

ANALISIS DE LA AMPLIFICACION DE ONDAS SISMICAS
DEBIDO A LA TOPOGRAFIA

Carlos Aguirre A.
Lívio Garrido
Departamento de Obras Civiles
Universidad Técnica Federico Santa María
Valparaíso - Chile

RESUMEN

Las irregularidades del terreno en un emplazamiento dado pueden originar modificaciones en las ondas sísmicas y en algunos casos amplificación del movimiento y daño en las estructuras circundantes. Este fenómeno se observó en Chile en una zona de edificios para viviendas denominada Canal Beagle durante el terremoto del 3 de Marzo de 1985.

El trabajo muestra un análisis preliminar por el método de Elementos Finitos el cual se aplica a una idealización de la zona basada en la información disponible acerca de la geometría, roca base y las propiedades del suelo.

Se utilizó un modelo bidimensional y algunos registros del terremoto del 3 de Marzo de 1985.

ABSTRACT

The irregularities of the land in a given location can cause a modification of the seismic waves and in some cases amplification of the movement and damage of the surrounding structures. This phenomenon was observed in Chile in a buildings residential area called Canal Beagle during the March 3, 1985 earthquake.

The paper shows a preliminary analysis using the Finite Element Method whis is applied to an idealization of the zone based on the information available about the geometry, base rock and the soil properties.

A bidimensional model was utilized and some of the records of the March 3, 1985 earthquake.

INTRODUCCION.

Es un hecho conocido que los grandes sismos muestran efectos diferentes en distintos tipos de suelos, encontrándose movimientos que varían en amplitudes, duración y frecuencias dependiendo de las características del medio de propagación y de la geometría. En el caso de suelos inestables cuando se alcanza tensiones de corte significativas se suelen presentar además situaciones de falla por compactación, deslizamiento e incluso licuefacción en el caso de suelos granulares saturados. [1]

Los casos más comunes de amplificación se han observado en suelos blandos ubicados sobre estratos rígidos como los ocurridos en el terremoto de Caracas-Venezuela en 1967 [2], Gediz -Turquía en 1979, Friuli- Italia en 1976 [3] y México en 1985 [4].

En algunos casos, la amplificación puede estudiarse analizando la propagación vertical de las ondas de corte a través de estratos paralelos horizontales. Un modelo bastante utilizado es el programa SHAKE desarrollado por Seed et.al.[5] a comienzos de la década del 70.[6],[7]. En algunos casos en los cuales la superficie del terreno, de la roca o los estratos son inclinados el análisis es más complejo requiriéndose de modelos bi y tridimensionales.

Los efectos del terremoto del 3 de Marzo de 1985 en el denominado sector Canal Beagle de Viña del Mar son características de una amplificación inusual del movimiento. En el lugar, que es una zona de lomas, existe un conjunto de edificios de 4 y 5 pisos algunos de los cuales, aquellos ubicados en zonas de coronamientos resultaron severamente dañados. Sus iguales ubicados a corta distancia de los anteriores en zonas más planas, construidos en condiciones similares, en el mismo tipo de suelo, resistieron el terremoto casi sin daño. Los niveles de intensidades en esa zona corresponden a 1 o 2 grados superiores a los asignados por lo isosismas para esa región [8].

Resultados reportados por Celebi,M.[9]; sobre la base de mediciones instrumentales realizadas poco después del sismo, muestran un aumento importante de las amplitudes de los registros en las zonas de coronamiento. El mismo autor sugiere como causa de la inusual amplificación la configuración topográfica de las lomas, las cuales se muestran en la fig.1.

Si bien es cierto, los resultados anteriores indican un efecto de amplificación importante, es necesario un análisis del fenómeno en las condiciones que se producen durante un sismo destructor. El aumento de deformaciones en el suelo que puede originar un sismo de estas características modifica algunos parámetros de la respuesta. Las experiencias indican que el crecer las deformaciones también crece el amortiguamiento a valores del orden del 15% al 20% del amortiguamiento crítico, lo que corresponde a 5 o 6 veces el amortiguamiento en pequeñas deformaciones. Este efecto se muestra en la figura 2 correspondiente a resultados reportados por Ohsaki [10] y sugiere que el efecto de amplificación es menos importante cuando aumenta la intensidad del sismo.

