

De la amplificación sísmica

Ondas sísmicas. Suelos y velocidad de onda de corte. Influencia de la topografía en la amplificación sísmica. Análisis numérico de la amplificación sísmica.

Ondas sísmicas

Referencia

Tomado de:

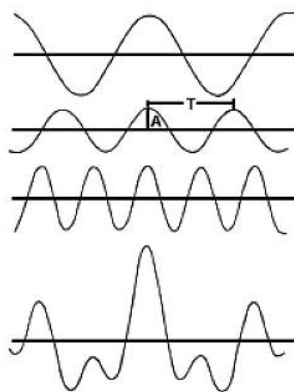
http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/34/html/sec_8.htm

Conceptos

Las **ondas sísmicas** constituyen la forma en que se propaga en el terreno, la energía liberada desde una fuente (almacenada como energía de deformación). Esta propagación se produce **por la deformación del medio** -que provoca la energía sísmica-, y se transmite progresivamente a las partes contiguas, que en el caso de los sismos, corresponde a la Tierra.

El **frente de onda** es el conjunto de puntos alcanzados simultáneamente por una onda. A su vez, los **rayos sísmicos**, son las líneas perpendiculares a este frente.

Representación



REPRESENTACIÓN SINUSOIDAL Y ARREGLO DE FOURIER

Las ondas se representan como arreglos sinusoidales variando en el tiempo, con un **periodo** $T=1/f$ (**frecuencia**, f), **amplitud** A , **velocidad** V , y **longitud de onda** $\lambda=VT$.

Si varias ondas sinusoidales con diferentes características viajan simultáneamente, al sumarse dan como consecuencia una representación irregular, que puede conseguirse con una serie de Fourier.

La figura adjunta ilustra esta representación, para el caso de tres arreglos sinusoidales. La amplitud de cada uno de estos arreglos, indica también su contribución a los extremos de la onda sísmica.

Ondas P y S

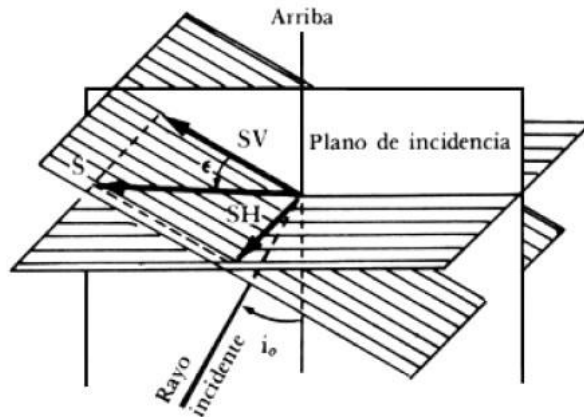
Son dos tipos importantes de ondas viajando a través de la Tierra. Se trata de ondas P y de las ondas S .

- Las **ondas P** o de compresión, se desplazan en la dirección de la propagación. Producen compresiones y dilataciones. Se trata de las ondas más veloces, y

son las primeras en llegar y ser registradas. Se les conoce también como **ondas primarias**.

- Las **ondas S** o de corte, se desplazan perpendicularmente a la dirección de propagación, y están asociadas a deformaciones de corte. Viajan a menor velocidad que las ondas P (aproximadamente a $\frac{1}{\sqrt{3}}$ de éstas). También se les llama **ondas secundarias**. Suelen tener mayor amplitud que las P, y sentirse más fuertemente.

Ondas SV y SH



ONDA DE CORTE S, Y SUS COMPONENTES SV Y SH

Las ondas de corte S también se presentan según su componente vertical, SV, y la horizontal, SH.

Ondas superficiales

Este tipo de ondas tienen máxima amplitud en la superficie, y nula a gran profundidad. Se distinguen las dos siguientes.

- Las **ondas de Raleigh** derivadas de la interacción de las ondas P y las SV. Son ondas lentas con diferentes modos de propagación.
- Las **ondas de Love** se derivan de interferencias sólo de ondas SH. No se registran en forma vertical, pues están polarizadas horizontalmente. Son más lentas que las ondas P y S, aunque más rápidas que las de Raleigh.

