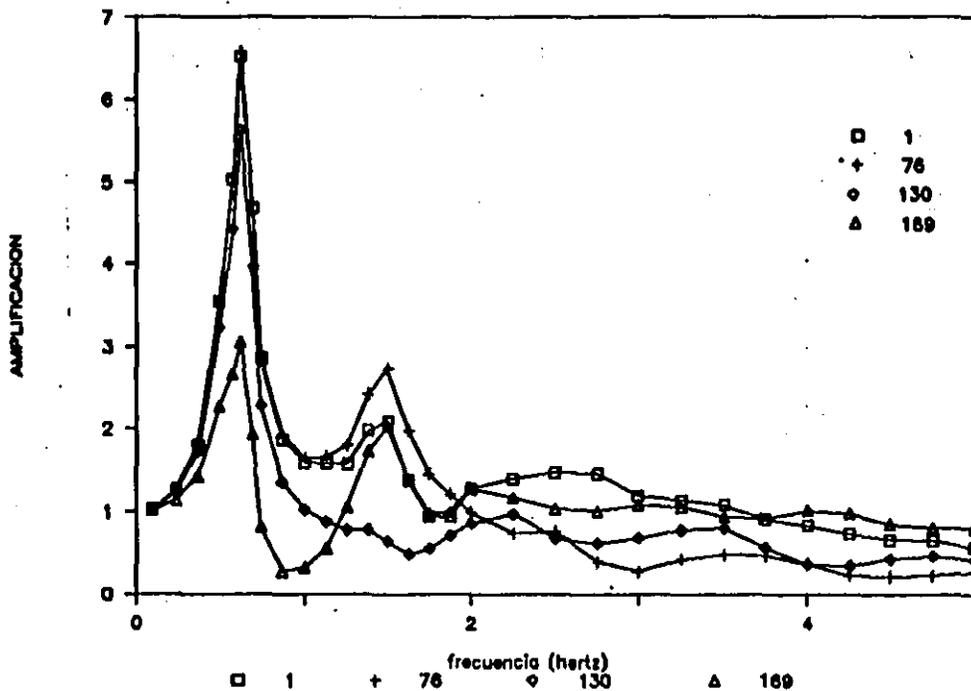


FIGURA 3.10e Variación de la función de amplificación en la superficie de los terraplenes (talud 1:1 B=25).

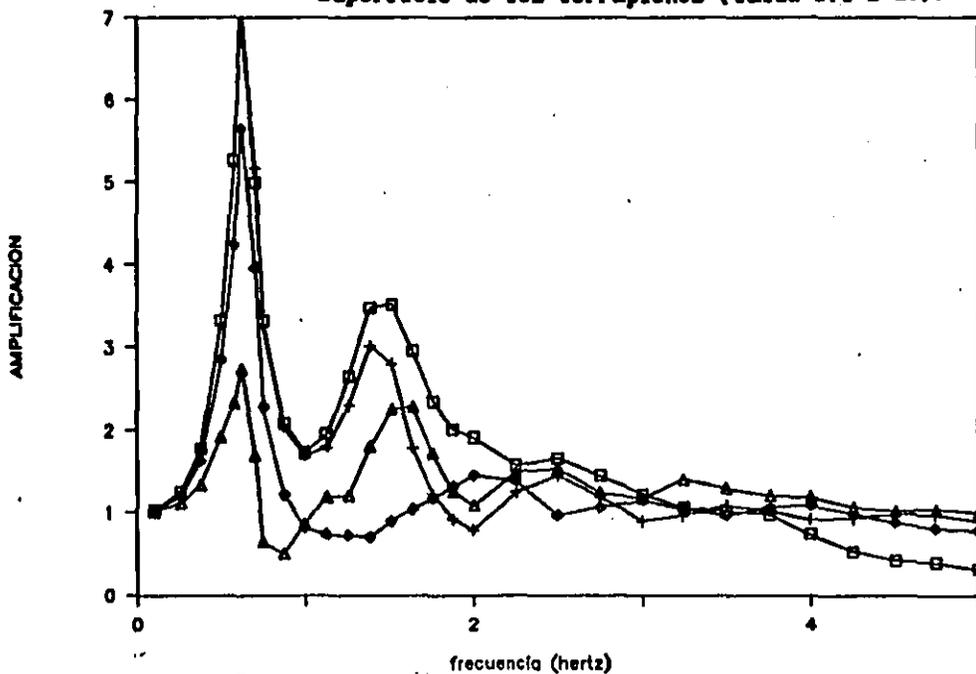


FIGURA 3.10f Variación de la función de amplificación en la superficie de los terraplenes (talud 2:1 B=25).

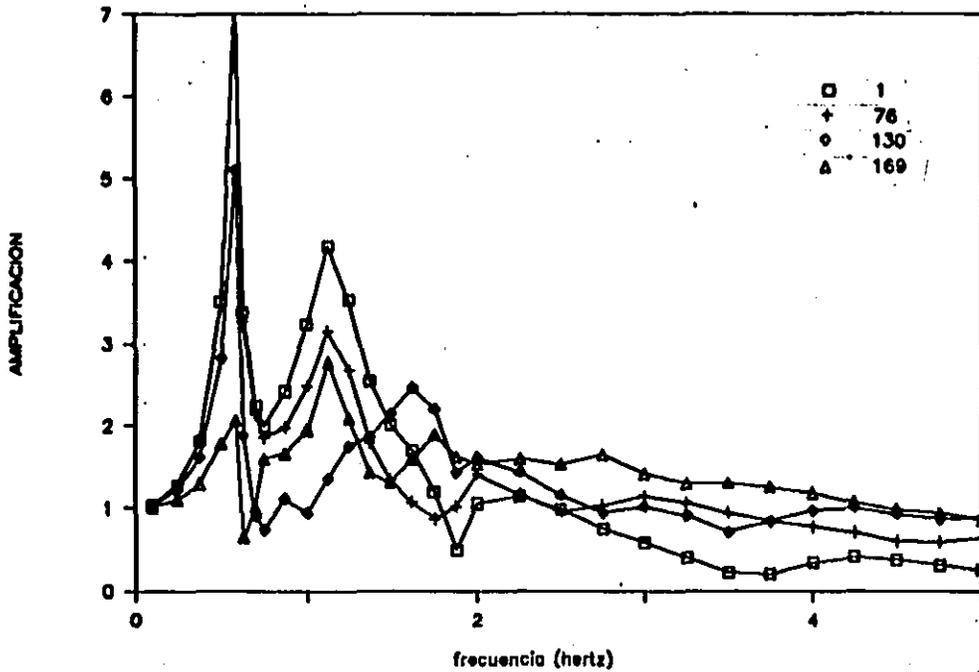


FIGURA 3.10g Variación de la función de amplificación en la superficie de los terraplenes (talud 3:1 B=25).

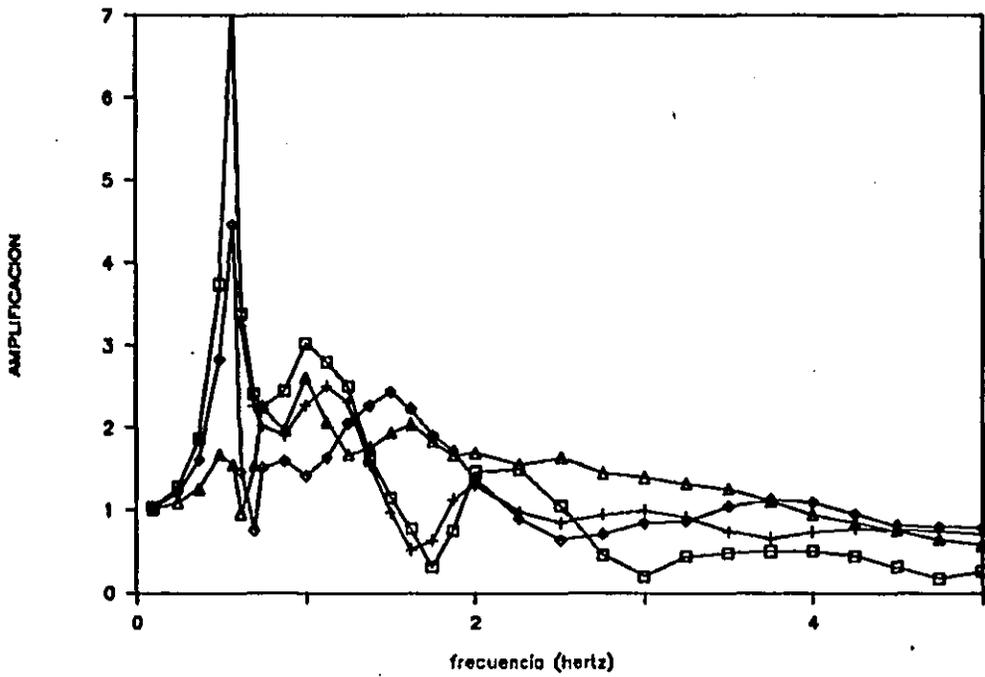


FIGURA 3.10h Variación de la función de amplificación en la superficie de los terraplenes (talud 4:1 B=25).

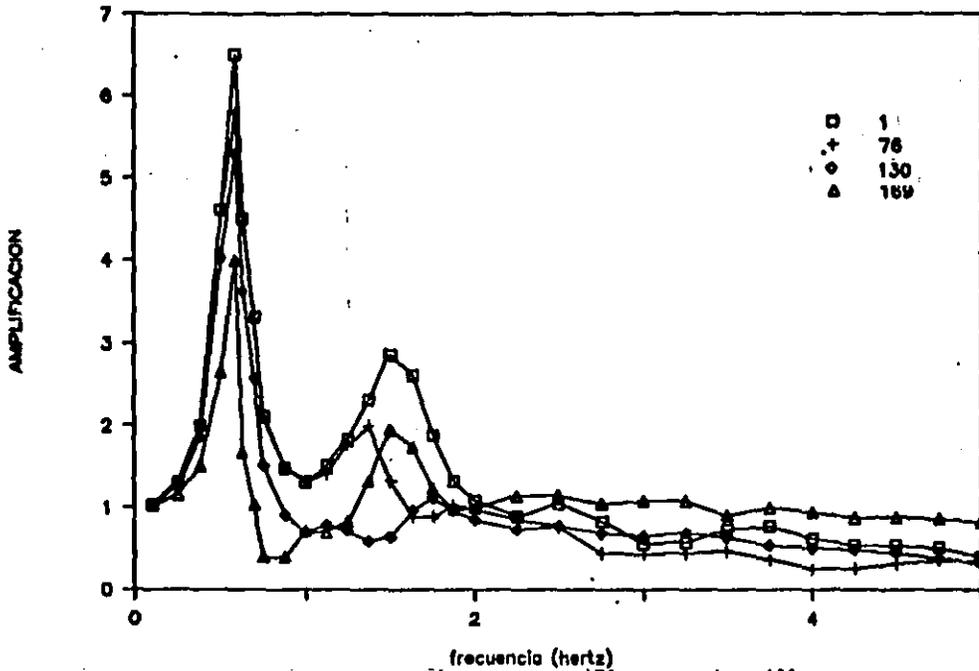


FIGURA 3.101 Variación de la función de amplificación en la superficie de los terraplenes (talud 1:1 B=50).

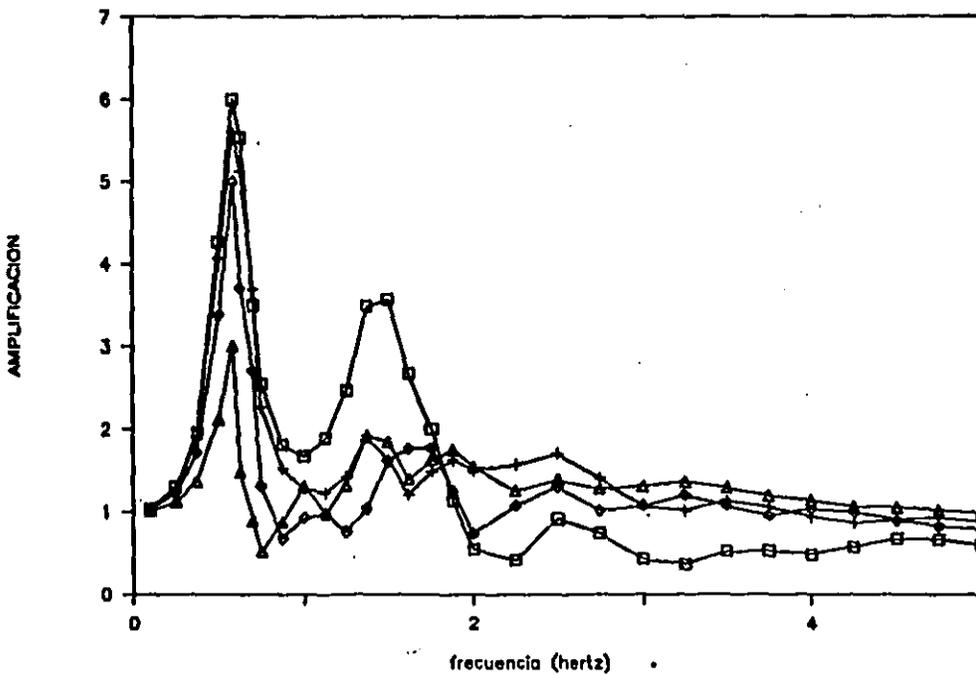


FIGURA 3.102 Variación de la función de amplificación en la superficie de los terraplenes (talud 2:1 B=50).

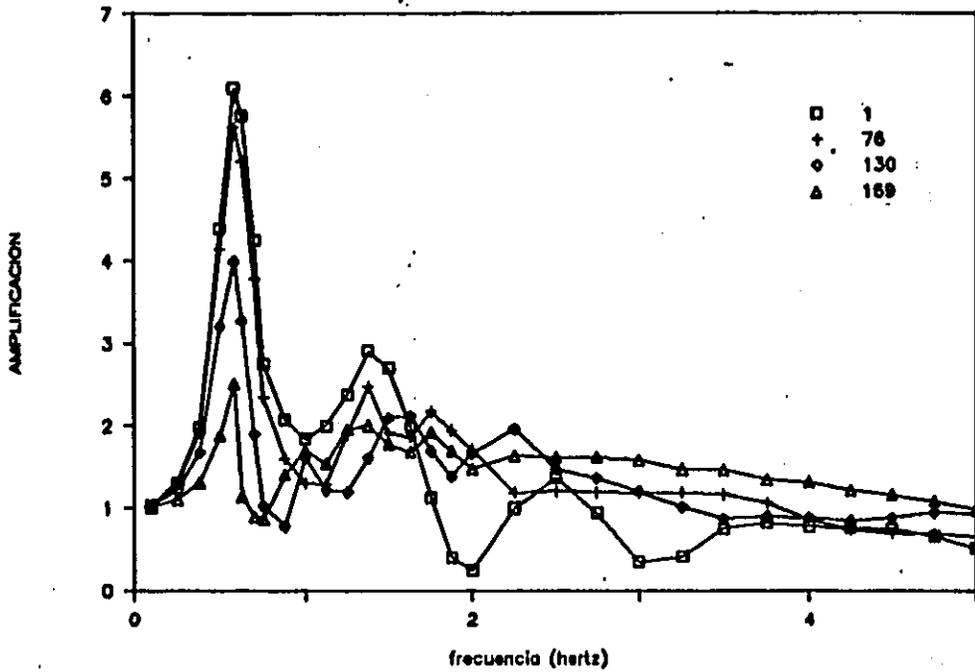


FIGURA 3.10k Variación de la función de amplificación en la superficie de los terraplenes (talud 3:1 B=50).

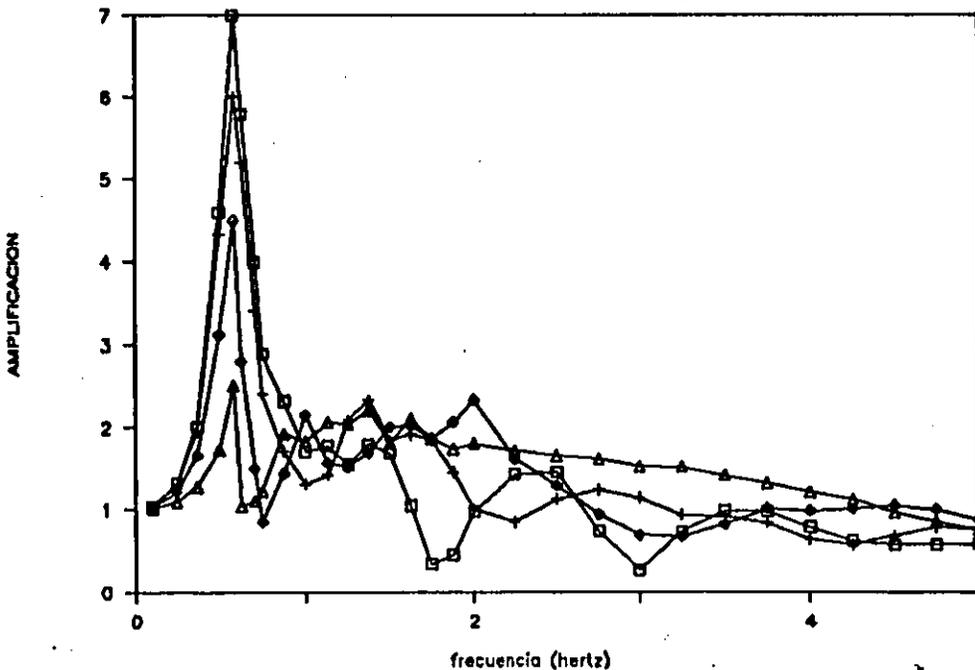
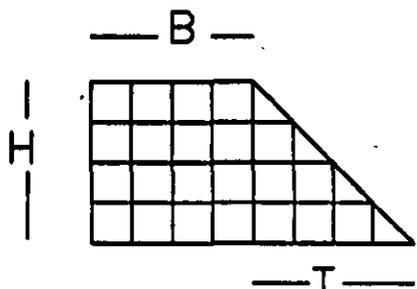
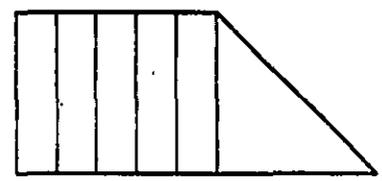


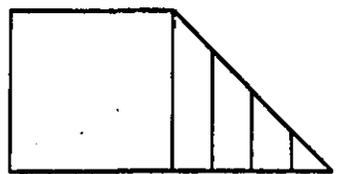
FIGURA 3.10l Variación de la función de amplificación en la superficie de los terraplenes (talud 4:1 B=50).



Malla De elemento Finito



Aumento De Divisiones En La Corona



Aumento De Divisiones En la Pendiente.

