



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

COMPARACIÓN DE DOS TÉCNICAS PARA LA ESTIMACIÓN
DE DISTANCIAS PERMISIBLES EN ESTUDIOS DE
VIBRACIÓN INDUCIDA

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN GEOFÍSICA

PRESENTA:

ERIKA SAMANTHA SOBODKA TREVIÑO

DIRECTOR DE TESIS: DR. MARTÍN CÁRDENAS SOTO



MÉXICO, D. F.

2006

M 24 23 75



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
60-I-662

SRITA. ERIKA SAMANTHA SOBODKA TREVIÑO
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Dr. Martín Cárdenas Soto y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geofísico:

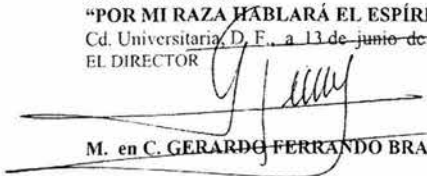
**COMPARACIÓN DE DOS TÉCNICAS PARA LA ESTIMACIÓN DE DISTANCIAS
PERMISIBLES EN ESTUDIOS DE VIBRACIÓN INDUCIDA**

| | |
|-----|---|
| | RESUMEN |
| | INTRODUCCIÓN |
| I | GENERALIDADES |
| II | OBTENCIÓN DE DATOS |
| III | MÉTODO INGENIERIL. LEY DE ESCALAMIENTO CÚBICO |
| IV | MÉTODO GEOFÍSICO. LEY DE ATENUACIÓN |
| V | CONFRONTACIÓN DE RESULTADOS |
| | CONCLUSIONES |
| | REFERENCIAS |

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria, D.F., a 13 de junio de 2006
EL DIRECTOR


M. en C. GERARDO FERRANDO BRAYO

GFB*JAGC*gtg


CONTENIDO

| | Pag. |
|---|------|
| AGRADECIMIENTOS | |
| RESUMEN | 1 |
| INTRODUCCIÓN | 3 |
| Antecedentes | 3 |
| Justificación del estudio | 4 |
| Presentación del trabajo | 5 |
| <u>Capítulo I. GENERALIDADES</u> | 7 |
| 1.1 Daños causados por vibraciones y límites admisibles | 7 |
| 1.2 Naturaleza de los daños | 10 |
| 1.3 Mecanismo de Detonación | 11 |
| 1.4 Tipos de análisis de Vibración inducida | 13 |
| 1.5 Reglamentación de manejo de vibración | 15 |
| Conceptos básicos | 15 |
| Normas Internacionales | 17 |
| <u>Capítulo II. OBTENCIÓN DE DATOS</u> | 18 |
| 2.1 Marco geológico regional | 18 |
| Geomorfología | 18 |
| Estratigrafía | 18 |
| Geología estructural | 19 |
| 2.2 Recopilación de datos en campo | 20 |
| Sitio 1 | 20 |
| Adquisición de datos | 20 |
| Registros obtenidos en campo | 21 |
| Presentación y manejo de registros obtenidos en campo | 23 |
| Sitio 2 | 27 |
| Adquisición de datos | 27 |
| Registros obtenidos en campo | 28 |
| Presentación y manejo de registros obtenidos en campo | 28 |
| Sitio 3 | 32 |
| Adquisición de datos | 32 |
| Registros obtenidos en campo | 33 |
| Presentación y manejo de registros obtenidos en campo | 33 |
| Velocidad máxima en sitios 1, 2 y 3 | 36 |
| <u>Capítulo III. METODO INGENIERIL. LEY DE ESCALAMIENTO CÚBICO</u> | 38 |
| 3.1 Relaciones empíricas | 38 |
| Atenuación de vibraciones inducidas | 38 |
| Predominio de ondas Rayleigh en vibración inducida | 40 |
| Relaciones empíricas de atenuación | 41 |
| Ley de escalamiento cúbico | 43 |

| | |
|--|----|
| Otros modelos de atenuación | 45 |
| 3.2 Ley de escalamiento cúbico aplicada a datos de campo | 47 |
| Regresiones lineales de datos de campo | 47 |
| Sitio 1 | 48 |
| Sitio 2 | 48 |
| Sitio 3 | 49 |
| Ley de escalamiento cúbico, modelos obtenidos | 52 |
| Sitio 1 | 53 |
| Sitio 2 | 54 |
| Sitio 3 | 56 |
| 3.3 Comentarios a la ley de escalamiento cúbico | 57 |
| <u>Capítulo IV. METODO GEOFÍSICO. LEY DE ATENUACIÓN</u> | 59 |
| 4.1 Determinación de atenuación sísmica, por medio de regresiones independientes | 60 |
| 4.2 Ley de atenuación aplicada a datos de campo | 62 |
| Sitio 1 | 63 |
| Espectros de Fourier | 63 |
| Efecto de sitio | 65 |
| Curvas de atenuación | 66 |
| Sitio 2 | 69 |
| Espectros de Fourier | 69 |
| Efecto de sitio | 70 |
| Curvas de atenuación | 71 |
| Sitio 3 | 73 |
| Espectros de Fourier | 73 |
| Efecto de sitio | 75 |
| Curvas de atenuación | 75 |
| 4.3 Comentarios a la ley de atenuación | 77 |
| <u>Capítulo V. CONFRONTACIÓN DE RESULTADOS</u> | 80 |
| 5.1 Análisis de resultados mediante los métodos ingenieril y geofísico | 80 |
| Parámetros característicos de vibración inducida | 81 |
| Análisis de resultados, Sitio 1 | 82 |
| Análisis de resultados, Sitio 2 | 84 |
| Análisis de resultados, Sitio 3 | 84 |
| Distancias permisibles | 85 |
| 5.2 Ventajas y desventajas de cada método | 87 |
| 5.3 Recomendaciones | 90 |
| Sitios de medición | 90 |
| Equipo de medición | 91 |
| Método ingenieril | 91 |
| Método geofísico | 91 |
| Reducción del nivel de vibración en campo | 93 |
| CONCLUSIONES | 94 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 97 |

ANEXOS

| | |
|--|-----|
| Anexo 1. Propagación de ondas sísmicas | 101 |
| Anexo 2. Atenuación de vibraciones inducidas | 105 |
| Comportamiento del suelo bajo condiciones de vibración | 105 |
| Antecedentes. Oscilaciones lineales con un grado de libertad | 105 |
| El oscilador armónico simple. Ecuación de movimiento | 105 |
| Oscilaciones con amortiguamiento. Ecuación de movimiento | 107 |
| Oscilaciones forzadas. Ecuación de movimiento | 109 |
| Análisis de atenuación por dispersión geométrica y amortiguamiento | 111 |
| Análisis de atenuación a partir de la ecuación de onda | 112 |
| Amplificación del movimiento del suelo debido a una capa de suelo blando | 112 |
| Anexo 3. Normas Internacionales | 122 |
| Norma Española UNE 22-381-93 | 122 |
| Norma Escocesa PAN50 | 127 |
| Norma Alemana DIN4150 | 129 |

AGRADECIMIENTOS

A mi querida Universidad Nacional Autónoma de México, que me llena de orgullo y me abrió sus puertas

A la Facultad de Ingeniería y mis Profesores, por enseñarme tantas matemáticas matizadas de experiencias inolvidables

A la División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra de la Facultad de Ingeniería

A la Coordinación de Proyectos de Vinculación PEMEX - Facultad de Ingeniería

Al Dr. Martín Cárdenas, mi Director de Tesis, por el valioso tiempo dedicado a este trabajo y todo el apoyo brindado para concluir con esta etapa

Al Ing. Eduardo Amador, por la ayuda brindada durante toda mi carrera

Al Ing. Enrique del Valle, por los conocimientos inculcados en clases y fuera de ellas

Al Mtro. Rolando de la Llata, por sus valiosos comentarios para finalizar este trabajo

Al Dr. Jorge Aguirre, por poner tanto interés en mi trabajo y contribuir a su finalización

Al Dr. Hugo Ferrer por el apoyo en el procesamiento de datos acelerométricos

DE MANERA ESPECIAL DEDICO ESTE TRABAJO:

A Mamá, por haberme enseñado con el ejemplo a salir adelante aun en la peor situación, por darme los principios que forjaron mi carácter y por tu inagotable cariño

A Papá por haber contribuido, con tu efímero paso por mi vida, a ser quien soy

A mis hermanas Ingrid y Helga, porque no me imagino en este mundo sin ustedes y su infinito apoyo en cada etapa de mi vida

A mis cuñados Jorge y Mike, por ser una extensión del cariño y apoyo de mis hermanas, además de mis amigos

A mis sobrinas Ingrid, Fernanda, Rebeca, Madison y Morgan; porque su alegría y sus pequeñas sonrisas son fuente de inspiración indispensable

A Greg porque representas el futuro que siempre he soñado y todo el apoyo que me has dado para concluir con esto

A los Patos, por ser los mejores abuelitos que pude haber tenido; su amor, su entrega y apoyo a lo largo de mi vida han sido invaluable

A la familia Treviño con mucho cariño por creer en mí y ser lo más importante

A la familia Díaz González Treviño, por habernos recibido y ayudado en los momentos más difíciles y ser mi segunda familia

A Opa y Alma, por ser mi otro pedacito de familia

A los que se fueron sin llegar a este momento tan importante, pero me apoyaron incondicionalmente; Tío Benja y Lau, lo comparto con ustedes, donde quiera que estén...

Al Ing. Jorge Navarro Islas por tus consejos, tu cariño y las amenas conversaciones ingenieriles

A mi amigo Alexander, por haber sido mi guía en mis primeros días de universitaria

A Cheki por todo lo que vivimos juntos en nuestra querida Universidad, y la linda amistad que nos une en la actualidad

A mi amiga Lucía, por lo que aprendimos y soñamos juntas mientras buscábamos el objetivo común de la Ingeniería, aunque los caminos, al final, no convergieran

A ese amor imposible de la Facultad, que a distancia se ve ya tan solo como un pedacito necesario en mi vida, pero que fue parte esencial de esta etapa...

A las geofísicas (Señoras): Raquí, Oli, Elba, Jan, Luz y Kari, por compartir mucho más que las matemáticas y por enseñarme tantas cosas, cada una a su modo

A Lourdes porque me demuestras tu cariño siempre, a pesar del poco tiempo que podemos compartir

A Nora por la buena amistad que amarramos en tan poco tiempo

A Luis, por mantenerme con un pie en las humanidades mientras me sumergía en el mundo de la ciencia y por todo eso que hemos compartido que es mucho

A Pablo, por que siempre sabes hacerme reír, aun en mis peores momentos y has estado conmigo a través de los años y la distancia

A Eduardo (Arqui), por recordarme el lado artístico de la vida y perdonarme las burradas

A Ceci , Jessi y Tans por ser mis amigas, confidentes y por todo lo que nos divertimos juntas

A Juan Carlos, por tu amistad y tu confianza con muchísimo cariño

A mi amigo Xih, por tu apoyo incondicional y porque siempre has sido un ejemplo a seguir para mi

A los niños 55 de los buenos tiempos; por las mejores experiencias de hermandad y amistad que he vivido y se conservan a la fecha

A Jaime de la Torre por tu apoyo, cariño y amistad

A Lore y Juan Pablo Bribiesca (Sona), que desde pequeños iluminaron mi vida con su sabiduría e inocencia, y en la actualidad nos une un cariño inmenso

A los “Bros” y los “Compas” por aceptarme como soy y hacerme parte de la gente de mi carrera, una vez terminado Ciencias Básicas

A la Sociedad Astronómica de la Facultad de Ingeniería, por darme la oportunidad de crecer en otro aspecto de la vida; por albergar momentos siderales, necesarios entre tanta matemática y por creer en mi (Paco, Nahum, Pablito, Farah, Bibi, Yoatzín, Luis, Mumu, Efrén y los que no menciono.....)

A mis queridos Pumas, que me regalaron el Bicampeonato y la oportunidad de festejarlo en vivo en su estadio, en compañía de mis amigos

A CIT México por darme la oportunidad de conocer el mundo más allá de la Ingeniería, y las buenas amistades ahí generadas

Con todo mi cariño a todas las personas que contribuyeron a mi formación, con su sólo paso por mi vida, y que por razones de practicidad no alcanzo a mencionar.

RESUMEN

El estudio de atenuación de ondas es importante para la ingeniería, puesto que es necesario contar con una evaluación previa del alcance, y posible daño que producirán las vibraciones propagándose en suelos que sirven como sustento de estructuras, ó a las estructuras mismas. Así mismo, es relevante para evaluar las consecuencias de dicho fenómeno en la geología regional y la molestia de los habitantes.

Es necesario determinar distancias mínimas permisibles, a las cuales, se pueden generar ondas sísmicas, tratando de alcanzar su atenuación hasta igualar vibración ambiental, antes de incidir en zonas urbanas, con grandes cantidades de energía, causando daños estructurales que pueden poner en peligro la vida de los habitantes, o el equilibrio del medio.

Se han utilizado tradicionalmente fórmulas matemáticas empíricas que permiten conocer velocidades máximas de partícula, en función de la distancia de la fuente al punto de medición. Dicha distancia es a su vez normalizada con la energía de la fuente. Como la velocidad de partícula disminuye conforme a la atenuación de la energía, es posible determinar distancias permisibles, de manera que la onda atenúe gran parte de su energía antes de tocar una posible zona de daño.

El modelo tradicional analizado en éste trabajo es la Ley de escalamiento cúbico. Si bien, es un método suficientemente práctico, no proporciona una interpretación física completa, puesto que ignora el tipo de onda generada y el análisis se lleva a cabo en el dominio del tiempo.

Se busca comparar los resultados que arroja dicho modelo, con aquel derivado del análisis del espectro de frecuencia. La manipulación en el dominio espectral proporciona curvas de velocidad de partícula vs frecuencia, con lo cual es posible definir distancias permisibles.

En este último modelo se observa también la contribución de las ondas superficiales y los efectos de sitio involucrados, por lo cual proporciona una interpretación física más completa de los factores que gobiernan la atenuación de la vibración del suelo.

Para estimar la forma en que se atenúan las vibraciones en función de la distancia, con los dos métodos mencionados, se utilizan registros del movimiento del suelo debido a explosiones de pentolita con cargas de entre 1 y 5Kg, en arreglos lineales de acelerómetros distribuidos en una longitud de 300m, para tres zonas de estudio distintas.

Los resultados muestran que el método tradicional proporciona distancias permisibles que se encuentran muy por debajo de normas internacionales, es decir, este método evalúa en forma congruente una vez que se utiliza el pico de velocidad de los registros, sin embargo, se observa que en uno de los sitios estudiados, las amplificaciones son hasta de un orden mayor con respecto a los otros dos sitios.

El análisis de los datos indica que las condiciones geológicas del subsuelo juegan un papel importante. Así mismo, la evaluación de los efectos de sitio indica que las distancias permisibles obtenidas en el dominio del tiempo están sesgadas debido a que el pico de velocidad puede no capturar el efecto de atenuación de los materiales del subsuelo y el tipo de onda predominante. Por ello, se llevó a cabo la confrontación de estos resultados con aquellos obtenidos utilizando el segundo método.

Mediante el análisis espectral, con el segundo método, se observa claramente la contribución de ondas de cuerpo (P y S) y ondas superficiales. Estimando el límite espacial de la aparición de estos dos tipos de onda y evaluando las distancias permisibles en ese punto, se tiene que estas distancias se incrementan hasta por un factor de 2 respecto a las obtenidas por el primer método que resulta más conservador.

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

El estudio de atenuación de vibraciones generadas artificialmente propagándose por suelos, surge a partir de la necesidad ingenieril de conocer el daño causado, tanto a estructuras erigidas por el hombre, como a la estabilidad de estructuras geológicas, mantos acuíferos etc. Y ha venido cobrando importancia a medida que las fuentes generadoras de tales vibraciones aumentan en cantidad, magnitud y cercanía a zonas pobladas.

Las primeras investigaciones al respecto, fueron llevadas a cabo por el U.S. Bureau of Mines (USBM) en 1930 (Lee et al, 1936) y constaban del análisis del comportamiento de rocas bajo los efectos de vibración generada por explosivos. Dicho análisis requería desarrollar y calibrar un tipo de sismógrafo, adaptado para medir la amplitud de vibraciones generadas durante las operaciones normales de explotación de minas, con el fin de evitar poner en riesgo la vida de las personas involucradas en la operación, así como la estabilidad de la mina.

Se originaron entonces nuevas vertientes en el desarrollo del estudio del decaimiento de vibraciones, también conocido como teoría de atenuación, a través de distintas aplicaciones en diferentes áreas de estudio.

Debido a que las ondas, propagándose por cualquier tipo de medio, pueden ser caracterizadas por las mismas variables, es posible utilizar el mismo principio de modelado, ya sea en ondas acústicas propagándose en aire, ondas sísmicas propagándose en suelos ó estructuras, etc. Este trabajo estará enfocado al caso particular de ondas sísmicas generadas por fuentes artificiales (explosiones) cuyo medio de propagación es la Tierra.

Explicado de manera breve, la teoría de atenuación se basa en el hecho de que la onda de choque es amortiguada a medida que su frente se aleja de la fuente; tal amortiguamiento es causado por factores como la dispersión geométrica de energía en un espacio tridimensional, el carácter no completamente elástico de las rocas y la presencia de agua llenando vacíos, entre otros.

Al llevar a cabo el estudio de atenuación de vibraciones, es conveniente definir ciertas zonas físicas que se ven involucradas en la propagación y recopilación de datos, al respecto, G.A. Bollinger (1980), definió lo siguiente:

- a) Zona de generación (fuente)
- b) Zona de propagación sísmica
- c) Zona de propagación acústica
- d) Zona de recopilación de datos

La fuente y la zona de propagación sísmica determinan las características medibles en las ondas generadas, como velocidad de partícula, frecuencia, amplitud y distancia recorrida.

A pesar de que las ondas acústicas también pueden provocar daños en estructuras y en el medio ambiente (v.gr. daños a ventanas y fachadas de materiales frágiles), la zona de transmisión acústica, no será considerada en este trabajo, por no estar relacionada con el estudio de propagación de ondas en suelos.

La zona de recopilación de datos, se encuentra en la zona de generación y la zona de propagación; con la implementación de distintas configuraciones en la ubicación de instrumentos de medición, distribuidos estratégicamente de acuerdo al objetivo del estudio.

Aplicando las definiciones mencionadas, los ingenieros se dieron a la tarea de llevar a cabo experimentaciones que han ayudado a definir criterios ó normas por observar, al provocar detonaciones que producen vibraciones que alteren el medio ó las estructuras.

Justificación del estudio

La importancia del estudio de atenuación de ondas para la ingeniería, radica en la necesidad de contar con una evaluación previa, del posible daño que podrían provocar las vibraciones propagándose en suelos que sirven como sustento de estructuras, ó a las estructuras mismas. Así mismo, es relevante para evaluar las consecuencias de dicho fenómeno en la geología regional y la molestia de los habitantes. Por ello se requiere mejorar las técnicas para definir con mayor precisión, el comportamiento de atenuación de ondas bajo distintas condiciones y la amplitud del movimiento, entre otras cosas.

Para reducir los daños causados por vibración, es necesario determinar distancias mínimas a las cuales se pueden generar ondas sísmicas, tratando de alcanzar su atenuación hasta igualar vibración ambiental, antes de incidir en zonas urbanas, con grandes cantidades de energía, que pueda causar daños estructurales poniendo en peligro la vida de los habitantes, o el equilibrio del medio.

Buscando establecer posibles parámetros ó límites admisibles de vibración, la UNESCO publicó en 1995 un documento llamado "Aspectos Geológicos de Protección Ambiental". Dichos límites deben ser respetados con el objetivo de proteger la vida y mantener el equilibrio con el medio ambiente, al igual que se ha hecho con parámetros establecidos a fin de conservar la calidad del aire y del agua. La publicación busca establecer principios básicos de medición y procesamiento de señales, con el fin de evaluar los efectos de las vibraciones en estructuras.

Para determinar el daño en estructuras se ha utilizado tradicionalmente, una fórmula matemática empírica que permite el cálculo de curvas de amplitudes máximas de velocidad (V_s), tomando en cuenta la distancia de la fuente al punto de medición (R), así como ($w^{1/3}$) que es la raíz cúbica de la carga explosiva. Si bien, es un método suficientemente práctico, no proporciona una interpretación física completa, puesto que ignora el tipo de onda generada, cuando en realidad se tienen diferentes ondas que transmiten distintas cantidades de energía, según el tipo de terreno por donde se propagan, a velocidades distintas. Por consiguiente, cada tipo de onda necesitará tiempos distintos para alcanzar puntos a la misma distancia.

En referencia a lo anterior, Dowding (1985) señala que el espectro de frecuencias del movimiento vibratorio es tan o más importante que la velocidad de vibración en la evaluación del potencial de daño.

Incorporando resultados obtenidos en trabajos desarrollados en el campo de la sismología y explosiones atómicas sobre estructuras capaces de resistirlas, Dowding (1985) concluyó que las estructuras responden en modo diferente, al ser sometidas a vibraciones idénticas en todos los aspectos, pero diferentes en la frecuencia principal, descubriendo que las bajas frecuencias tienen mayor probabilidad de dañar a las estructuras, que las altas (v. gr. una estructura residencial responderá menos a un movimiento de terreno de 12mm/s a una frecuencia principal de 80Hz que a una frecuencia principal de 10Hz, por consiguiente, el movimiento a 80Hz tiene menos probabilidad de fisurar la estructura que el movimiento a 10Hz).

Aunado a lo anterior, las bajas frecuencias pueden llegar a coincidir con la frecuencia natural de vibración de las estructuras; de suceder esto, el movimiento se amplifica pues se presenta el fenómeno de resonancia y las deformaciones son mayores.

Es por eso que en este trabajo se analizará un modelo distinto al tradicional, basado en la incorporación del tipo de onda (ondas S), por medio del análisis de su espectro de frecuencia (Fourier), asumiendo, que las vibraciones tienen una forma sinusoidal, lo que facilita su representación matemática y no introduce errores importantes (Chapot, 1981; Dowding, 1985; Langefors y Kihlstrom, 1978). La manipulación de dichos espectros proporcionará curvas de atenuación en función de la distancia, con lo cual se realizará la confrontación de resultados entre este y el método ingenieril.

Presentación del trabajo

Se analizará el fenómeno de atenuación desde dos puntos de vista distintos; el modelo matemático empírico tradicional utilizado en la ingeniería, que involucra la distancia de la fuente a la estación de medición y la carga utilizada en la explosión, en el dominio del tiempo, y el modelo utilizado por Cárdenas et al (1993,1994a, 1994b), el cual involucra el tipo de onda propagándose, la dispersión geométrica y la atenuación anelástica del medio. Debido a que este último modelo se lleva a cabo en el dominio de la frecuencia, es posible inferir el efecto de sitio involucrado.