Suelos y velocidad de onda de corte

Referencia

A los diferentes tipos de perfil de suelo, se asocia un rango de velocidad de onda de corte. Se suele utilizar la que brinda la siguiente referencia.

International Conference of Building Officials 1997. Uniform Building Code 1997 (UBC-97). Whittier. California. 1997.

Categorización del sitio: tipo de perfil del suelo y velocidad de onda de corte

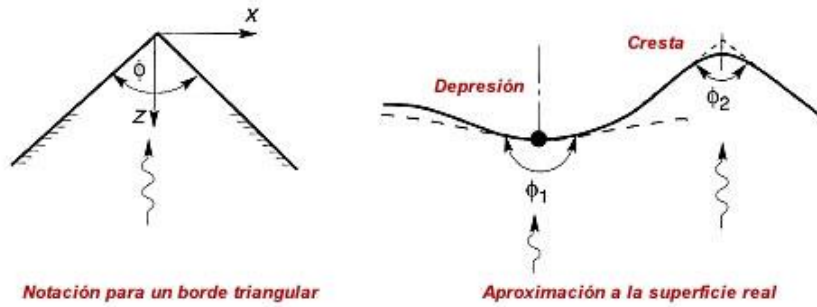
Tipo del perfil del suelo	Denominación	Velocidad de onda de corte, m/s	Otras características
S _A	Roca dura	Mayor de 1,500	
S _B	Roca	Entre 760 a 1,500	
S _C	Suelo muy denso y roca blanda	Entre 360 a 760	Penetración estándar N>50. O resistencia sin drenar al corte mayor o igual a 100 kPa.
S _D	Suelo rígido	Entre 180 y 360	Penetración estándar entre 15 y 50. O resistencia sin drenar al corte entre 50 y 100 kPa.
S _E	Suelo blando	Menor de 180	Con más de 3 m de arcilla blanda, con índice de plasticidad mayor a 20, contenido de agua mayor o igual al 40%, y resistencia sin drenar al corte menor de 25 kPa.
S _F	Requieren de evaluación específica en el sitio: Suelos vulnerables con potencial de falla o colapso bajo carga sísmica (suelos licuables, arcillas altamente sensitivas, suelos cementados débilmente). Depósitos o capas de arcillas orgánicas de más de 3 m de espesor. Arcillas con índice de plasticidad mayor de 75, capas con más de 8 m de espesor. Capas de arcilla suave a media, con capas de más de 36 m de espesor.		

Influencia de la topografía en la amplificación sísmica

Referencia

Steven L. Kramer (University of Washington). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice-Hall, Inc. 1996.

Las irregularidades topográficas pueden tener un efecto significativo en los movimientos sísmicos. Cuando se trata de un cerro (o de una presa), las mediciones que registran picos en la cresta, han sido atribuidos a la respuesta dinámica del cerro y la cresta. El efecto corresponde a un complejo campo de ondas, que bajo larga duración produce múltiples reflexiones de difícil predicción. Cuando se trata de irregularidades sencillas, pueden encontrarse soluciones a problemas idealizados, como en los casos de las siguientes figuras.



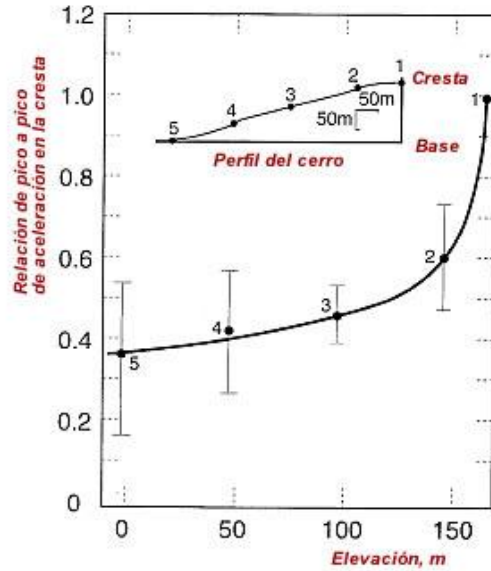
CARACTERIZACIÓN DE IRREGULARIDADES TOPOGRÁFICAS SIMPLES

Así, para un borde triangular infinito, con ángulo φ en el vértice, sometido a ondas verticales SH , con movimiento paralelo a su eje, los desplazamientos en el vértice están amplificados por el factor siguiente.

$$factor = \frac{2\pi}{\varphi}$$

Esta solución también se usa como aproximación para ciertos casos donde puede idealizarse el perfil topográfico.