FIGURA 3.11 REVISION DEL TAMANO DE LA MALLA

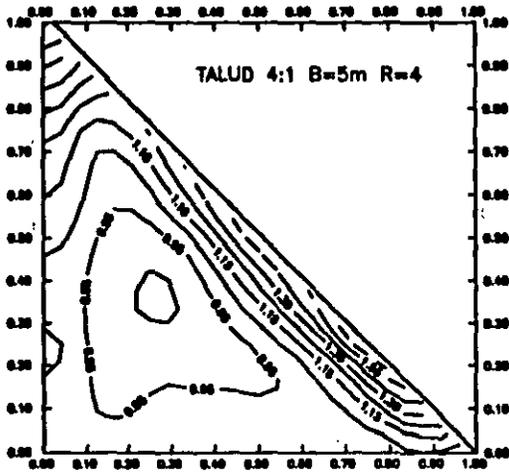


FIGURA 3.12a MAS DIVISIONES EN LA PENDIENTE

ALTURA NORMALIZADA $Y=y/H$

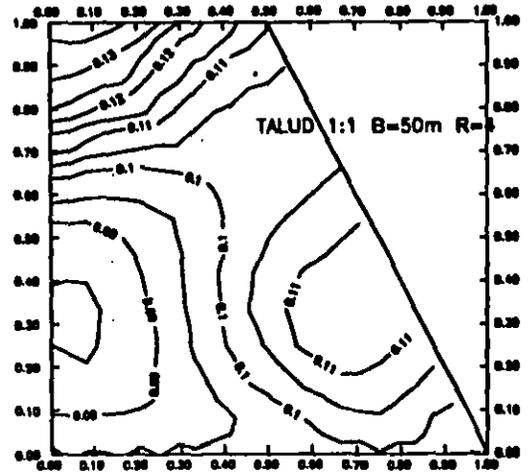


FIGURA 3.12b MAS DIVISIONES EN LA CORONA

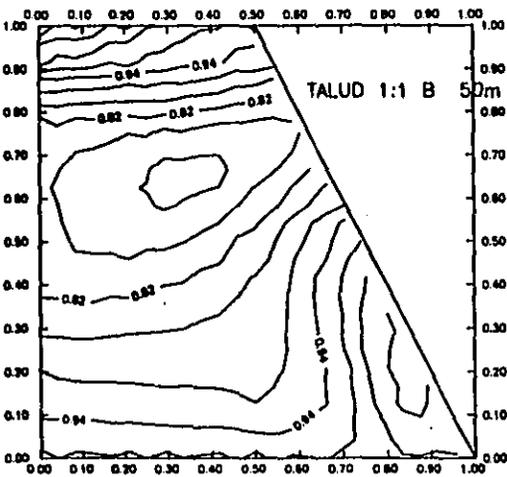


FIGURA 3.12c MALLA CONECTADA CON CAMPO LIBRE.

FIGURA 3.12 REVISION DEL TAMAÑO DE LA MALLA

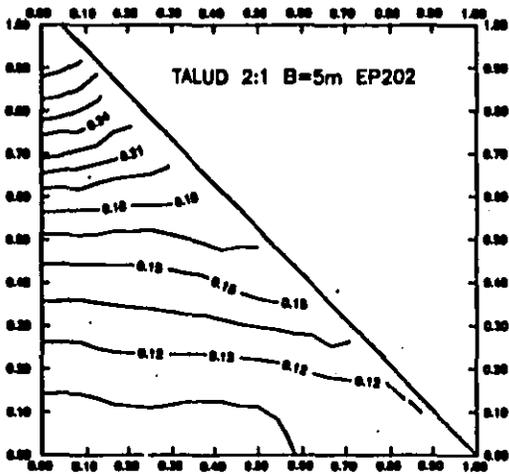


FIGURA 3.13a ESPECTRO NORMAL (EP2).

FIGURA 3.13 VARIACION DEL ESPECTRO

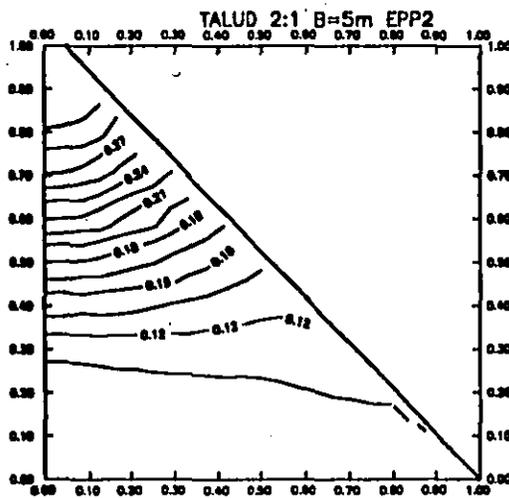


FIGURA 3.13b ESPECTRO MAS AGUDO (EPP2).

ALtura NORMALIZADA Y=y/H

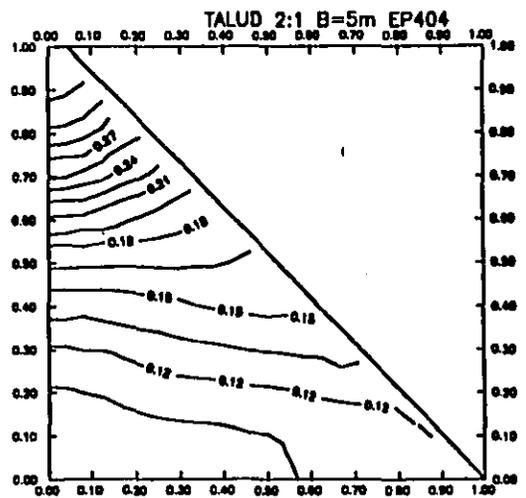


FIGURA 3.13c ESPECTRO CON MAYOR FRECUENCIA (EP4)

VARIACION DEL AMORTIGUAMIENTO

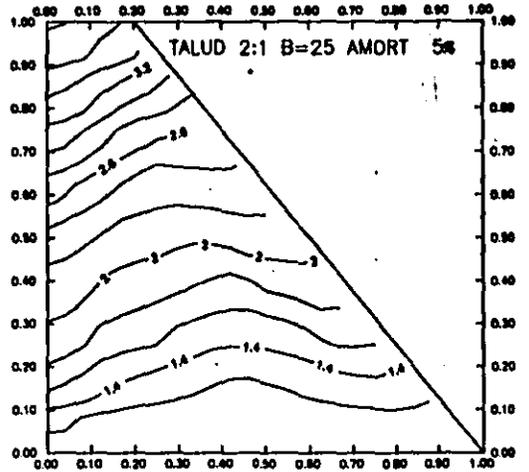
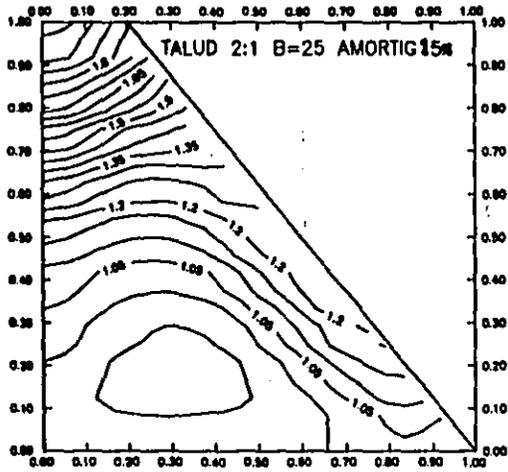


FIGURA 3.14 VARIACION DEL AMORTIGUAMIENTO

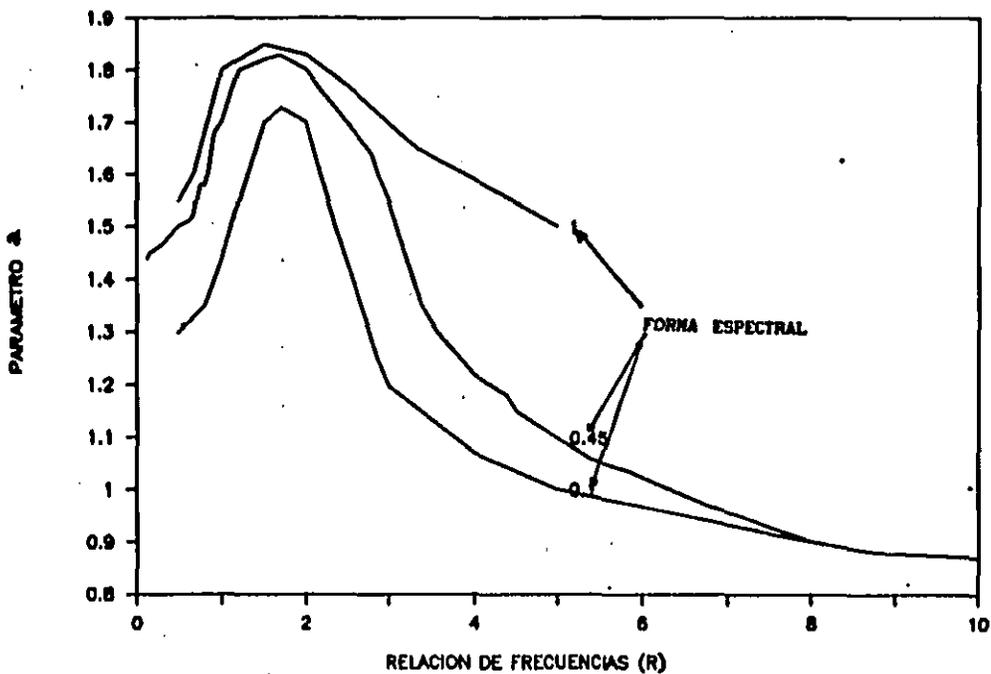


FIGURA 4.1a Parámetro de ajuste a.