El capítulo uno proporciona un panorama general de antecedentes, necesarios para introducir al lector en el tema de estudio; trabajos previos llevados a cabo y cómo se fueron desarrollando los métodos utilizados para la determinación de límites admisibles. Se habla también de la naturaleza de los daños, que con el tiempo y la experiencia han sido establecidos por distintos autores, con el objetivo de establecer parámetros precisos de factores de calidad, normas y reglamentación internacional diseñada a la fecha para el fenómeno de vibración generada por humanos, y por último se habla de manera general de los mecanismos de detonación, necesarios como complemento a la información manejada en este trabajo, pues los datos utilizados se obtuvieron de pruebas de explosión.

En el segundo capítulo se presentan los datos de campo que serán utilizados en los métodos comparados en este trabajo, así como un panorama regional de la geología de la zona donde fueron recabados. Se describen también las configuraciones de adquisición de datos, y el manejo de los mismos, con el objetivo de tenerlos listos a utilizar en los modelos que arrojarán los límites de distancias permisibles.

Los capítulos tres y cuatro, proporcionan el marco teórico necesario para conocer los dos métodos analizados, así mismo, se presenta los resultados obtenidos por ambos métodos, tras la aplicación de los datos obtenidos en campo.

Finalmente el capítulo cinco contiene las conclusiones, así como, el análisis de resultados obtenidos de la aplicación de cada método, su comparación y posibles recomendaciones.

Ambos métodos pueden ser desarrollados a partir de los mismos datos de campo, lo cual reduce las posibles complicaciones prácticas. La meta perseguida al analizar estos métodos, es establecer el desarrollo y práctica de los modelos, la eficacia de los mismos en la obtención de distancias permisibles y las ventajas y desventajas de cada uno.

Así mismo, se busca definir cuál de los dos métodos permite una mejor caracterización física del medio de propagación, pues de éste modo se puede tener un mejor conocimiento geológico de la zona de estudio.

CAPITULO 1

GENERALIDADES

1.1 DAÑOS CAUSADOS POR VIBRACIONES Y LÍMITES ADMISIBLES

Las vibraciones que más han sido estudiadas son aquellas causadas por sismos, sin embargo, es necesario poner atención al estudio de vibraciones generadas artificialmente, ya que requieren ser analizadas con un enfoque distinto para su control, esto por varias razones; en primer lugar, a diferencia de los sismos, las vibraciones generadas por humanos son controlables, bajo el conocimiento previo de su generación, características y efectos. Se sabe que dichas vibraciones no pueden llegar a tener la intensidad de movimientos sísmicos, pero son mucho más frecuentes, pudiendo poner en peligro estructuras y vidas humanas, además el tipo de vibraciones generalmente es diferente a las sísmicas, en casi todas las características de forma de onda (frecuencia, envolvente, duración, etc.)

Al elaborar proyectos de ingeniería civil, geofísica o de minas, es necesario tener una evaluación previa de las consecuencias de las vibraciones sobre las estructuras, y los habitantes de la zona. Para ello, es necesario prever los niveles de vibración a diferentes distancias del lugar de detonación. A partir de los años treinta se ha trabajado en la búsqueda de:

- a) Una relación empírica entre alguna medida de la energía de la vibración y la probabilidad de daños a residencias y otras estructuras de las cercanías.
- b) Una relación empírica entre la carga detonada y la energía de la vibración, en función de la distancia.
- c) De aparatos capaces de captar las vibraciones de manera precisa, fiable y reproducible.
- d) De los límites máximos admisibles de vibración
- e) De las medidas económicamente viables a ser tomadas para evitar que las vibraciones sobrepasen límites máximos

Si bien, la propagación de las ondas de choque por el macizo rocoso fue comprendida satisfactoriamente, el comportamiento de las estructuras sometidas a vibraciones transitorias demoró más en ser modelado. En efecto, se midió y se previó los niveles de vibraciones transmitidas por el macizo rocoso y por la capa de suelo a la altura de las cimentaciones de estas estructuras, pero su comportamiento dinámico y la forma como transmiten y amortiguan las vibraciones que les llegan, fueron incorporaciones más recientes a la investigación.

La U.S. Bureau of Mines (USBM) inició su programa de investigaciones respecto a este fenómeno en 1930. Su objetivo fue desarrollar un tipo de sismógrafo capaz de captar vibraciones generadas durante las operaciones normales de explotación de minas. Luego de estudiar los aparatos utilizados en la captación de vibraciones causadas por sismos, los investigadores se avocaron a proyectar y construir un sismómetro que midiera directamente la amplitud del movimiento vibratorio. Fue necesario diseñar y construir mesas vibratorias que oscilaran con frecuencias y amplitudes conocidas y regulables, que sirvieran para calibrar los sismómetros. Dichos equipos fueron los precursores de los

modernos sismómetros de ingeniería, llamados así para diferenciarlos de los sismómetros empleados en sismología.

Luego de construidos, ajustados y calibrados, se inició una campaña de trabajos de campo, en diversas canteras y mina experimental del USBM. En aquella época la motivación de los estudios era por casos de litigios entre mineros y la población, que los acusaba de provocar daños a sus casas. La primera publicación derivada de los experimentos, sin presentar todavía muchos resultados, data de Noviembre de 1936 (Lee et al, 1936).

Durante 1937, continuaron las pruebas, hasta que se produjeron daños en una de las casas experimentadas. En los siguientes dos años se efectuaron nuevas pruebas, con el empleo de explosivos y vibradores mecánicos. El programa de investigaciones fue clausurado en 1940, con el análisis retrospectivo de los datos y la tentativa de modelización matemática de los resultados y conclusiones.

Las síntesis y conclusiones de investigaciones de esa década fueron publicadas por Thoenen y Windes (1942), admitiendo el carácter preliminar del trabajo, y la necesidad de estudios más profundos y de dilucidación de una serie de preguntas pendientes. Entre las conclusiones obtenidas, destaca lo siguiente:

- 1) La presencia de capas no consolidadas causa mayor amplitud de movimiento en bajas frecuencias que en roca sana, en iguales condiciones de distancia y de carga explosiva.
- 2) La escala de Mercalli, normalmente usada para evaluar el efecto de sismos, es inadecuada para vibraciones producidas por explosivos; para aceleraciones consideradas como provocadoras de daños serios o totales en aquel caso, no se observó ningún daño durante los ensayos.
- 3) Se dedujo una fórmula matemática empírica para el cálculo de la traslación en función de la distancia y de la carga explosiva.

Finalmente se propuso un criterio de daño; el de aceleración del movimiento oscilatorio (deducida a partir de la medida de amplitud y frecuencia). Durante las pruebas fueron comprobados daños, solamente cuando la aceleración era aproximadamente igual ó mayor que la aceleración de la gravedad $980g^1$. Para evitarlos fue recomendado que la aceleración no sobrepasara $0.1g$

En 1949, Crandell publicó un artículo proponiendo otra manera de estimar el potencial de daño: un coeficiente llamado "Coeficiente de energía" definido por el cociente entre el cuadrado de la aceleración máxima y el cuadrado de la frecuencia del movimiento.

La primera publicación que propone el empleo de la velocidad de vibración (velocidad de partícula) se debe a Langefors y colaboradores (1958), cuyos ensayos fueron realizados en rocas duras y sanas. La variable medida era la traslación y el equipo de investigación hizo n construir su propio vibrógrafo. El riesgo de daño, para estructuras erigidas sobre roca, según las conclusiones de estos autores, se correlaciona con la velocidad de partícula de tal manera que a mayor velocidad mayores daños observados. El criterio de daño utilizado se

¹ $980 \text{ gal} = 9.8 \text{ m/s}^2$

expresa en función del cociente entre la velocidad de partícula V y la velocidad de propagación de la onda de choque a través del macizo rocoso C . Cabe destacar que las frecuencias registradas durante las pruebas fueron bastante altas (entre 50 y 500Hz) lo que se debe a la naturaleza de la roca.

En la misma época, en Checoslovaquia, Dvorak realizaba experimentos semejantes, concluyendo también que la velocidad de partícula es un buen criterio para evaluar el potencial de daño. En 1962, una nueva publicación del U.S. Bureau of Mines revisó alrededor de 40 artículos sobre el tema, encontrando tres que presentaban datos sobre vibración, conjugados con observaciones sobre el nivel de daño a estructuras residenciales.

Los trabajos de Edwards y Northwood (1960), Lee et al (1936) y Thoenen y Windes (1942). Estos datos fueron trabajados estadísticamente tratando de determinar cuál parámetro (translación, velocidad o aceleración) presentaba una mejor correlación con el grado de daño observado. El estudio indicó a la velocidad de partícula como el parámetro más adecuado, manteniendo el valor de 50mm/s como garantía de probabilidad muy baja de ocurrencia de daño, para una gran variedad de condiciones de suelo y roca.

Fogelson (1971), presenta una nueva síntesis de análisis de datos. El mismo valor de 50mm/s se mantiene como límite por debajo del cual la probabilidad de daños es muy pequeña. En 1980 el U.S. Bureau of Mines revisa de nuevo este valor y lo considera excesivamente alto en otras partes del mundo, introduciendo la frecuencia como parámetro tan importante como la velocidad de partícula, avance sustancial conseguido a través del análisis del comportamiento dinámico de las estructuras en función del espectro de frecuencias del movimiento vibratorio.

Trabajos realizados en diversos países propusieron distintos valores de velocidad máxima de partícula tratando de evitar daños a estructuras. Dichos valores se sitúan, en general, entre 10 y 20mm/s. Chapot (1981), realizó un profundo estudio retrospectivo donde sugirió una gama de 10 a 30mm/s, sin hacer mención a la frecuencia.

En Canadá, Edwards y Northwood (1960) condujeron otra serie de pruebas en rocas blandas y suelo no consolidado, trayendo nuevos elementos. Estos experimentos, junto con otros realizados más tarde con igual metodología, hicieron evidente la importancia de la frecuencia, sugiriendo una considerable variación en el límite de daño en función de ésta.

En México, Ordaz y Singh presentaron una técnica en 1992 para cuantificar la amplificación de las ondas sísmicas en determinadas zonas de la Ciudad de México; que consiste en realizar dos regresiones independientes sobre la amplitud de las señales en función de la distancia R y de la frecuencia F . La primera regresión permite estimar las características espectrales de la fuente. La segunda regresión utiliza las características de la fuente determinadas para estimar el llamado, factor de calidad, que representa la máxima pérdida de energía de la onda, por cada ciclo.

Por su parte Cárdenas et al (1993, 1994a, 1994b) aplican la técnica mencionada, para cuantificar la atenuación de la energía sísmica en trayectorias continentales, paralelas y perpendiculares a la costa del pacífico, utilizando datos recabados, tanto de sismos como de

detonaciones en el mar. Los resultados obtenidos muestran que la respuesta teórica en superficie para el modelo propuesto, ante incidencia vertical de ondas SH, concuerda con las funciones de transferencia empíricas obtenidas con registros de vibración ambiental y explosiones.

1.2 NATURALEZA DE LOS DAÑOS

Las primeras investigaciones sobre límites de seguridad para vibraciones, carecían de una definición adecuada de la palabra “daño”. La primera definición completa surge en los trabajos canadienses (Edwards y Northwood, 1960 y Northwood et al., 1963), que refieren lo siguiente:

- Límite de daño: Apertura de viejas fisuras y formación de nuevas fisuras en el , desplazamiento de objetos sueltos
- Daño menor: superficial, no afectando la resistencia de la estructura (v. gr. quebradura de ventanas y formación de fisuras en la mampostería)
- Daño mayor: sería debilitación de la estructura (v.gr. grandes fisuras, movimientos de cimientos o muros conductores, recalques en distorsión o debilitamiento de la superestructura, paredes fuera de plomo) (Edwards y Northwood, 1960)

Actualmente se ha definido límite de daño como la ocurrencia de fisuras de dimensión capilar en el revestimiento de las paredes, del tipo de las que aparecen con frecuencia en muchas estructuras, independientemente de estar o no sometidas a vibraciones. Este tipo de ocurrencia se llamó “cosmético” por algunos autores, pues no compromete ni la resistencia ni la estabilidad de la estructura.

Stagg et al (1984) estudiaron el origen y el proceso de fisuración en residencias, concluyendo que “la actividad humana y las variaciones de temperatura y humedad provocan deformaciones en paredes equivalentes a movimientos de terreno de hasta 30mm/s. El golpe de una puerta, por ejemplo, puede causar deformaciones de hasta 140 micropulgadas/pulgada, equivalente a la deformación causada por una vibración de 12.5mm/s.”

Por consiguiente, Stagg et al (1984), simularon las condiciones de fatiga de una estructura sometida a vibraciones con el auxilio de un vibrador mecánico que producía deformaciones equivalentes a las de una velocidad de partícula de 12.5mm/s. La primera fractura apareció luego de 56.000 ciclos, lo que equivaldría a 28 años de actividad de explotación minera.

Los criterios de daño más comunes en la actualidad, incluyen a las normas extranjeras establecidas más utilizadas, como la norma de Bureau of Mines (Siskind et al, 1980) y la norma alemana DIN 4150 (1986); siendo esta última, la más exigente en sus valores permisibles

Dichas normas, son relaciones entre velocidades vs frecuencia de vibración del suelo, a través del cual se propaga la onda, que establecen rangos permisibles de construcción de estructuras, con el objetivo de proporcionar seguridad a los habitantes.

1.3 MECANISMO DE DETONACIÓN

Cuando se detona una carga explosiva en el interior de un macizo rocoso, su energía potencial se libera en un intervalo de tiempo muy corto. El mecanismo de detonación es tal que se genera una elevada presión en la zona de reacción química del explosivo. La potencia de una detonación suele tener valores del orden de 16 Gigawatts, esta presión provoca una onda de choque cuya energía se propaga a través del suelo o macizo rocoso. Dicha onda de choque es una onda sísmica que puede ser de tipos diferentes (Anexo 1)

Algunos de los factores involucrados en la medición de datos que provienen de explosiones artificiales son:

- Energía de la fuente; cantidad y tipo
- Tipo de disparo; instantáneo o con retraso
- Geometría de la zona de generación; profundidad, aire libre ó confinado, etc.
- Distancia de ubicación de los instrumentos de medición
- Geología de la zona
- Tipo y características de respuesta de los instrumentos de medición

Kisslinger et al (1963, 1964, 1966, 1969), llevaron a cabo una serie de investigaciones, estudiando la generación de ondas sísmicas por medio de explosivos en modelos homogéneos bidimensionales. Se encontró que la propagación de los dos tipos de ondas (P y S) era fuertemente modificada, cuando la fuente se encuentra lo suficientemente cerca de la superficie, como para producir cráteres. La amplitud de las ondas P, en la cercanía de la superficie es mayor a la amplitud medida, propagándose en el interior del medio. Mientras que la amplitud de las ondas S mostró variaciones en la zona cuyo ángulo crítico hace que las ondas P y S se reflejen.

Estos autores encontraron también que la zona de generación de ondas con distinto material del medio de propagación, (aire o sólido), modifica el espectro de frecuencia de ondas P.

Para modelar el efecto de deformación por la propagación de ondas sísmicas, Kim y Kisslinger (1967) realizaron mediciones en medios sometidos a esfuerzos estáticos. Una pequeña pero definitiva anisotropía fue producida por la deformación estática, teniendo como resultado que a mayor tensión, mayor amplitud de ondas S y P.

Kisslinger, Mateker y McEvelly (1963) realizaron una serie de experimentos con explosivos químicos en medios naturales durante tres años, en los cuales se utilizaron aproximadamente 160 cargas de entre 0.11 y 6.8Kg, en ubicaciones variables entre los 38 y 3m bajo la superficie del suelo, ubicando los instrumentos de medición a 250m de distancia.

Los distintos tipos de medio estudiados fueron en su mayoría arena, arcilla, aluvi3n y limo. A partir de dicho estudio, los autores formularon las siguientes conclusiones:

1. En medios densos y r3gidos, el movimiento m3ximo es menor que en materiales no consolidados.
2. La frecuencia de todos los eventos es mayor en materiales r3gidos
3. No se encontraron diferencias en la atenuaci3n de ondas superficiales, mientras que la atenuaci3n de ondas P es menor en materiales r3gidos.
4. Las ondas de corte (de cuerpo y love) son relativamente mayores que las ondas P y Rayleigh, en materiales r3gidos
5. La propagaci3n de ondas P y Rayleigh es mucho menos sim3trica en materiales no consolidados que en medios r3gidos.

Nicholls y Hooker (1962) y investigaron el acoplamiento² de la energ3a de los explosivos en relaci3n al medio; definiendo 2 tipos de acoplamiento de explosivos en roca: Geom3trico e impedancia (3 s3smico)

El acoplamiento geom3trico, para cargas cil3ndricas se define como el cociente del di3metro de la carga, por el di3metro de la cavidad donde 3sta se coloca, multiplicado por 100. Por consiguiente, si la carga se ajusta por completo en la cavidad, entonces el acoplamiento geom3trico ser3 del 100%.

El acoplamiento de impedancia (s3smico) se define como el cociente de la impedancia caracter3stica del explosivo (densidad de la carga x velocidad de detonaci3n de la carga) por la impedancia caracter3stica del medio (densidad de la roca x velocidad de onda P).

En sus experimentos, Nicholls mantuvo la forma de la carga y la densidad constantes y utiliz3 distancias escaladas (m/kg. 1/3). El uso de distancias escaladas implica que, para un sitio dado, dos detonaciones de cargas de distinto tama1o, producir3n la misma deformaci3n (o amplitud en la velocidad de part3cula) a la misma distancia escalada.

Las cargas empleadas fueron de dinamita de alta velocidad con gravedad espec3fica de 1.4 y tasa de detonaci3n de 5,486m/seg.

Se llev3 a cabo el estudio en condiciones de acoplamiento geom3trico de cuatro formas distintas (100%, 78%, 65% y 49%) en medios limosos. Dichos limos tienen gravedad espec3fica de 2.6 y una velocidad de ondas P de 4,267m/seg. La gr3fica de la amplitud relativa de deformaci3n (%) contra el acoplamiento (%), mostr3 que la amplitud de deformaci3n es proporcional al acoplamiento Geom3trico. Como era de esperarse, de la definici3n del mismo, la m3xima deformaci3n se obtuvo cuando el acoplamiento geom3trico fue del 100%.

En cuanto al acoplamiento s3mico, fueron llevadas a cabo pruebas para cuatro distintos tipos de explosivos qu3micos en medios salinos, cuya gravedad espec3fica es de 2.2 y la velocidad de ondas P de 4,389m/seg.

² Blast Vibration An3lisis, G.A. Bolinger, Illinois University Press, 1980

A partir de los resultados obtenidos, Nicholls concluyó que la máxima amplitud sísmica, se obtiene cuando la impedancia característica del explosivo es igual a la de la roca.

Adams y Swift (1961) analizaron el efecto del medio en el que se ubica la fuente, en relación con el acoplamiento sísmico, llevando a cabo detonaciones de explosivos químicos (de 45kg a 455kg), en dos distintos medios; limos y salinos, la medición del movimiento del suelo se hizo a 122m de distancia a la fuente.

Dichos autores concluyeron que para una frecuencia dominante de 30 a 60Hz, la intensidad de la señal en limos era de 1.6 ± 0.4 veces que en el medio salino. Así mismo, notaron que la presión litostática en las zonas con mayor carga, afecta la cantidad de energía transmitida en la zona elástica, de manera que al aumentar la presión litostática, aumenta la energía propagada en la zona.

1.4 TIPOS DE ANÁLISIS DE VIBRACIÓN INDUCIDA

Se cuenta con una gran variedad de técnicas en la literatura relacionada con el manejo y caracterización de vibraciones inducidas, (Bollinger, 1980; Dowding 2001) algunas obsoletas. Dichas técnicas pretenden calcular la amplitud y frecuencia de las vibraciones, para ser comparadas con normas ó para ser utilizadas en investigaciones.

Los grupos generales en que pueden ser catalogadas todas las técnicas de análisis son:

- Análisis como vibraciones armónicas en registros análogos: Este grupo asume que el movimiento del suelo causado por una explosión, y registrado en medios análogos, se halla en estado sinusoidal estacionario en el intervalo de interés de la señal (figura 1.1, arriba). La amplitud máxima y la frecuencia asociada puede ser hallada por simple inspección de la señal. (Bollinger 1980 y Dowding 2001).
- Análisis como vibraciones transitorias en registros análogos: Si la primera llegada de vibración es una onda impulsiva y es a la vez el máximo de la señal (figura 1.1, abajo), y dado que la curva de magnificación dinámica de los sensores es basada en la respuesta del estado estable del sensor, la información de vibración registrada ha sido transformada; si la señal es análoga y no se puede realizar corrección instrumental, entonces el método utilizado consiste en medir la amplitud y la frecuencia de la señal en el máximo y luego realizar correcciones de las variables por medio de ecuaciones (función de corrección instrumental preestablecida para el sensor) (Bollinger, 1980).
- Análisis digital de señales: En este grupo se encuentran las técnicas de procesamiento que se aplican a señales digitales con el fin de encontrar algunos parámetros relevantes o para corregir la señal. Entre estas técnicas están: filtrado, análisis de Fourier, reconocimiento de tipo de ondas, integración y derivación numérica, etc.

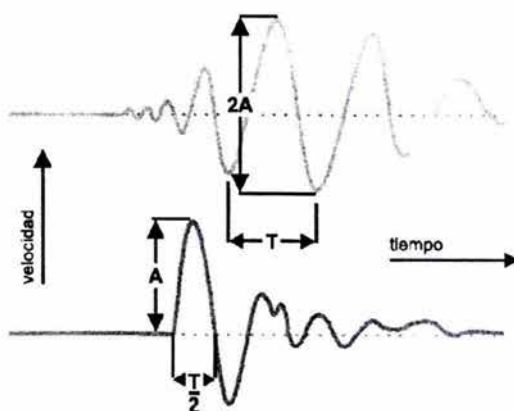


Figura 1.1 Forma de la onda para el análisis armónico (arriba) y transitorio (abajo) Bollinger, (1980)

- Respuesta espectral: Este es el mismo método utilizado en dinámica de estructuras, en el cual se encuentra la respuesta máxima de una serie de sistemas estructurales de un grado de libertad bajo el efecto de una vibración temporal; (Chopra 2001) es una referencia aconsejable sobre el método, y la aplicación en vibraciones generadas por explosiones se encuentra en Dowding (2001).

Los tipos de análisis más utilizados, cuando las señales se registraban en medios analógicos eran aquellos que les daban tratamiento armónico y transitorio, puesto que los procedimientos muy elaborados eran impracticables. Asumiendo que las vibraciones producidas por explosiones, se aproximan a señales armónicas dentro de pequeños intervalos de tiempo de la señal original, fueron elaboradas las normas internacionales, previas a los años 80 y muchas investigaciones básicas sobre el tema, se basaron en señales análogas y usaron este tipo de análisis.

Con la llegada de las computadoras y la digitalización, cobraron auge los últimos dos tipos de análisis (procesamiento digital y espectros elásticos de respuesta), mismos que han sido desarrollados y aplicados cada vez más en el área de manejo y caracterización de señales producidas por explosiones³.