La referencia también cita mediciones en la cresta de un cerro, de cinco sismos en el Japón. Los cálculos de picos de aceleración normalizados varían en diferentes puntos a lo largo del cerro. El promedio del piso de aceleración en la cresta fue del orden de 2.5 el promedio de la aceleración en la base.



RELACIÓN NORMALIZADA DE PICOS DE ACELERACIÓN

En relación con la evaluación de los efectos así calculados, el autor refiere que los cálculos son complicados y que demandan más información de la usualmente disponible, por lo que habría dudas sobre los resultados, según se comenta en la siguiente tabla.

Comentarios sobre efectos de irregularidades topográficas

Estructura	Condiciones	Tipo	Predictibilidad cuantitativa
Topografía de superficie	Sensible a la relación de forma. Mayores con pendientes entre 0.2 y 0.6. Muy pronunciado cuando λ es igual al ancho de la montaña.	Amplificación en el tope de la estructura. Amplificación y disminución en la base. Rápidos cambios en amplitud a lo largo de la pendiente.	Pobre. Generalmente impredecible. Podría deberse a la interacción cerro - cresta, y a efectos tridimensionales.

Análisis numérico de la amplificación sísmica

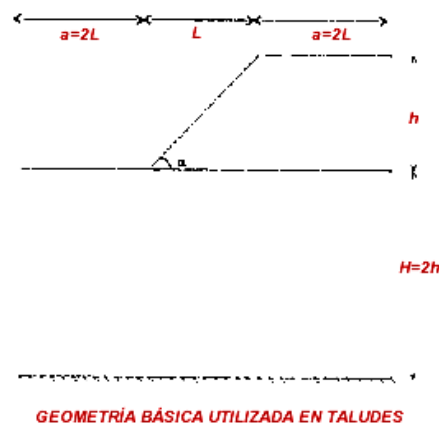
Referencia

María Elena Arroyo Caraballo. *Numerical Study of the Amplification of the Seismic Ground Acceleration Due to Local Topography*. Thesis for the degree of Master of Science in Civil Engineering. University of Puerto Rico. Mayaguez Campus. Puerto Rico. 2001.

La tesis corresponde a un análisis numérico de los efectos de la topografía en la aceleración sísmica de suelos. El análisis fue desarrollado en taludes (acantilados o escarpados) y cerros (montañas), simulados con modelos bidimensionales de elementos finitos. Las características del suelo fueron definidas según cuatro perfiles del Código UBC-97. Los datos de aceleración fueron tomados de dos terremotos pasados. Se tuvo en cuenta el comportamiento no lineal del suelo. Los factores de amplificación resultantes del análisis se presentan para diferentes parámetros de la geometría en estudio (resultan entre 1.00 y 2.35).

Características consideradas

♦ Geometría y malla



En el caso de taludes, el ángulo, las longitudes y sus proporciones se indican en la figura.

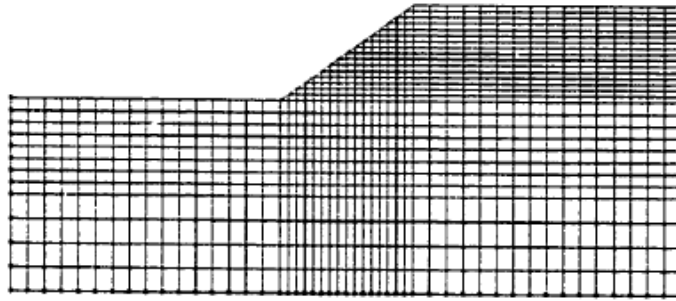
La altura del escarpado es h . El doble de su valor es considerado para la profundidad del suelo, H .

El ángulo a define la pendiente del talud. El análisis es efectuado para cuatro valores de este ángulo: 15, 30, 40, 50 y 65 grados.