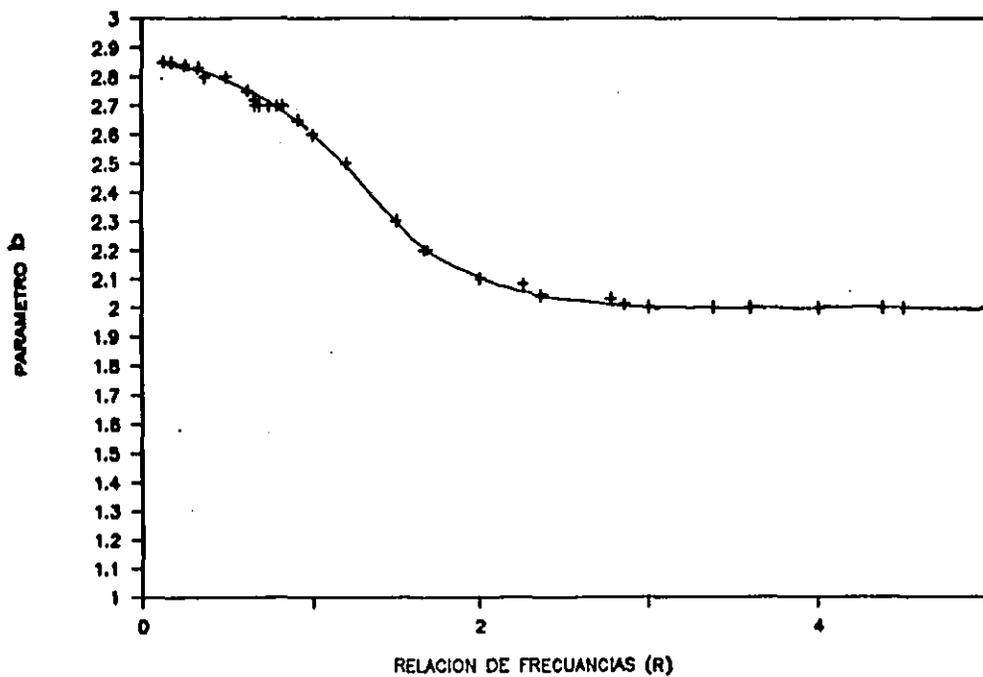


FIGURA 4.1b Parámetro de ajuste b

ACELERACIONES SEGUN FORMA ESPECTRAL

PARAMETROS DE AJUSTE

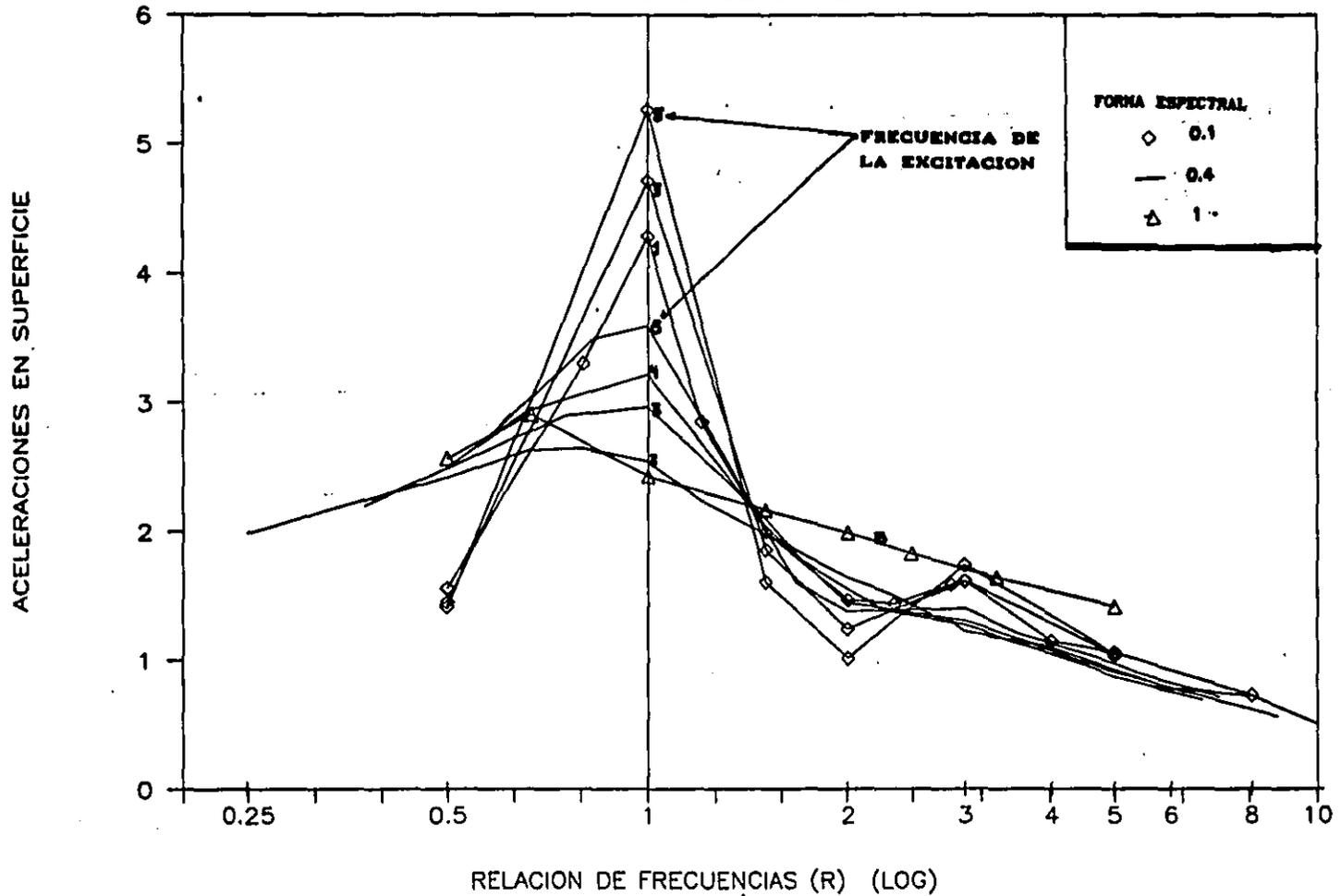


FIGURA 4.1.c

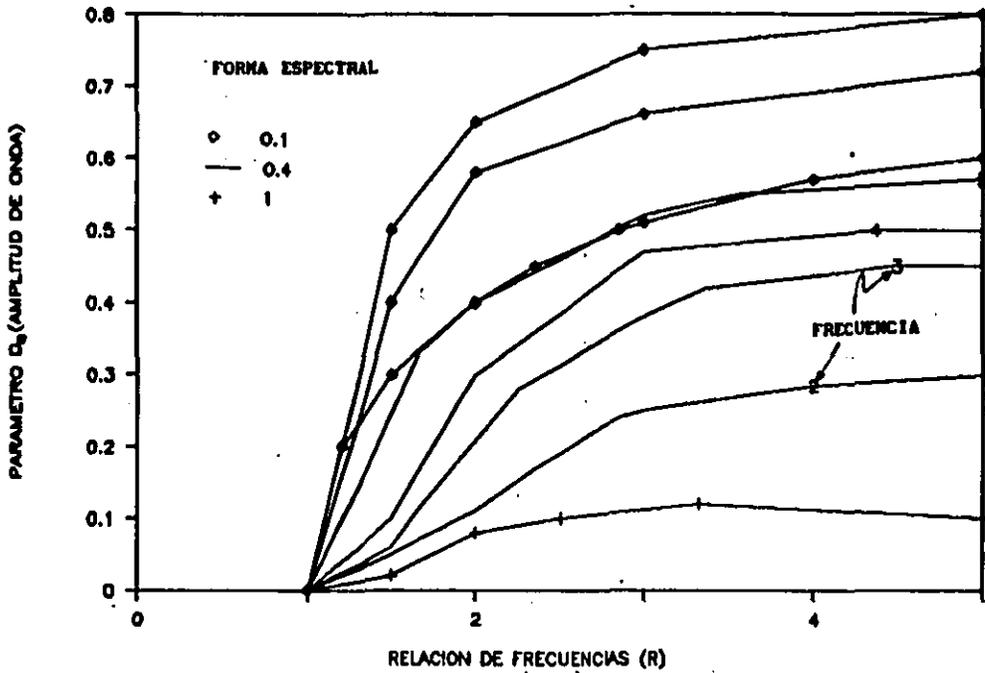


FIGURA 4.1d Parámetro de ajuste D_0

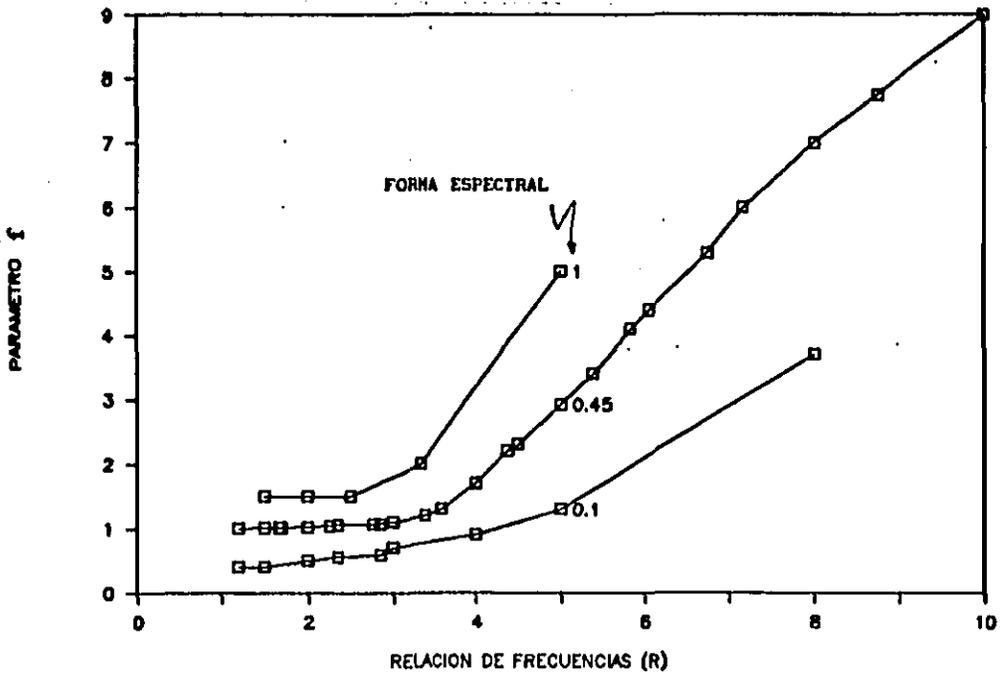


FIGURA 4.1f Parámetro de ajuste f

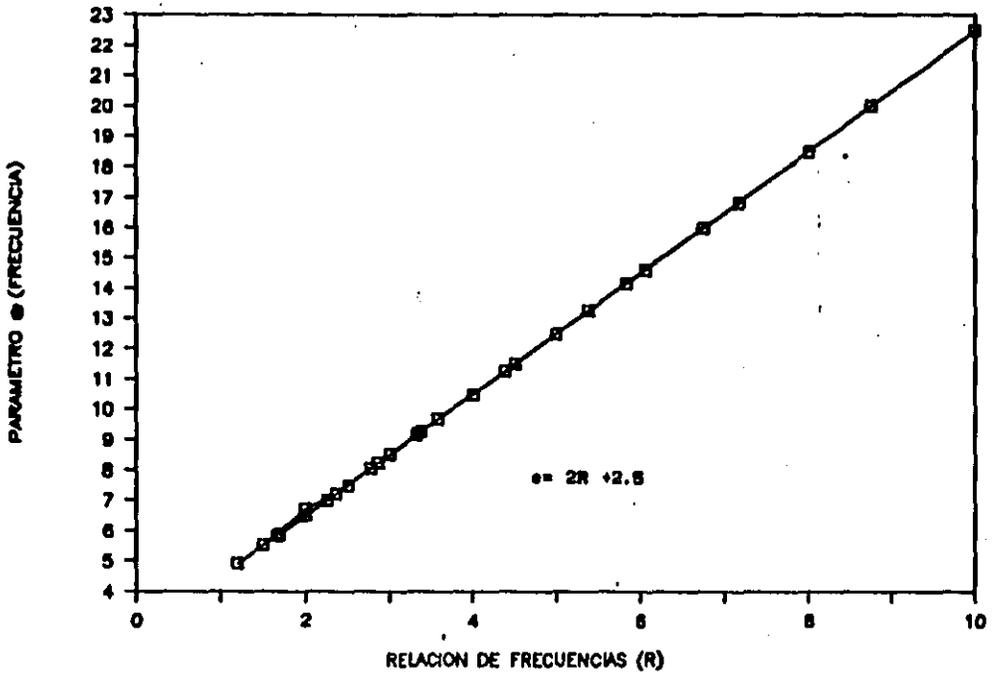


FIGURA 4.1e Parámetro de ajuste e

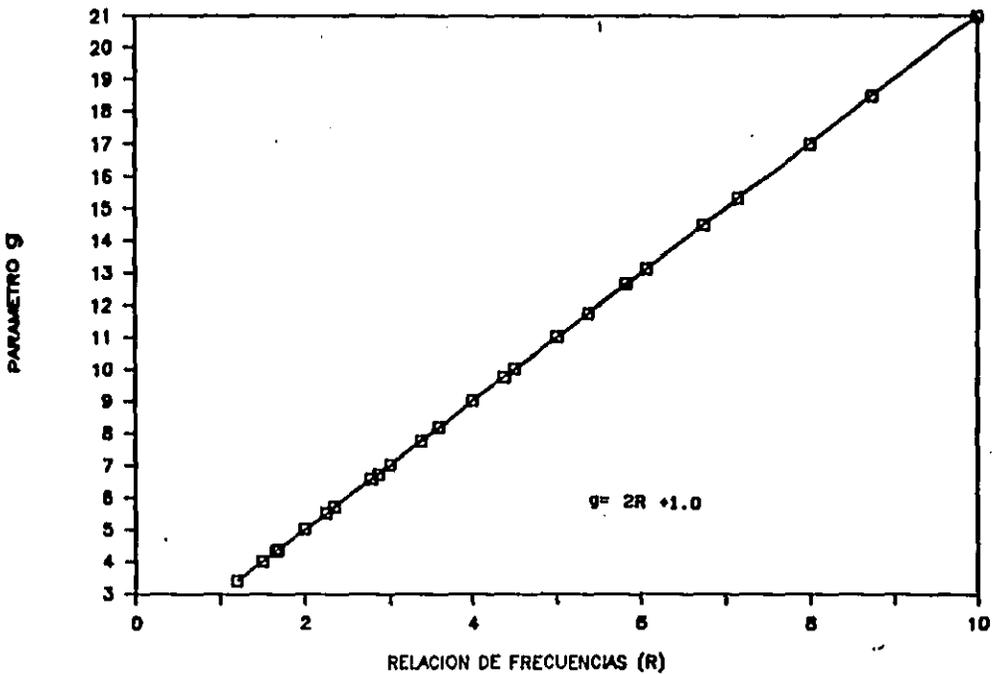


FIGURA 4.1.g Parámetro de ajuste g

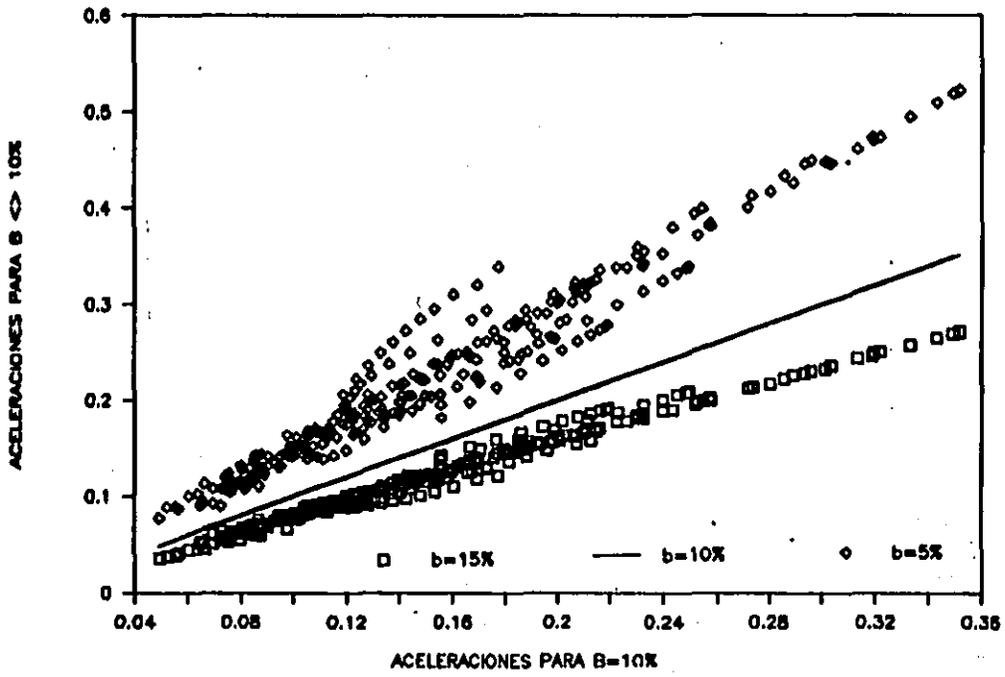


FIGURA 4.2.a Comparación de aceleraciones de amortiguamiento 10% respecto a las de 5% y 15% para alturas entre 0.3>Y>1.

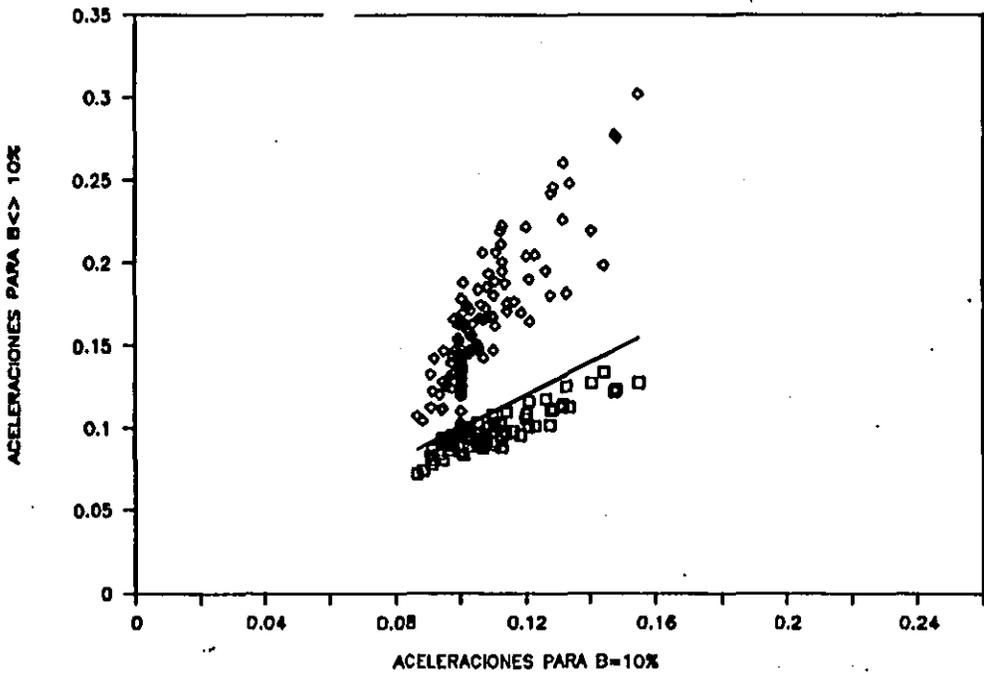


FIGURA 4.2.b Comparación de aceleraciones de amortiguamiento 10% respecto a las de 5% y 15% para alturas menores de 0.3Y.

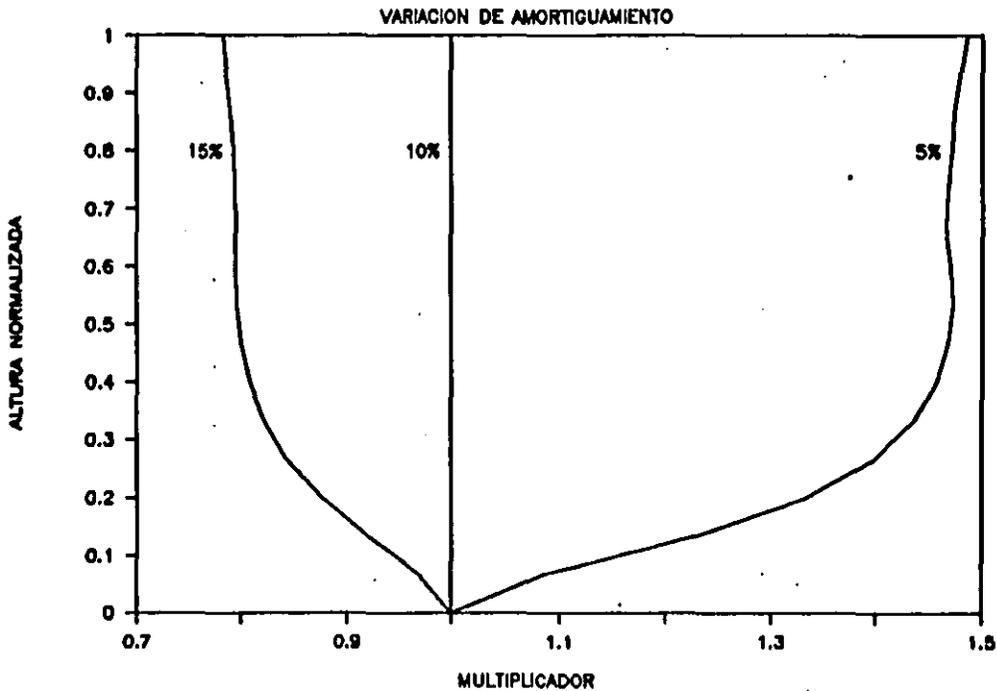


FIGURA 4.3.a Multiplicadores respecto a los resultados con amortiguamiento 10% para obtener resultados de 5 y 15%

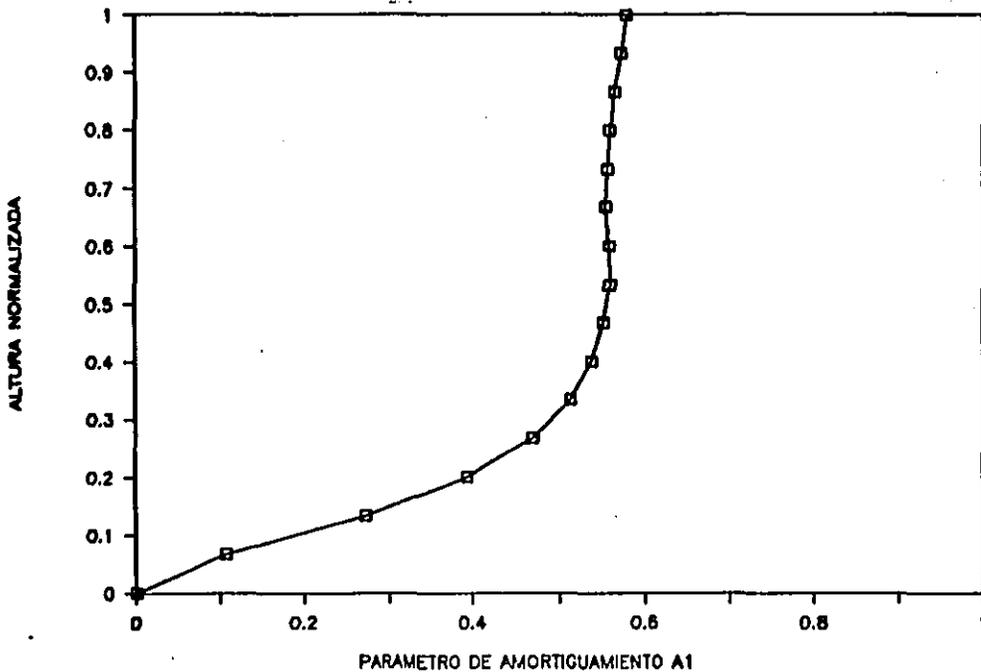


FIGURA 4.3.b Parámetro a_1 para obtener la variación por efecto del amortiguamiento (β)

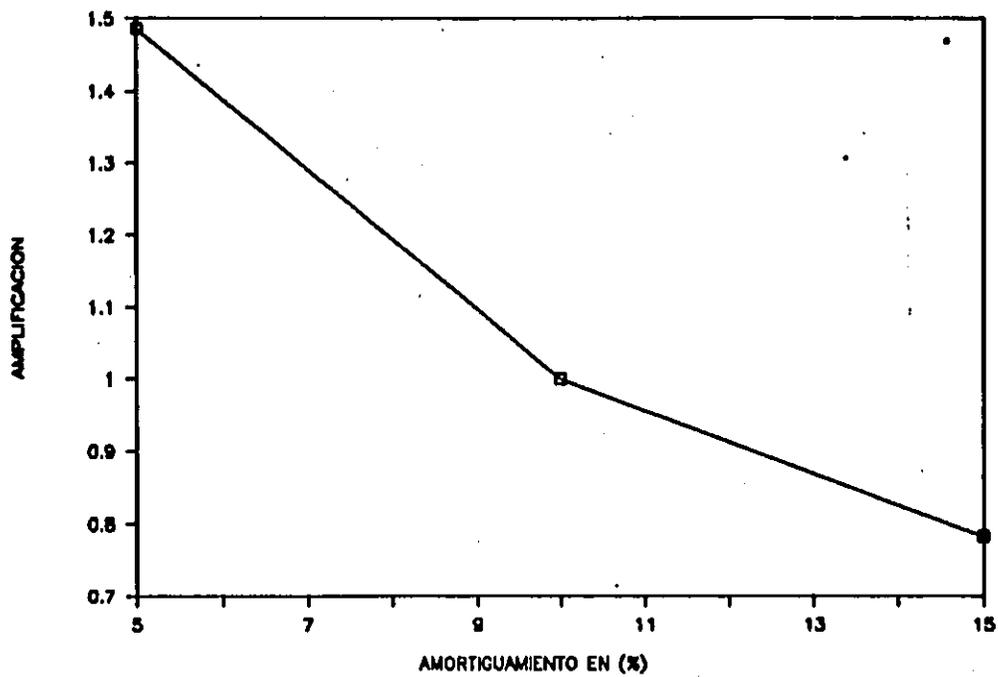


FIGURA 4.4.a. Representación de los factores de amortiguamiento en escala natural ($\gamma=1$).

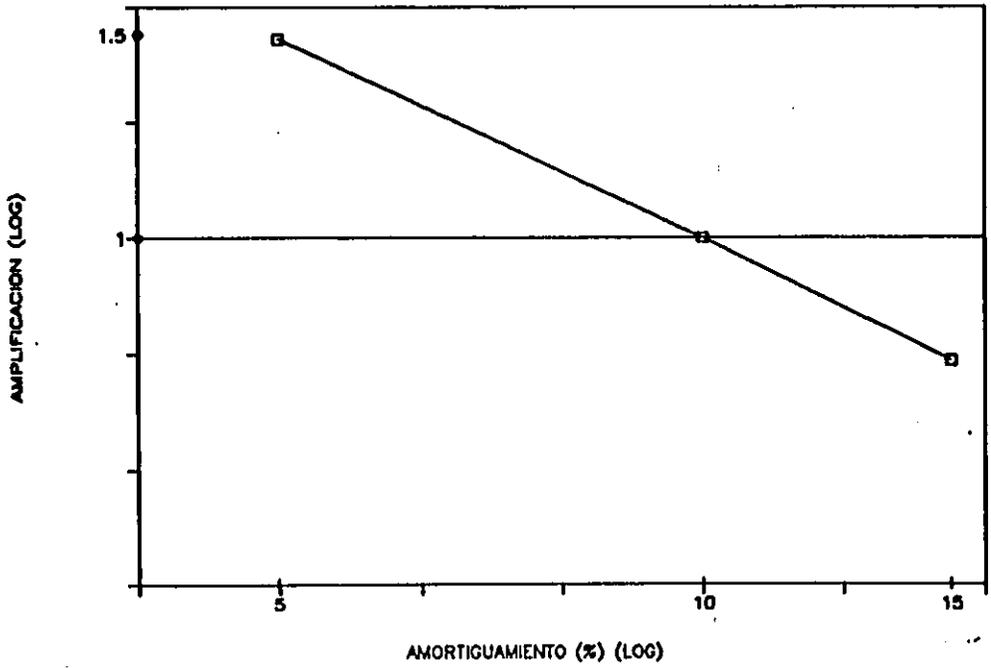


FIGURA 4.4.b. Representación de los factores de amortiguamiento en escala doble logarítmica ($\gamma=1$).