El análisis digital permite mejorar la calidad de la información, puesto que permite eliminar aquellas partes de información no deseadas (ruido). Además es posible utilizar técnicas elaboradas como el espectro de Fourier ó el espectro de respuesta (Anexo 2, Ecuación A.78). La tendencia en este sentido es utilizar técnicas de análisis como el espectro elástico, que relaciona las vibraciones con su efecto en sistemas estructurales y también con daño cosmético (Dowding 2001) y técnicas de procesamiento digital de señales.

³ Exceptuando las aplicaciones militares que llevan más tiempo utilizando estas tecnologías

En la actualidad los sistemas de monitoreo de vibración inducida más concurridos en el sector de la minería son los elaborados por las empresas Instantel (<http://www.instantel.com>) y Blastronics (<http://www.blastronics.com.au/>), los cuales arrojan valores pico de las variables deseadas. (Benjumea 2003)

1.5 REGLAMENTACIÓN DE MANEJO DE VIBRACIÓN

Las vibraciones generadas por actividad humana, tales como maquinaria de construcción, explosiones ó incluso tráfico vehicular y férreo, pueden llegar a causar daños cosméticos y estructurales a las edificaciones.

Con el crecimiento de la urbanización y la explotación minera, por mencionar dos de las fuentes generadoras de vibración más comunes, han aumentado en las últimas décadas los niveles de vibración, por lo que surgió la necesidad de acotar los máximos niveles permitidos, con el fin de evitar daños en las estructuras.

Tales valores máximos han sido definidos con mediciones y reconocimiento de daños en edificaciones, incluyendo cierto margen de seguridad por lo que, en el ámbito internacional, las vibraciones producidas por explosiones han comenzado a ser controladas por medio de normas ó legislaciones generadas a partir de los estudios de atenuación de vibraciones.

Conceptos básicos

La velocidad de vibración de partícula, para una capa de suelo determinada ó un tipo de estructura, es la variable decisiva, puesto que determina los esfuerzos que pueden ser causantes de daños.

Según Persson et al (1994) la relación entre la velocidad de partícula y los esfuerzos, en el caso idealizado de una onda plana propagándose por un medio elástico infinito, está dada por:

$$\sigma = \varepsilon E, \quad \text{si } \varepsilon = \frac{\dot{u}}{c} \quad \Rightarrow \quad \sigma = \frac{\dot{u}E}{c}$$

Donde σ , es el esfuerzo; ε , es la deformación; E , es el modulo de elasticidad; \dot{u} , es la velocidad de partícula y c , la velocidad de propagación de la onda sísmica. (para una velocidad de propagación y modulo de elasticidad constante)

Es por ello que todas las normas y recomendaciones enfocadas al potencial de daños generados por vibraciones inducidas utilizan la velocidad de partícula como variable básica.

La segunda variable importante a tomar en cuenta en la evaluación de potencial de daños es la frecuencia de la vibración incidente, puesto que la magnitud de las deformaciones que un nivel de vibración dado genera en una estructura, también depende del comportamiento dinámico de ésta, en particular, de sus frecuencias de resonancia o respuesta.

Además de la velocidad de partícula y las frecuencias asociadas, existen otros factores involucrados en la probabilidad de daños por vibraciones, como:

- la duración de las vibraciones
- la frecuencia con la que son llevados a cabo los eventos generadores de vibración
- la resistencia de los materiales que constituyen la estructura
- la calidad de la construcción, los esfuerzos estáticos preexistentes (incrementados, por ejemplo, por asentamientos del suelo)
- el nivel de mantenimiento y conservación de la estructura

En la mayoría de los casos, no es justificable económicamente llevar a cabo una evaluación rigurosa del potencial de daños por vibración, por lo que generalmente se recurre a normas y recomendaciones, que relacionan características de la estructura y del suelo de cimentación, con el tipo de vibración y los niveles de la misma (velocidad de partícula, frecuencia dominante), así como características de la explosión (cantidad de carga, distancias, etc.).

Dichas normas han sido producto de la experimentación durante varias décadas, involucrando miles de mediciones y observaciones de daños; sin embargo, su aplicación en ambientes diferentes a donde fueron generadas, requiere una cuidadosa evaluación, pues hay que considerar aspectos geológicos locales y regionales, tipología de las estructuras, materiales de construcción, etc.

En general, las normas internacionales para el control de efectos de vibraciones causadas por los humanos, no distinguen el tipo de fuente, excepto algunas normas específicas para voladuras con explosivos.

Hoy en día, los niveles de vibración causados por explosiones pueden ser reducidos mediante la limitación de las cargas ó secuenciando las explosiones, de tal suerte que la energía transmitida al suelo sea distribuida en el tiempo, lo cual disminuye las velocidades máximas de vibración. Además de lo mencionado, existen técnicas aun más sofisticadas, que mediante una secuenciación controlada y previamente diseñada, logran fenómenos de interferencia destructiva y directividad en el campo de las ondas generadas en la explosión.

Es importante evaluar la vibración en tres direcciones ortogonales (exigido por algunas normas), para observar asimetría de radiación en las explosiones, propiedades de los distintos tipos de onda generadas y hacer posible la observación de particularidades de la transmisión de ondas elásticas en el suelo.

Los valores de velocidad de partícula máximos permitidos ó recomendados varían de una norma a otra; sin embargo, el valor indicativo que más se ha utilizado es el de 50.8 mm/s, fundamentado en una cantidad repetida de observaciones hechas por Langefors y Kihlström (Bollinger, 1980; Persson et al, 1994), quienes en 1963, establecieron valores de velocidad de partícula pico y sus efectos asociados, para distintos tipos de suelos

Normas Internacionales

Siendo este trabajo un análisis de comparación entre dos métodos que permiten obtener distancias permisibles, es necesario confrontar los resultados obtenidos para los datos de campo expuestos en el Capítulo 2, con normas internacionales, a fin de conseguir conclusiones reales.

La tabla 1.1 muestra algunas de las normas internacionales más importantes, desarrolladas y utilizadas durante las últimas décadas.

En este trabajo se hará uso de tres de las normas mencionadas; La Norma Alemana DIN4150, la Norma Escocesa PAN50 y la Norma Española UNE 22-381-93, mismas que se describen en el Anexo 3.

Tabla 1.1 Normatividad Internacional en el manejo de explosiones

| PAIS DE PROCEDENCIA | NOMBRE DE REGLAMENTACIÓN | FECHA DE EXPEDICIÓN |
|---------------------|--------------------------|---------------------|
| Alemania | DIN 4150 | 1975 |
| Brasil | CETESB D7.013 | 1998 |
| Escocia | PAN50 | 2000 |
| EEUU-Federal | USBM RI8507 | 1980 |
| EEUU-Federal | OSM 817.67 | 1983 |
| España | UNE 22-381-93 | 1993 |
| Francia | Recomendaciones GFEE | 2001 |
| Internacional | ISO 4866 | 1990 |
| Italia | UNI 9916 | 1991 |
| Nueva Zelanda | NZS 4403 | 1976 |
| Portugal | NP 2074 | 1983 |
| Reino Unido | BSI 6472 | 1992 |
| Reino Unido | BSI 7385 | 1993 |
| Suecia | SS 460 48 46 | 1991 |
| Suiza | SN 640 312a | 1992 |

La norma alemana tiene tres actualizaciones en los años 1999 y 2001 (De Benjumea 2003).

CAPITULO 2

OBTENCIÓN DE DATOS

2.1 MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

A fin de contar con una visión regional de las características geológicas de la zona donde fueron adquiridos los datos utilizados en este trabajo, se presenta a continuación una breve reseña, que permitirá una mejor comprensión de los resultados obtenidos, a partir de los dos métodos comparados.

La zona de la cual fueron extraídos los datos sísmicos utilizados en este trabajo, se localiza en la Provincia Fisiográfica Planicie Costera del Golfo de México. (Dirección General de Geografía 1981)

En el área de la Cuenca de Veracruz se ha reconocido, en los trabajos de exploración petrolífera, una sucesión sedimentaria neógena que consiste en “cenizas, arenas, tobas y conglomerados compuestos de material volcánico de color ocre y gris. El espesor de estos sedimentos varía entre 30 y 100m, y se encuentran distribuidos en toda la planicie costera” (De la Fuente-Navarro, 1959). Este autor considera que las emisiones de las estructuras volcánicas de los alrededores son la fuente de los materiales de la sucesión Plio-Cuaternaria de la zona de estudio. (Facultad de Ingeniería, 2005)

Geomorfología

La morfología de la zona es la de un sector cónico disecado por corrientes fluviales con patrón de drenaje radial. Las topofomas más sobresalientes en el área, se ubican en el sector noroeste y corresponden con un conjunto de lomeríos disecados, alargados con dirección oeste-este. Las lomas y lomeríos presentan interfluvios suaves con elevaciones que varían entre 150m y 50m, lo que significa que son de bajo relieve.

Las topofomas de la región fueron generadas por la acumulación de gran cantidad de material epiclástico, proveniente de las emisiones volcánicas del Eje Neovolcánico, principalmente del Pico de Orizaba y que posteriormente fue transportado por las corrientes fluviales, acumulando el material grueso en formas de cintas en valles fluviales, posteriormente disecadas. Hacia el oriente, estos materiales fueron retrabajados, generando acumulaciones de material fino que forman los lomeríos mencionados con anterioridad.

El desarrollo de las terrazas fluviales está relacionado al proceso de incisión del drenaje de la zona, en una etapa temprana, ya que es posible reconocer una evolución relativa entre las corrientes fluviales del área.

Estratigrafía

Han sido identificadas en la zona ocho unidades geológicas del Cuaternario (figura 2.1), con base en las cuales se expresa la evolución geológica del área durante este tiempo. La disposición de las unidades es subhorizontal, con pendiente suave hacia el oriente. El

desarrollo de las mismas ha sido condicionado por la actividad volcánica del Pico de Orizaba, cuyos productos han estado sometidos a distintos procesos de transporte, acumulación e intemperismo.

La unidad que presenta mayor área de afloramiento en la zona de estudio, está expuesta en el sector occidental y consiste en depósitos piroclásticos y epiclásticos dispuestos como una intercalación arrítmica de areniscas, tobas, brechas volcánicas (lahares) y acumulaciones fluviales.

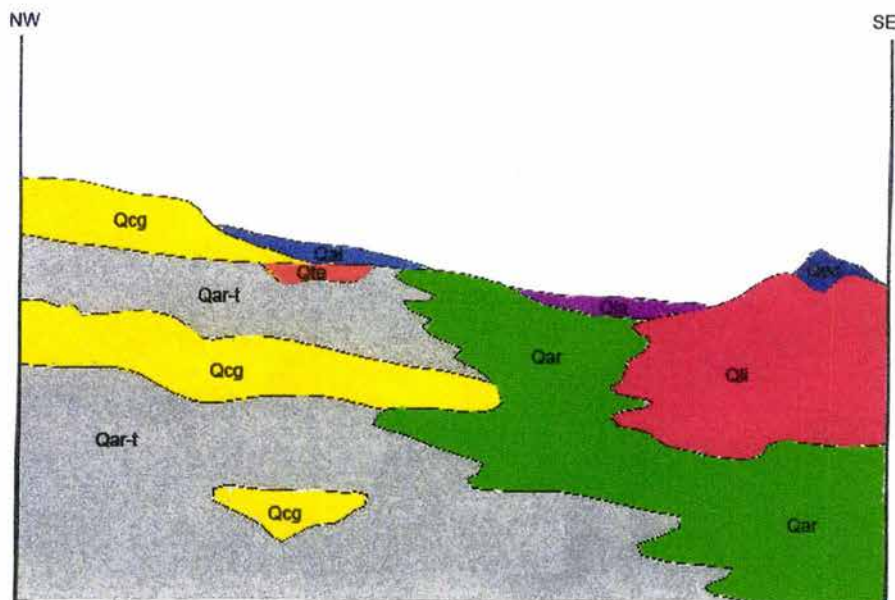


Figura 2.1 Sección esquemática noroeste-sudeste, en la que se muestran las relaciones estratigráfico-estructurales entre las unidades aflorantes en la región. Unidades Cuaternarias: Qal: Aluvi6n; Qcg: Conglomerados; Qla: Dep6sitos lagunares; Qeo Dep6sitos e6licos; Qar-t: Areniscas y tobas; Qar: Areniscas; Qli: Dep6sitos litorales; Qte: Dep6sitos aluviales (Facultad de Ingenieria, 2006)

Geologfa Estructural

Con base en los resultados obtenidos durante la exploraci6n geol6gica directa del subsuelo de la Cuenca de Veracruz, asf como estudios geofsficos de adquisici6n de datos; se ha reconocido una configuraci6n estructural compleja, concluyendo lo siguiente:

- Se ha identificado una fuente de cabalgaduras Laramfdicas que involucra a la secuencia del Eoceno medio (Mossman y Viniegra, 1976)
- Las sucesiones Mioceno-Plioceno de la Cuenca de Veracruz registran eventos de extensi6n, acortamiento, extensi6n oblicua y de levantamiento volc6nico (Jennete et al. 2003)

- El área de estudio se encuentra en el bloque autóctono de tales estructuras Laramídicas (Meneases-Rocha et al., 1996)

La figura 2.1 presenta una sección propuesta (Facultad de Ingeniería 2006), la cual muestra las relaciones temporales y distribución de las ocho unidades de depósitos Cuaternarios recientes, descritos con anterioridad. Como se puede apreciar, se trata de una zona compuesta por materiales muy heterogéneos, puesto que las unidades se encuentran intercaladas a lo largo de la misma.

En conclusión, es posible afirmar que se trata de un proceso continental, a través del Plio-Cuaternario, donde se ha llevado a cabo la interacción de distintos procesos sedimentarios, principalmente fluviales y costeros; con etapas de gran actividad volcánica, en la que se generaron acumulaciones de flujos de bloques y cenizas, así como lahares, que posteriormente fueron erosionados y reabajados al restaurarse las condiciones sedimentarias.

2.2 RECOPIACIÓN DE DATOS EN CAMPO

Para llevar a cabo la comparación de métodos utilizados en la determinación de distancias permisibles, se hará uso de los datos de campo especificados en este apartado.

Tales datos constan de registros de aceleración obtenidos al detonar dinamita, recabados mediante la utilización de instrumentos Kinematics, modelo K2, tales instrumentos contienen acelerómetros triaxiales que registran el movimiento del suelo en tres direcciones ortogonales (dos horizontales y una vertical)

Con el fin de comparar distintos resultados, obtenidos al aplicar los datos de campo a los dos métodos por comparar, se utilizó información proveniente de tres sitios distintos, todos de la cuenca de Veracruz.

Para los tres sitios, los instrumentos registraron las explosiones en ventanas de tiempo de más de cinco minutos, a una velocidad de muestreo de 0.01Hz.

Sitio 1

Adquisición de datos

En el sitio 1 se obtuvieron los registros del movimiento del suelo durante vibraciones inducidas por detonaciones⁴, así como mediciones de vibración ambiental, para ello fueron realizados los pozos cuya distribución se muestra en la figura 2.2

En cada pozo se colocaron cargas de dinamita (pentolita) de 4 y 5Kg, a una profundidad de 25m. Se nombrarán para fines prácticos explosión 1 y 2, respectivamente.

⁴ Mecanismo de detonación, subtema 1.3

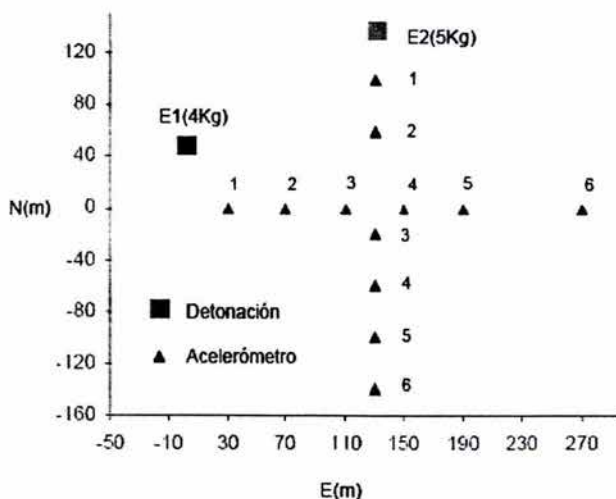


Figura 2.2 Muestra la ubicación de pozos y acelerómetros en el sitio 1. (E1 es la explosión 1 (4kg). E2 es la explosión 2 (5kg). (Facultad de Ingeniería 2005).

A continuación, se realizó la colocación de siete acelerómetros dejando una separación de 40m entre cada uno, a lo largo de dos líneas de 270m de longitud, orientadas respectivamente, norte-sur y este-oeste.

La componente radial⁵ de los acelerómetros se orientó hacia la explosión 1, mientras que para la explosión 2, dicha componente quedó orientada hacia el punto de origen de la misma

La línea de acelerómetros, orientada E-W registró el movimiento del suelo producido por la explosión 1, mientras que el movimiento producido por la explosión 2, fue registrado por la línea orientada N-S.

Una vez ubicados, los acelerómetros se pusieron en funcionamiento manualmente, un instante previo al inicio de la detonación, registrando el movimiento del suelo durante 300 segundos. Se utilizarán solamente los registros de seis acelerómetros, debido a que al detonar los explosivos, al menos un acelerómetro no registró el evento.

Registros obtenidos en campo

Explosión 1, Carga 4kg

La figura 2.3 muestra los registros obtenidos para la explosión 1, donde fueron detonados 4kg de explosivos. Es posible observar la similitud existente entre las amplitudes máximas registradas para cada una de las componentes, en las tres estaciones más cercanas a la

⁵ Se le llama componente radial, a la componente N-S y transversal a la E-W, puesto que los acelerómetros tienen dichas componentes orientadas en dirección a la explosión y no al norte magnético.

fuente, esto es, a 58, 86 y 121m de distancia. A excepción de la componente transversal de la estación ubicada a 86m, donde se observa una reducción notoria en la amplificación.

En las siguientes tres estaciones, ubicadas a 158, 196 y 235m de la fuente, se tiene que la amplitud máxima de aceleración es muy similar para las tres componentes, en promedio 0.1cm/s^2 , menor que la amplitud observada en las tres primeras estaciones. El registro de las tres componentes de movimiento de la última estación, a 275m de distancia presenta atenuación hasta 3 veces mayor respecto a las tres estaciones anteriores.

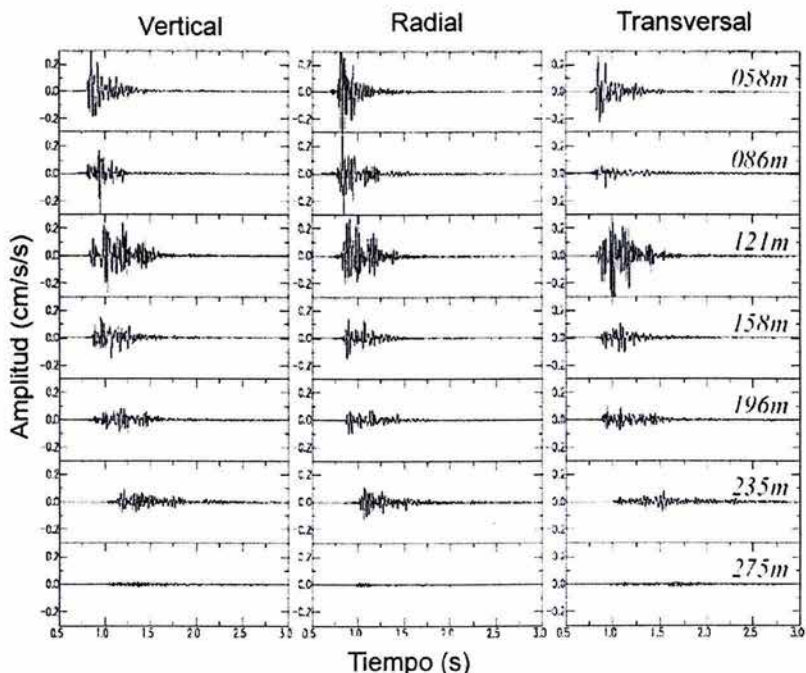


Figura. 2.3 Muestra los registros de aceleración de la explosión 1 (4kg) del sitio 1. La escala es común en todas las trazas de cada componente (Facultad de Ingeniería 2005)

Explosión 2, Carga 5kg

En la figura 2.4 se observan los registros obtenidos en campo para la explosión 2, donde la carga explosiva fue de 5kg. Las amplitudes máximas se registraron en las dos estaciones más cercanas a la fuente a 30 y 60m de distancia, se observa en la componente transversal de la primera estación (a 30m), una disminución anómala de la amplitud, a excepción de esto, se tiene que la amplitud máxima de la componente radial de las tres primeras estaciones, ubicadas a 30, 70 y 110m, se amplifica notablemente más, respecto a las componentes de movimiento vertical y transversal.

En los registros de las estaciones subsiguientes, se observa para cada una de las componentes, que la amplitud de la aceleración máxima decae en función de la distancia, excepto por las componentes radial y vertical, registradas en la penúltima estación a 230m, las cuales muestran un aumento anómalo en la amplitud.

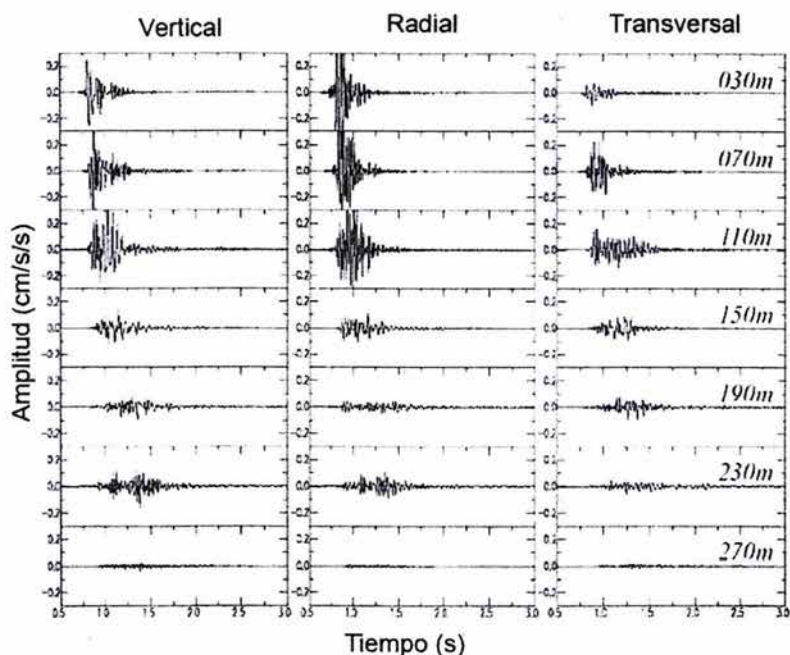


Figura. 2.4. Muestra los registros de aceleración de la explosión 2 (5kg) del sitio 1. La escala es común en todas las trazas de cada componente. (Facultad de Ingeniería 2005)

Presentación y manejo de registros obtenidos en campo

Para obtener los valores de velocidad de partícula en cada componente, medidos en campo, se llevó a cabo la integración de los registros de aceleración (figuras 2.3 y 2.4) como se indica a continuación:

- Filtrar con un filtro pasa altas tipo Bultertworth, de dos polos y dos ceros
- Integrar mediante SAC (función de integración)
- Corregir por línea base (función tren)

La velocidad de partícula es representada por un vector de tres componentes: la dirección vertical, la dirección longitudinal ó radial (línea imaginaria uniendo el centro de masa de la detonación al punto de seguimiento) y la dirección transversal (formando 90° con la longitudinal en el mismo plano horizontal).