Para una evaluación más realista de la amplificación en estas condiciones requiere de registros de terremotos destructores y modelos que representen adecuadamente las características en el emplazamiento.

METODOLOGIA DE ANALISIS.

El problema, en una primera aproximación se puede formular desde el punto de vista de la vibración de un sistema elástico o más precisamente viscoelástico.

Si se sigue la metodología propuesta por Gurtin [11],[12], las ecuaciones que rigen el fenómeno, condiciones de borde y condiciones iniciales resultan de la optimización del funcional

$$J(u_i) = \int_{\Omega} \{ \rho u_i \cdot u_i + \frac{1}{2} E^{ijkl} g^* u_{i,j} \cdot u_{k,l} - 2 F_i \cdot u_i \} d\Omega - \int_{\partial\Omega\sigma} g^* T^i \cdot u_i dS \quad (1)$$

donde x_2 : coordenada sistema cartesiano.

u : desplazamientos en la dirección coordenada i

E : tensor elástico

F : fuerza de volumen

ρ : densidad de masa

T : fuerzas especificadas en el contorno

términos que se ilustran en la figura 3.

El problema con condiciones iniciales resulta así igual a un problema con condiciones de borde equivalentes en términos de integrales de convolución. Este procedimiento es también tratado en los trabajos de Sandhu y Pister[13], Reddy, J.M. [14] y Sandhu y Wilson[15].

La solución numérica puede efectuarse por el método de elementos finitos minimizando el funcional de energía dado por la ecuación (1). Para ello se discretiza el medio aproximando en cada elemento las variables por funciones simples, generalmente polinomios.

De esta manera se puede escribir en cada elemento

$$J_e(u) = \frac{1}{2} \int_{\Omega_e} \{\rho(u)\}^T \{u\} d\Omega_e + \frac{1}{2} \int_{\Omega_e} \{u_{k,l}\}^T [E] g^* \{u_{i,j}\} d\Omega_e - \int_{\Omega_e} \rho(u)\}^T \{F\} d\Omega_e - \int_{\partial\Omega_e} g^* \{u\}^T \{T\} dS_e$$

donde

(2)

Ω_e representa el dominio de e-ésimo elemento y $\partial\Omega_e$ su frontera

Los vectores $\{u\}$ y $\{u_{i,j}\}$ son respectivamente el vector de desplazamiento y el tensor de deformación.

lo que permite obtener por agregación

$$J(u) = \sum_{e=1}^m J_e(u) \quad (3)$$

m : Número total de elementos.

La discretización en elementos finitos se realiza mediante funciones de forma simples, usualmente polinómicas que permiten aproximar los desplazamientos en cualquier punto en función de los desplazamientos en los nodos. Se puede escribir

$$\{u(x,t)\} = [N(x)] \{U(t)\} \quad (4)$$

donde

$[N(x)]$: matriz de funciones de forma

$\{U(t)\}$: vector de desplazamientos nodales

$\{u(x,t)\}$: vector de desplazamientos en un punto cualquiera del elemento.

Se ha omitido en la expresión (4) un subíndice que indique el elemento.

De la misma forma, para las derivadas asociadas a las deformaciones unitarias:

$$\{u_{k,l}\} = \left\{ \frac{\partial u_k}{\partial x_l} \right\} = [L] \{U(t)\} \quad (5)$$

o bien en términos de los desplazamientos nodales, usando la ecuación (4)

$$\{u_{k,l}\} = [L]\{U\} = [L][N]\{U\} = [B]\{U\} \quad (6)$$

El funcional en coordenadas locales, referidos a los desplazamientos nodales es:

$$J_e\{U\} = \frac{1}{2} \int_{\Omega_e} \{U_e\}^T \rho [N_e]^T [N_e] \{U_e\} d\Omega_e + \frac{1}{2} \int_{\Omega_e} \{U_e\}^T [B]^T [E][B] \{U_e\} d\Omega_e - \int_{\Omega_e} \{U_e\}^T [N_e]^T \{F_e\} d\Omega_e - \int_{\partial\Omega_{\sigma e}} \{U_e\}^T \{g\} [N_e]^T \{T\} ds_e$$

considerando

$$\begin{aligned} [M_e] &= \int_{\Omega_e} \rho [N_e]^T [N_e] d\Omega_e \\ [K_e] &= \int_{\Omega_e} [B]^T [E][B] d\Omega_e \\ \{X_e\} &= \int_{\Omega_e} [N_e]^T \{F_e\} d\Omega_e \\ \{\phi_e\} &= \int_{\partial\Omega_e} [N_e]^T \{T\} ds_e \end{aligned} \quad (7)$$

Y el ensamblaje indicado en (3) requiere primero una transformación a coordenadas globales del tipo:

$$\{U_e\} = [h_e] \{U\}$$

donde:

$[h_e]$: matriz de transformación geométrica

resultando finalmente:

$$J(U) = 1/2 (U)^T [M] * (U) + 1/2 (U)^T * [K] g * (U) - (U)^T * X - (U)^T * g * (\phi) \quad (8)$$

con

$$[M] = \sum_{e=1}^n (h_e)^T [M_e] (h_e) \quad \text{Matriz de masas global}$$

$$[K] = \sum_{e=1}^n (h_e)^T [K_e] (h_e) \quad \text{Matriz de rigidez global}$$

$$\{X\} = \sum_{e=1}^n (h_e)^T \{X_e\} \quad \text{Vector de fuerzas de cuerpo}$$

$$\{\phi\} = \sum_{e=1}^n (h_e)^T \{\phi_e\} \quad \text{Vector de fuerzas de superficie}$$

La optimización se realiza de la primera variación de (8) la técnica propuesta por Gurtin se trata en detalle en la referencia [16], resultando para la aproximación espacial.

$$[M] \{U\} + [K] g * \{U\} = \{X\} + g * \{\phi\} \quad (9)$$

donde el símbolo * denota una convolución que tiene implícita una integración en el tiempo que es equivalente a un conjunto de ecuaciones integrales lineales simultáneos, con la cantidad desconocida

$$\{r(t)\} = g * \{U\} \quad (10)$$

lo que resulta finalmente en la ecuación típica de vibración de un sistema en coordenadas discretas

$$[M] \{\ddot{r}\} + [K] \{r\} = \{F(t)\} \quad (11)$$

donde $\{\ddot{r}\}$ es igual a $\{U\}$ que es la cantidad que representa la respuesta.

Esta ecuación acepta, sin pérdida de generalidad la incorporación de un término de disipación expresado como una matriz de amortiguamiento viscoso equivalente [17], resultando:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{R(t)\} \quad (12)$$

donde

$$[C] = \sum_{e=1}^N [h_e]^T [c_e] [h_e]$$

$$[c_e] = \int_{\Omega_e} [H_e]^T \eta [H_e] d\Omega_e$$

que se aplica al caso de fuerzas dinámicas conocidas que se aplican a la estructura.

En el caso particular de una excitación dada por aceleraciones aplicadas en ciertos puntos de la estructura, usualmente en la base rocosa, el término $\{R(t)\}$ es nulo y debe expresarse los desplazamientos absolutos en términos de los desplazamientos relativos más el desplazamiento del suelo, en la forma:

$$\{v\} = \{x\} - \{u_g\}$$

$$\{\dot{v}\} = \{\dot{x}\} - \{\dot{u}_g\} \quad (13)$$

$$\{\ddot{v}\} = \{\ddot{x}\} - \{\ddot{u}_g\}$$

por lo que la ecuación de movimiento en estas condiciones es:

$$[M] \{\ddot{v}\} + [C] \{\dot{v}\} + [K] \{v\} = \{R(t)\} \quad (14)$$

donde:

$R(t)$ es el vector de fuerzas sísmicas efectivas actuando en los puntos nodales.