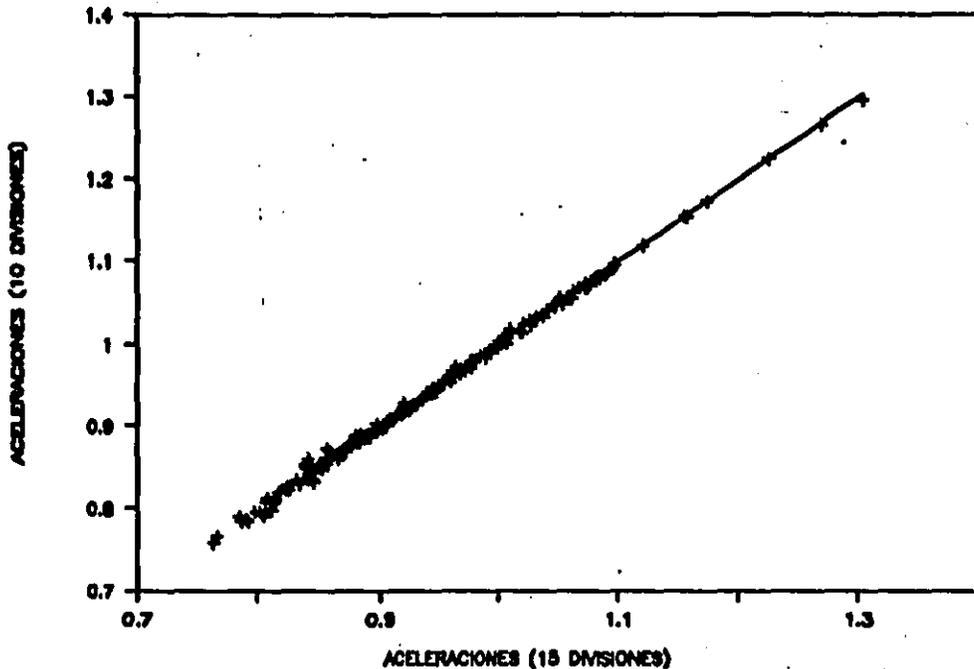


FIGURA 4.8.a Comparación de resultados con 5 y 15 divisiones en la corona (revisión del tamaño de los elementos).

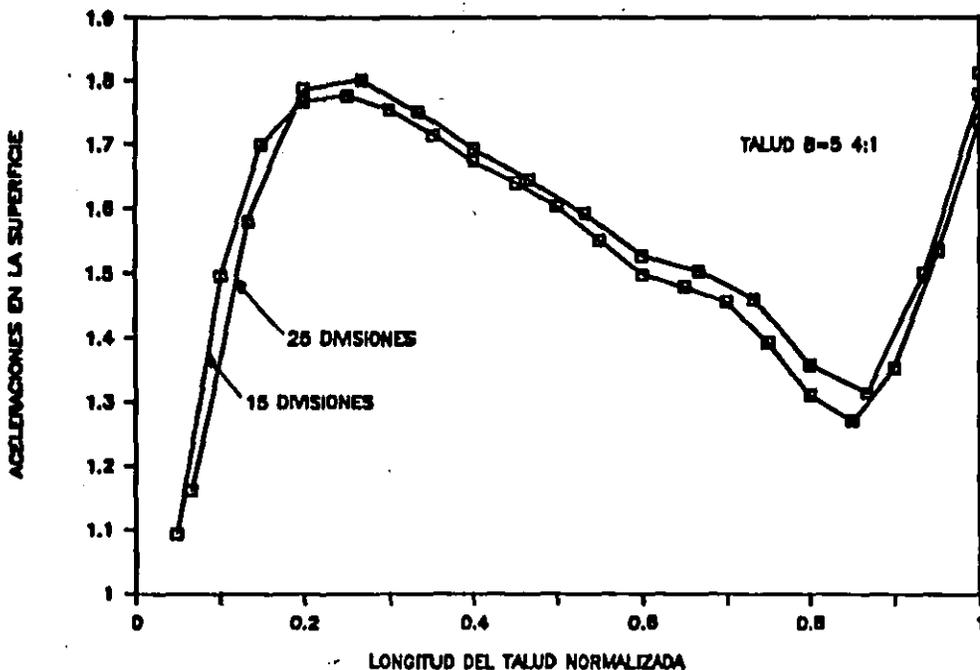


FIGURA 4.8.b Comparación de resultados con 15 y 25 divisiones en la pendiente (revisión del tamaño de los elementos).

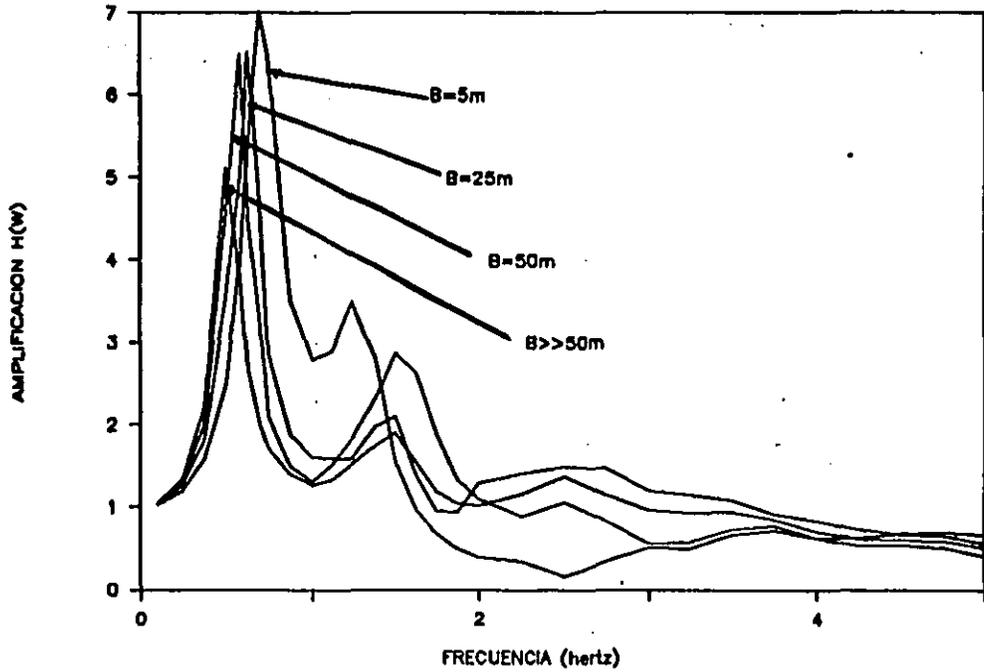


FIGURA 4.6.a Variación de la función de amplificación por cambios del ancho de corona.

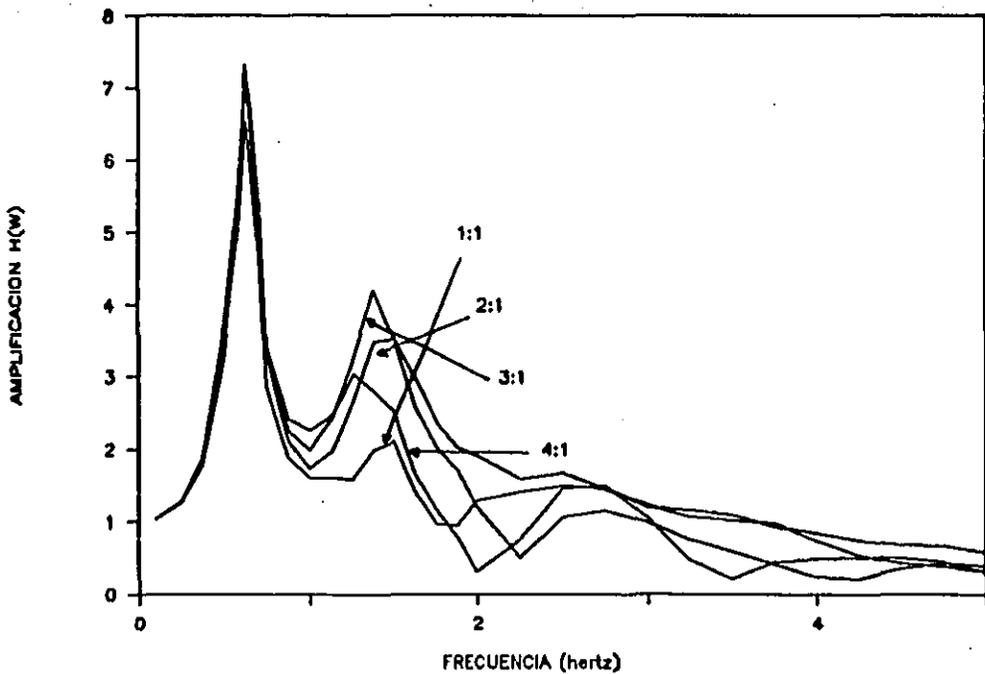


FIGURA 4.6.b Variación de la función de amplificación por cambios de la pendiente del talud.

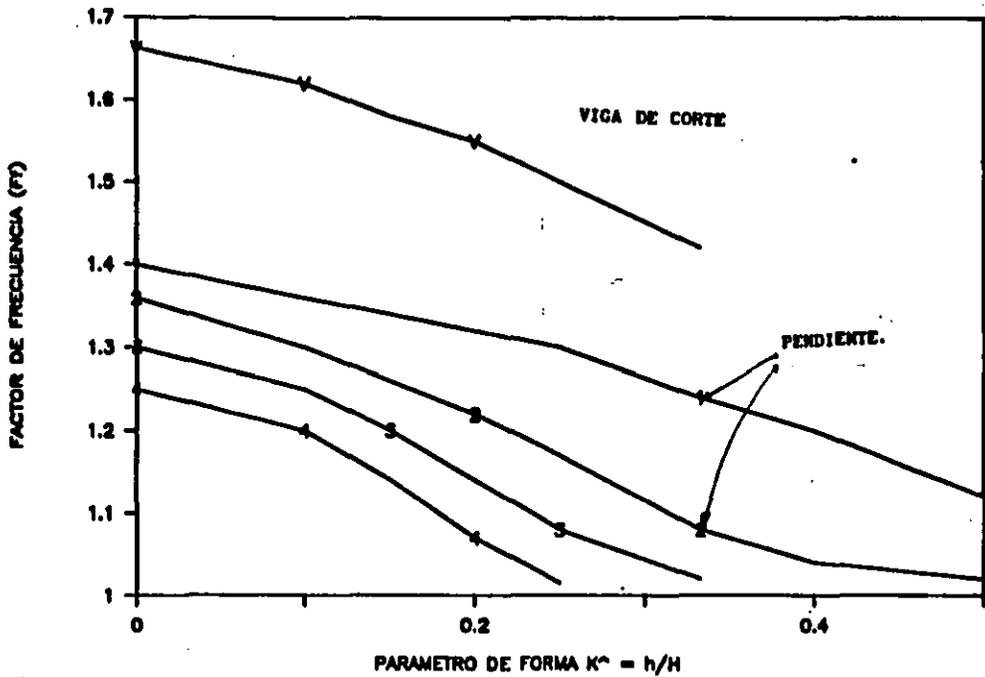


FIGURA 4.7.a Factores de correccion de la frecuencia de campo libre variación con la pendiente (modo 1)

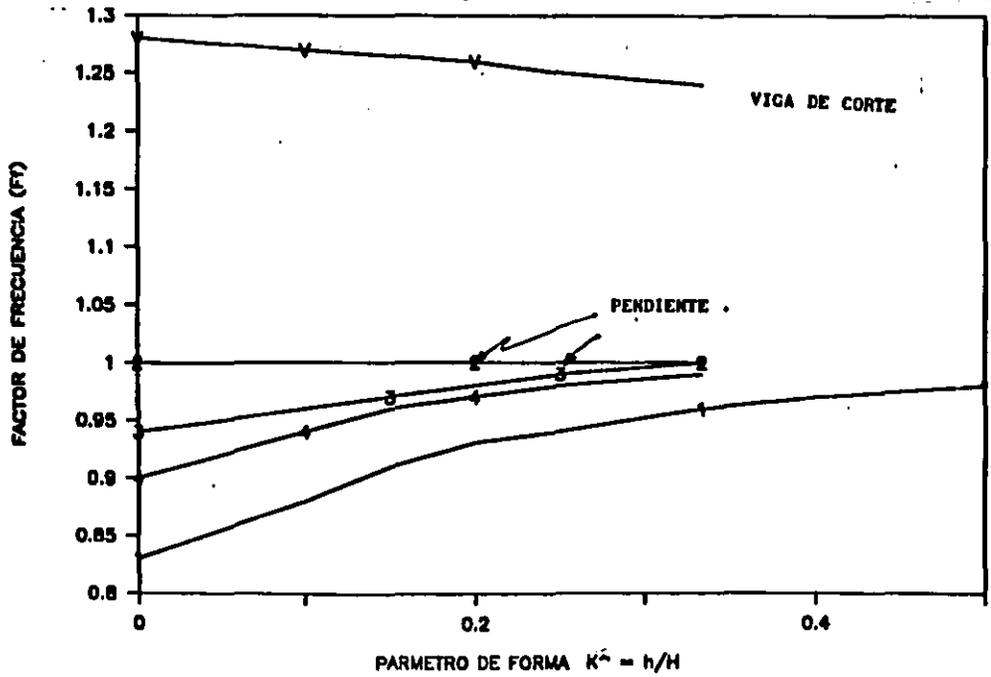


FIGURA 4.7.b Factores de correccion de la frecuencia de campo libre variación con la pendiente (modo 2)

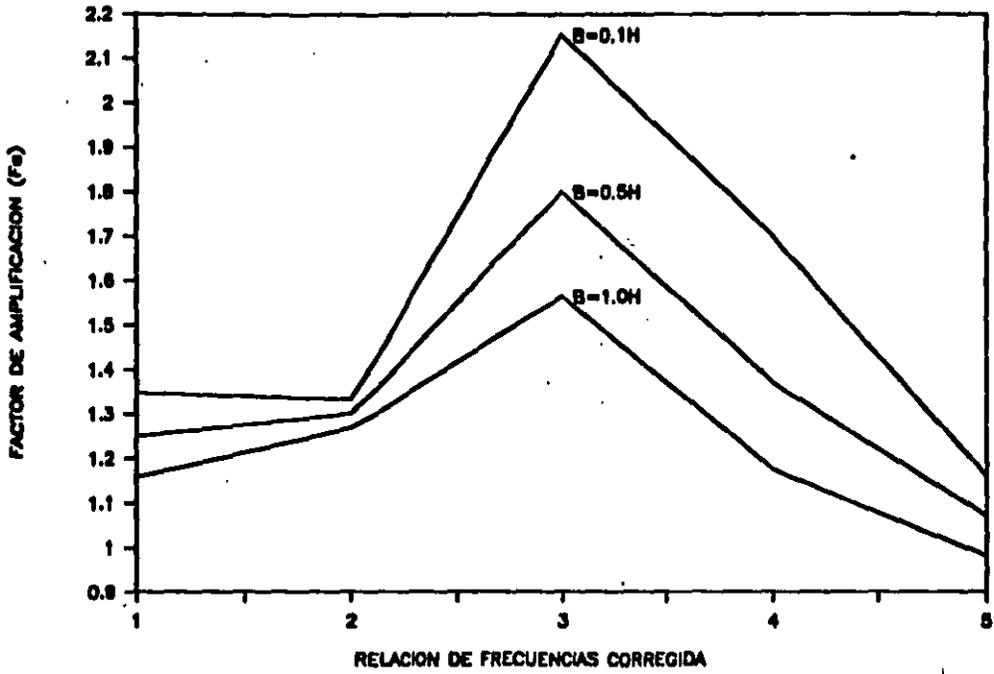
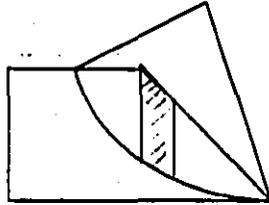
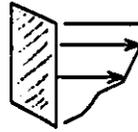


FIGURA 4.8 Factor de amplificación en la corona del terraplén.



ANALISIS POR SECCIONES



VARIACION DE COEFICIENTE SISMICO

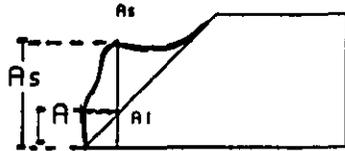


FIGURA 4.9 FACTOR DE AMPLIFICACION EN LA SUPERFICIE

$$F_s = A_s / A_l$$

A_s = ACELERACION EN LA SUPERFICIE DEL TALUD

A_l = ACELERACION EN EL MISMO PUNTO, CONSIDERANDO VARIACION LINEAL DEL PIE A LA CORONA.