Sismogramas obtenidos aisladamente para cada una de las componentes muestran que la velocidad de pico no se produce simultáneamente en las tres direcciones (como se observa en las figuras 2.3 y 2.4).

De éste modo, la componente radial puede presentar su pico algunas milésimas de segundo luego del pico de velocidad vertical. Se debe, por ende, calcular la velocidad resultante a cada intervalo de tiempo, con el fin de obtener la velocidad máxima de partícula. Bollinger(1980). Es necesario entonces, medir la velocidad de partícula resultante debida a las tres componentes mencionadas con anterioridad.

Para este trabajo se cuenta con valores máximos de cada componente, medidos en campo (tablas 2.1 y 2.2) por lo que se hará la suma vectorial de cada máximo, aun cuando se hayan producido en tiempos distintos, a través de la siguiente expresión:

$$V_{\max} = \left[|V_{\text{rad}}|_{\max}^2 + |V_{\text{trans}}|_{\max}^2 + |V_{\text{ver}}|_{\max}^2 \right]^{0.5} \quad (2.1)$$

La Tabla 2.1 presenta las velocidades máximas absolutas obtenidas a partir de la ecuación 2.1, para los valores de la explosión 1 (4kg).

Tabla 2.1. Velocidades máximas absolutas medidas para la explosión 1(4Kg) en el sitio 1

| ESTACIÓN | DISTANCIA [m] | V _{max} [cm/seg] | | | V _{max} |
|----------|------------------|---------------------------|--------------|--------------|------------------|
| | | Radial | Transversal | Vertical | |
| 1 | 58 | 1.307938E-03 | 1.59895E-03 | 1.561312E-03 | 2.5894E-3 |
| 2 | 86 | 4.479845E-04 | 9.959996E-04 | 3.543146E-04 | 1.1481E-3 |
| 3 | 121 | 1.049689E-03 | 9.50968E-04 | 1.235728E-03 | 1.8796E-3 |
| 4 | 158 | 7.371212E-04 | 5.591884E-04 | 3.935334E-04 | 1.0054E-3 |
| 5 | 196 | 4.266592E-04 | 3.119216E-04 | 4.763623E-04 | 7.1151E-4 |
| 6 | 275 | 6.41827E-05 | 5.824923E-05 | 6.133965E-05 | 1.0618E-4 |

Chapot (1981) mostró que la suma vectorial es un método seguro, pues en la peor de las hipótesis, la velocidad resultante estimada será igual a la velocidad resultante real; en un análisis estadístico de más de 400 medidas, en donde fueron calculadas tanto la velocidad estimada por éste método como la real, éste autor encontró que en promedio la estimación excedió la velocidad real en 24%

En las figuras 2.5 y 2.6 se observa el comportamiento de velocidades máximas en función de la distancia. La resultante de velocidad máxima obtenida para la explosión 1 (4kg), presenta un comportamiento muy errático, comenzando con un descenso registrado entre las estaciones uno y dos, para luego experimentar un incremento importante a los 120m, aproximadamente a la mitad del recorrido, finalizando con el descenso casi constante de velocidad.

Para la explosión 2 (5kg), la resultante de velocidad de partícula decreció a lo largo de la distancia recorrida, más o menos de manera constante, hasta llegar a la quinta estación de registro a 230m, donde el decaimiento deja de ser constante y se observa un decaimiento más pronunciado, hasta la última estación de registro a 270m.

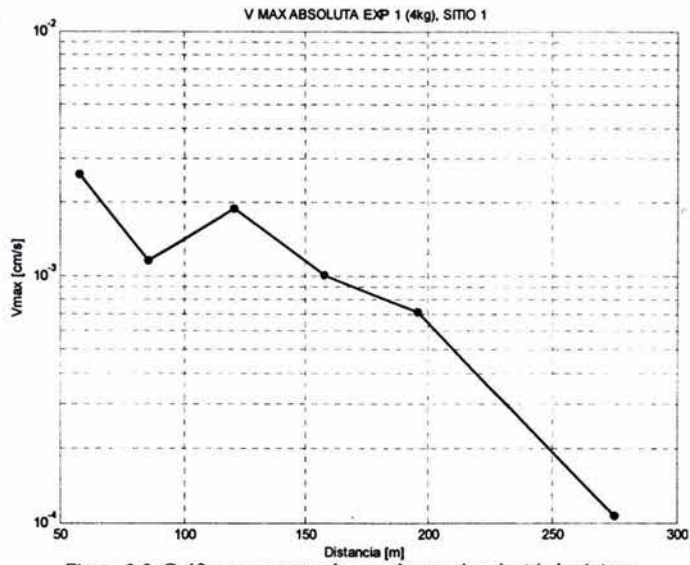


Figura 2.5 Gráfica que muestra los resultantes de velocidad máxima en función de la distancia, para la explosión 1 (4Kg) en el sitio 1

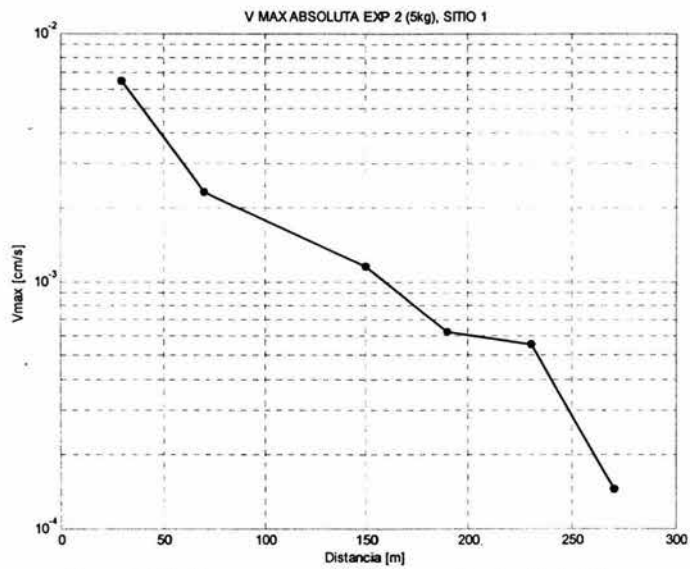


Figura 2.6 Gráfica que muestra los resultantes de velocidad máxima en función de la distancia, para la explosión 2 (5Kg) en el sitio 1

La Tabla 2.2 muestra las resultantes de velocidades máximas obtenidas, para la explosión 2 (5kg), a partir de la ecuación 2.1.

Tabla 2.2. Velocidades máximas absolutas medidas para la explosión 2 (5Kg) en el sitio 1

| ESTACIÓN | DISTANCIA [m] | V_{max} [cm/seg] | | | $ V_{max} $ |
|----------|---------------|--------------------|--------------|--------------|-------------|
| | | Radial | Transversal | Vertical | |
| 1 | 30 | 3.395915E-03 | 5.458374E-03 | 4.953478E-04 | 6.4475E-3 |
| 2 | 70 | 1.454113E-03 | 1.497549E-03 | 1.003508E-03 | 2.3160E-3 |
| 3 | 150 | 6.857362E-04 | 4.739775E-04 | 7.968977E-04 | 1.1532E-3 |
| 4 | 190 | 4.606516E-04 | 2.645961E-04 | 3.174512E-04 | 6.1885E-4 |
| 5 | 230 | 3.821837E-04 | 2.920375E-04 | 2.686508E-04 | 5.5092E-4 |
| 6 | 270 | 8.87916E-05 | 6.18292E-05 | 9.58542E-05 | 1.4455E-4 |

La figura 2.7 muestra la comparación de resultantes de velocidad máximas de partícula, para las dos explosiones del sitio 1; los instrumentos de medición fueron ubicados de manera perpendicular, sin embargo, se observa cierta similitud en el comportamiento de las gráficas, excepto por la medición llevada a cabo en el tercer acelerómetro de la explosión 1 (4Kg); donde se tiene un incremento notorio en la velocidad, para después mostrar decremento constante.

Por otro lado, la resultante de velocidad en la primera estación de la explosión 2, (5Kg) es mayor que la registrada en la primera estación para la explosión 1 (4Kg), debido a las distancias a las cuales se llevaron a cabo los registros, 30 y 58m respectivamente.

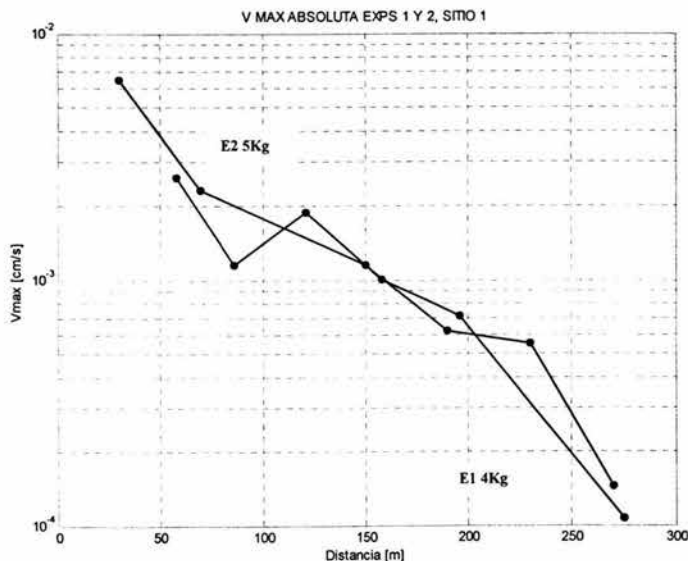


Figura 2.7 Gráfica que muestra las resultantes de velocidad máxima en función de la distancia, para las explosiones 1 y 2 de 4 y 5Kg en el sitio 1 (E14kg: explosión 1, E25kg: explosión 2)

Sitio 2

Adquisición de datos

En el sitio 2 se llevaron a cabo 3 perforaciones equiespaciadas a 50m, y se utilizaron cargas explosivas de 2Kg; colocadas a 25m de profundidad. La figura 2.8 muestra la distribución de acelerómetros y la posición de los pozos donde se realizaron las explosiones, así como los instrumentos que midieron el ruido ambiental.

Se colocaron siete acelerómetros a lo largo de una línea de 240m de longitud, perpendicular a la línea formada por las tres cargas explosivas (figura 2.8). La componente radial de los instrumentos fue orientada hacia la línea de las explosiones. La detonación de los tres puntos de tiro se llevó a cabo con un intervalo aproximado de dos minutos, registrados en total en una ventana de 10 minutos de duración.

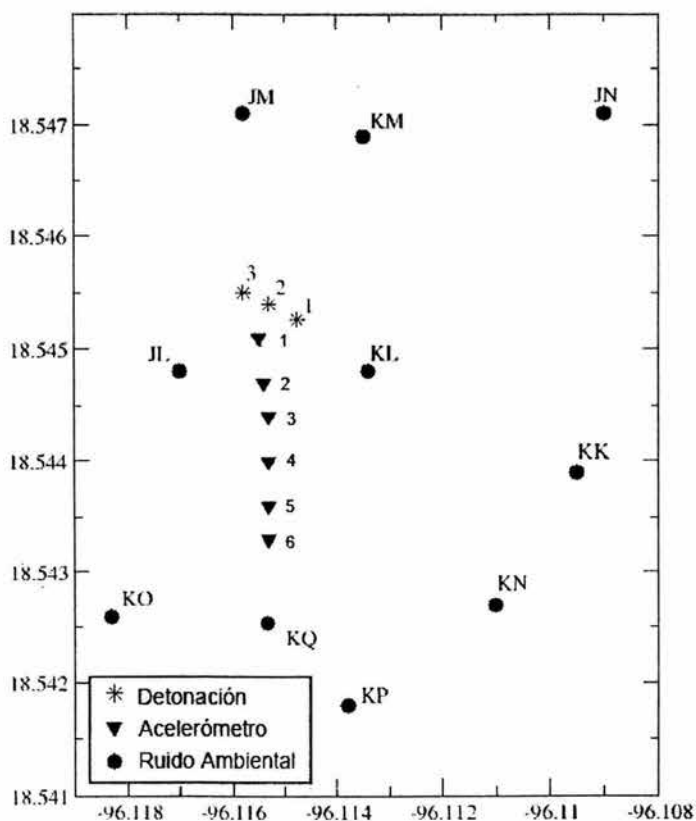


Figura 2.8 Muestra la ubicación de pozos y acelerómetros en el sitio 2. (Facultad de Ingeniería 2005)

Registros obtenidos en campo

Explosión 2, carga 2Kg

La figura 2.9 muestra como ejemplo, el registro obtenido para la explosión 2 (2Kg). Se observa que los registros en las estaciones 2 y 3, a 79 y 113m respectivamente de distancia a la fuente, presentan atenuación en sus tres componentes, escalada por un factor de 2 y 3 respecto al registro de la primera estación.

Así mismo, la estación 4, ubicada a 153m de distancia presenta atenuación en sus tres componentes, por un factor de 4. Las estaciones de registro 5 y 6 muestran una ligera amplificación para sus componentes, radial y vertical, siendo entonces la amplitud máxima de velocidad de partícula significativa solo en las primeras tres estaciones de registro.

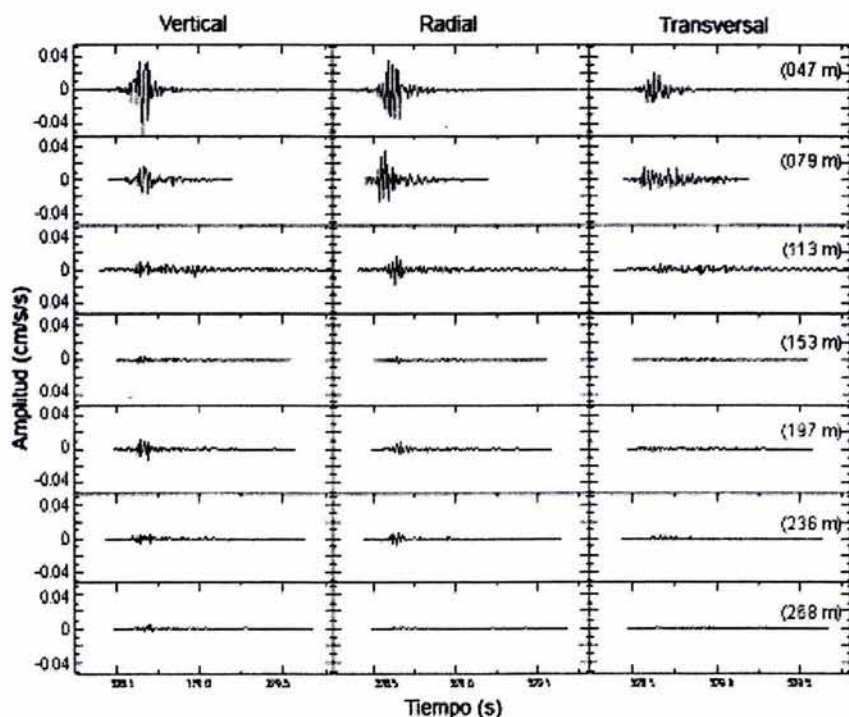


Figura 2.9 Muestra los registros de aceleración de la explosión 2 (2Kg) del sitio 2. La escala es común en todas las trazas de cada componente. (Facultad de Ingeniería 2006)

Presentación y manejo de registros obtenidos en campo

Utilizando la ecuación 2.1, se calcularon las velocidades absolutas máximas a partir de los registros de campo de las tres explosiones de 2kg en este sitio. Las Tablas 2.3, 2.4 y 2.5 muestran los resultados obtenidos en cada caso.

Tabla 2.3 Velocidades máximas absolutas medidas para la explosión 1 de 2Kg en el sitio 2

| ESTACIÓN | DISTANCIA [m] | V _{max} [cm/seg] | | | V _{max} |
|----------|---------------|---------------------------|-------------|----------|------------------|
| | | Radial | Transversal | Vertical | |
| 1 | 68.62 | 1.25E-03 | 2E-03 | 2.85E-03 | 3.6993E-3 |
| 2 | 93.49 | 5.87E-04 | 5.87E-03 | 6.9E-04 | 5.9394E-3 |
| 3 | 123.56 | 1.9E-04 | 2.21E-04 | 3.54E-04 | 4.5853E-4 |
| 4 | 160.96 | 5E-05 | 2.6E-05 | 6.7E-05 | 8.7549E-5 |
| 5 | 203.24 | 2.31E-04 | 5.04E-05 | 7.4E-05 | 2.4774E-4 |
| 6 | 241.23 | 1.47E-04 | 3.46E-04 | 4.3E-05 | 3.7838E-4 |

Tabla 2.4 Velocidades máximas absolutas medidas para la explosión 2 de 2Kg en el sitio 2

| ESTACIÓN | DISTANCIA [m] | V _{max} [cm/seg] | | | V _{max} |
|----------|---------------|---------------------------|-------------|----------|------------------|
| | | Radial | Transversal | Vertical | |
| 1 | 47 | 6.58E-03 | 5.09E-03 | 8.32E-03 | 1.1765E-2 |
| 2 | 79 | 1.2E-03 | 5.28E-04 | 1.26E-03 | 1.8183E-3 |
| 3 | 113 | 3.47E-04 | 3.90E-04 | 4.6E-04 | 6.9577E-4 |
| 4 | 153 | 6.16E-05 | 3.98E-05 | 6.88E-05 | 1.0055E-4 |
| 5 | 197 | 2.31E-04 | 5.74E-05 | 8.52E-05 | 2.5281E-4 |
| 6 | 236 | 2.05E-04 | 3.37E-04 | 6.72E-05 | 4.0013E-4 |

Tabla 2.5 Velocidades máximas absolutas medidas para la explosión 3 de 2Kg en el sitio 2

| ESTACIÓN | DISTANCIA [m] | V _{max} [cm/seg] | | | V _{max} |
|----------|---------------|---------------------------|-------------|----------|------------------|
| | | Radial | Transversal | Vertical | |
| 1 | 68.62 | 7.57E-04 | 1.9E-03 | 2.13E-03 | 2.9529E-3 |
| 2 | 93.49 | 6.58E-04 | 4.43E-04 | 9.62E-04 | 1.2468E-3 |
| 3 | 123.56 | 4.86E-04 | 4.86E-04 | 6.76E-04 | 9.6403E-4 |
| 4 | 160.96 | 8.58E-05 | 7.97E-05 | 7.8E-05 | 1.4070E-4 |
| 5 | 203.24 | 3.58E-04 | 7.25E-05 | 1.24E-04 | 3.8574E-4 |
| 6 | 241.23 | 2.67E-04 | 5.23E-04 | 1.33E-04 | 6.0208E-4 |

Las figuras 2.10, 2.11 y 2.12 presentan las gráficas del comportamiento de resultantes de velocidades máximas en función de la distancia, para las tres explosiones.

La gráfica de la figura 2.10 representa las resultantes de velocidad para la explosión 1. Se observa un claro aumento de velocidad entre las estaciones 1 y 3, ubicadas a 68 y 93m respectivamente de la fuente. De la estación 3 a la 4 la velocidad decrece, para volver a amplificarse en las estaciones 5 y 6 a 203 y 241m de la fuente.

La figura 2.11 presenta la gráfica de resultantes de velocidad de la explosión 2. Se tiene un comportamiento muy similar al observado en la figura 2.10, con excepción de que en este caso no se registra ninguna amplificación de velocidad en la estación 2 de registro.

Para la explosión 3 (figura 2.12), el decremento de la velocidad es menor en las primeras tres estaciones, pero a partir de los 123m se tiene un comportamiento casi idéntico al observado en las figuras 2.11 y 2.10, con un decremento abrupto y una notoria amplificación en la última estación de medición.

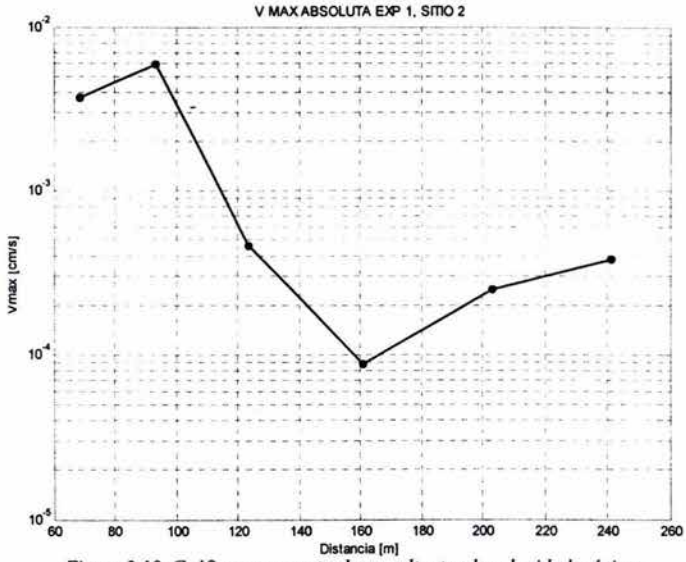


Figura 2.10 Gráfica que muestra las resultantes de velocidad máxima en función de la distancia, para la explosión 1 (2Kg), del sitio 2

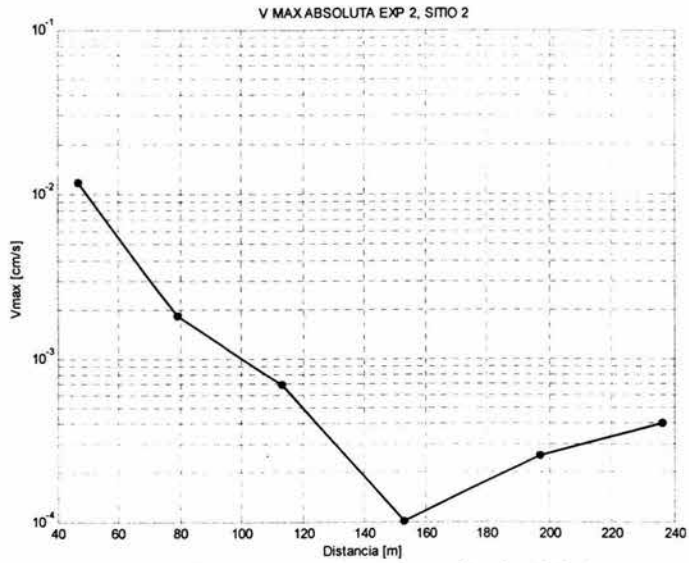


Figura 2.11 Gráfica que muestra las resultantes de velocidad máxima en función de la distancia, para la explosión 2 (2Kg), del sitio 2

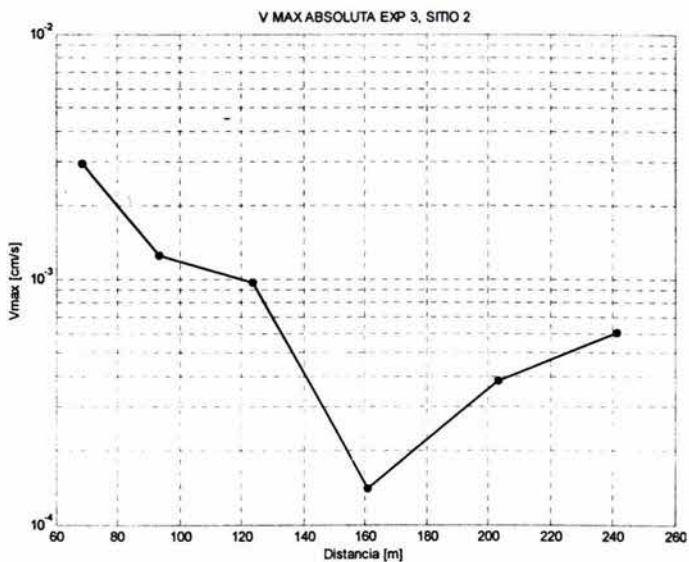


Figura 2.12 Gráfica que muestra las resultantes de velocidad máxima en función de la distancia, para la explosión 3 (2Kg), del sitio 2

Se observa en la figura 2.13 la comparación de gráficas obtenidas para las tres explosiones.