En algunas soluciones se introduce el amortiguamiento en coordenadas locales a nivel del elemento, como es el caso de los trabajos de Idriss I.M. y Seed H.B. [18],[19], lo que produce una variación de acuerdo al nivel de deformaciones que a su vez varía durante el proceso de iteración numérica.

La ecuación (22) puede resolverse sin dificultad y su solución numérica se encuentra en prácticamente todos los textos de Elementos Finitos [20]

RESULTADOS

La respuesta del sistema se evaluó en términos de valores de espectro-respuesta para puntos característicos de la malla. Se usó un registro en roca del sismo del 3 de Marzo de 1985, componente S20 E obtenido en la Universidad Técnica Federico Santa María.

En las figuras 5 y 6 se muestra para puntos ubicados en una cúspide y un valle, el espectro de aceleraciones y la razón espectral referida a los valores del registro en roca. Lo mismo en las figuras 7 y 8 para el espectro de velocidades.

Es claro un notable aumento de las amplitudes en ciertas frecuencias. En el caso de espectros de aceleraciones para períodos bajo 1.25 seg. las razones espectrales son mayores que 1.00 y en el rango 0.75 a 1.00 seg. alcanza valores del orden de 3. Una situación similar se presenta en el caso de los espectros de velocidades sólo que el rango de frecuencia es mayor.

En las mismas figuras se puede observar que los valores de amplitudes obtenidos en los puntos altos de las colinas son casi el doble de los obtenidos en los valles.

Las figuras 9 y 10 muestran una situación similar en otros puntos de la malla sobre la superficie correspondiente a otro valle y otra cúspide. Se ha omitido los espectros y sólo se presenta las razones espectrales de amplificación.

En la figura 11 se muestra para nodos ubicados sobre una misma vertical la variación de las aceleraciones máximas. A fin de eliminar el efecto del relieve se muestran los resultados usando el modelo unidimensional [5] y un proceso denominado QUAD 4*, en el cual se supuso la superficie del terreno horizontal. Finalmente, en la figura 12, usando los mismos criterios de la Fig.11 se muestra la variación de las aceleraciones máximas en la superficie del corte, resultando diferencias importantes entre los puntos altos y los valles. Los puntos ubicados en las crestas alcanzan valores sobre 0.40g mientras los puntos en los valles alcanzan valores del orden de 0,25g y menores.

El modelo presentado de una idea del efecto de amplificación en Canal Beagle, con resultados consistentes con el daño observado. Sin embargo, se requeriría un modelo tridimensional y una medición detallada de las propiedades del suelo hasta el nivel de la roca para una modelación más precisa.



FIGURA 1. -Detalle topografico de Canal Beagle(levantamiento aerofotografico realizado por el Instituto Hidrográfico de la Armada). -