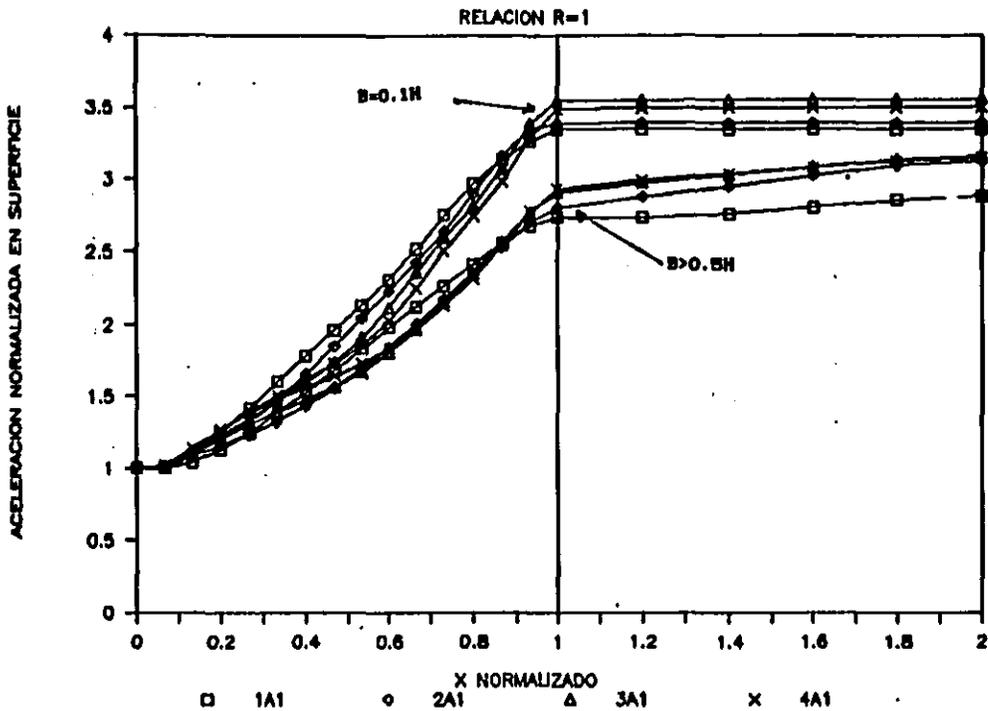


FIGURA 4.10.a Aceleraciones en la superficie según geometría. R=1

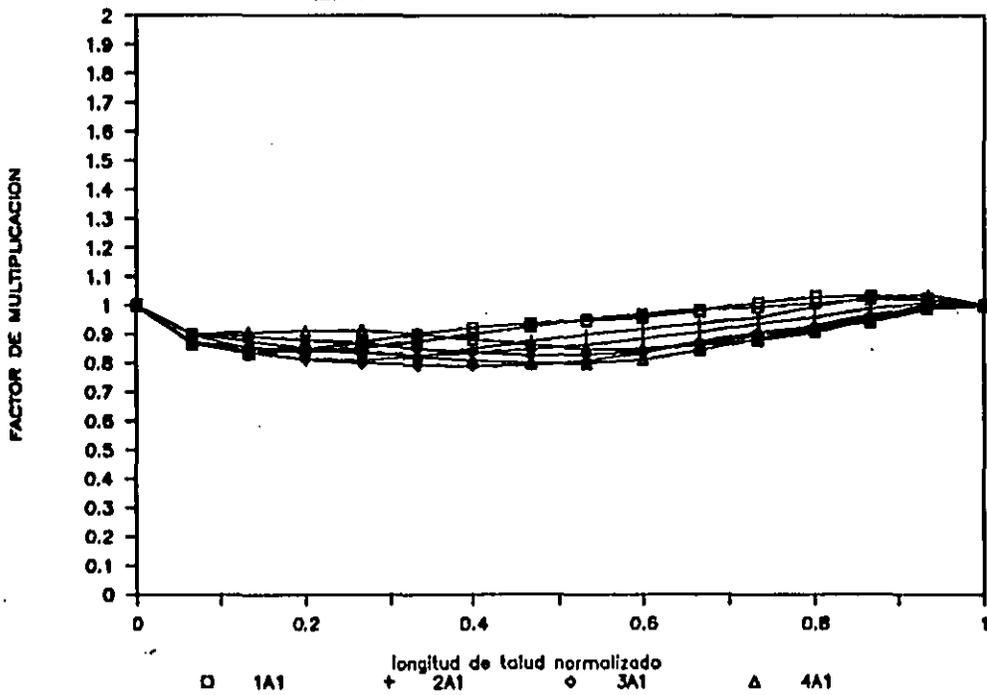


FIGURA 4.10.b Factor de amplificación en la superficie .R=1

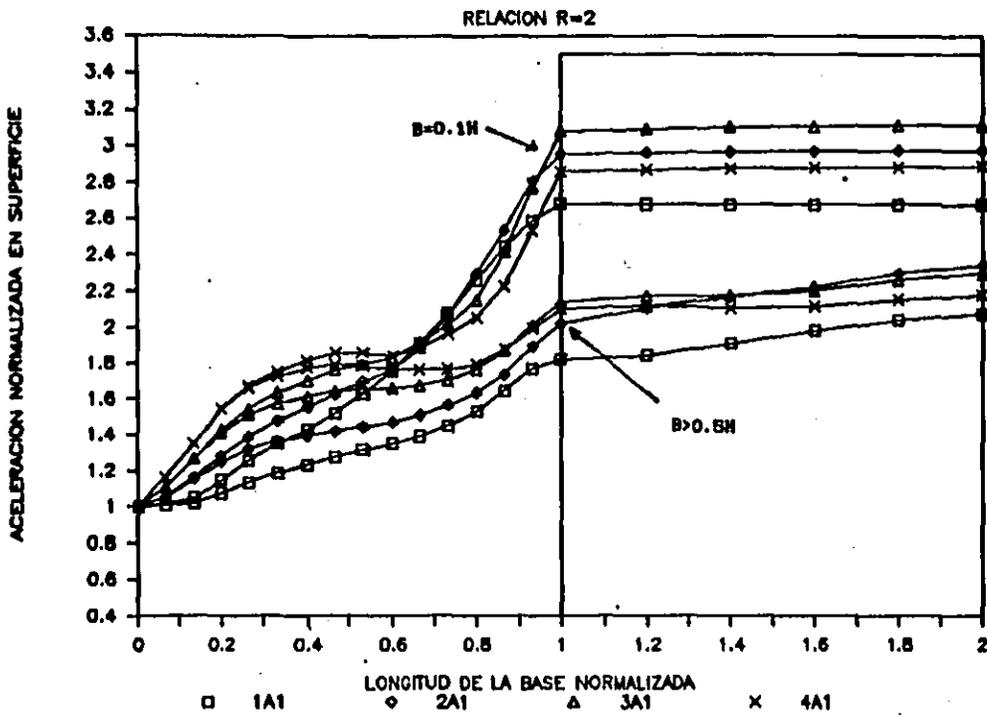


FIGURA 4.11.a Aceleraciones en la superficie según geometría. R=2

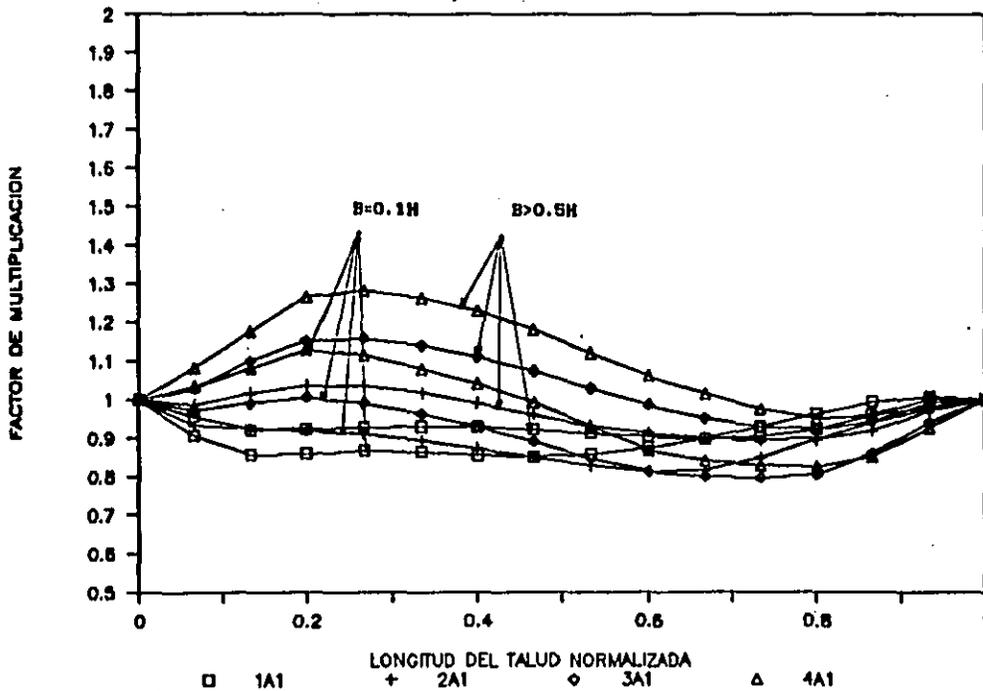


FIGURA 4.11.b Factor de amplificación en la superficie .R=2

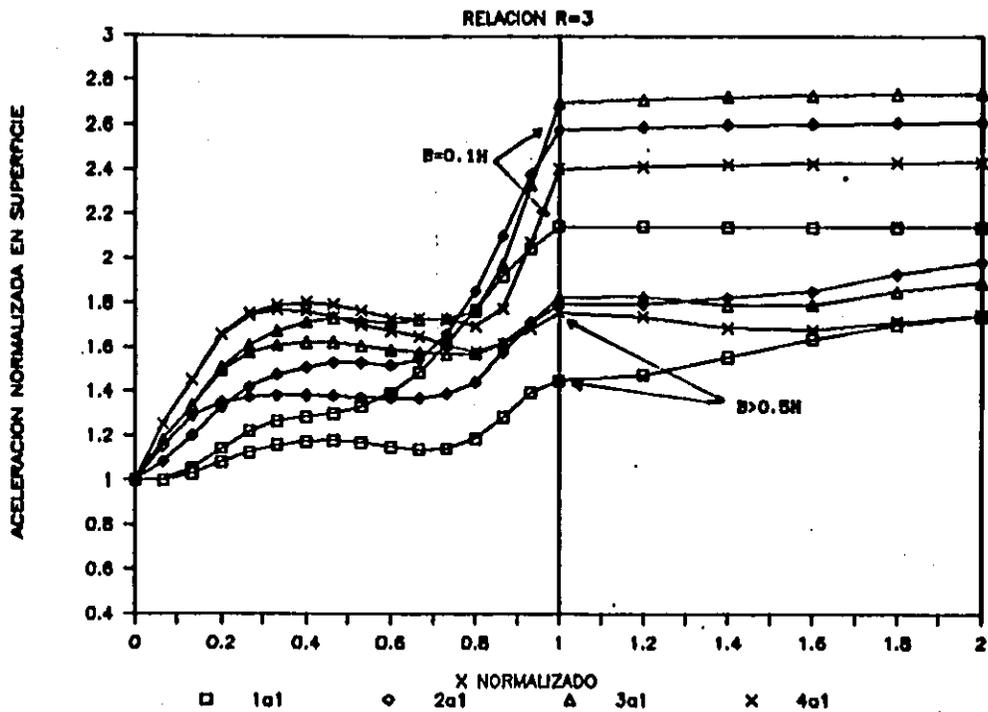


FIGURA 4.12.a Aceleraciones en la superficie según geometría. R=3

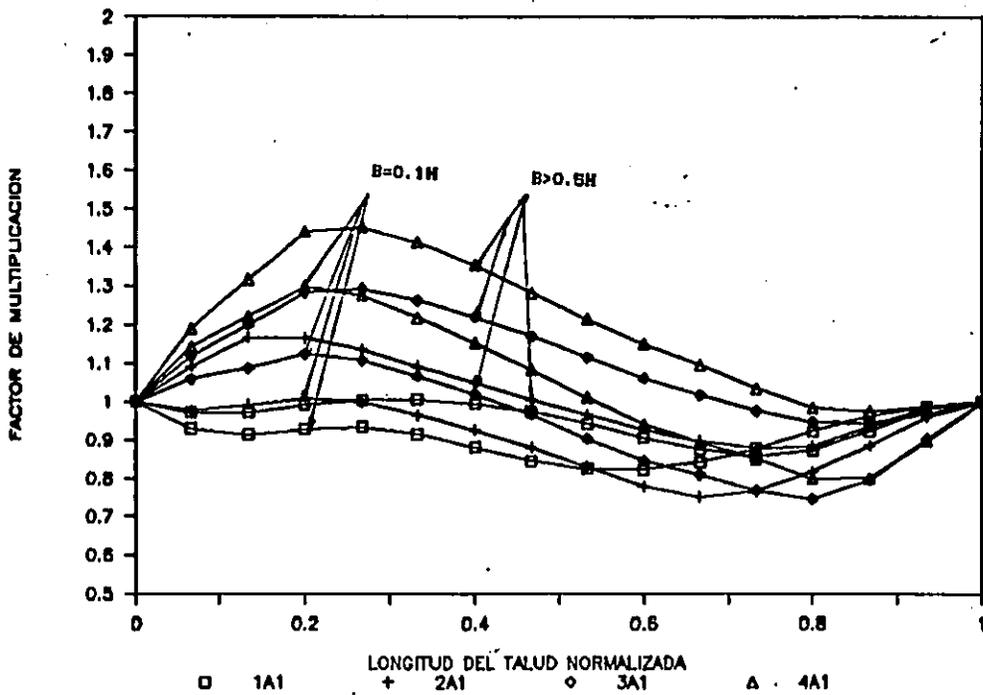


FIGURA 4.12.b Factor de amplificación en la superficie .R=3

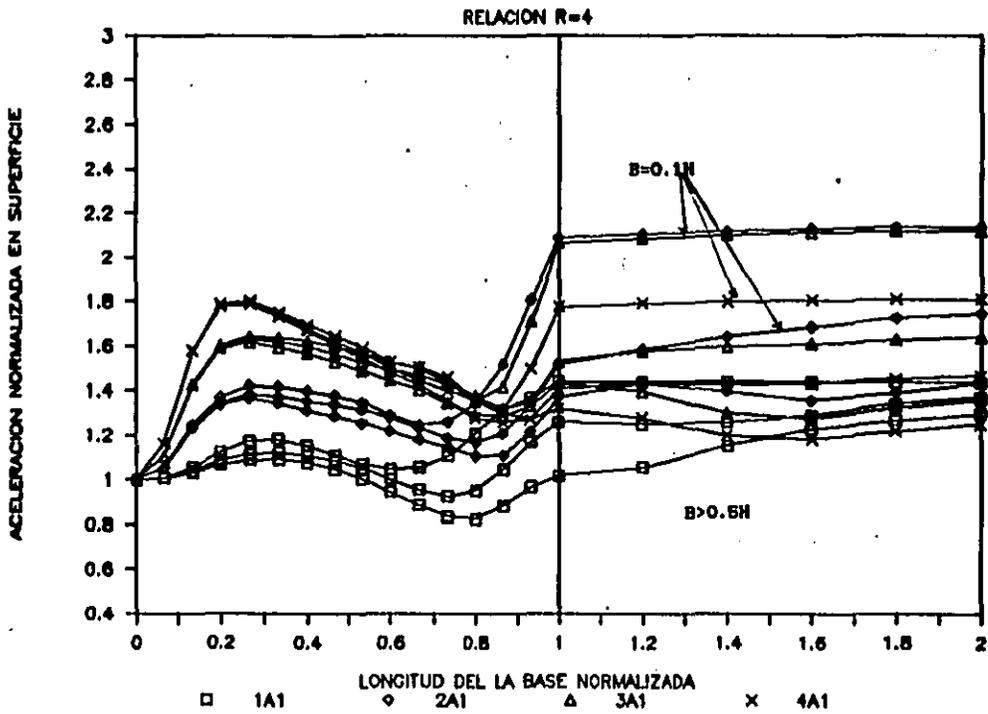


FIGURA 4.13.a Aceleraciones en la superficie según geometría. R=4

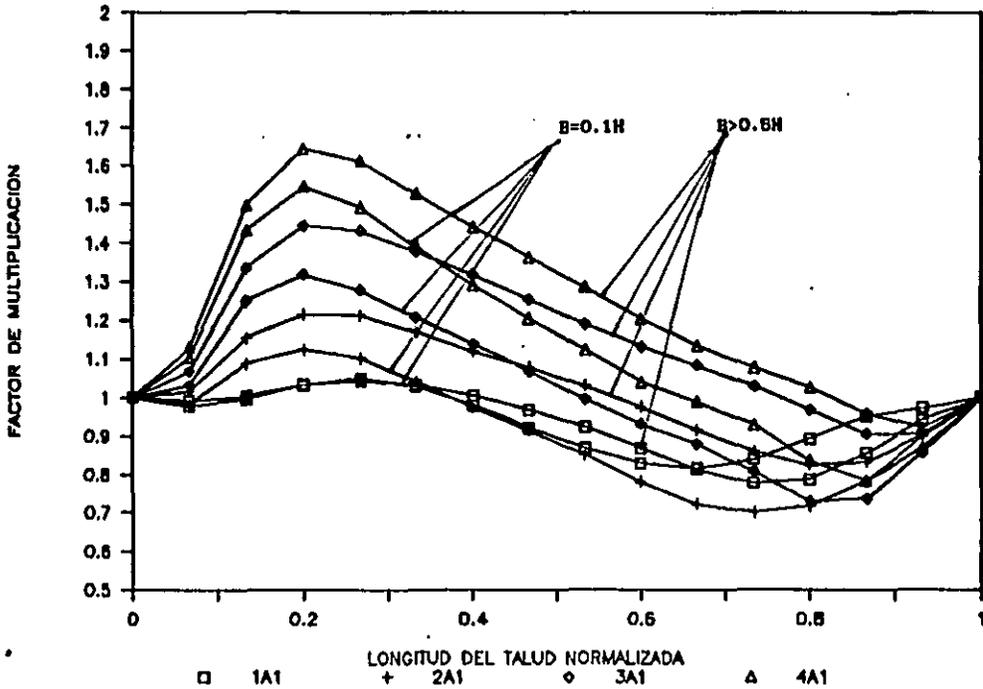


FIGURA 4.13.b Factor de amplificación el la superficie .R=4

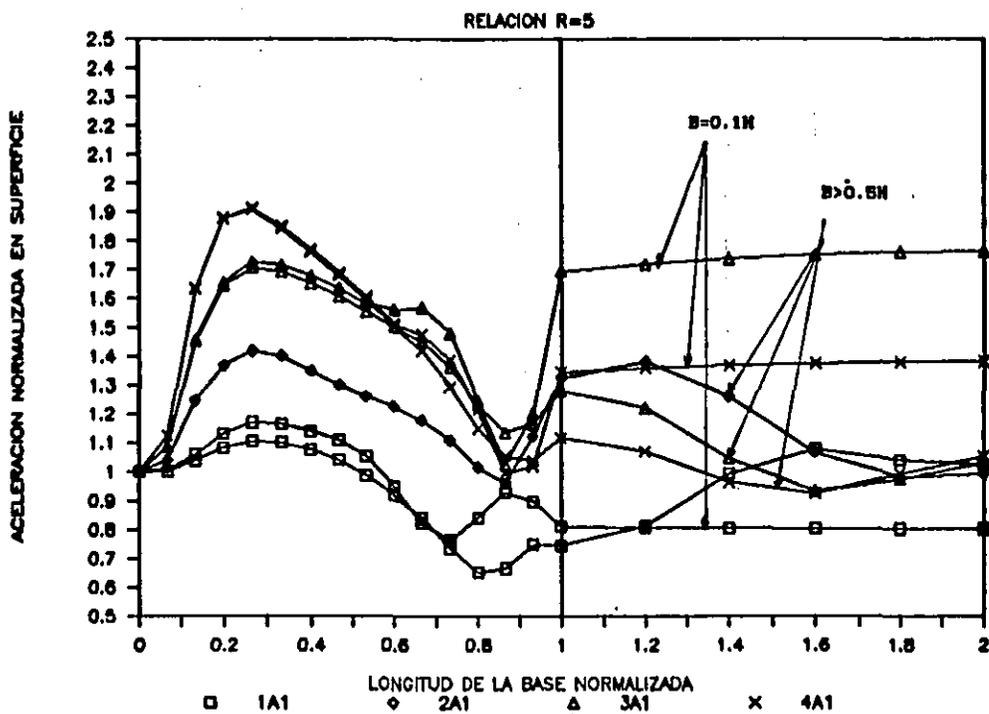


FIGURA 4.14.a Aceleraciones en la superficie según geometría. R=5

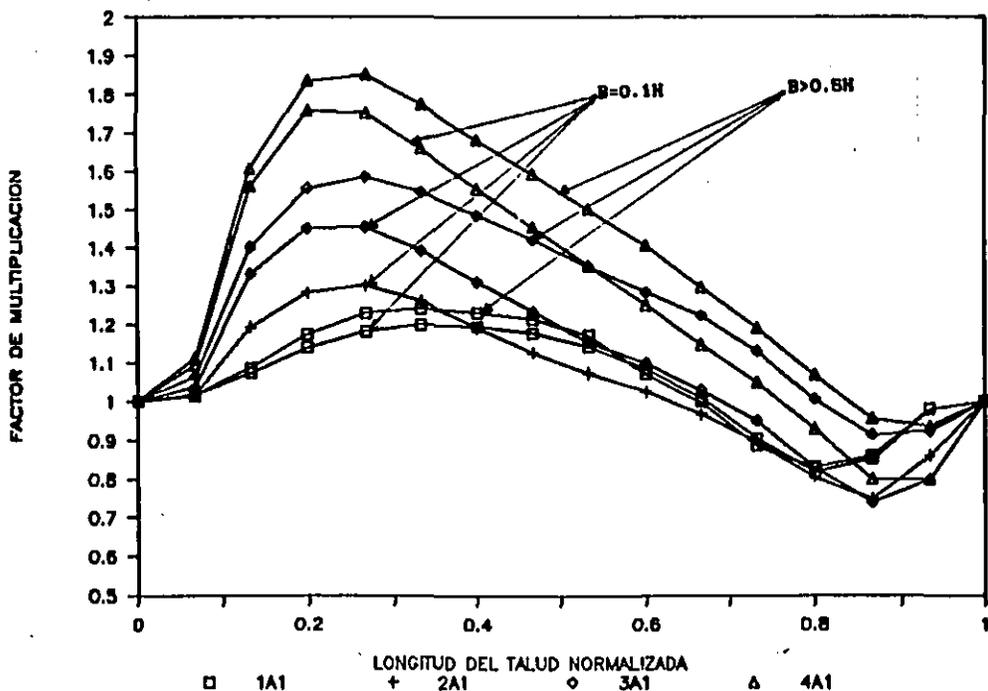


FIGURA 4.14.b Factor de amplificación en la superficie .R=5

VARIACION DEL ESPECTRO

TALUD B=5m 2:1 R=2

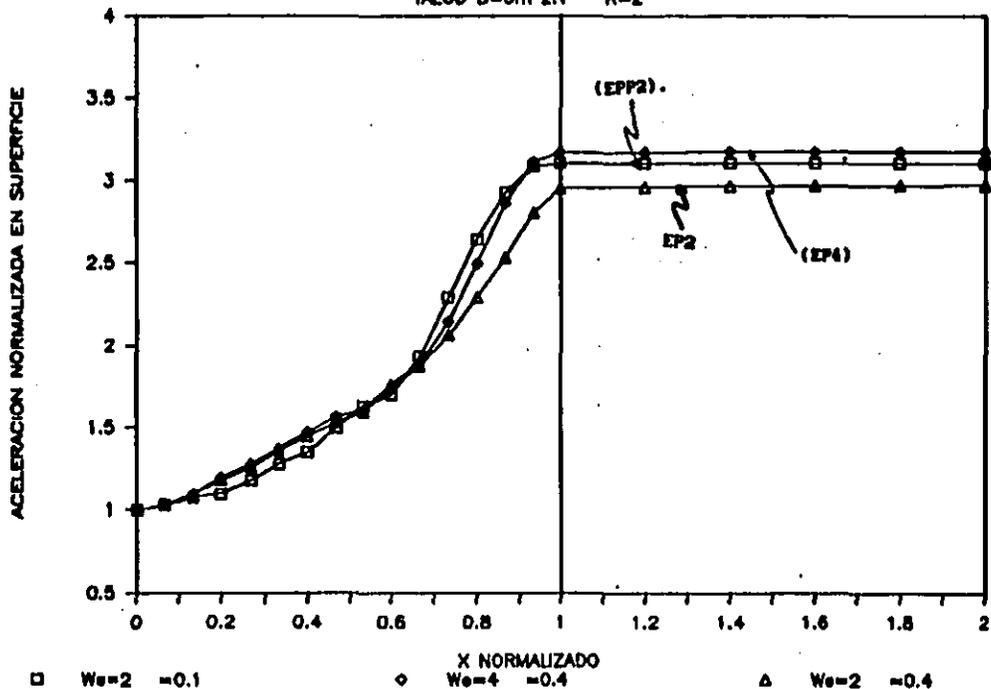


FIGURA 4.18.a Efecto en la variación de espectro en la superficie.