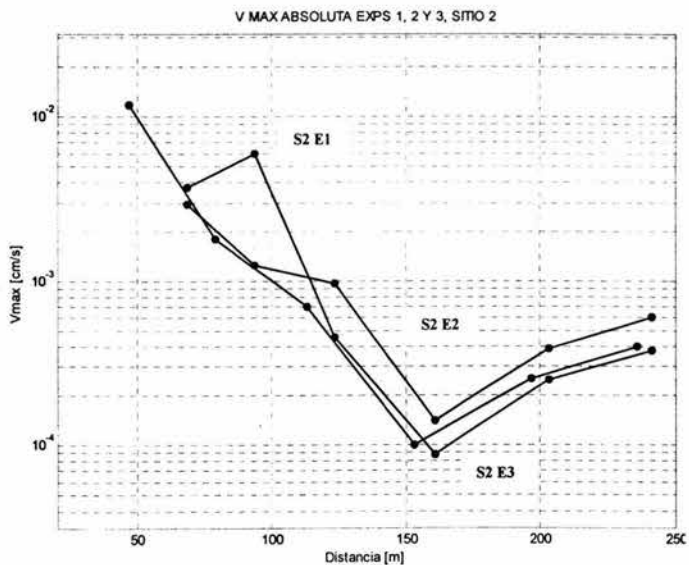


Figura 2.13 Gráfica que muestra las resultantes de velocidad máxima en función de la distancia, para las explosiones 1, 2 y 3, del sitio 2 (S2: sitio2, E1, E2 y E3 se refiere a las explosiones 1, 2 y 3)

Las tres explosiones muestran comportamientos similares en el decaimiento de velocidad en función de la distancia, siendo la amplificación observada en la estación de registro 2, de la explosión 1, el valor más disperso respecto a todos los datos de velocidades absolutas

Sitio 3

Adquisición de datos

En este sitio se llevaron a cabo perforaciones equiespaciadas a 50m, donde se ubicaron dos cargas explosivas de 1Kg (explosión 1) y 1.5Kg (explosión 2), a una profundidad de 25m.

La figura 2.14 muestra la distribución de acelerómetros y pozos donde se detonaron las explosiones, así como la ubicación de los instrumentos que midieron el ruido ambiental. La distribución utilizada en el sitio 3 fue la misma descrita para el sitio 2; siete acelerómetros ubicados a lo largo de una línea de 240m de longitud, casi perpendicular a la línea formada por las cargas explosivas.

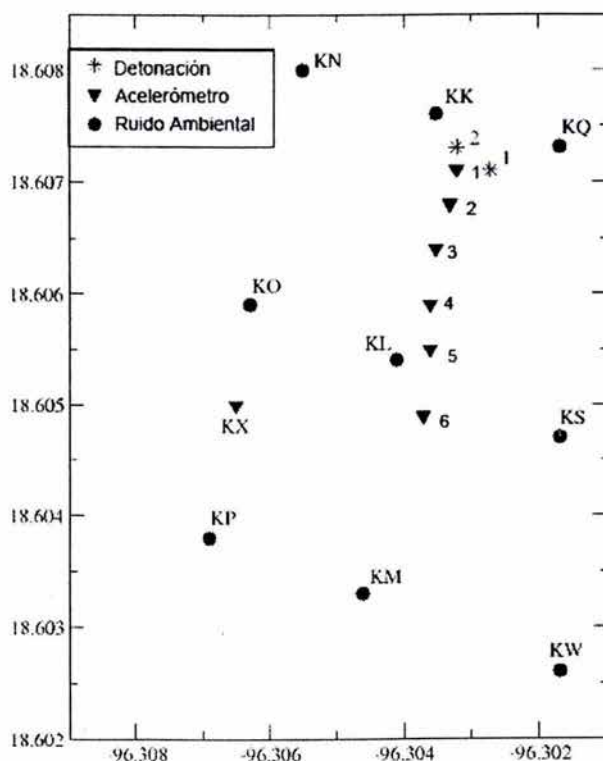


Figura 2.14 Muestra la ubicación de pozos y acelerómetros en el sitio 3 (Facultad de Ingeniería 2006)

La componente radial de los acelerómetros se orientó hacia la línea de las explosiones, y las dos detonaciones se llevaron a cabo con dos minutos de diferencia. En cada acelerómetro se registró ruido ambiental, durante 10 minutos antes de las detonaciones.

Registros obtenidos en campo

Explosión 2, carga 1.5 kg

La figura 2.15 muestra los registros de aceleración, de la explosión 2 (1.5Kg), del sitio 3. Se observa que la componente vertical en la estación 2, (a 24m) se amplifica por un factor de 2, respecto a las componentes radial y transversal de la misma estación. Los registros de las tres componentes se atenúan con un factor de dos respecto a la segunda estación, a 63m de distancia a la fuente. En la estación 4, (a 114m) los registros presentan amplificación, principalmente en la componente radial. Las estaciones 5 y 6 muestran un comportamiento de atenuación descendente.

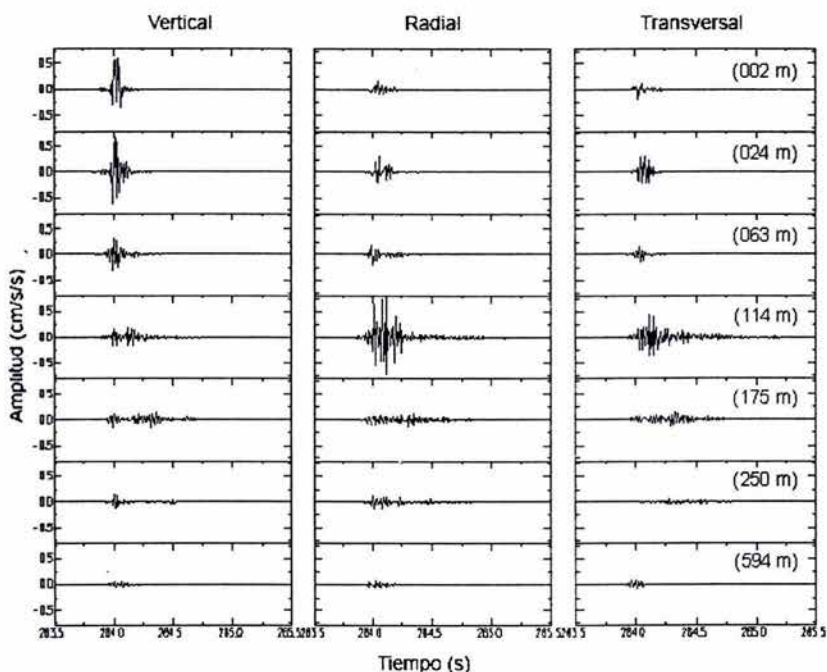


Figura 2.15 Muestra los registros de aceleración de la explosión 2 (2Kg) del sitio 3. La escala es común en todas las trazas de cada componente. (Facultad de Ingeniería 2006)

Presentación y manejo de registros obtenidos en campo

Las tablas 2.6 y 2.7 muestran las resultantes de velocidad máxima absoluta calculada con la ecuación 2.1, a partir de los datos de campo recabados en el sitio 3, para las explosiones 1 y 2, de 1Kg y 1.5 Kg.

Tabla 2.6 Velocidades máximas absolutas medidas para la explosión 1 (1Kg) en el sitio 3

| ESTACIÓN | DISTANCIA [m] | V _{max} [cm/seg] | | | V _{max} |
|----------|---------------|---------------------------|--------------|--------------|------------------|
| | | Radial | Transversal | Vertical | |
| 1 | 55.46 | 5.788954E-04 | 5.775765E-04 | 7.440049E-04 | 1.1055E-3 |
| 2 | 80.43 | 5.718615E-04 | 9.291366E-04 | 5.155331E-04 | 1.2066E-3 |
| 3 | 124.48 | 2.020968E-04 | 2.269260E-04 | 1.347503E-04 | 3.3240E-4 |
| 4 | 182.00 | 7.172887E-06 | 3.127308E-06 | 3.488293E-06 | 8.5672E-6 |
| 5 | 207.12 | 4.467067E-05 | 4.265331E-05 | 8.944853E-05 | 1.0870E-4 |
| 6 | 254.95 | 1.649768E-05 | 2.941264E-05 | 1.321214E-05 | 3.6219E-5 |

Tabla 2.7 Velocidades máximas absolutas medidas para la explosión 2 (1.5Kg) en el sitio 3

| ESTACIÓN | DISTANCIA [m] | V _{max} cm/seg | | | V _{max} |
|----------|---------------|-------------------------|--------------|--------------|------------------|
| | | Radial | Transversal | Vertical | |
| 1 | 2 | 1.617421E-03 | 3.396052E-03 | 1.795372E-02 | 1.8343E-2 |
| 2 | 24 | 2.541316E-03 | 2.525434E-03 | 1.171399E-02 | 1.2249E-2 |
| 3 | 63 | 1.494136E-03 | 8.932473E-04 | 1.940814E-03 | 2.6071E-3 |
| 4 | 114 | 6.465967E-04 | 3.016930E-04 | 2.113630E-04 | 7.4416E-4 |
| 5 | 175 | 9.612441E-05 | 7.500428E-05 | 1.708030E-04 | 2.0985E-4 |
| 6 | 250 | 3.182149E-05 | 5.474761E-05 | 2.106936E-05 | 6.6736E-5 |

Las figuras 2.16 y 2.17 muestran las gráficas del comportamiento de resultantes de velocidad máxima en función de la distancia, para las dos explosiones del sitio 3.

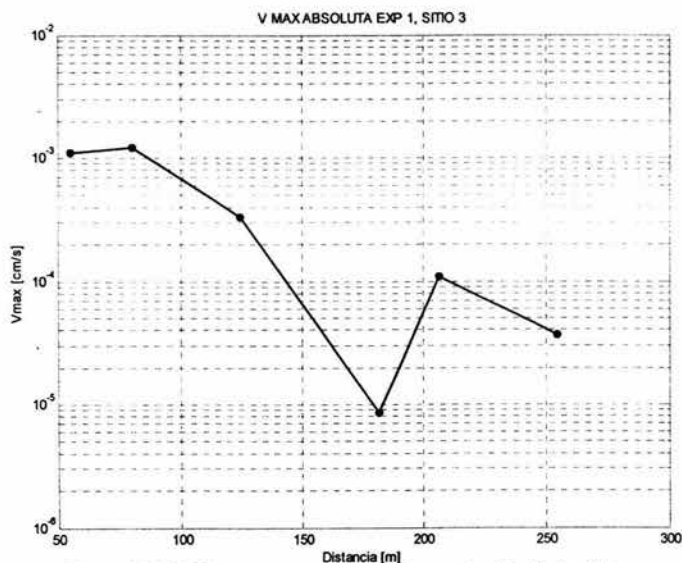


Figura 2.16 Gráfica que muestra los resultantes de velocidad máxima en función de la distancia, para la explosión 1 (1Kg) en el sitio 3

En la figura 2.16 se observa una ligera amplificación de la estación 1 a la 2 (a 80m). Posteriormente la velocidad decrece hasta llegar a la estación de registro 4 (a 182m), donde comienza a verse un incremento en la velocidad, hasta llegar a los 200m de distancia a la fuente, donde nuevamente decrece para el registro de la estación 6.

La figura 2.17 presenta resultantes de velocidad altas, tanto en la estación de registro 1 a 2m de distancia a la fuente, como en la estación de registro 2 a 24m. El resto de las estaciones muestran un comportamiento de descenso regular en la velocidad.

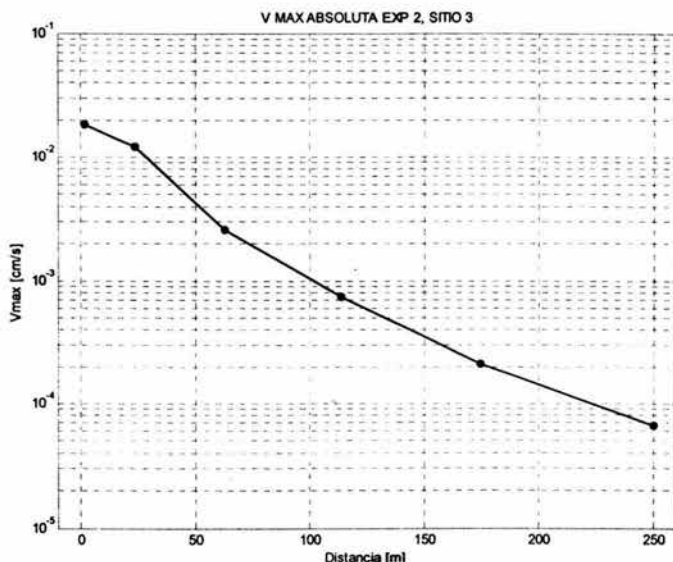


Figura 2.17 Gráfica que muestra las resultantes de velocidad máxima en función de la distancia, para la explosión 2 (1.5Kg) en el sitio 3

En la gráfica contenida en la figura 2.18 se observa que las velocidades máximas en el sitio 3, son muy distintas, de la primera a la tercera estación de registro, para ambas explosiones.

La máxima registrada en la primera estación para la explosión 2 (1.5Kg), es mucho mayor que la primera velocidad registrada para la explosión de 1kg. Esto se explica pues el primer acelerómetro de la explosión 2 (1.5kg), se encontraba situado a sólo 2m de la fuente, mientras que para la explosión 1 (1kg), el primer registro se hizo a 55m de distancia a la fuente.

El comportamiento de ambas gráficas podría ser similar, con diferencias mínimas en los valores numéricos de resultantes de velocidad, sino fuera por el fuerte decremento registrado en la estación 4 de la explosión 1 a 182m de distancia a la fuente.

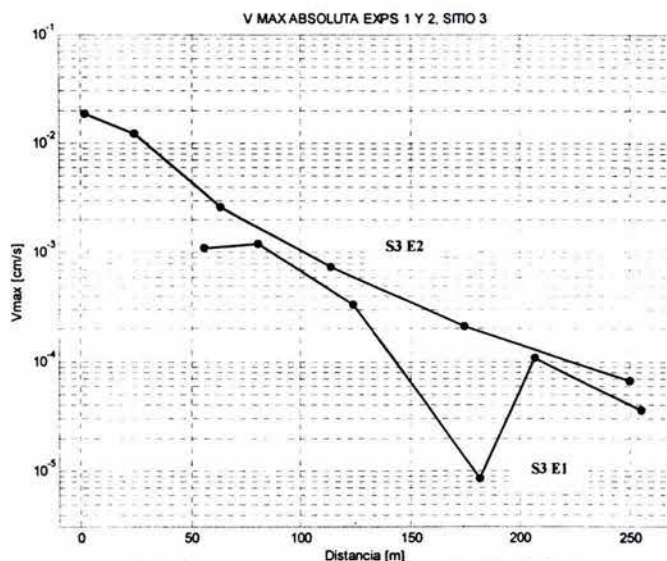


Figura 2.18 Gráfica que muestra las resultantes de velocidad máxima en función de la distancia, para las explosiones 1 y 2 (1 y 1.5Kg) en el sitio 3 (S3; sitio 3, E1 y E2 son las explosiones de 1 y 1.5kg)

Velocidad Máxima en Sitios 1, 2 y 3

La figura 2.19 muestra todas las gráficas de resultante de velocidad máxima obtenidas en cada una de las explosiones llevadas a cabo en los tres sitios de estudio.

Se observa, en general, un comportamiento de disminución en la velocidad conforme a la distancia recorrida, para todos los casos. La explosión 1 del sitio 1 (S1E1) (4kg), muestra, como ya se vio en las gráficas individuales, un aumento en la velocidad de partícula, entre las estaciones de registro 3 y 4. La explosión 1 del sitio 3 (S3E1), presenta la velocidad de partícula inicial más baja, en la primera estación que registró la misma.

Las gráficas de resultante de velocidad del sitio 2, presentan mucha similitud entre sí, como las del sitio 1. El sitio 3 genera gráficas que mayor diferencia presentan entre sí.

El rango de magnitud de las variables medidas en vibraciones generadas por explosiones dependen de varios factores, como la distancia a la fuente y la cantidad de explosivos detonados por intervalo de retardo, entre otros; la cantidad de combinaciones posibles de los factores antes mencionados hace que el rango de magnitudes sea grande. Dowding (2001) sugiere los rangos generales que se muestran en la Tabla 2.8

Tales rangos están sujetos a errores por la naturaleza empírica de los datos tomados en campo. Se observa que los rangos son bastante amplios, siendo la velocidad la variable que tiene un mayor rango dinámico y que nos proporciona mayor resolución.

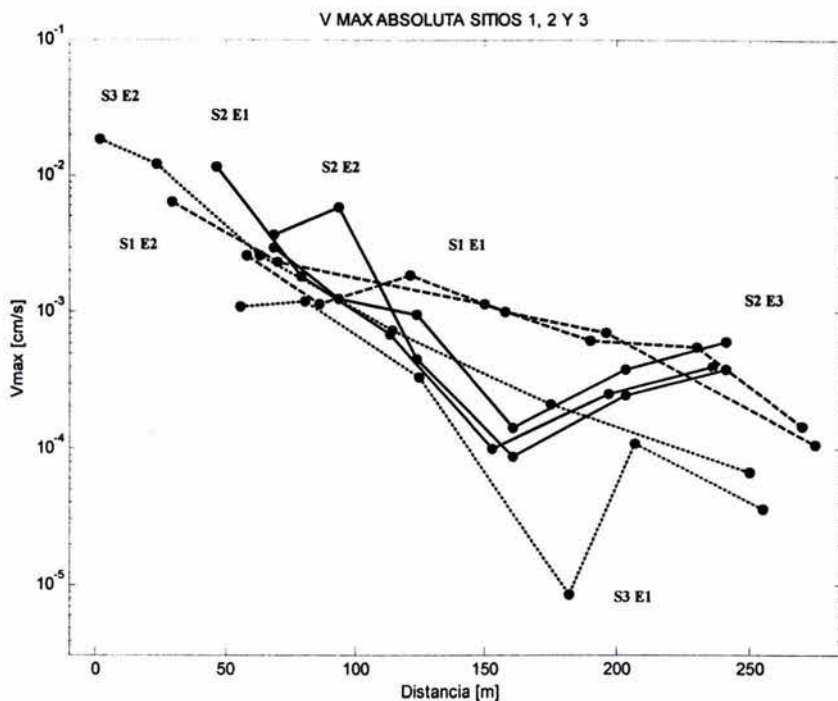


Figura 2.19 Gráfica que muestra las resultantes de velocidad máxima en función de la distancia, para todas las explosiones en los sitios 1(---), 2(—) y 3(...) (S1, S2 y S3 son los sitios, E#, se refiere al número de explosión)

Tabla 2.8. Rangos típicos de los parámetros de vibraciones (Cording et al 1974)

| PARÁMETRO | RANGO | UNIDADES |
|--------------------------|-------------|-------------------|
| Desplazamiento | 0.000-10 | mm |
| Velocidad de partícula | 0.0001-1000 | mm/s |
| Aceleración de partícula | 10-100000 | mm/s ² |
| Frecuencia | .05-200 | Hz |
| Longitud de onda | 30-1500 | m |
| Duración de pulsos | 0.1-2 | s |

De Dowding (2001))

Prácticamente todas las normas internacionales de manejo de vibraciones han sido desarrolladas a partir del parámetro velocidad, es por esto que es deseable medir esta y no otra variable. Cada una de las variables: desplazamiento, velocidad y aceleración son medidas con transductores diferentes; sin embargo, cada señal tiene información de las tres variables en rangos diferentes de frecuencia con diferente nivel de amplificación.

CAPITULO 3

METODO INGENIERIL LEY DE ESCALAMIENTO CÚBICO

En este capítulo se proporciona el marco teórico necesario para el conocimiento del método ingenieril, así mismo, se lleva a cabo la aplicación de los datos de campo de los sitios 1, 2 y 3 (subtema 2.2) en el mismo, para obtener distancias permisibles.

3.1 RELACIONES EMPÍRICAS

Atenuación de vibraciones inducidas

La atenuación o decaimiento de vibraciones es producida por dos fenómenos; dispersión geométrica y amortiguamiento⁶. La combinación de ambos, dan como resultado una relación a través de la cual es posible modelar teóricamente, el comportamiento de cierta zona de estudio, a partir de mediciones hechas en campo.

Primeramente se tiene la dispersión geométrica; la cual se expresa por medio de una relación entre dos distancias, R_1 y R_2 donde la velocidad principal de partícula \dot{u}_1 es conocida y \dot{u}_2 desconocida. La potencia n está en función del tipo de onda; donde $n = 1$, para ondas de cuerpo cuya propagación es esférica, excepto en la superficie, donde $n = 2$ y $n = 1/2$ para ondas Rayleigh. (ecuación 3.1)

La potencia n , en cierto sentido, representa el decaimiento de energía por unidad de área, sobre la superficie en la cual, la vibración se propaga.

$$\dot{u}_2 = \dot{u}_1 \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^n \quad (3.1)$$

Además de la dispersión geométrica, se sabe que, por cada ciclo de movimiento, o longitud de onda λ recorrida, la onda pierde una pequeña cantidad de energía gracias a la fricción al toparse con distintos medios; este ciclo de pérdida de energía, es llamado “amortiguamiento del material”, y está en función de las propiedades de deformación del material por el que se propaga la onda.

Dicha relación, ha mostrado ser proporcional al logaritmo de la distancia recorrida:

$$u_2 = u_1 e^{-\alpha(R_2 - R_1)} \quad (3.2)$$

Donde α es el coeficiente de atenuación, que depende de la frecuencia dominante de la onda y de la rigidez del material.