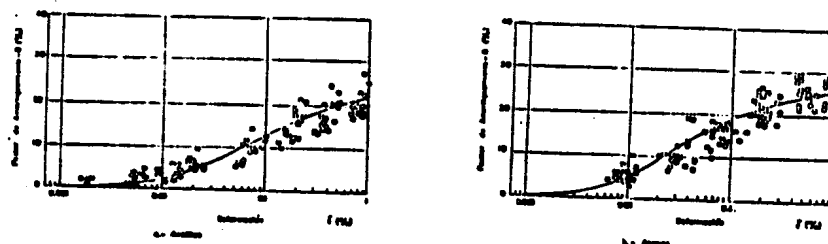


FIGURA 2. -Variación de la razón de amortiguamiento con la deformación. -

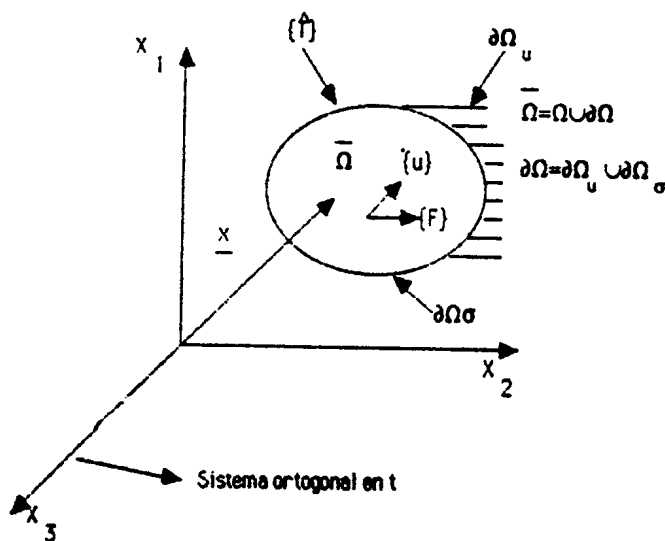
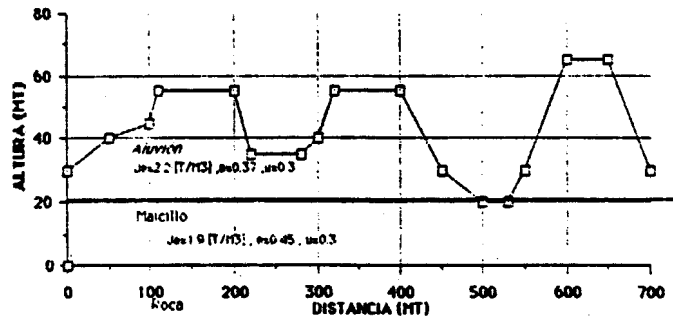
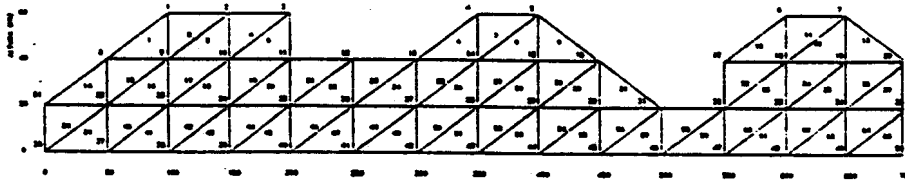


FIGURA 3. -Región del espacio y sistema de referencia ocupado.



(a).-Perfil.



(b).-Malla elegida.-

FIGURA 4.-Sector Canal Beagle. Corte #1, según figura 1.-

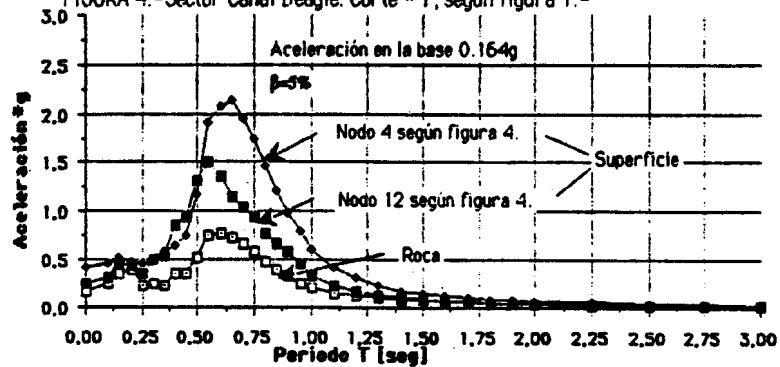


FIGURA 5.- Espectro de respuesta de aceleración.- Nodos 4 y 12.-

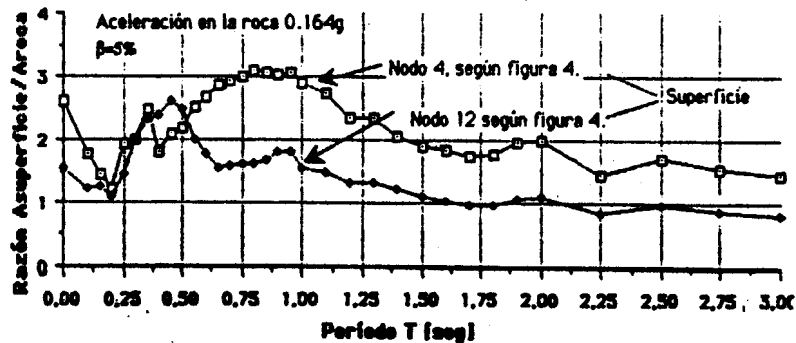


FIGURA 6.- Razón espectral de amplitud de aceleración referida a la roca.- Nodos 4 y 12