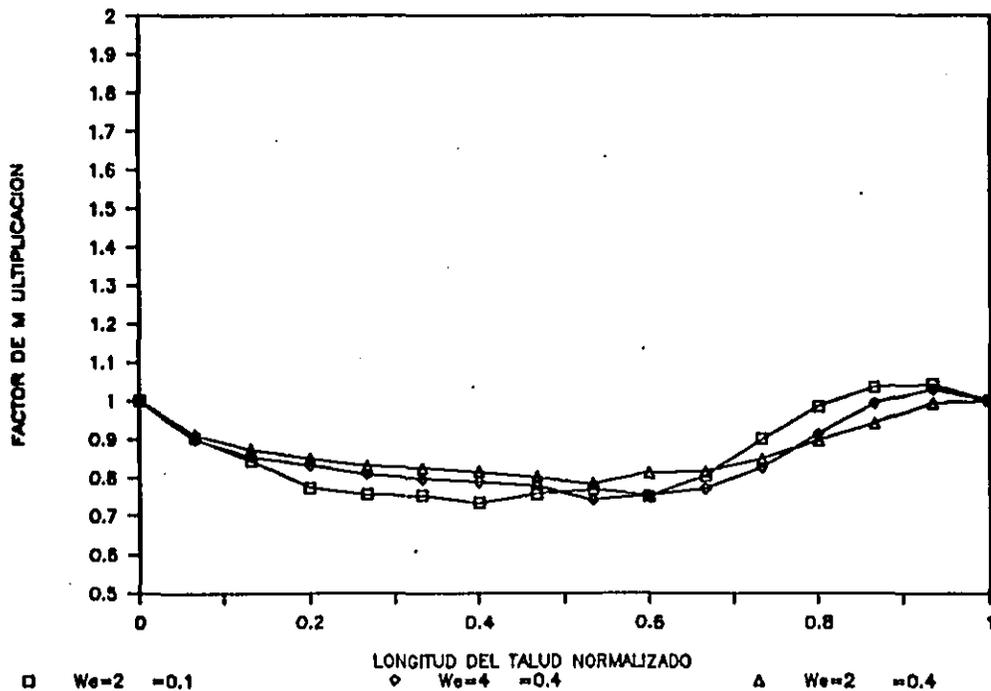


FIGURA 4.18.b Efecto en la variación del espectro en el factor de amplificación de superficie (F_s)

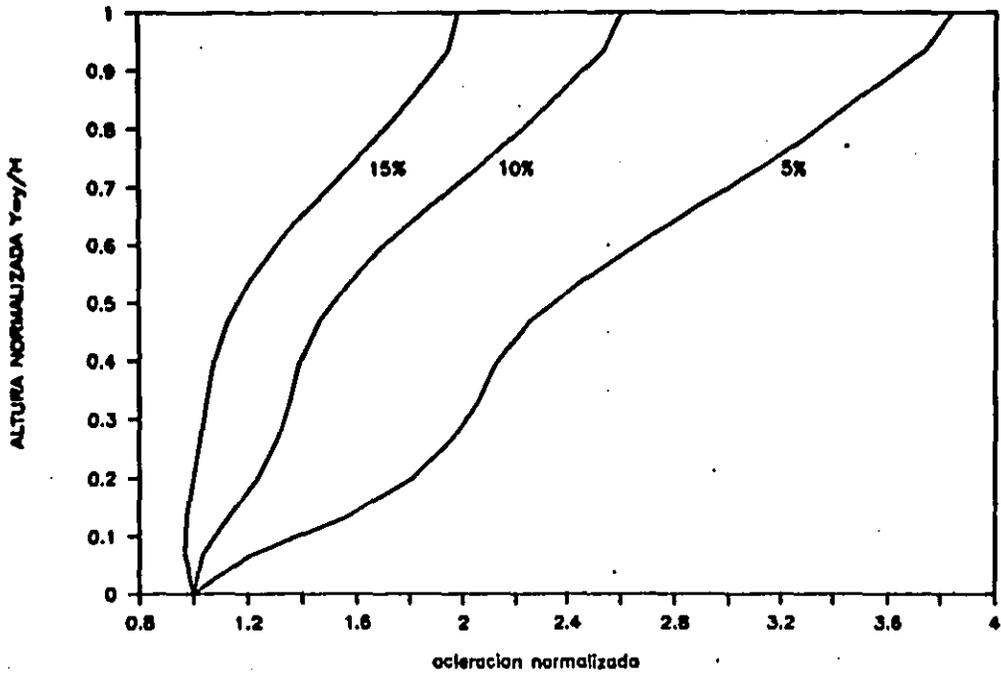


FIGURA 4.18.a Efecto en la variación del amortiguamiento en la sección central del terraplén (Talud 2:1 B=5m).

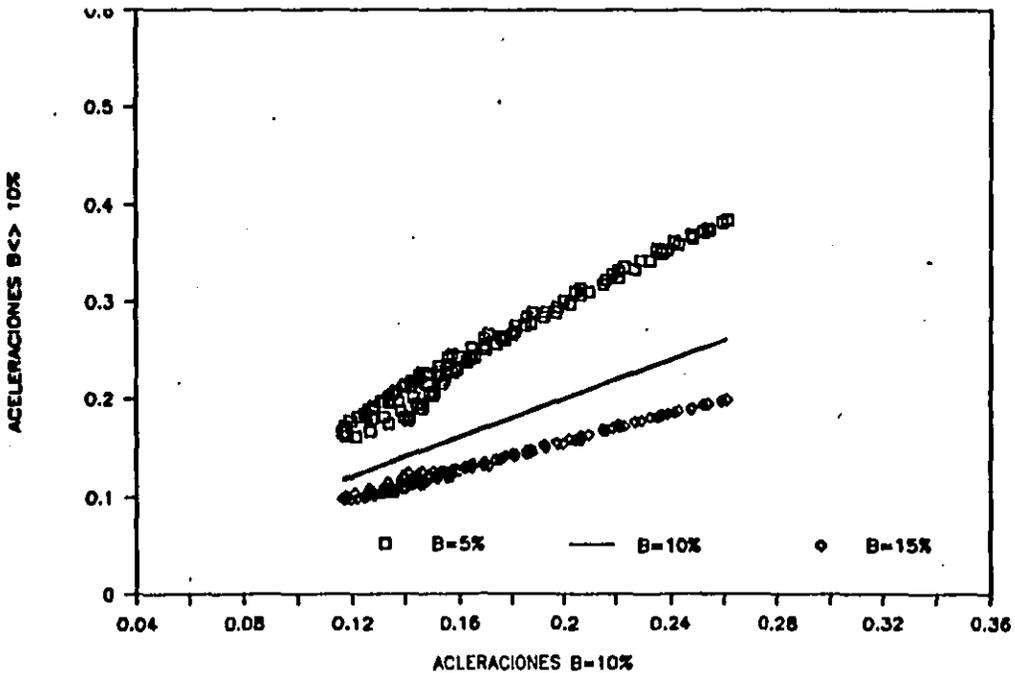


FIGURA 4.18.b Comparación de aceleraciones de amortiguamiento 10% respecto a las de 5% y 15% para alturas entre 0.3 > Y > 1.0.

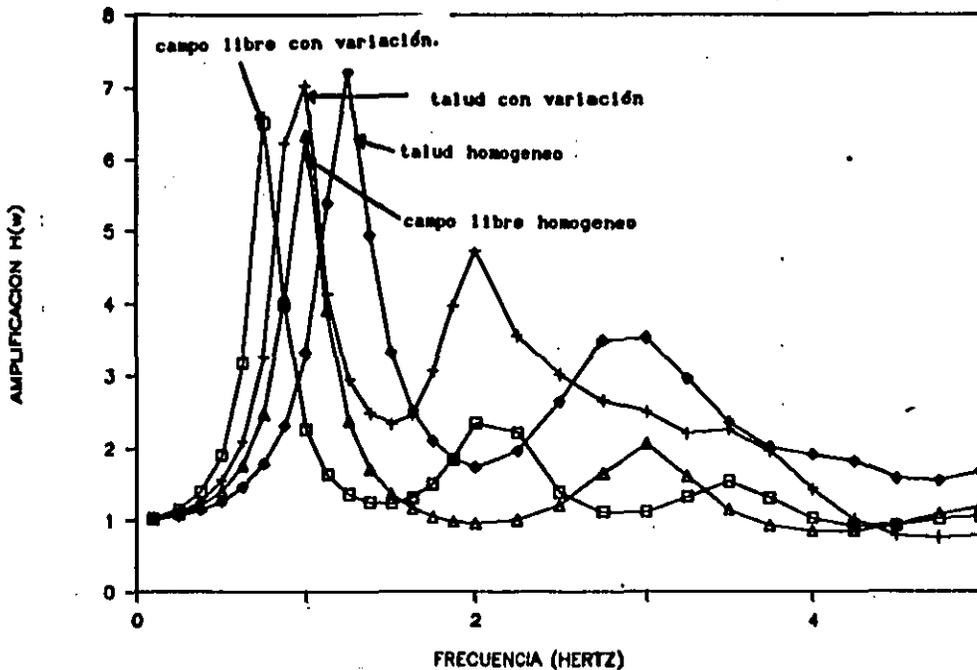


FIGURA 4.17.a cambio de la función de amplificación con la variación de la rigidez con la profundidad.

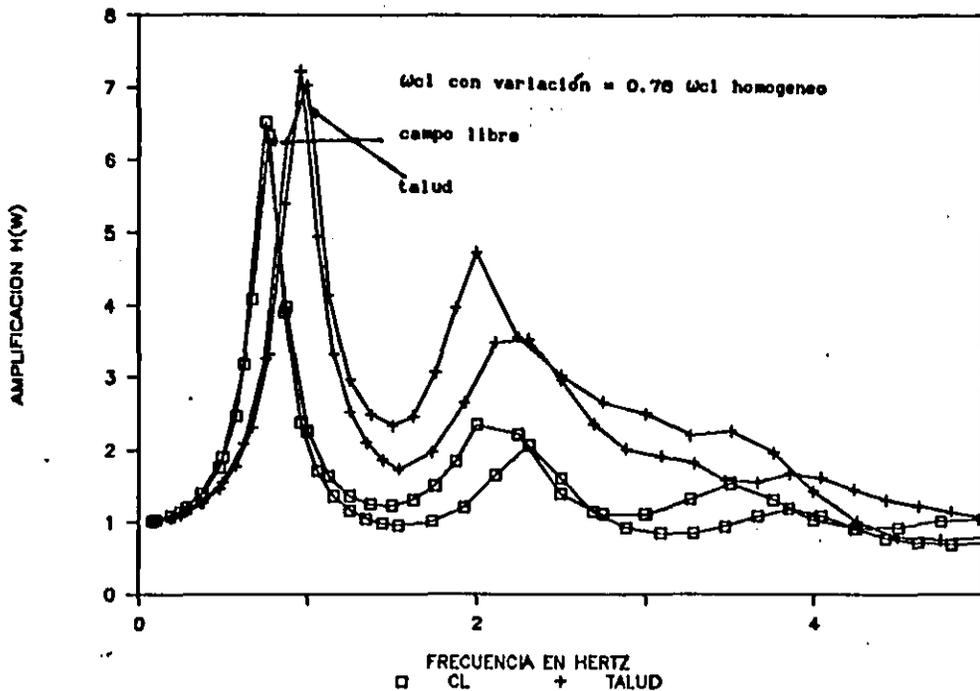


FIGURA 4.17.b cambio de la función de amplificación con la variación de la rigidez con la profundidad.

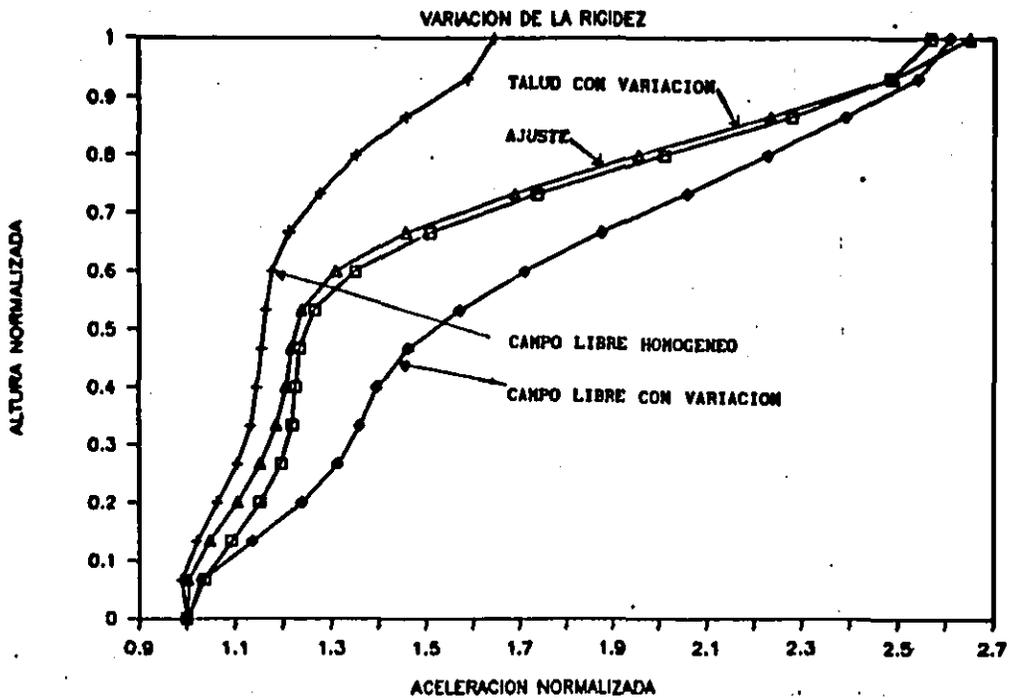


FIGURA 4.18.a Cambio de las aceleraciones maximas con la variación de la rigidez con la profundidad.

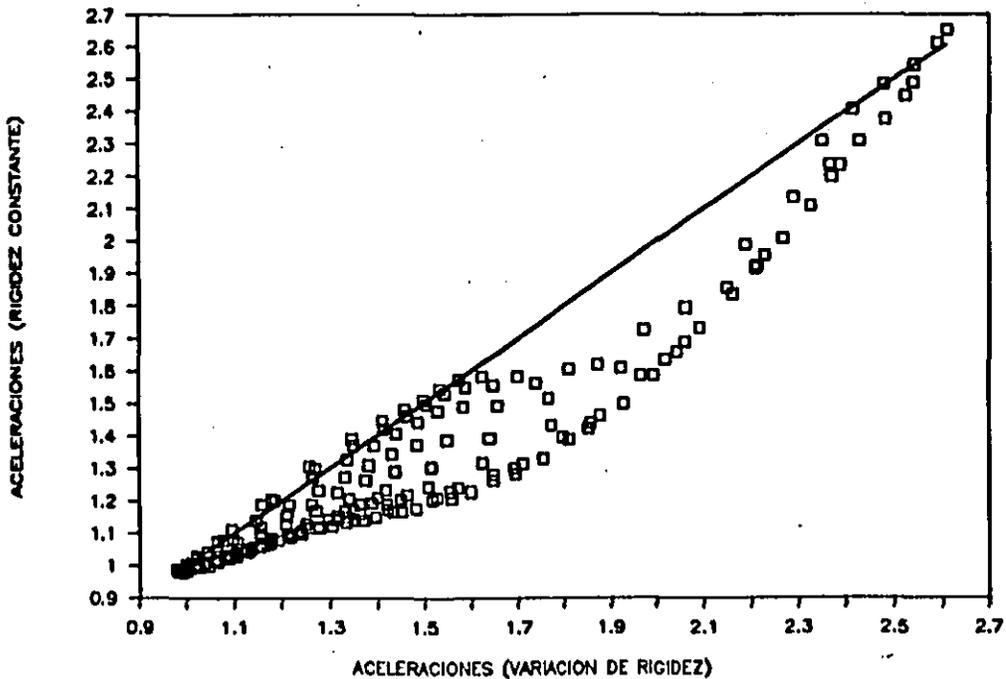


FIGURA 4.18.b Comparación de coeficientes sísmicos del talud con rigidez variable y talud con rigidez constante.