Al combinar ambas componentes de atenuación, se obtiene la ecuación 3.3

⁶ Anexo 2, Atenuación de vibraciones inducidas

$$\dot{u}_2 = \dot{u}_1 \sqrt{\frac{R_1}{R_2}} e^{-\alpha(R_2 - R_1)} \quad (3.3)$$

para ondas Rayleigh, donde $n = 1/2$

En la ecuación 3.3 el coeficiente α aumenta con la frecuencia dominante, por consiguiente, una onda de alta frecuencia presentará más ciclos de movimiento, que ondas de baja frecuencia, al recorrer la misma distancia. Recordando que el amortiguamiento está en función de la pérdida de energía por ciclo de deformación, independientemente de la distancia recorrida.

Lo dicho explica porqué, en general, la frecuencia dominante decrece con la distancia, para mismos tipos de onda. Las componentes de baja frecuencia han tenido menos ciclos de deformación y por consiguiente, perdido menos energía que las de alta frecuencia. Por otro lado se ha observado que α tiende a ser mayor en suelos que en rocas. (Woods y Jedele, 1985)

La figura 3.1 muestra las relaciones básicas de atenuación de vibraciones; ecuaciones 3.1 y 3.2, para ondas Rayleigh, con $n = 1/2$.

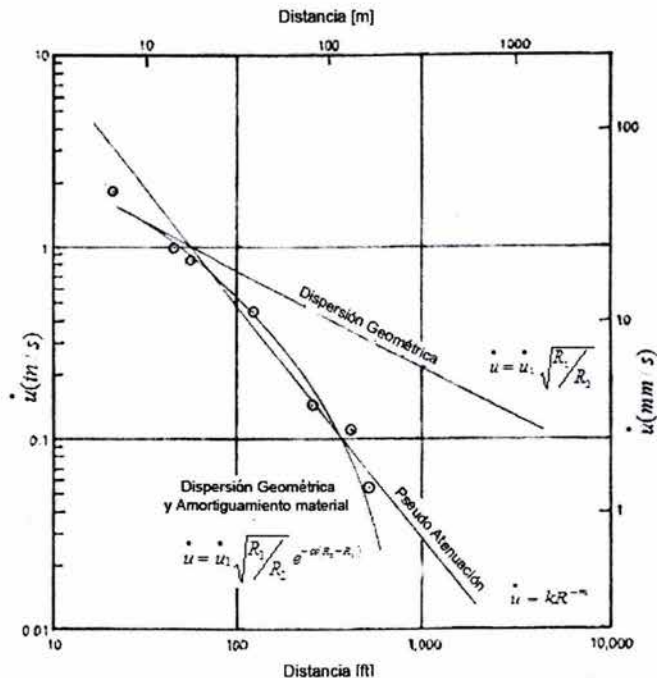


Figura 3.1 Relaciones básicas de vibración vs atenuación (Woods y Jedele, Problemas de vibración en ingeniería geotécnica, 1985)

Predominio de ondas Rayleigh en Vibración inducida

La dispersión geométrica junto con el comportamiento de la frecuencia visto con anterioridad, explican porqué las ondas Rayleigh (Anexo 1) predominan a grandes distancias, tanto para vibraciones generadas por explosivos, como por mecanismos de compactación dinámica.

Primeramente se sabe que las ondas Rayleigh se propagan solo en la superficie, por lo que dispersan su energía en una superficie cilíndrica, a diferencia de la superficie esférica, a través de la cual se dispersa la energía de las ondas de cuerpo (P y S), de ahí la diferencia entre los valores de n (decaimiento de energía), tomados en cuenta en la ecuación 3.1, en este caso $n = 1/2$.

En segundo lugar, se tiene que, a grandes distancias, las ondas Rayleigh de baja frecuencia, habrán completado menos ciclos de deformación y perdido menos energía, que las ondas de cuerpo de alta frecuencia.

Aun pensando que las ondas Rayleigh, no se generan en la fuente, como es el caso de las vibraciones analizadas en este trabajo, donde la explosión se lleva a cabo a varios metros de profundidad; se generan muy cerca de la fuente sobre la superficie, como se muestra en la figura 3.2, especialmente en suelos.

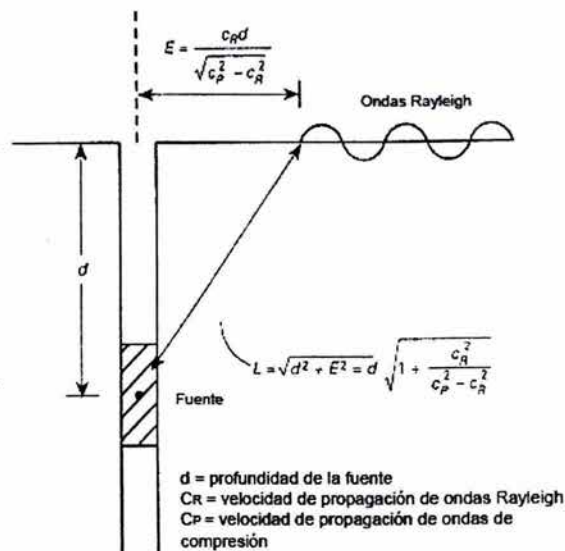


Figura 3.2 Distancia entre la fuente y el origen de ondas Rayleigh en la superficie.

La misma figura muestra que la proximidad de la fuente al origen de ondas Rayleigh en la superficie, es función de las velocidades de propagación.

Relaciones empíricas de atenuación

La ecuación 3.1 que involucra la dispersión geométrica, el amortiguamiento, n y α , suele ser complicada en la práctica, por lo que a menudo es reemplazada por una tercera relación lineal que involucra la energía de la detonación (ecuación 3.4)

$$\dot{u} = KR^{-m} \quad (3.4)$$

Dicha simplificación reemplaza la relación curvilínea (ecuación 3.3), con un ajuste lineal, mediante una gráfica Log-Log, de velocidades máximas vs distancias. De acuerdo con las gráficas comunes, K es la intercepción de la recta a una distancia de 1, y m es la pendiente de la curva en escala logarítmica.

Con esta simplificación se pueden predecir movimientos a diferentes distancias, para vibración producida artificialmente, la relación para ondas Rayleigh, queda:

$$\dot{u} = K \left(\frac{R}{E} \right)^{1/2} \quad (3.5)$$

En otras palabras, m debería ser -1, si la pendiente fuera un ciclo logarítmico abajo y a la derecha. La tendencia de esta simplificación para predecir movimiento, a distancias muy grandes y muy pequeñas, es conservativa.

La experimentación con explosiones, donde las relaciones de atenuación son escaladas o normalizadas, con la energía explosiva de la fuente, ha llevado a reemplazar R por $R/E^{1/2}$, donde E es la energía cinética del impacto de la fuente y R la distancia del punto de medición a la misma. Woods y Jedele (1985).

Las relaciones empíricas tienen el objetivo de predecir valores de vibración, desplazamiento, velocidad, aceleración de partícula y frecuencia asociada a la vibración máxima, producidas artificialmente.

Teniendo en cuenta las variables involucradas en una explosión, y por medio de un análisis adimensional, aplicando el teorema Pi de Buckingham⁷, se obtienen dichas relaciones empíricas.

En la tabla 3.1 se muestran las variables que explican el fenómeno de explosión (para un medio homogéneo e isotrópico); esto es, variables independientes, relacionadas con la fuente de las vibraciones, y las dependientes relacionadas con las vibraciones. En total se tienen nueve variables que explican el fenómeno y éstas están formadas únicamente por

⁷ En general, define que si un fenómeno tiene N variables y M dimensiones, entonces hay $N-M$ términos adimensionales que relacionan dichas variables

tres dimensiones (F , fuerza; T , tiempo y L , longitud), por lo tanto existen seis términos adimensionales que describen una explosión. Hendron, (1968)

Tabla 3.1 Variables consideradas en el análisis adimensional del fenómeno de explosiones (Ambraseys y Hendron 1968)

| VARIABLE INDEPENDIENTE | SÍMBOLO | DIMENSIÓN |
|---|-----------|-----------|
| Energía liberada en la explosión (peso del explosivo, es proporcional a la Energía) | W | FL |
| Distancia de la fuente al sensor | R | L |
| Velocidad de onda propagándose | c | LT^{-1} |
| tiempo | t | T |
| VARIABLE DEPENDIENTE | | |
| Desplazamiento máximo del suelo | u | L |
| Velocidad máxima del suelo | du/dR | LT^{-1} |
| Aceleración máxima del suelo | du^2/dR | LT^{-2} |
| Frecuencia asociada a la máxima vibración | f | T^{-1} |

* F , fuerza; L , longitud; t , tiempo

De acuerdo a la tabla 3.1, existen seis parámetros o términos adimensionales, proporcionales entre sí, que relacionan las variables mostradas, estos son: u/R , $\frac{du}{dR} \frac{R}{c}$, $\frac{du^2}{dR} \frac{R}{c^2}$, ft , tc/R , $W/\rho c^2 R^3$, los cuatro primeros términos enlazan las variables dependientes e independientes, mientras que los dos últimos solo combinan variables independientes. Los seis términos adimensionales son proporcionales entre sí.

De los seis términos recién descritos, los más utilizados son aquel que relaciona la velocidad máxima de partícula y la velocidad de propagación de la onda, $\frac{du}{dR} \frac{R}{c}$ y el que relaciona la distancia y la energía de la explosión $W/\rho c^2 R^3$

De la proporcionalidad de estos dos términos tenemos:

$$\frac{u}{c} \alpha \frac{W}{\rho c^2 R^3} \quad (3.6)$$

Añadiendo una constante de proporcionalidad M y eliminando un término de velocidad en ambos lados de la ecuación se obtiene:

$$\dot{u} = M \left(\frac{1}{\rho c} \frac{W}{R^3} \right) \quad (3.7)$$

Se tiene, entonces una ecuación dimensional respecto a la velocidad, en ella ρc es la impedancia del medio (medida de la resistencia de la partícula a moverse), específicamente en elasticidad es la relación entre esfuerzo y velocidad de partícula (Aki y Richards, 1980)

Ley de escalamiento cúbico

El escalamiento de la distancia se vuelve necesario al predecir velocidades de partícula, cuando la energía de la detonación (en este caso W), es una variable considerada en el modelo, tanto para vibraciones generadas por explosivos como por compactación dinámica. Woods y Jedele (1985)

Las relaciones de escalamiento más comunes son las de escalamiento cuadrado y escalamiento cúbico. Ambos escalamientos han sido utilizados tradicionalmente para comparar datos de campo y predecir la atenuación ó decaimiento de velocidad de partícula.

Históricamente, el escalamiento cuadrado, ha sido utilizado en el análisis de explosiones cuya carga es distribuida en un cilindro largo, entonces, por unidad de longitud del cilindro; si la densidad es constante, el diámetro del agujero es proporcional a la raíz cuadrada del peso de la carga explosiva. El radio de $R/W^{1/2}$ es aproximadamente el radio entre dos distancias, la distancia entre la explosión y la estación de registro más cercana, R y el radio del agujero cilíndrico, que es proporcional a $W^{1/2}$.

El estudio de escalamiento cúbico con parámetros adimensionales ha sido utilizado durante años en relación con modelos a pequeña escala de explosiones nucleares y fue sugerido para el estudio de vibraciones generadas por explosivos, Ambraseys y Hendron (1968)

La ecuación 3.7, derivada del análisis adimensional de las variables involucradas en explosiones, según Hendron (1968), puede ser tratada en el caso ideal de vibraciones viajando por un solo medio, el cual se supone homogéneo e isotrópico; donde la impedancia ρc es constante, y $M/\rho c$ puede ser reemplazado por una constante cualquiera, (en este caso K) la cual no será del todo constante, pues puede tener variaciones ya que la suposición, de un medio homogéneo e isotrópico, no siempre se cumple. Así mismo, la impedancia ρc puede ser susceptible a cambios en el tipo de onda, generadora de la vibración. (Aki y Richards, 1980).

El término W/R^3 de la ecuación 3.7 es igual a $R/{}^3\sqrt{W}$ para tener una relación directa entre las vibraciones y la distancia, de tal forma que:

$$\dot{u} = K \left(\frac{R}{{}^3\sqrt{W}} \right)^\alpha \quad (3.8)$$

La Ecuación 3.8 se conoce como la “ley de escalamiento cúbico” y la razón $R/\sqrt[3]{W}$ es llamada “Distancia escalada cúbica”⁸; así mismo, R es la distancia de la fuente al instrumento de medición y W es la carga que genera las vibraciones.

Existen otras relaciones empíricas basadas en los términos adimensionales descritos en la tabla 3.1 (por ejemplo Sebos, 1999), las cuales no se han estudiado a fondo, y por lo tanto no se incluyen en este trabajo

A partir de la ecuación 3.8 se puede predecir, con cierta confianza, los valores de velocidad máxima de partícula como función de la carga W y la distancia R . Los valores K y α son constantes que deben ser estimadas, ambas dependen directa o indirectamente de las condiciones geológicas de la región.

El valor K está relacionado con la impedancia; mientras que el valor α teóricamente se aproxima a -3 , sin embargo puede tener variaciones que dependen de la eficiencia sísmica de la carga (porcentaje de la energía que es convertida en ondas sísmicas) y de cambios en la distancia R debido a diferencias en las trayectorias de las ondas por condiciones geológicas y geotérmicas locales y regionales.

Para calcular las constantes K y α , la velocidad resultante \dot{u} y la distancia escalada $R/\sqrt[3]{W}$ se transforman a escala logarítmica de la siguiente manera:

Partiendo de la ecuación 3.8, aplicamos \log_{10} en ambos lados de la ecuación

$$\log_{10}(\dot{u}) = \log_{10} \left[K \left(\frac{R}{\sqrt[3]{W}} \right)^\alpha \right] \quad (3.9)$$

sabiendo que $\log_a(uw) = \log_a u + \log_a w$, entonces

$$\log_{10}(\dot{u}) = \log_{10}(K) + \log_{10} \left(\frac{R}{\sqrt[3]{W}} \right)^\alpha \quad (3.10)$$

pero $\log_a(u^c) = c \log_a(u)$, por lo que:

$$\log_{10}(\dot{u}) = \log_{10}(k) + \alpha \log_{10} \left(\frac{R}{\sqrt[3]{W}} \right) \quad (3.11)$$

acomodando términos:

⁸ Para diferenciarlo del escalamiento cuadrático, $R/\sqrt[3]{W}$ que ha sido encontrado experimentalmente y que es apropiado para describir el fenómeno cuando la carga tiene forma cilíndrica

$$\log_{10}(\dot{u}) = \alpha \log_{10}\left(\frac{R}{\sqrt[3]{W}}\right) + \log_{10}(k) \quad (3.12)$$

Con información⁹ de \dot{u} de los registros y $R/\sqrt[3]{W}$ de diseño y por medio de mínimos cuadrados, se encuentra la mejor recta que ajuste a los datos, y se tiene que $\log(k)$ es la intercepción con $R/\sqrt[3]{W}$ y α es la pendiente de la recta.

En el siguiente subtema se aplicará la ley de escalamiento cúbico, paso a paso, para obtener modelos adecuados a cada zona de estudio, de acuerdo a los datos de campo generados en las explosiones.

Para demostrar la efectividad del escalamiento cúbico, Hendron (1968) graficó velocidades de partícula \dot{u} vs distancias escaladas $R/W^{1/3}$ para datos de explosiones de 14 a 145,000 Kg de carga. (figura 3.3) A pesar de la gran diferencia entre los valores de W , la velocidad de partícula muestra una relación consistente con el rango de distancias escaladas.

Otros modelos de atenuación

La ley de escalamiento cúbico se utiliza en el control y manejo de vibraciones inducidas, sin embargo, existen otros procedimientos empíricos y estadísticos que relacionan las variables medidas en las explosiones (frecuencia, desplazamiento, velocidad, aceleración) y los parámetros de diseño de las voladuras (cantidad de explosivos, secuencia de retardos, etc.).

Algunos de esos métodos de estadística multivariada son: el análisis de grupo (Cluster Analysis), el análisis de componentes principales (Principal Component Analysis), análisis de correspondencia (Correspondence Analysis), entre otros. Dado que en este trabajo se cuenta con un número reducido de datos de campo, estos métodos de clasificación estadística y gráfica no serán utilizados.

A continuación se presentan algunos ejemplos de ecuaciones de propagación obtenidas a partir de mediciones ejecutadas en diversos sitios, al aplicar la ley de escalamiento cúbico:

Chapot, (1981) para canteras:

$$\dot{u} = 250 \left[\frac{R}{\sqrt{W}} \right]^{-1.8} \quad (3.13)$$

Tritsch (1983)

⁹ Los valores de velocidad utilizados en éste trabajo, se obtienen de la suma vectorial de velocidad para componentes normal, longitudinal y transversal, en cada punto; como se explica en el apartado 2.2

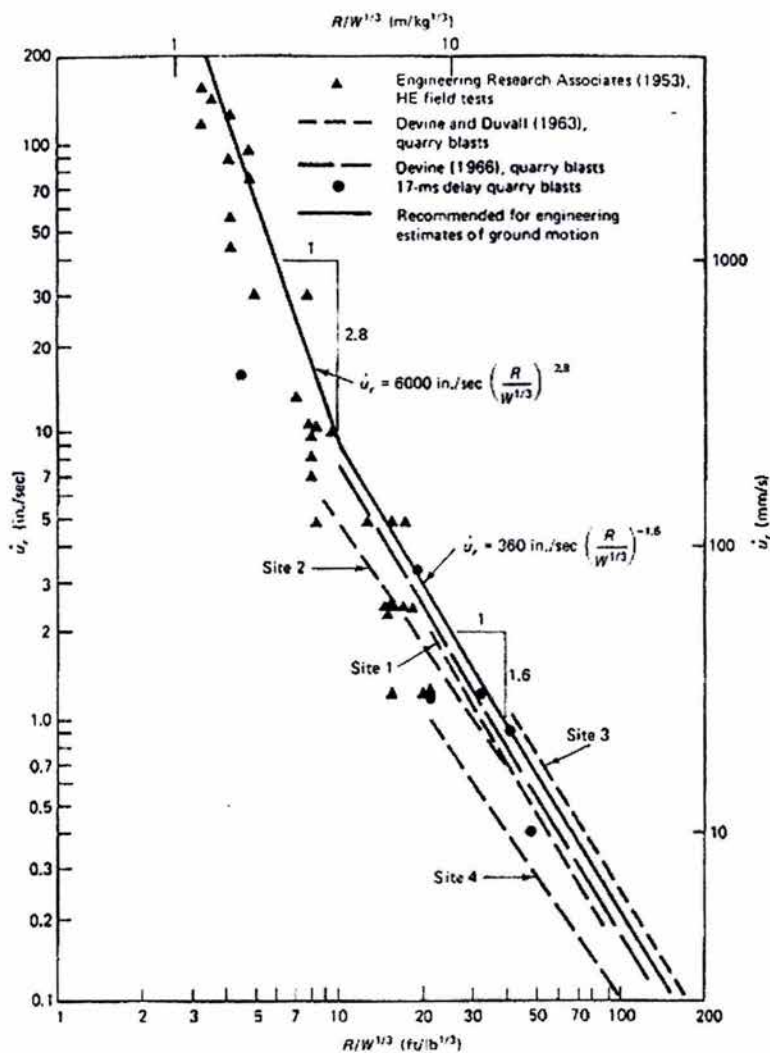


Figura 3.3 Velocidad máxima de partícula vs distancias escaladas cúbicamente (Ambraseys y Hendron, 1968)

$$\dot{u} = 1274 \left[\frac{R}{\sqrt{W}} \right]^{-1.76} \quad (3.14)$$

Midéia et al, (1978) para basalto

$$\dot{u} = 51.48 \left[\frac{R}{W^{1/2}} \right]^{-1.298} \quad (3.15)$$

A pesar de contar con este tipo de ecuaciones, solamente el estudio de cada sitio en particular podrá proporcionar una ecuación que arroje resultados cercanos a la realidad, y por consiguiente, que modele correctamente el comportamiento de atenuación en cada zona de estudio.

Como se ha visto; tanto las condiciones geológicas, como los factores asociados a la explosión tienen un papel importante en el correcto modelado del fenómeno de atenuación, y dichas características pueden variar mucho de un sitio a otro. Cabe mencionar que puede llegar a haber también errores en las mediciones o durante el análisis de la información (Oriard y Emmert, 1980)

3.2 LEY DE ESCALAMIENTO CÚBICO APLICADA A DATOS DE CAMPO

Regresiones Lineales de datos de campo

En éste subtema se aplicará la ley de escalamiento cúbico descrita con anterioridad (subtema 3.1), a los datos obtenidos en campo, para cada uno de los tres sitios mencionados en el subtema 2.2; de manera que a través del decaimiento de velocidad de partícula, sea posible conocer el comportamiento de atenuación, de la vibración generada:

Retomando la ecuación 3.12

$$\log_{10}(\dot{u}) = \alpha \log_{10} \left(\frac{R}{\sqrt[3]{W}} \right) + \log_{10}(k) \quad (3.12)$$

Es la ley de escalamiento cúbico en escala logarítmica, que tiene la misma forma de la línea recta $y = mx + b$

Para estimar los valores de k y α , se utilizó el método tradicional, que consiste en una estimación por mínimos cuadrados de dichas constantes, a partir de los datos de velocidad de partícula máxima \dot{u} de los registros en campo¹⁰, y distancia escalada $R/\sqrt[3]{W}$ del diseño de la prueba. Dicho método nos permite encontrar el mejor ajuste de datos, donde $\log(k)$ es la intercepción con $R/\sqrt[3]{W}$ y α es la pendiente de la recta.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en las regresiones para cada sitio.

¹⁰ Se utilizan para este cálculo las resultantes de velocidad máxima obtenidas en el subtema 2.2

Sitio 1

Como las constantes k y α , varían en función de las condiciones geológicas de cada zona y los instrumentos de medición estuvieron situados sobre distintos puntos para cada carga (4 y 5kg) en el sitio 1 (figura 2.2, subtema 2.2) se realizaron regresiones lineales independientes para cada una de las 2 explosiones, lo que permite obtener dos modelos de propagación. La figura 3.4 muestra las rectas obtenidas en este sitio.

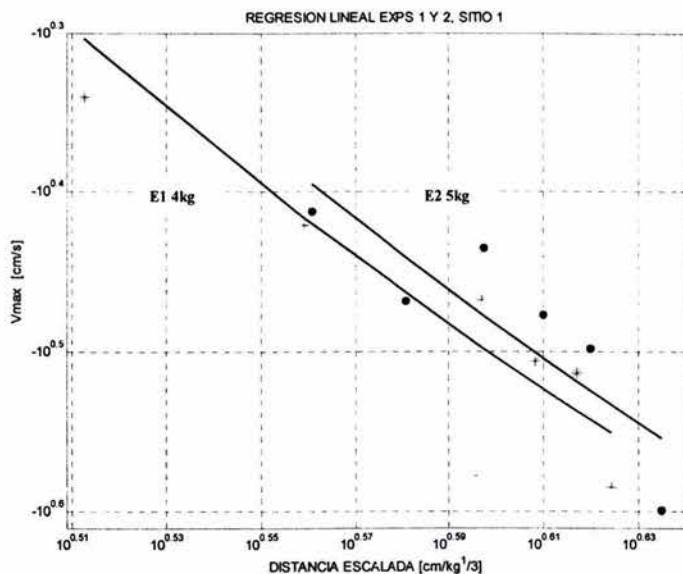


Figura 3.4 Regresiones lineales, sitio 1 (o; representa velocidades máximas absolutas de la explosión 1 (4Kg); * representa velocidades máximas absolutas de la explosión 2 (5Kg))

Se observa en la figura 3.4 que las rectas obtenidas a partir de las regresiones son muy similares entre sí, en el caso de la explosión 1 (4kg), el valor de α obtenido fue de -1.6239 y k de 3.4229 . La explosión 2 (5kg) genera una recta cuya pendiente α es -1.6163 mientras que k es 3.2484 .