El ángulo y la altura, determinan la longitud proyectada L del acantilado. El doble de este valor,

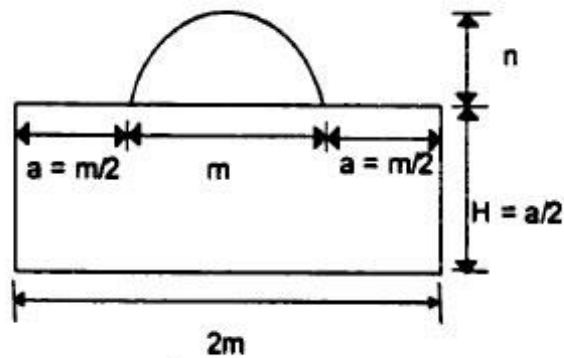
a ambos lados, es usado para la frontera del talud.

En relación con esta geometría, se ajusta la malla para el modelo de elementos finitos, según se ilustra en la siguiente figura.



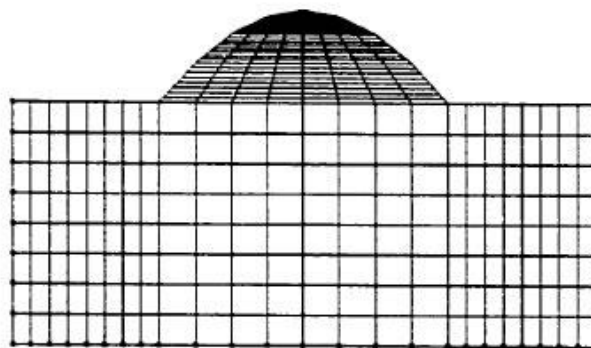
EJEMPLO DE MALLA UTILIZADA PARA EL ANÁLISIS DE TALUDES POR ELEMENTOS FINITOS

Respecto a la representación de un cerro, la tesis utiliza una parábola. Se emplearon dos parámetros: la base m , y la altura total de cerro, n .



GEOMETRÍA USADA PARA UN CERRO

La extensión lateral fue definida con el parámetro $a=m/2$. La profundidad del suelo, como $H=a/2$. Se utilizó la siguiente malla.



MODELO DE MALLA PARA ELEMENTOS FINITOS EN CASO DEL CERRO

Los valores de n variaron en 38, 75, 115, y 225 pies. El valor de m fue fijado en 400 pies. Para todos los casos estudiados, con el método de elementos finitos se utilizaron 10 iteraciones.

◆ Tipos de suelos

A partir de la clasificación UBC-97 de los perfiles de suelos, en la tesis se utilizaron cuatro de estos, con las siguientes velocidades de las ondas de corte.

S_B: 3,750 pies/s

S_C: 1,850 pies/s

S_D: 900 pies/s

S_E: 575 pies/s

◆ Solicitación sísmica

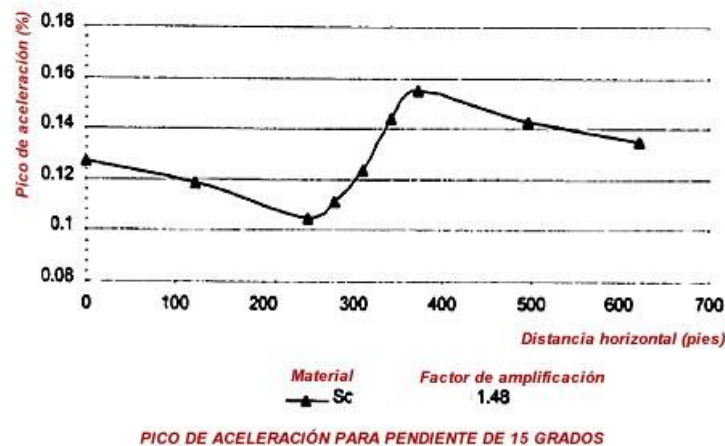
Se emplearon dos sismos históricos, cuyas características principales son las siguientes.

Características de los sismos empleadas en el estudio

Sismo	Magnitud, Richter	Pico de desplazamiento, cm	Pico de velocidad, cm/s	Pico de aceleración, cm/s ²
El Centro (18 de mayo de 1940)	7.1	10.87	33.45	341.70
San Salvador (10 de octubre de 1986)	5.5	11.90	80.00	680.80

El pico de aceleración del suelo para ambos sismos, fue de 0.1g. En el estudio se emplearon los espectros de Fourier para los dos sismos.