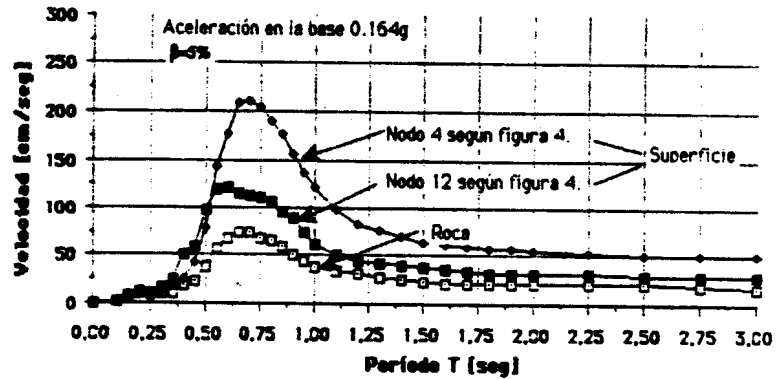


FIGURA 7 - Espectro de respuesta de velocidades. - Nodos 4 y 12. -

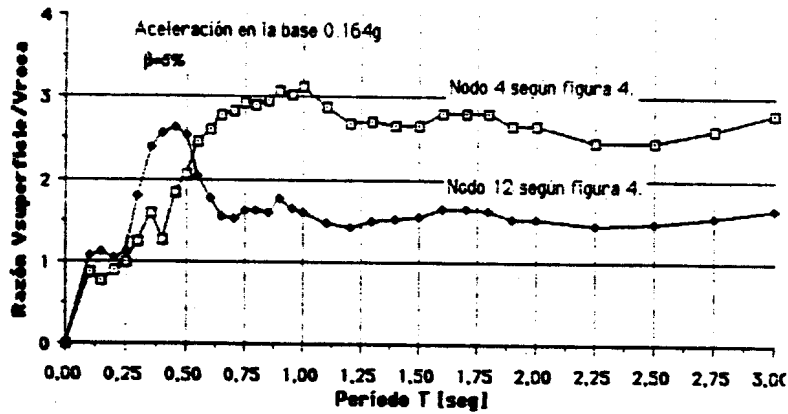


FIGURA 8. - Razón espectral de amplitud de velocidades referida a la roca. Nodos 4 y 12. -

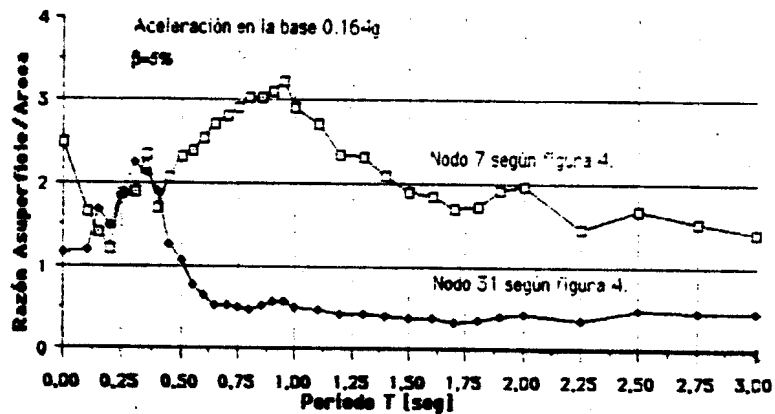


FIGURA 9. - Razón espectral de amplitud de aceleración referida a la roca. - Nodos 7 y 31. -