Los valores obtenidos a partir de las regresiones lineales se muestran en la Tabla 3.2 y serán comentados una vez presentadas las gráficas de las regresiones en los tres sitios.

Sitio 2

En el sitio 2, las estaciones de registro permanecieron en la misma ubicación durante las tres explosiones de 2Kg, (figura 2.8, subtema 2.2) por consiguiente, se trabajó con tres regresiones lineales independientes, siendo posible obtener tres modelos de propagación.

El objetivo de llevar a cabo lo mencionado, es contar con la posibilidad de comparar los resultados obtenidos, al llevar a cabo las tres regresiones por separado y después con todos los datos en una sola.

Los valores de pendiente y ordenada al origen obtenidos en el sitio 2 se presentan en la tabla 3.2, para ser comentados más adelante. Se observa en la figura 3.5 que las rectas generadas a partir de las regresiones de datos de las explosiones 1 y 2, son de pendiente más similar entre sí, que con la recta generada a partir de la explosión 3.

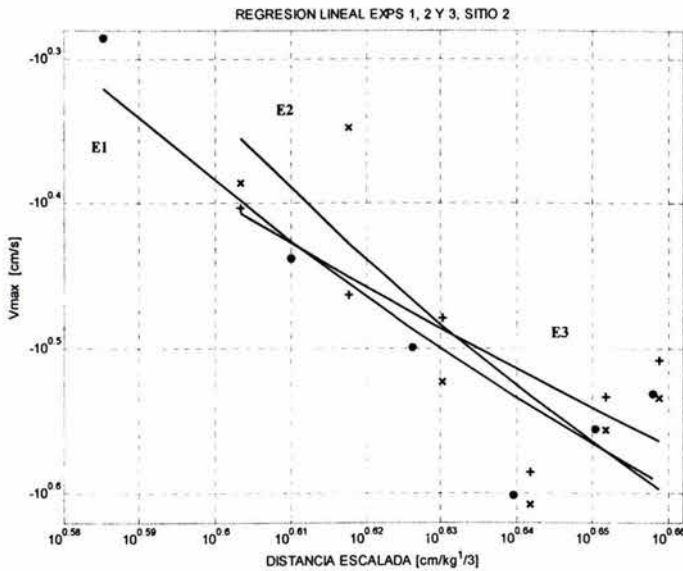


Figura 3.5 Regresiones lineales, sitio 2. (x representa velocidades máximas absolutas de la explosión 1 (2Kg); o representa velocidades máximas absolutas de la explosión 2 (2Kg); + representa velocidades máximas absolutas de la explosión 3 (2Kg))

Sitio 3

En el sitio 3 la configuración de acelerómetros y pozos de detonación fue igual a la del sitio 2, (figura 2.14, subtema 2.2) pero con dos explosiones de cargas distintas. (1 y 1.5Kg) Dado que el modelo de escalamiento cúbico involucra dentro de sus variables el valor de la carga utilizada, se obtuvieron 2 modelos de propagación en este sitio.

Las rectas obtenidas mediante la regresión presentan una diferencia de pendientes amplia, (figura 3.6) siendo este sitio el que mayor diferencia muestra en los datos de velocidades de partícula y por consiguiente, en los parámetros α y k obtenidos, mismos que se comentan a continuación en la tabla 3.2.

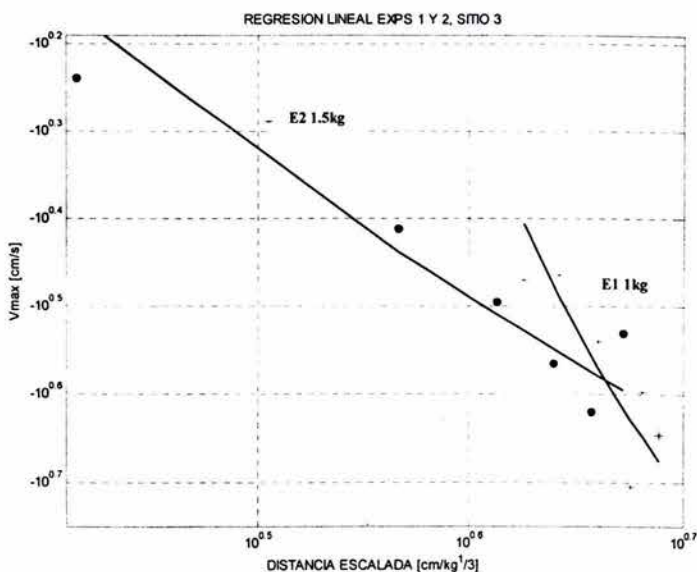


Figura 3.6 Regresiones lineales, sitio 3. (* representa velocidades máximas absolutas de la explosión 1 (1Kg); o representa velocidades máximas absolutas de la explosión 2 (1.5Kg))

El valor teórico de α es -3. La tabla 3.2 presenta los valores obtenidos en las regresiones, mismos que varían respecto a dicho valor, siendo los del sitio 1 y la explosión 2 (1.5kg) del sitio 3, los más lejanos a este. Las variaciones en el valor de α dependen de la eficiencia sísmica de la carga y de cambios en la distancia R, debido a diferencias en los caminos recorridos por las ondas por condiciones geológicas y geotérmicas locales y regionales.

Tabla 3.2 Muestra los valores empíricos obtenidos a través de la Regresión lineal de datos en campo, para los sitios 1, 2 y 3

| Sitio | W [Kg] | α | $(\log_{10}(k))$ |
|-------|-------------|----------|------------------|
| 1 | 4 (exp 1) | -1.6239 | 3.4229 |
| 1 | 5 (exp 2) | -1.6163 | 3.2484 |
| 2 | 2 (exp 1) | -3.0950 | 10.1555 |
| 2 | 2 (exp 2) | -2.5750 | 7.8205 |
| 2 | 2 (exp 3) | -2.0398 | 5.6333 |
| 3 | 1 (exp 1) | -3.3263 | 11.4912 |
| 3 | 1.5 (exp 2) | -1.1820 | 1.6082 |

Las tres explosiones del sitio 2 y la primera del sitio 3, presentan valores de α más cercanos al valor teórico.

Los datos de ordenada al origen (Tabla 3.2) fueron obtenidos mediante las regresiones lineales en escala logarítmica partiendo de la ecuación 3.12.

La gráfica 3.7 muestra todas las rectas obtenidas mediante regresión lineal, para cada una de las explosiones en los tres sitios de estudio. Se observa que en el sitio 1 y 2, las rectas son de pendientes similares, mientras que para las dos explosiones del sitio 3, las pendientes son muy distintas. (Tabla 3.2)

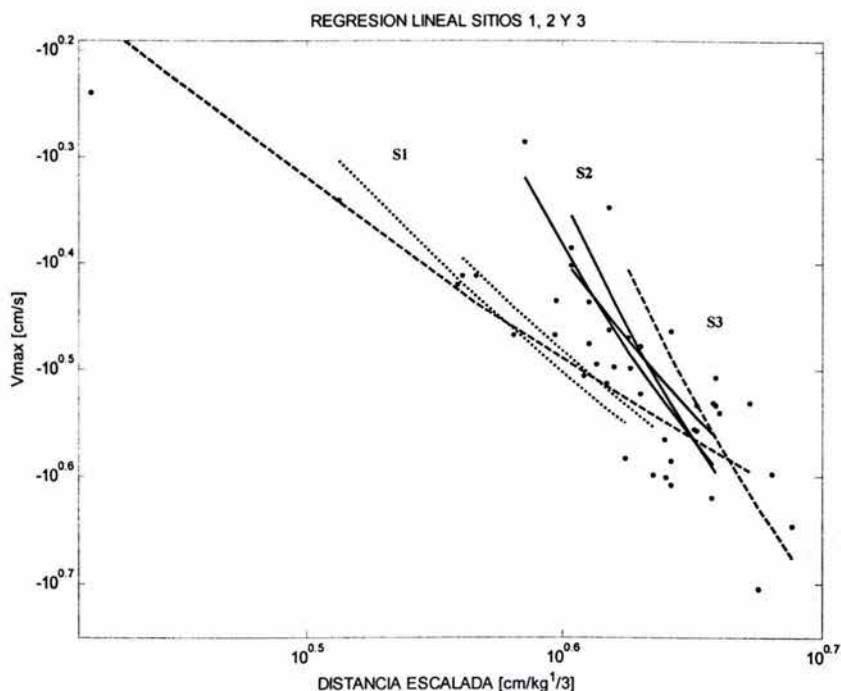


Figura 3.7 Gráfica que muestra las rectas obtenidas en las regresiones lineales, sitios 1, 2 y 3 (S1: sitio 1(...); S2: sitio 2(_); S3: sitio 3(- -))

Es posible hacer cierta descripción del comportamiento de los datos procesados mediante las gráficas, sin embargo, se sabe que dicha representación puede no ser lo suficientemente precisa; puesto que, con un cambio de escala, las variaciones que probablemente sean pequeñas se pueden percibir muy grandes ó viceversa; es por esto que se necesita de valores que sean representativos del comportamiento de los datos, y que dependan únicamente de los mismos.

Estos valores, conocidos como “Parámetros numéricos” en Estadística se utilizan para ayudar a describir el comportamiento de la muestra, (en este caso, el grupo de velocidades registradas para cada explosión) con mayor precisión.

El Parámetro estadístico numérico utilizado en este caso será la medida de dispersión conocida como Desviación Estándar respecto a la media, definida por la siguiente ecuación:

$$S = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1} \right]^{1/2} \quad (3.16)$$

donde:

$x_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ son los datos de velocidad máxima

\bar{x} es el valor promedio de velocidad máxima

n es el número total de datos de velocidad máxima

Una vez conocida la desviación estándar para cada regresión lineal, es posible conocer el error estándar de la muestra, utilizando la ecuación 3.17

$$S_x = \frac{\pm S}{(n-1)^{1/2}} \quad (3.17)$$

A partir de las ecuaciones 3.16 y 3.17 se obtuvo la desviación estándar y el error de las tres regresiones llevadas a cabo, para los datos de velocidades de los tres sitios de estudio, la Tabla 3.3 muestra los resultados obtenidos.

El mínimo error se obtuvo en la regresión de datos de velocidades, para la explosión 1 (1Kg) del sitio 3, siendo el máximo valor de error, el obtenido para la regresión de datos de la explosión 2 (1.5Kg) del mismo sitio.

Tabla 3.3. Muestra el error estándar obtenido para las regresiones lineales de datos de campo en los sitios 1, 2 y 3

| Sitio | Carga W [Kg] | Desviación Estándar | Error Estándar |
|-------|--------------|---------------------|----------------|
| 1 | 4 (exp 1) | 2.3451e-005 | 2.3451e-006 |
| 1 | 5 (exp 2) | 5.5351e-005 | 5.5351e-006 |
| 2 | 2 (exp 1) | 5.1689e-005 | 5.1689e-006 |
| 2 | 2 (exp 2) | 1.0464e-004 | 1.0464e-005 |
| 2 | 2 (exp 3) | 1.7010e-005 | 1.7010e-006 |
| 3 | 1 (exp 1) | 3.4117e-006 | 3.4117e-007 |
| 3 | 1.5 (exp 2) | 5.1779e-004 | 5.1779e-005 |

Ley de escalamiento Cúbico, Modelos obtenidos

Una vez obtenidos los valores de k y α mediante las regresiones lineales (Tabla 3.2), en escala logarítmica, y sabiendo que $y = \log_a x$ significa $a^y = x$, obtenemos el valor de k en escala no logarítmica para así obtener un modelo particular que muestre el comportamiento de atenuación en cada sitio de estudio.

Los valores de k y α , se sustituyen en la ecuación 3.8 (subtema 3.1), para escribir el modelo de escalamiento cúbico que caracteriza cada sitio, de acuerdo a los datos de campo

$$\dot{u} = K \left(\frac{R}{\sqrt[3]{W}} \right)^\alpha \quad (3.8)$$

A continuación se presentan los modelos, junto con las curvas obtenidas en escala logarítmica para cada sitio.

Sitio 1

Como se dijo con anterioridad, en este sitio se obtuvieron dos modelos de propagación.

$$\log_{10}(V_{\max}) = -1.6239 \log_{10} \left(\frac{R}{\sqrt[3]{W}} \right) + 3.4229 \quad (3.18)$$

$$\log_{10}(V_{\max}) = -1.6163 \log_{10} \left(\frac{R}{\sqrt[3]{W}} \right) + 3.2484 \quad (3.19)$$

La figura 3.8 muestra, las rectas obtenidas con los modelos 3.18 y 3.19, junto con los datos de campo, por medio de los cuales fueron obtenidas las constantes k y α .

A pesar de que en este sitio, se utilizaron 2 configuraciones distintas de arreglos de acelerómetros (figura 2.2) perpendiculares entre sí; se obtuvieron valores a partir de las regresiones más similares, que los obtenidos en los sitios 2 y 3, donde se utilizó una misma línea de acelerómetros para registrar todas las explosiones llevadas a cabo. (figuras 2.8 y 2.14)

La figura 3.8 que muestra las rectas en escala logarítmica nos dice que los modelos obtenidos ajustan bien a los datos, puesto que no existen dispersiones significativas en los mismos.

Dado que la confrontación de resultados entre el método ingenieril y geofísico, se hará con la ayuda de la norma Alemana¹¹ DIN4150, (Anexo 3) y dicha norma establece las velocidades máximas recomendadas como 4, 8 y 30mm/seg, se han observado las distancias a las cuales, los modelos obtenidos en los tres sitios alcanzan una velocidad apenas menor a las que establece esta norma.

Tomando en cuenta que los puntos encerrados entre las dos rectas que representan los modelos en escala logarítmica, (figura 3.8), nos proporcionan un rango de velocidades máximas y sus respectivas distancias permisibles, se encontraron los siguientes rangos:

¹¹ También se hará uso de la norma Escocesa PAN50 y la Norma Española UNE 22-381-93

- Para una velocidad máxima de partícula de 30mm/seg, las distancias máximas permisibles van de 0.88 a 1.03m
- Para una velocidad máxima de partícula de 8mm/seg, las distancias máximas permisibles van de 2 a 2.33m
- Para una velocidad máxima de partícula de 4mm/seg, las distancias máximas permisibles van de 3.08 a 3.57m

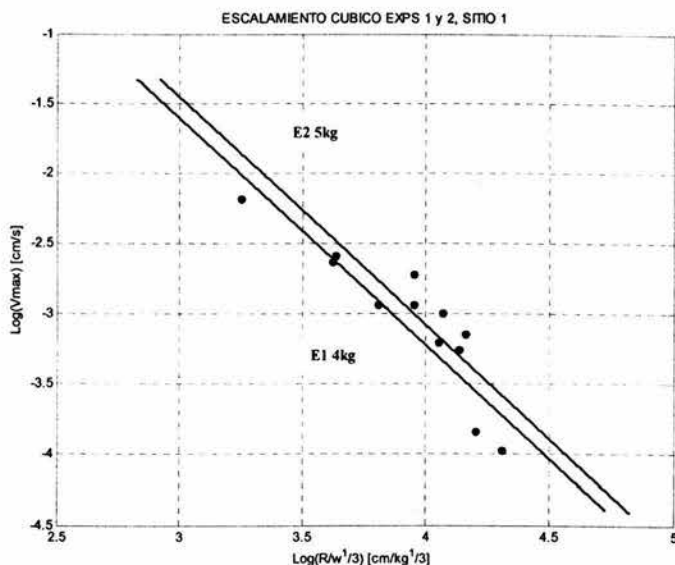


Figura 3.8 Ley de escalamiento cúbico en escala logarítmica para las explosiones 1 y 2 (4 y 5Kg) del sitio 1

Sitio 2

Se presentan a continuación los tres modelos obtenidos en este sitio. La figura 3.9 muestra, las rectas obtenidas con los modelos en escala logarítmica, junto con los datos, por medio de los cuales fueron obtenidas las constantes k y α . (ecuación 3.20 para la explosión 1; ecuación 3.21 para la explosión 2; ecuación 3.22 para la explosión 3)

$$\log_{10}(V_{\max}) = -3.0950 \log_{10}\left(\frac{R}{\sqrt[3]{w}}\right) + 10.1555 \quad (3.20)$$

$$\log_{10}(V_{\max}) = -2.5750 \log_{10}\left(\frac{R}{\sqrt[3]{w}}\right) + 7.8205 \quad (3.21)$$

$$\log_{10}(V_{\max}) = -2.0398 \log_{10}\left(\frac{R}{\sqrt[3]{w}}\right) + 5.6333 \quad (3.22)$$

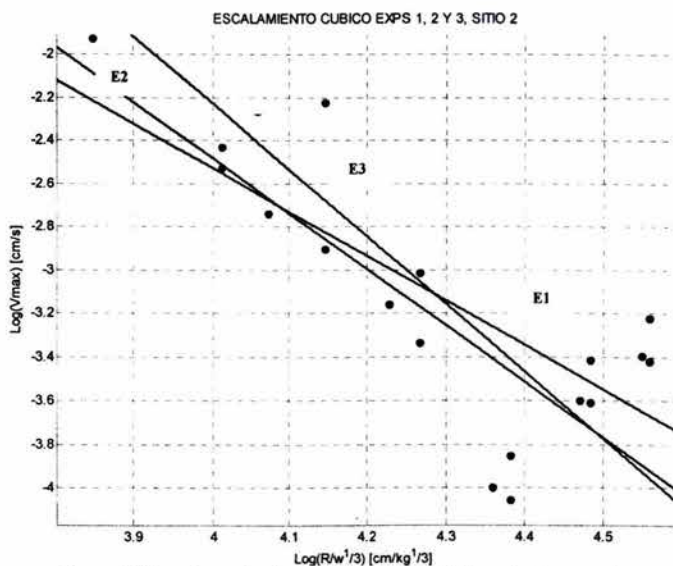


Figura 3.9 Ley de escalamiento cúbico en escala logarítmica para las Explosiones 1, 2 y 3 (2kg) del sitio 2

Como se observa en las ecuaciones que representan los modelos obtenidos para el sitio 2, los valores de k varían ampliamente, sobretodo entre el modelo obtenido para la explosión uno y el de la explosión 3.

Es posible ver la misma variación en las rectas graficadas de los modelos lineales en escala logarítmica que presenta la figura 3.9 y que se obtuvieron a partir de las ecuaciones 3.20, 2.21 y 3.22.

Dado que las tres explosiones en el sitio 2 fueron registradas por la misma línea de acelerómetros, y detonadas con la misma carga, (2kg) se esperaba un comportamiento muy similar entre los tres modelos y las curvas de atenuación.

Las explosiones se detonaron a 50m de distancia entre sí, en una línea perpendicular a la línea de registro, por lo que las variaciones obtenidas en los modelos pueden estar relacionadas con cambios muy locales en la litología con la que se topan las ondas durante su recorrido, hasta llegar a la estación de registro.

La diferencia de datos puede deberse también a errores en las mediciones, o a factores relacionados con la eficiencia sísmica de la carga y el confinamiento de la misma.

En este sitio se establecerá el rango de distancias permisibles, con base en los límites entre el mayor y menor valor generado por los tres modelos, (ecuaciones 3.20, 3.21 y 3.22) para valores de velocidades un poco menores a 4, 8 y 30mm/s; de tal manera que todos los puntos contenidos en dichas rectas, representen el fenómeno.

Los rangos encontrados en este sitio son los siguientes:

- Para una velocidad máxima de partícula de 4mm/seg, las distancias máximas permisibles van de 11.40 a 32.36m
- Para una velocidad máxima de partícula de 8mm/seg, las distancias máximas permisibles van de 8.11 a 25.87m
- Para una velocidad máxima de partícula de 30mm/seg, las distancias máximas permisibles van de 4.24 a 16.88m

Sitio 3

En el sitio 3 se obtuvieron dos modelos. La figura 3.10 muestra, las rectas obtenidas con los mismos en escala logarítmica, junto con los datos, por medio de los cuales fueron obtenidas las constantes k y α .

La ecuación 3.24 representa el modelo obtenido a partir de los datos de velocidades máximas generados para la explosión 1 (1kg), mientras que la ecuación 3.25, es el modelo en escala logarítmica para la explosión 2 (1.5kg).

$$\log_{10}(V_{\max}) = -3.3263 \log_{10}\left(\frac{R}{\sqrt[3]{W}}\right) + 11.4912 \quad (3.24)$$

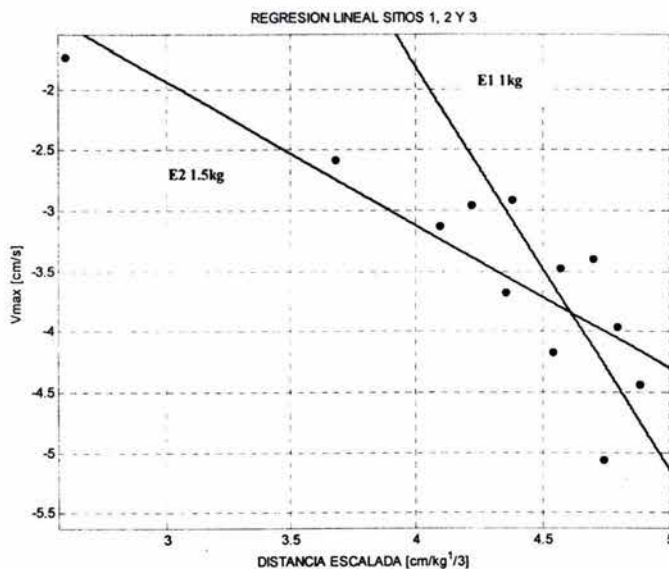


Figura 3.10 Ley de escalamiento cúbico en escala logarítmica para las explosiones 1 y 2 (1 y 1.5Kg) del sitio 3

$$\log_{10}(V_{\max}) = -1.1820 \log_{10} \left(\frac{R}{\sqrt[3]{W}} \right) + 1.6082 \quad (3.25)$$

En este sitio, al igual que en el sitio 2, se llevaron a cabo los registros de las explosiones, en una misma línea de acelerómetros, cuya posición permaneció constante y los puntos de detonación estuvieron a 50m de distancia, respectivamente. (figura 2.14, subtema 2.2)

Dado que la distancia entre explosiones es muy pequeña, no se esperaba que los modelos fueran tan diferentes, (ecuaciones 3.24 y 3.25), siendo los modelos obtenidos para este sitio, los que mayor diferencia presentaron entre sí.