COMPARACION DE RESULTADOS

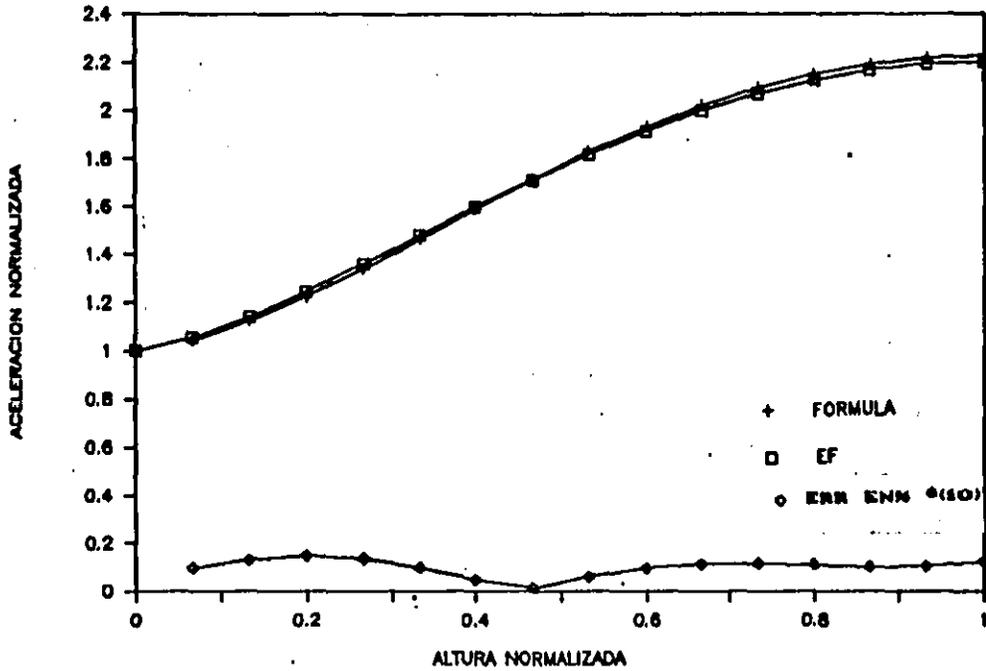


FIGURA 4.18a Comparación de coeficientes sísmicos (método simplificado Vs E.F) caso 1 en campo libre (R=0.4 EP2).

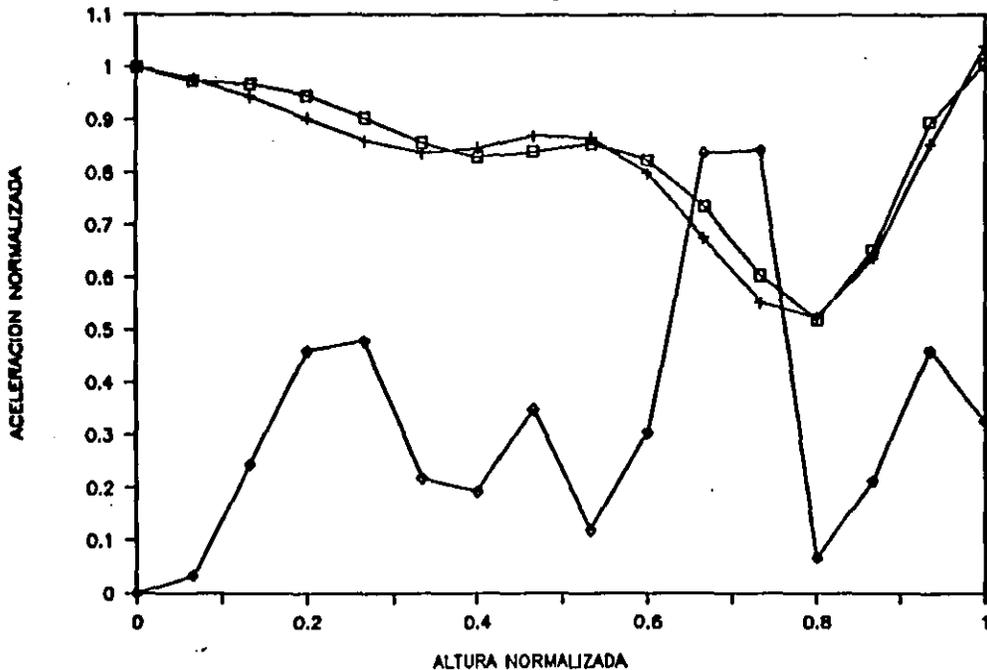


FIGURA 4.18b Comparación de coeficientes sísmicos (método simplificado Vs E.F) caso 2 en campo libre (R=4.4 EP4)

COMPARACION DE RESULTADOS

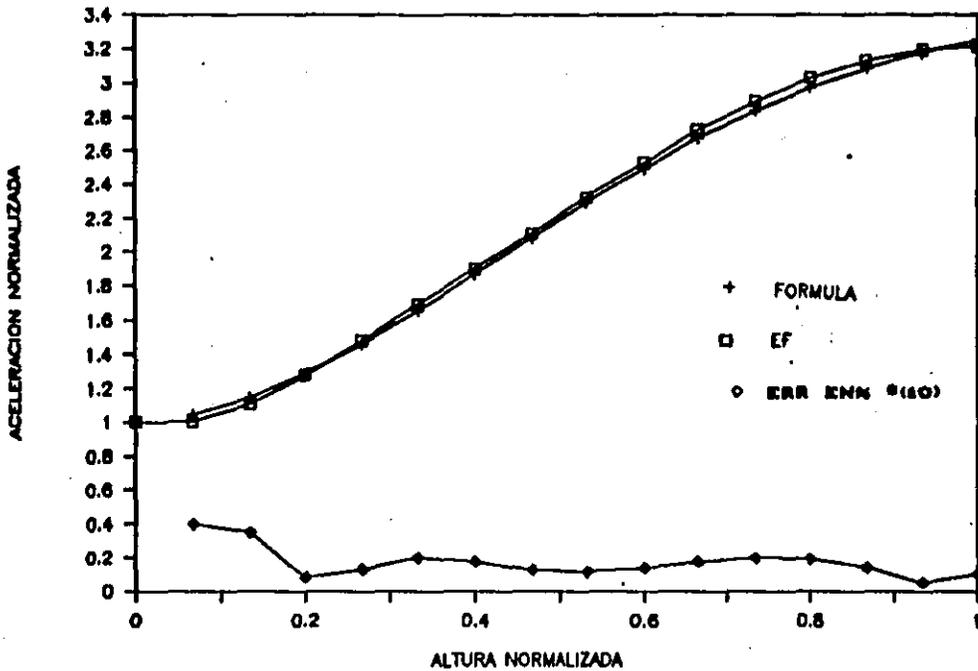


FIGURA 4.18c Comparación de coeficientes sísmicos (método simplificado Vs E.F) caso 3 en campo libre ($R=1.4 EP4$)

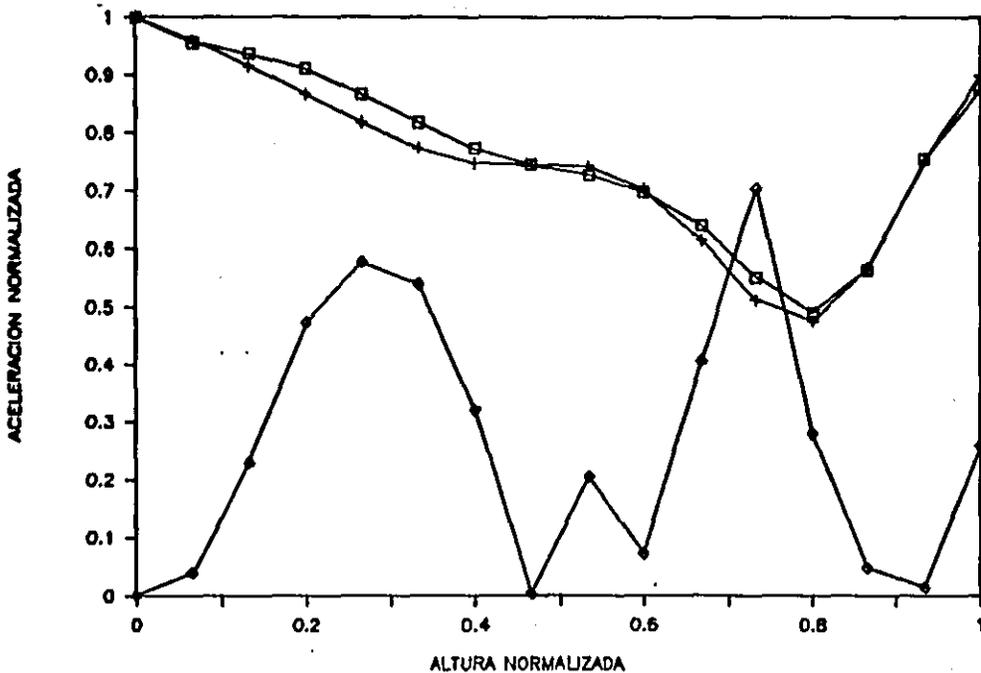


FIGURA 4.18d Comparación de coeficientes sísmicos (método simplificado Vs E.F) caso 4 en campo libre ($R=5 EP3$)

COMPARACION DE RESULTADOS

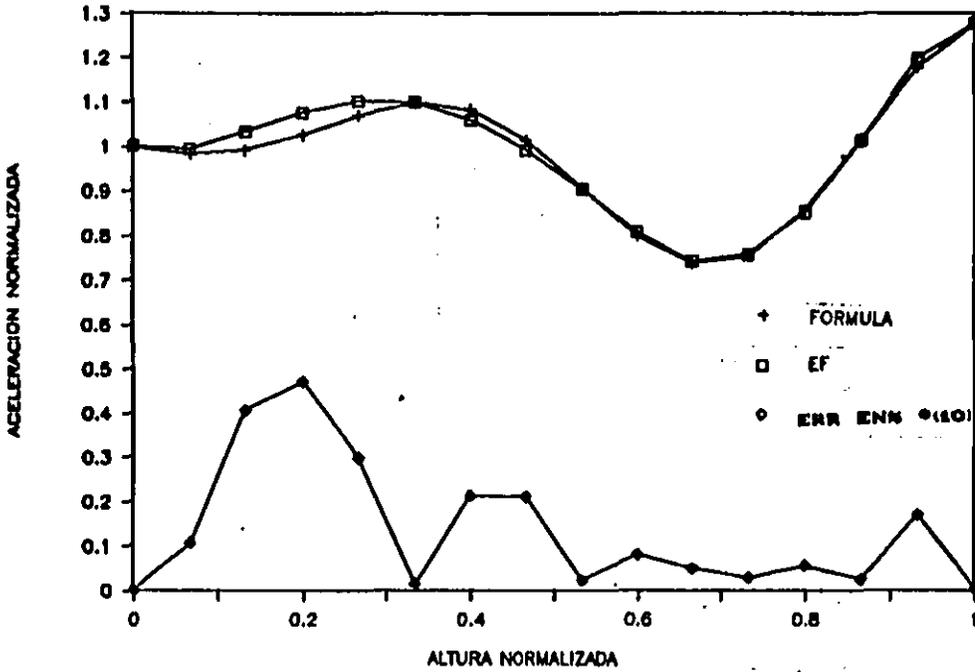


FIGURA 4.19a Comparación de coeficientes sísmicos (método simplificado Vs E.F) caso 5 en campo libre (R=3 EP3)

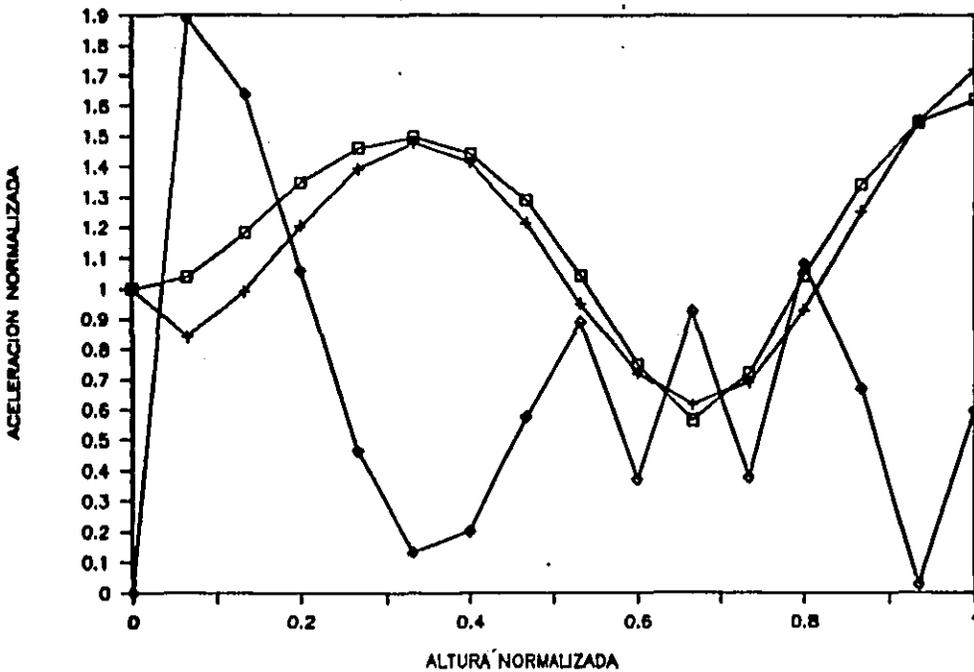


FIGURA 4.19b Comparación de coeficientes sísmicos (método simplificado Vs E.F) caso 6 en campo libre (R=3 EPP2)

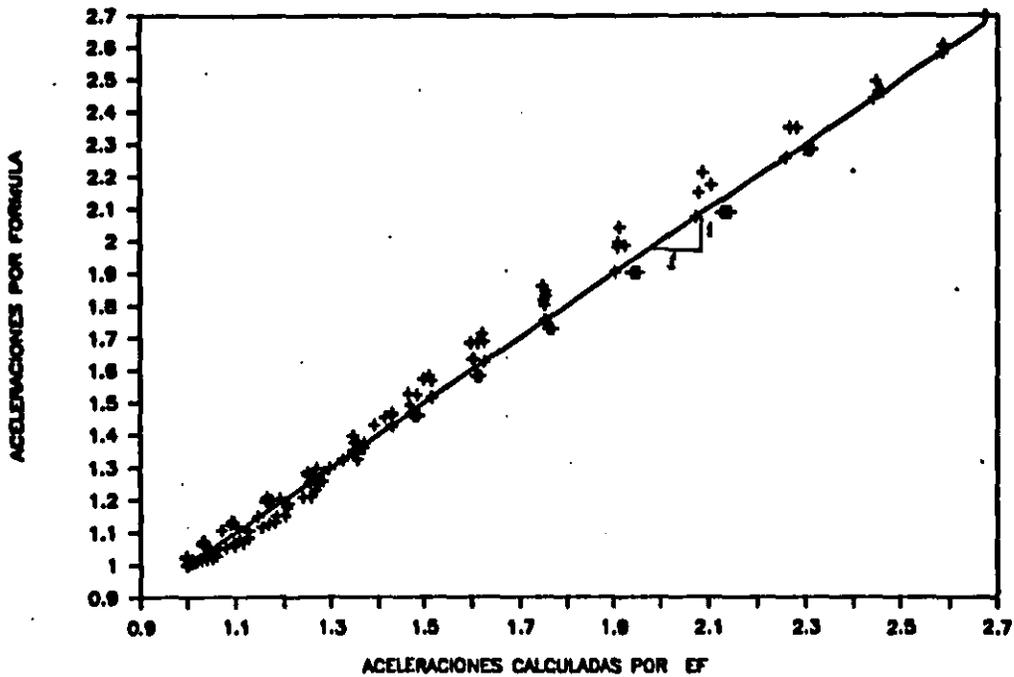


FIGURA 4.20a Comparación de coeficientes sísmicos (método simplificado Vs E.F) caso 1 en taludes.(TALUD 1:1 B=5 R=2)

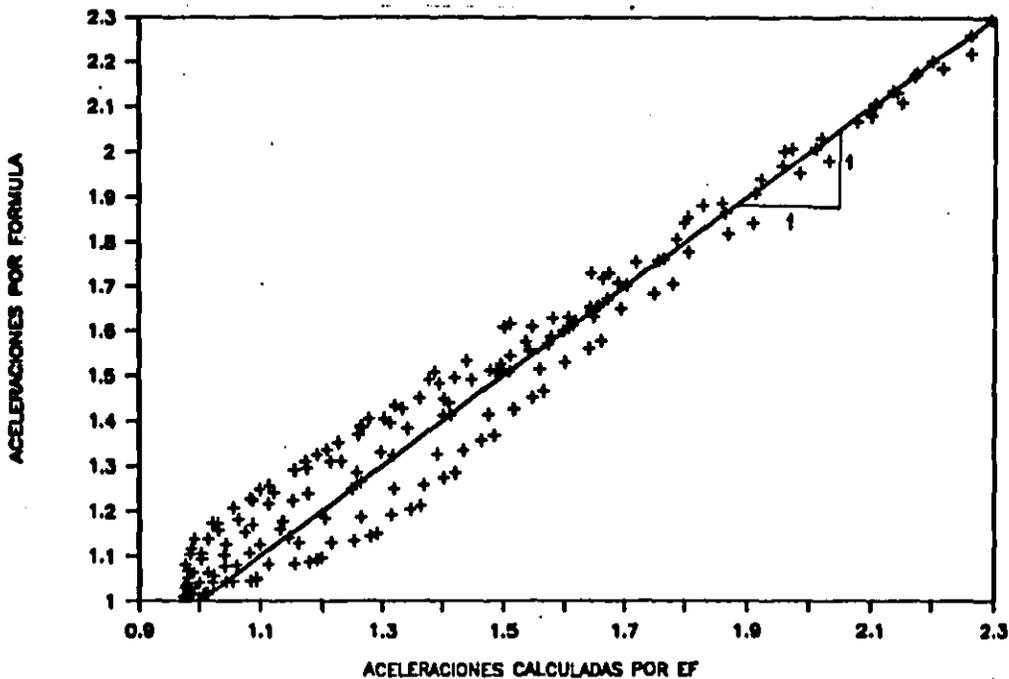


FIGURA 4.20b Comparación de coeficientes sísmicos (método simplificado Vs E.F) caso 2 en taludes.(TALUD 3:1 B=5 R=2)

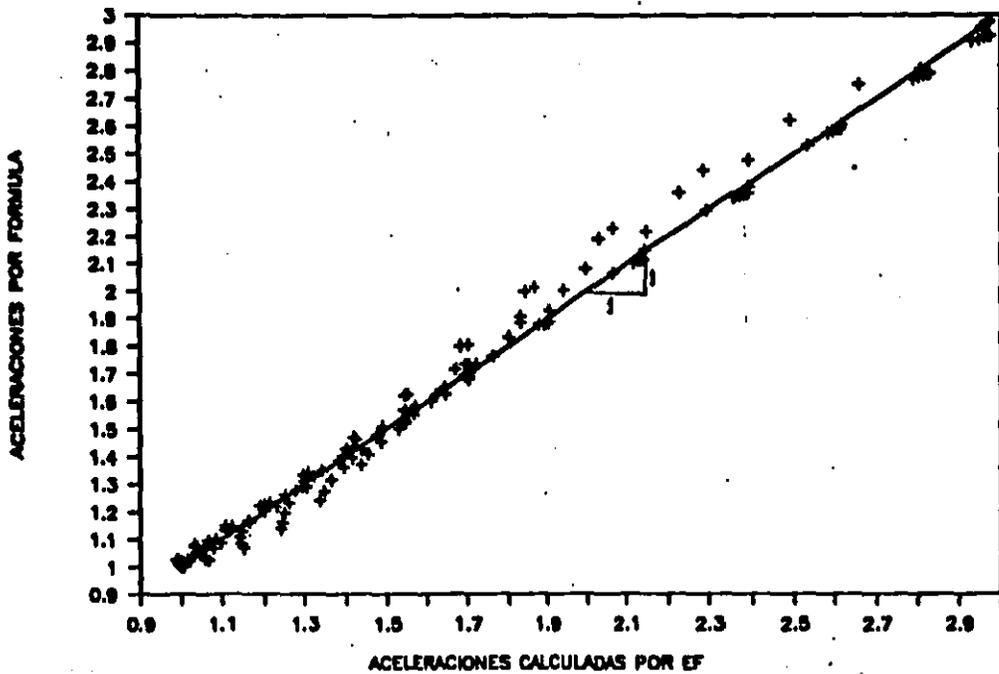


FIGURA 4.20c Comparación de coeficientes sísmicos (método simplificado Vs E.F) caso 3 en taludes. (TALUD 2:1 B=50 R=2)