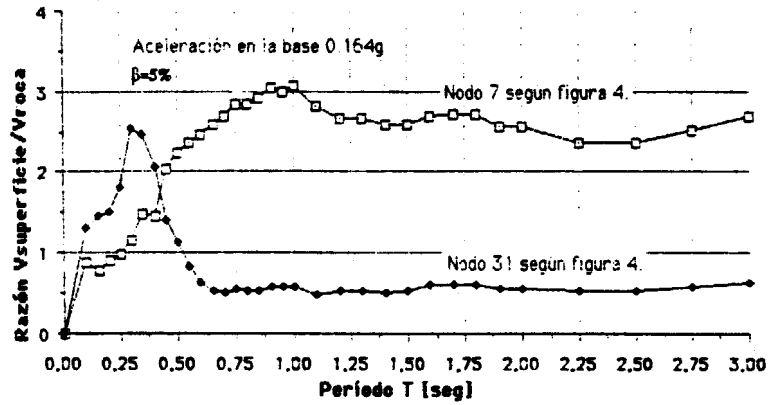


FIGURA 10.-Razón espectral de amplitud de velocidad referida a la roca -

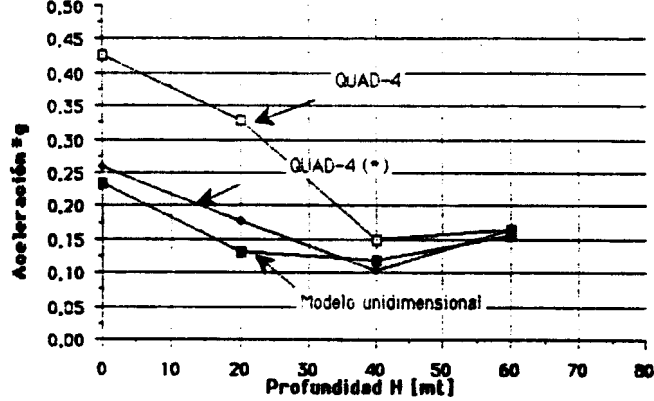


FIGURA 11.-Aceleración máxima horizontal a través de la profundidad debido a la topografía del sector.-

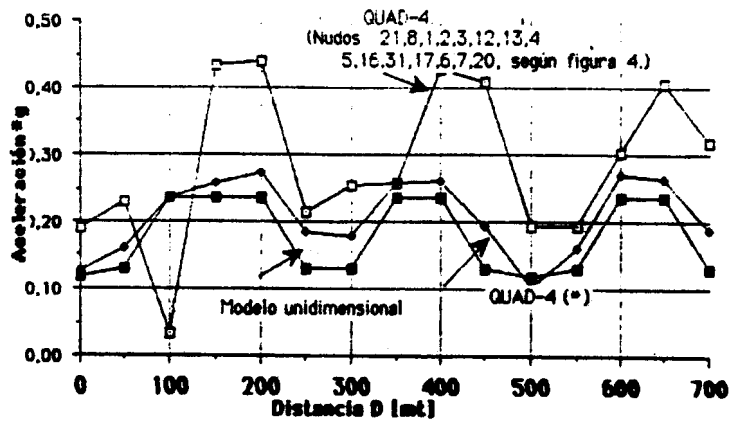


FIGURA 12.-Aceleraciones máximas horizontales dadas en la superficie del corte #1 con y sin topografía.

REFERENCIAS.