Amplificación en escarpados



Los cálculos se efectuaron para los cinco ángulos de las pendientes, los dos sismos considerados, y las cuatro clasificaciones de suelos. En total, 40 casos estudiados para los que se encontraron los respectivos factores de amplificación, a lo largo del borde del modelo estudiado. Se presenta el gráfico de uno de los resultados, para el sismo de El Centro.

El resumen de los factores de amplificación encontrados es el siguiente.

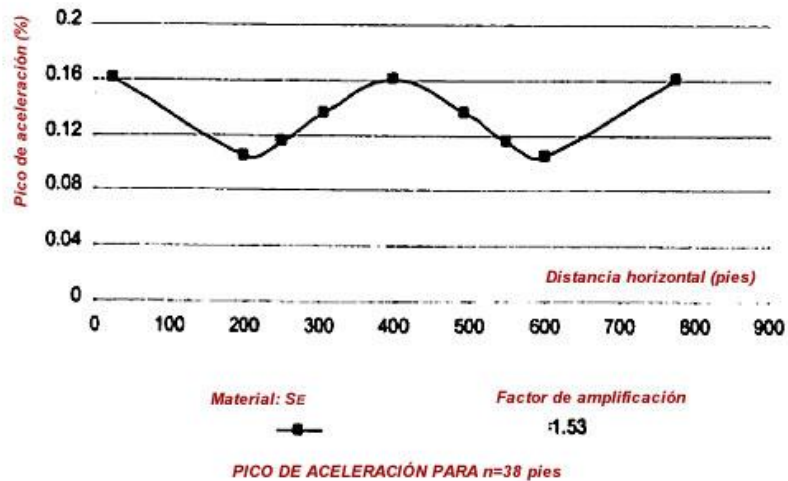
Resumen de los factores de amplificación calculados

Ángulo, grados	Sismo de El Centro, 0.1 g Clasificación de suelos UBC-97				Sismo de San Salvador, 0.1 g Clasificación de suelos UBC-97			
	S _A	S _B	S _C	S _D	S _A	S _B	S _C	S _D
15	1.00	1.48	1.33	1.44	1.11	1.31	1.38	1.40
30	1.01	1.51	1.30	1.38	1.17	1.50	1.20	1.30
40	1.01	1.64	1.18	1.24	1.12	1.35	1.17	1.22
50	1.01	1.67	1.18	1.19	1.12	1.40	1.62	1.57
65	1.04	1.75	1.13	1.19	1.13	1.25	1.45	1.57

Amplificación en cerros

El trabajo fue realizado en forma similar al caso anterior. Como se señaló, *m* fue fijado en 400 pies, y los valores de *n* fueron tomados como: 38, 75, 115, y 225 pies. El depósito de suelo fue adoptado en 100 pies. La extensión lateral, 200 pies. Las propiedades del suelo tomadas fueron las siguientes. Peso unitario de 125 pcf. Relación de Poisson de 0.35. Factor de amortiguación de 0.05. Se considera un solo tipo de material.

El resultado que se presenta en el gráfico a modo de ilustración, corresponde a una altura de 38 pies, una relación *n/m* de 0.095, para el sismo de El Centro. Se muestran los picos a lo largo de la superficie. En los extremos y en el tope del cerro se presentan las mayores amplificaciones, siendo la máxima, en este caso, de 1.53.



Con la diversidad de resultados obtenidos, el estudio presenta un resumen de los máximos factores de amplificación para el caso de cerros.

Máximos factores de amplificación

Valor de <i>n</i> , pies	Valor de <i>n/m</i> , en milésimas	Características de suelos UBC-97			
		S _B	S _C	S _D	S _E
38	95	1.01	1.52	1.48	1.53
75	188	1.34	1.93	2.16	2.34

Máximos factores de amplificación

Valor de n , pies	Valor de n/m , en milésimas	Características de suelos UBC-97			
		S_B	S_C	S_D	S_E
115	288	1.48	1.47		1.60
225	563	2.35			0.90