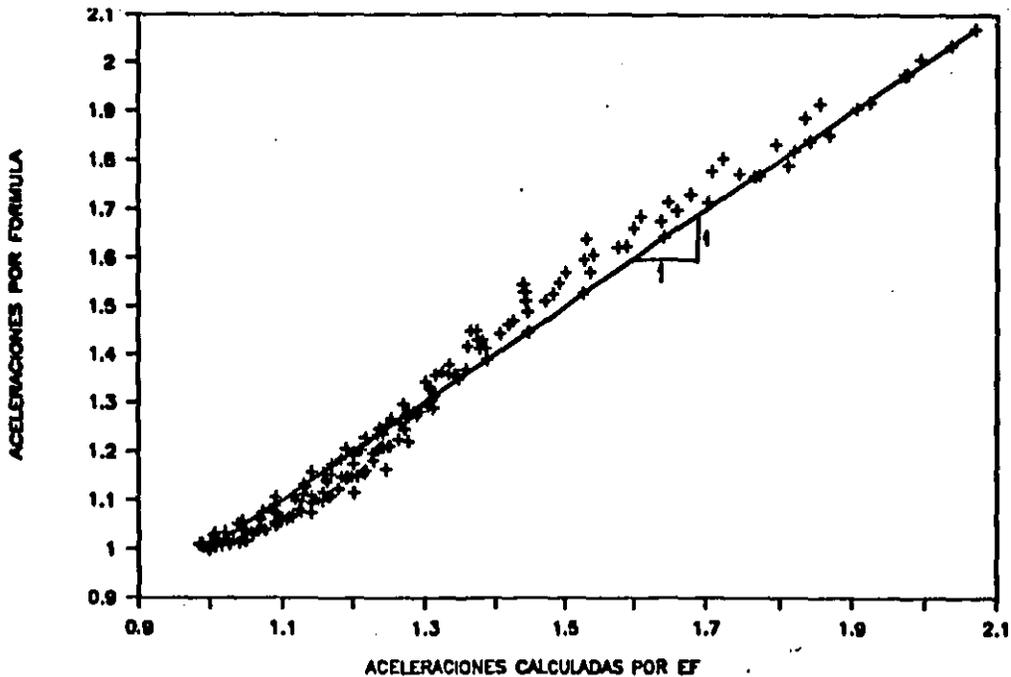


FIGURA 4.20d Comparación de coeficientes sísmicos (método simplificado Vs E.F) caso 4 en taludes. (TALUD 1:1 B=50 R=2)

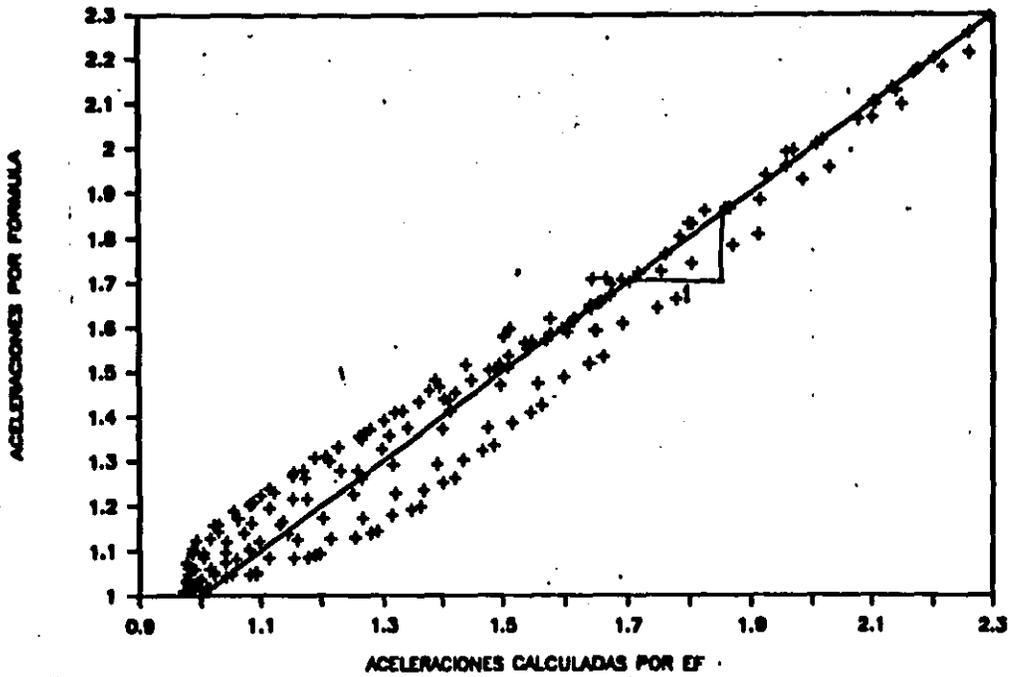


FIGURA 4.20a Comparación de coeficientes sísmicos (método simplificado Vs E.F) caso 5 en taludes. (TALUD 2:1 B=5 R=4)

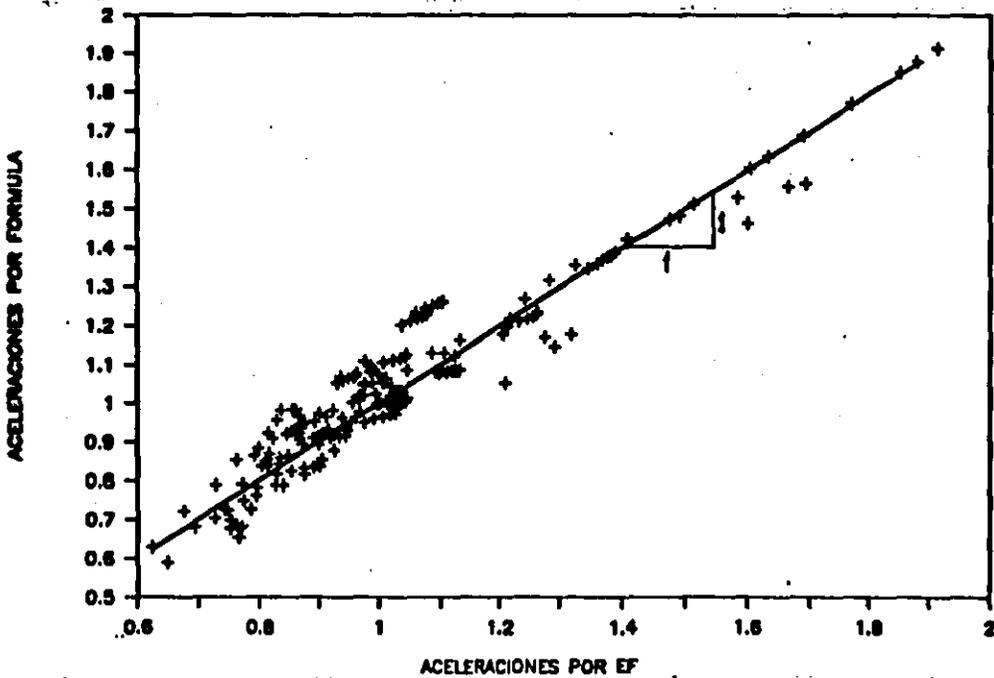


FIGURA 4.20f Comparación de coeficientes sísmicos (método simplificado Vs E.F) caso 6 en taludes. (TALUD 1:1 B=50 R=4)

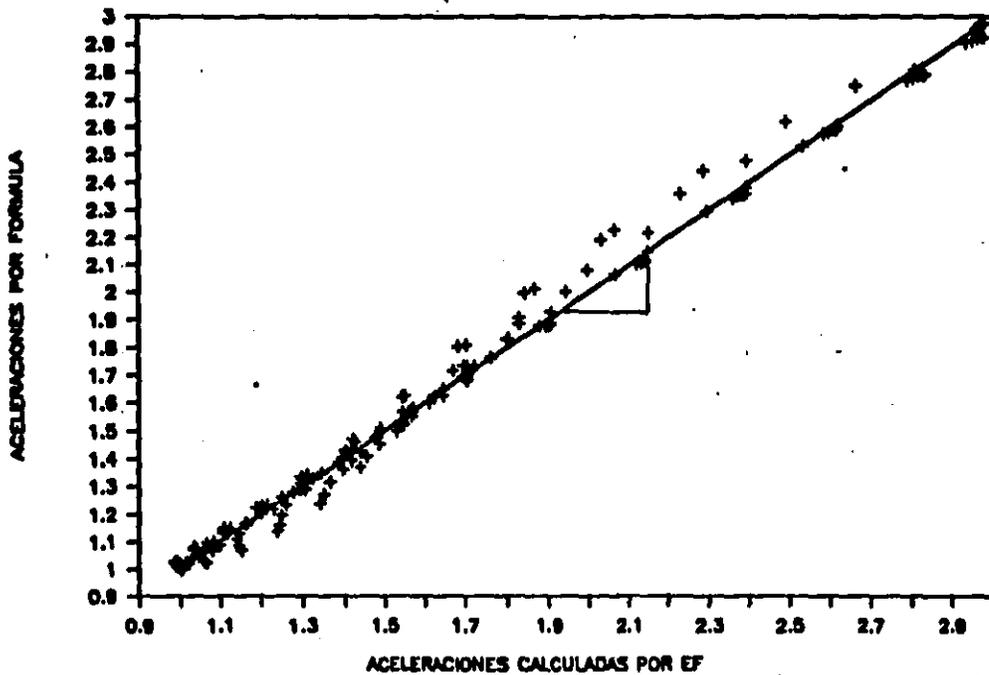


FIGURA 4.20g Comparación de coeficientes sísmicos (método simplificado Vs E.F) caso 8 en taludes.(TALUD 4:1 B=50 R=4)

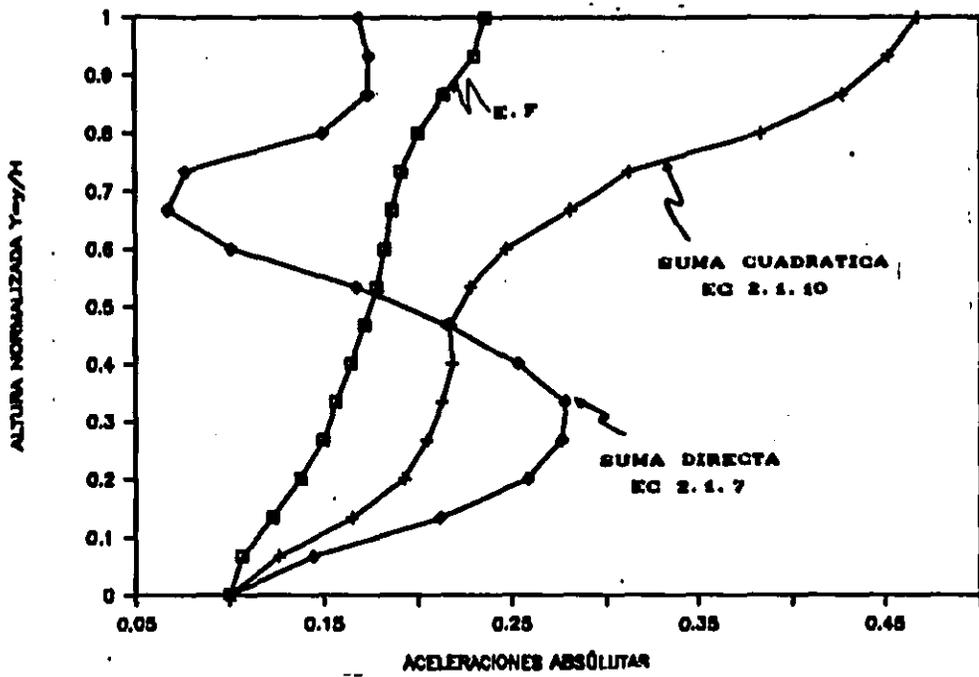


FIGURA 4.21a Comparación de coeficientes sísmicos (viga de corte vs E.F) caso 1.

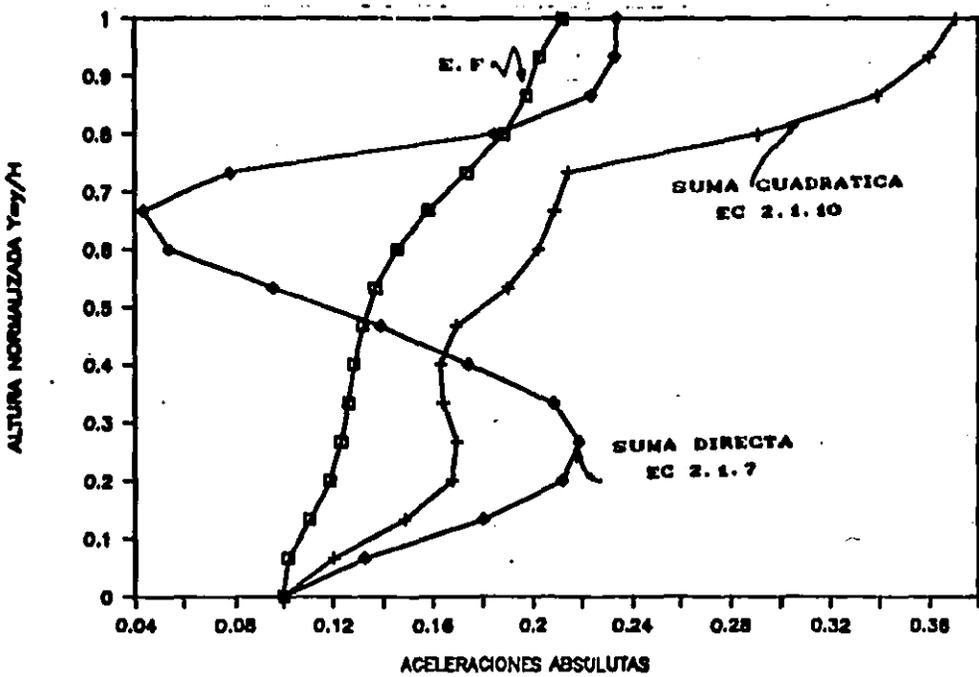


FIGURA 4.21b Comparación de coeficientes sísmicos (viga de corte vs E.F) caso 2.

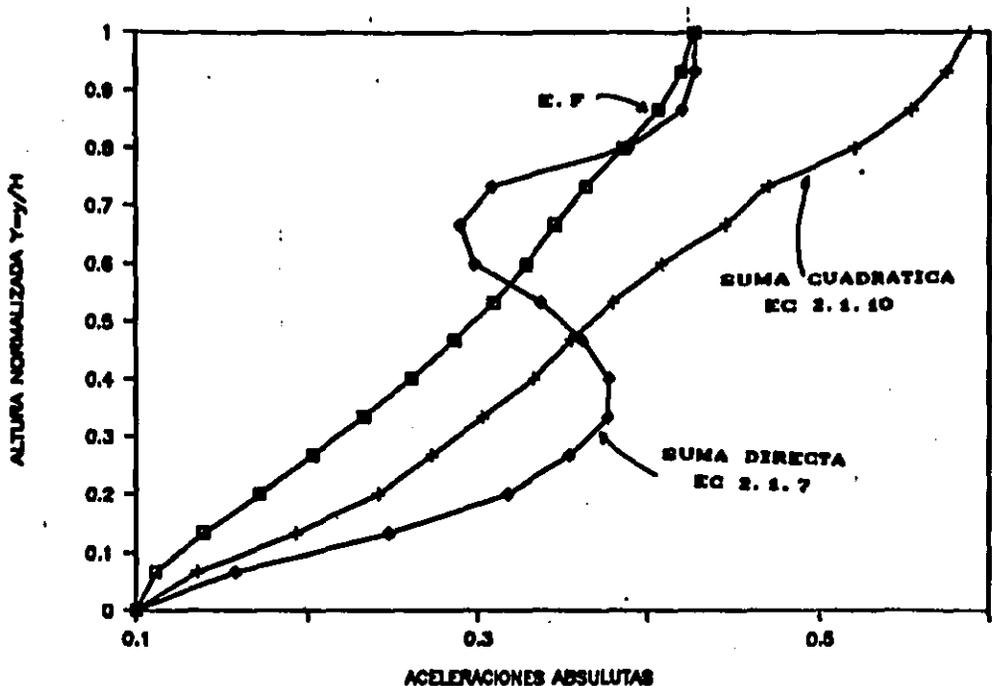


FIGURA 4.21c Comparación de coeficientes sísmicos (viga de corte vs E.F) caso 3.

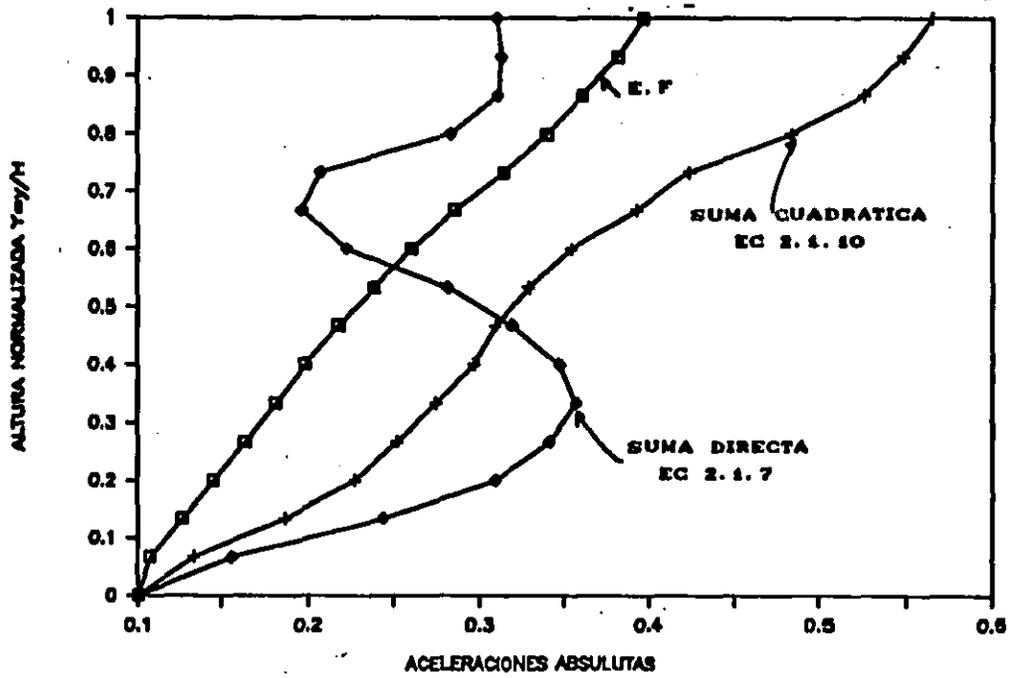


FIGURA 4.21d Comparación de coeficientes sísmicos (viga de corte vs E.F) caso 4.