- [1].-H. Bolton Seed and Izzat M. Idriss.
Influence of soil conditions on ground motions during earthquakes.
Journal of the soil mechanics and foundations division.
January, 1969
- [2].-H. Bolton Seed, Robert V. Whitman, Houshang Deszfulian, Ricardo Doory and Izzat M. Idriss.
Soil conditions and building damage in 1967 Caracas earthquake.
Journal of the soil mechanics and foundations division.
August, 1972.
- [3].-Walter W Hays.
Site amplification of earthquake ground motion.
Third U.S. national conference on earthquake engineering.
Charleston, South Carolina, 1986.
- [4].-Rios R; Zecora L.; Alva I; Pfuller E.
El sismo de México del 19 de septiembre de 1985.
4as Jornadas chilenas de sismología e ingeniería antisísmica.
D-130 Vol I. Universidad Técnica Federico Santa María. 1986.
- [5].-Schnabel P.B.; Lysmer, J.; Seed, H.B.
"SHAKE. A computer Program for Earthquake Response. Analysis of horizontally layered sites"
EERC 72-12. Universidad de California, 1972.
- [6].-Ricardo Nicolau R., Arturo Gutiérrez T, Mónica Woywood Y. y Miguel Parra Z.
Características de la amplificación sísmica en la ciudad de Concepción.
- [7].-Applied Technology Council.
Tentative Provisions for the development of seismic.
Regulations for buildings.
A.T.C. Publications ATC3-06 NBS.
Special Publication 510, NSF publication 78-8, U.S. Government printing office,
Washington D.C. U.S.A. 1978.
- [8].-Perez, L.E.
Microzonificación sísmica de la ciudad de Viña del Mar.
Memoria para optar al título de Ing. Civil.
Universidad Técnica Federico Santa María.
- [9].-M. Celebr
A feature of the 3 march 1985 Chile earthquake-topographical and geological amplification.
4tas jornadas chilenas de sismología e ingeniería antisísmica and international seminar on the Chilean march, 1985 earthquake.
ATFSM-ACHISINA-1986 Viña del Mar. Chile.
- [10].-Augusto Espinosa Silva.
Dinámica de suelos y estabilidad de taludes.
4to seminario internacional de ingeniería sísmica. Universidad de Los Andes.
Bogotá. Septiembre de 1986.
- [11].-M. E. Gurtin.
Variational principles for linear elastodynamics.
Archives for rational mechanics and analysis.
Vol. 16, 1964.
- [12].-M. E. Gurtin.
Variational principles in the linear theory of viscoelasticity.
Archives for rational mechanics and analysis.
Vol. 13, 1963.

- [13].-R. Sandhu and K. Pister.
A variational principle for linear, coupled field problems in continuum mechanics.
Int. J. Engng. Sci. Vol. 8 pp. 989-999.
Pergamon Press. 1970.
- [14].-J. N. Reddy.
Modified Gurtin's variational principles in the linear dynamic theory of viscoelasticity.
Int. J. Solids Structures. Vol. 12, 1976.
Pergamon Press.
- [15].-R. S. Sandhu and E. L. Wilson.
Finite element analysis of seepage in elastic media.
Journal of the engineering mechanics division.
Proceedings of the American Society of Civil Engineers.
June, 1969.
- [16].-L. A. Garrido.
Estudio de amplificación de ondas sísmicas en suelos. Análisis unidimensional y formulación tridimensional en elementos finitos.
Memoria para optar al título de Ing. Civil.
Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile (en proceso de impresión)
- [17].-Bobby O. Hardin and Vincent P. Drnevich.
Shear modulus and damping in soils: design equations and curves.
Journal of the soil mechanics and foundations division.
July, 1972.
- [18].-I. M. Idriss and H. Bolton Seed.
Seismic response by variable damping finite element.
Journal of the geotechnical engineering division.
January, 1974.
- [19].-I. M. Idriss and H. Bolton Seed.
Seismic response of soil deposits.
Journal of the soil mechanics and foundations division.
Proceedings of the American Society of Civil Engineers.
March 1970.
- [20].-C. S. Desai and J. F. Abel.
Introduction to the finite element method.
Van Nostrand Reinhold. 1972.
- [21].-I. M. Idriss, J. Lysmer, R. Hwang and H. B. Seed.
QUAD-4. A computer program for evaluating the seismic response of soil structures by variable damping finite element procedures.
Earthquake engineering research center.
July, 1973.
- [22].-Chandrakent S. Desai and John T. Christian.
Numerical methods in geotechnical engineering.
McGraw-Hill, 1977.