La figura 3.10 nos dice que hay amplia dispersión en los datos que generan los valores de k y α , así mismo, nos muestra la gran diferencia de pendientes de las rectas obtenidas, por lo que el rango de velocidades de partícula a tomar en cuenta en el sitio 3 es mucho mayor que en los dos sitios anteriores:

- Para una velocidad máxima de partícula de 4mm/seg, las distancias máximas permisibles van de 0.56 a 37.52m
- Para una velocidad máxima de partícula de 8mm/seg, las distancias máximas permisibles van de 0.31 a 30.46m
- Para una velocidad máxima de partícula de 30mm/seg, las distancias máximas permisibles van de 0.10 a 20.47m

3.3 COMENTARIOS A LA LEY DE ESCALAMIENTO CÚBICO

Los modelos obtenidos en el subtema 3.2 nos permiten comprender el comportamiento de velocidad de partícula, a determinada distancia, en cada sitio, así como el comportamiento de atenuación. Dichos modelos (ecuaciones 3.18 a 3.25) funcionan en la zona de estudio, pues las constantes k y α fueron calculadas empíricamente a través de los datos medidos en campo.

Como se mencionó en el subtema 3.1, existen varios tipos de ecuaciones de propagación, los cuales han sido obtenidos por diferentes autores, en estudios realizados para distintas geologías; tal es el caso de Chapot, 1981, quien obtuvo un modelo utilizable en canteras (ecuación 3.13) ó Midéia et al, 1978, que obtuvieron un modelo de propagación para macizos basálticos (ecuación 3.15).

Con esto se tiene presente la posibilidad de utilizar los modelos en zonas cuya geología sea similar, sin embargo, hay que tomar en cuenta que solamente el estudio de cada sitio en particular podría generar una ecuación confiable.

En caso de llegar a utilizar una ecuación publicada en literatura técnica, es necesario admitir un gran margen de error al usar ecuaciones obtenidas para tipos similares de roca, de preferencia en la misma región; aun con esto, hay que tomar en cuenta los factores relacionados con el medio, esto es, las condiciones geológicas y geotécnicas de la zona de

estudio (presencia de fallas locales, cavidades, porosidad, densidad, empacamiento de los sedimentos, competencia, estratificación anisotrópica etc), así como las posibles fluctuaciones del nivel freático. Benjumea (2003)

Algunos de los factores causantes de la dispersión de los datos adquiridos en campo, son aquellos asociados con la explosión, como la geometría de los barrenos y su orientación, las condiciones de confinamiento de la carga, rendimiento de los explosivos y el tipo de explosivo utilizado, así como los tiempos de retardo entre cargas.

Otros factores son los relacionados a la recopilación de datos, errores en las mediciones ó durante el análisis de la información (Persson et al., 1994), la eficiencia sísmica de la carga y los cambios en la distancia R debidos a diferencias en los caminos recorridos por las ondas según las condiciones geológicas y geotérmicas locales y regionales.

Con base en el análisis comentado para las rectas obtenidas en cada sitio en particular, se concluye que, los datos arrojados mediante la aplicación de La ley de escalamiento cúbico en los sitios 1, 2 y 3, nos hablan de que para el sitio 1, los dos modelos son muy similares entre sí, pero definen distancias permisibles muy pequeñas, lo cual, en la práctica no sería de mucha utilidad.

En el sitio 2 se obtienen rangos amplios de distancias permisibles, por lo que en tal caso, sería mejor tomar en cuenta el mayor valor, para evitar posibles daños.

Por último, el sitio 3 generó dos modelos muy distintos entre sí, cuyo rango de distancias permisibles es mayor que en los dos casos anteriores, por lo que nuevamente convendría tomar los máximos valores.

Los rangos de velocidades y distancias obtenidas en los tres sitios mediante el método ingenieril, serán retomados en el subtema 5.1, para la confrontación de tales resultados y los obtenidos mediante el método geofísico, mismo que se presenta en el siguiente capítulo.

CAPITULO 4

MÉTODO GEOFÍSICO LEY DE ATENUACIÓN

Es un hecho que en la actualidad, las variables más importantes en el análisis del efecto de vibraciones inducidas, propagándose por suelos sobre las estructuras, son la velocidad máxima de partícula (analizada en el subtema 3.2) y la frecuencia asociada.

Ambas variables forman parte de las normas internacionales diseñadas para la evaluación de los efectos de vibraciones, siendo la frecuencia de vibración, el parámetro de mayor polémica en las mismas¹²

Como ya se ha visto, la velocidad de partícula depende del contenido de energía de la vibración, misma que puede ser transmitida a las estructuras, mientras que la frecuencia (ciclos de vibración por segundo), determina la eficiencia de la transmisión de la misma energía.

Sabiendo que las vibraciones pueden ser estudiadas como una función oscilante en el tiempo o espacio, que se asemejan a un senoide, es posible aplicar el análisis de Fourier, el cual se basa en una transformada, esto es, una operación que establece formalmente una relación entre dos representaciones de un mismo fenómeno, para dos distintos dominios (tiempo y frecuencia)

En la literatura técnica que se refiere a la estimación de frecuencias en datos adquiridos en explosiones, sobresalen tres métodos: (Dowding, 2001; Bollinger, 1980; USACE, 1989)

- Espectro de frecuencias de Fourier
- Espectro de respuesta
- Periodo respecto a dos ceros consecutivos

Otro método común en el análisis de frecuencias son las ondículas, (wavelets) (Benjumea, 2003) de manera sencilla se explica como el análisis de un conjunto de espectros de frecuencia de Fourier, sin embargo, tal método no ha sido aplicado aun en estudios de vibración inducida, por lo que no ha sido contemplado en las normas internacionales.

El análisis de Fourier resulta ser una herramienta invaluable para la ingeniería, siempre y cuando nos encontremos estudiando fenómenos periódicos, estacionarios e invariantes en el tiempo; de otro modo, el espectro resultante y las frecuencias obtenidas carecerán de sentido físico (Huang et al, 1998)

Otra limitante de la transformada de Fourier, es que caracteriza la señal con su promedio en la ventana de análisis, por lo que no permite examinar la variación temporal de frecuencias.

¹² Se hablará con detalle de las normas internacionales en el capítulo 5

Debido a las deficiencias y limitaciones de la transformada de Fourier, han sido creadas nuevas técnicas para el cálculo de las frecuencias, tratando de superar las limitaciones de esta transformada.

La técnica más estudiada a la fecha es aquella conocida como estimadores espectrales de gran resolución ó derivaciones de la transformada de Fourier análoga. (Percival y Walden, 1993; Gray y Davisson, 1999).

En esta técnica se suele dividir la señal en segmentos que pueden estar traslapados ó no, en los que la señal se aproxima a una función armónica (Oppenheim et al, 2000), después, mediante el uso de una ventana en el dominio del tiempo (rectangular, triangular, Hanning, Blackman, etc.) se aísla un segmento de la señal y se calcula su transformada de Fourier, por lo que se obtiene una representación en el dominio de las frecuencias.

Algunos inconvenientes que han sido encontrados para este método se enumeran a continuación: (Picone et al, 1988; Huang et al, 1998; Rossberg, 2002)

- No proveen información precisa de la variación de las frecuencias en el tiempo, pues su resolución temporal está asociada con la longitud de las ventanas usadas.
- Se presenta distorsión en los picos de frecuencia cuando se cambian las propiedades de la ventana (ancho y fase).
- Se presenta distorsión ante la presencia de una señal no estacionaria, es decir se producen armónicos ficticios en el espectro.
- Con el fin de localizar un evento en el tiempo el ancho de la ventana debe ser angosto, reduciendo la resolución frecuencial de la señal (Principio de Heisenberg–Gabor).

Otro tipo de análisis recomendado por Dowding (2001), es el espectro de respuesta, sin embargo no ha sido utilizado en la elaboración de la mayoría de las normas internacionales, por lo que no puede ser comparado con datos experimentales.

En este trabajo se ha llevado a cabo la determinación de frecuencias por medio del análisis de Fourier, como se verá en el subtema 4.2.

4.1 DETERMINACIÓN DE ATENUACIÓN SÍSMICA, POR MEDIO DE REGRESIONES INDEPENDIENTES

Además de las relaciones empíricas descritas en el subtema 3.1, para el análisis de atenuación, en éste trabajo se estudiará un método alternativo propuesto por Cárdenas et al (1993, 1994a, 1994b)

La técnica consiste básicamente en llevar a cabo dos regresiones independientes sobre la amplitud de las señales, en función de la distancia r y de la frecuencia f . La primera

regresión permite estimar las características espectrales de la fuente, mientras la segunda, utiliza las características de la fuente determinada para estimar el llamado "factor de calidad" ó valor de Q^{13} .

El modelo propuesto es el siguiente:

$$A_{ij}(f, r) = S_i(f)G_{ij}(r)e^{br_i} \quad (4.1)$$

La ecuación 4.1 es una aproximación de la amplitud de Fourier de las ondas S del movimiento registrado en cierta zona de terreno firme, a una distancia r de una fuente puntual.

Los subíndices indican el evento i y su correspondiente estación de registro j

$A_{ij}(f, r)$ es la amplitud espectral del pico de velocidad ó aceleración máxima de la onda S filtrado en un pasabandas cuya frecuencia central es f

$S_i(f)$ es el espectro de la fuente, mientras que r es la distancia entre la fuente y el receptor.

$G_{ij}(r)^*$ es la función de dispersión geométrica, donde el exponente b representa el coeficiente de atenuación no elástica que modela la atenuación regional (Aki y Chouet, 1975) y se representa en la ecuación 4.2

$$b = \frac{-\pi f}{\beta Q(f)} \quad (4.2)$$

donde β es la velocidad promedio de ondas S, en el medio a través del cual se propagan. La variable $Q(f)$ es conocida como el factor de calidad, y está en función de la frecuencia. Si tomamos logaritmos a ambos lados de la ecuación 4.1 se tiene lo siguiente:

$$\log A \equiv \sum_{i=1}^n a_i + \log G + \log e^{br} \quad (4.3)$$

la suma $\sum_{i=1}^n a_i$ representa el espectro de la fuente (Joyner y Boore, 1981)

Reacomodando de manera que los términos conocidos estén a la izquierda de la ecuación:

$$\log A_{ij}(f, r) - \log G_{ij}(r) = \sum_{i=1}^n a_i + br_{ij} \quad (4.4)$$

¹³ La Atenuación sísmica, es comúnmente caracterizada por el factor de calidad Q , el cual se define en términos generales como el máximo de energía acumulada en un ciclo, dividido por la energía perdida en el mismo.

La ecuación 4.4 forma el sistema matricial $Mx = y$, donde "y" es el vector que contiene a los elementos $\log A_{ij}(f, r) - \log G_{ij}(r)$ y "x" es el vector solución que contiene los parámetros a_i y b_i , que a su vez son encontrados a través de un método de regresión lineal.

Es necesario agregar al sistema un factor de error, encontraremos las incógnitas si resolvemos el sistema $Mx = y - e$

Una vez conocido el término de fuente a_i y el coeficiente de atenuación b_i , se llega a la siguiente relación:

$$\log A_{ij}(f, r) - \log S_i(f) = \log G_{ij}(r) + br_{ij} \quad (4.5)$$

De la ecuación 4.5 se obtiene la curva de atenuación, donde el término $\log S_i(f)$ elimina el efecto de fuente de la ecuación 4.4

Así mismo, el término de atenuación b_i puede ser utilizado en la ecuación 4.2 para conocer el factor de calidad $Q(f)$ para determinada frecuencia

4.2 LEY DE ATENUACIÓN APLICADA A DATOS DE CAMPO

El conocimiento del movimiento del suelo en un punto es caracterizado por la influencia de tres factores: la fuente, el medio por el que se propagan las ondas elásticas generadas y el instrumento ubicado a cierta distancia, en el que se registra el fenómeno.

Por ello, uno de los parámetros básicos que caracterizan sísmicamente una región es su atenuación anelástica, que constituye la capacidad del terreno para amortiguar el movimiento generado por las ondas sísmicas conforme éstas se alejan de la fuente.

En este subtema se llevará a cabo la aplicación de los datos obtenidos en los sitios 1, 2 y 3, al método descrito en el subtema 4.1, para obtener curvas de atenuación que describan el comportamiento en cada zona de estudio.

Retomando el método de regresiones independientes analizado en el subtema anterior y partiendo de la ecuación 4.1

Se había llegado a la ecuación logarítmica 4.5 que nos permitiría conocer la curva de atenuación asociada a ondas generadas artificialmente.

$$\log A_{ij}(f, r) - \log S_i(f) = \log G_{ij}(r) + br_{ij} \quad (4.5)$$

A partir de la ecuación 4.5 también podríamos conocer el valor de b_i , que a su vez, sustituido en la ecuación 4.2, nos permite conocer el factor de calidad $Q(f)$ para determinada frecuencia.

A diferencia de los datos de campo utilizados en el método analizado en el capítulo 3 (ley de escalamiento cúbico) en el dominio del tiempo, es necesario en éste caso, utilizar datos de campo en el dominio de la frecuencia; para obtener datos de amplitudes máximas de velocidades de onda en función de la distancia.

Una vez teniendo estos datos, se procede a llevar a cabo la regresión lineal que nos arrojará los valores de a , y b , posteriormente utilizados en la ecuación 4.4

$$\log A_{ij}(f, r) - \log G_{ij}(r) = \sum_{i=1}^n a_i + br_{ij} \quad (4.4)$$

Los valores de amplitud utilizados en la regresión se obtienen calculando los espectros de amplitud de Fourier, para cada componente del movimiento radial (NS), transversal (EW) y vertical (Z) registrado en cada detonación.

Este análisis de las tres componentes por separado, permitirá conocer con mayor detalle el comportamiento de propagación de las vibraciones y la atenuación de las mismas, en cada componente de movimiento, lo cual nos permite identificar posibles discontinuidades laterales en la estructura del suelo.

Sitio 1

Espectros de Fourier

Los espectros de amplitud de Fourier suavizados, para una ventana triangular de 5 puntos, en cada una de las estaciones que registraron, en sus tres componentes, las dos detonaciones realizadas en el sitio 1, (figura 2.2, capítulo 2), se muestran en la figura 4.1

Es posible definir cierto número de frecuencias a las cuales se quiere llevar a cabo el análisis. En este caso fueron utilizadas siete frecuencias distintas, con base en lo siguiente:

Para las explosiones 1 y 2 (4 y 5kg), se tiene que el nivel de amplitud es plano en todas las estaciones de registro, para frecuencias menores a 10Hz.

Los espectros obtenidos para la explosión 1 (4kg) concentran la energía sísmica en frecuencias mayores a 20Hz. La única estación que muestra una amplitud relativamente alta (0.01cm/s) en la componente transversal, para frecuencias entre 10 y 20Hz, es aquella que se encuentra más cerca de la fuente, a 58m.

En esta misma estación, la energía estuvo concentrada entre 20 y 30Hz, aunque se observa una importante amplificación de la componente radial entre los 30 y 40Hz, cuya amplitud llega a ser mayor a 0.02cm/s.

La figura 4.1 muestra que para cada una de las 3 componentes, los espectros presentan variaciones de amplitud entre sí, que van de 0.00 a 0.02cm/s para las tres primeras estaciones de registro.

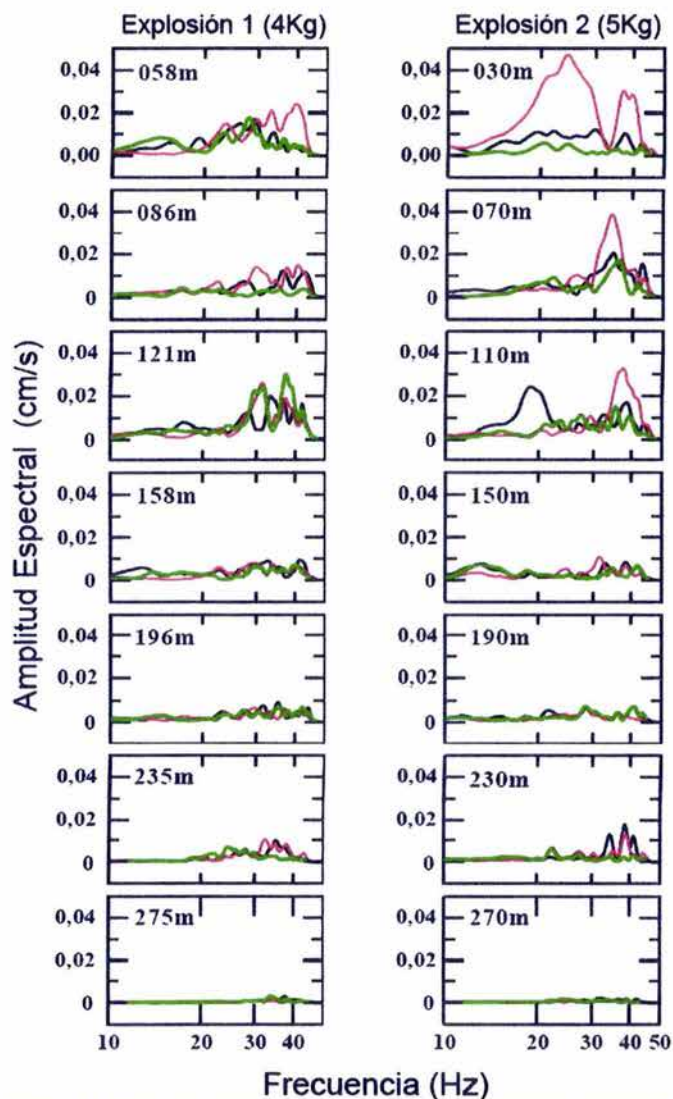


Figura 4.1 Muestra los espectros de Fourier de las 3 componentes (Z negro, NS rojo y EW verde) de los registros de aceleración para las explosiones 1 y 2 (4 y 5kg) del sitio 1 (Facultad de Ingeniería 2005)

En el caso de los espectros obtenidos para la explosión 2 (5kg), se observa que para la mayoría de las estaciones, la energía sísmica se concentró entre 30 y 40Hz. Así mismo, se tienen importantes contribuciones de la fuente en la componente radial, para frecuencias entre 20 y 30Hz (primera estación 30m) y 30 y 40Hz en las dos estaciones subsiguientes, misma componente.

Todos los espectros presentan amplificación de magnitud importante, para distintas frecuencias, respecto a la estación anterior, siendo esto más significativo en las tres primeras estaciones.

En el caso de las estaciones más lejanas, para ambas explosiones, se observa atenuación respecto a las amplitudes registradas en estaciones anteriores ó más cercanas a la fuente.

Se eligieron entonces siete frecuencias entre 6 y 24Hz, de manera que se pudieran utilizar las amplitudes (en sus tres componentes), obtenidas para las frecuencias seleccionadas. Posteriormente, se resuelven regresiones lineales, para las distancias y amplitudes máximas de las siete frecuencias seleccionadas.

Por último; con los datos arrojados por las regresiones mencionadas, se resuelve la ecuación 4.5, sin la contribución de la fuente. Se obtiene como resultado, las curvas de atenuación del movimiento sísmico, en función de la distancia, eliminando la contribución de la fuente, lo que significa que se grafica únicamente la atenuación debido al efecto de divergencia geométrica y la atenuación intrínseca de los materiales del subsuelo.

Efecto de Sitio

Lermo y Chávez-García (1993,1994) concluyeron que los microtemores (vibración ambiental) permiten la determinación del periodo dominante T_0 de sedimentos sujetos a amplificación dinámica, en un intervalo de frecuencias entre 0.3 y 10Hz, junto con una estimación preliminar del nivel de amplificación; esto mediante la comparación de resultados de microtemores contra razón espectral estándar de registros de temblores.

Dado que en este trabajo se está llevando a cabo el análisis de atenuación de vibraciones inducidas en distintos sitios, es necesario introducir como complemento los datos arrojados mediante el estudio de microtemores, puesto que permiten evaluar los periodos dominantes del suelo y las amplificaciones relativas del mismo.

La adquisición de datos para el registro de vibración ambiental, consistió en el registro continuo de tres minutos de duración, en varios acelerómetros colocados en el sitio de estudio. La técnica utilizada fue la de cocientes espectrales (Lermo y Chávez-García, 1993;1994)

Los resultados arrojados por el estudio de microtemores en este sitio (Facultad de Ingeniería, 2005) indicaron que parte de las amplificaciones observadas anómalamente en las curvas de atenuación, son generadas por efectos muy locales de materiales poco consolidados, donde fueron instaladas las estaciones de registro.

Por otro lado, la energía sísmica liberada por las explosiones se dio en el rango de 10 a 30Hz, por lo que es posible que las ondas propagándose en esta banda de frecuencia

encontraran a su paso, estratos con frecuencia de vibrar dentro de esa banda de frecuencia, produciéndose así efectos resonantes que amplificaron el movimiento del terreno¹⁴.

Curvas de atenuación

La figura 4.2 muestra las curvas de atenuación, para las tres componentes, de la explosión I (4kg) en el sitio I

De acuerdo a los datos de campo, al llevar a cabo esta detonación, los acelerómetros permanecieron ubicados de acuerdo a la configuración mostrada en la figura 2.2 (subtema 2.2). La línea de acelerómetros que registró este movimiento fue la que en el esquema se observa paralela al eje de las abscisas.

Analizando las curvas de atenuación obtenidas, se tiene que, para la componente vertical las curvas de atenuación para frecuencias de 12 y 18Hz presentan un decaimiento similar, bastante más suave que las curvas de frecuencias de 21 y 24Hz, cuyo decaimiento es visiblemente más pronunciado. Las curvas de frecuencias bajas (6 y 9Hz) presentan muy poca atenuación.

Analizando ahora la componente radial; se observa un comportamiento de atenuación, con curvas de pendiente pronunciada, y comportamiento similar, para casi todas las frecuencias, excepto las bajas (6 y 12Hz)

Por último, la componente transversal, arroja curvas con comportamientos muy similares de atenuación a distintas frecuencias (altas y bajas).

Llama la atención en este caso, la irregularidad en el comportamiento de la curva que muestra el comportamiento de atenuación a 15Hz, respecto a los otros resultados.

Llevando a cabo un análisis en conjunto de las tres componentes, se observa un decaimiento hasta de tres órdenes de magnitud, pasando tan sólo de la primera a la segunda estación de medición, esto es en distancia 75m aproximadamente. Para distancias mayores, y llegando a la penúltima estación (a 230m), la atenuación de la energía es causada por efectos de los materiales superficiales del subsuelo (no más de 30m de profundidad, pues los acelerómetros fueron situados a sólo 25m).

Las mismas curvas en conjunto nos permiten localizar algunas amplificaciones puntuales, por ejemplo, la tercera estación a 150m presenta un visible cambio de pendiente en la componente radial a bajas frecuencias, observado también en la componente vertical para las curvas de 21 y 24Hz. La última estación a 270m registra una mayor atenuación para casi todas las frecuencias de las tres componentes, excepto la curva de la frecuencia a 6Hz de la componente radial.

¹⁴Anexo 2, subtema 2.3 Amplificación del movimiento del suelo debido a una capa de suelo blando

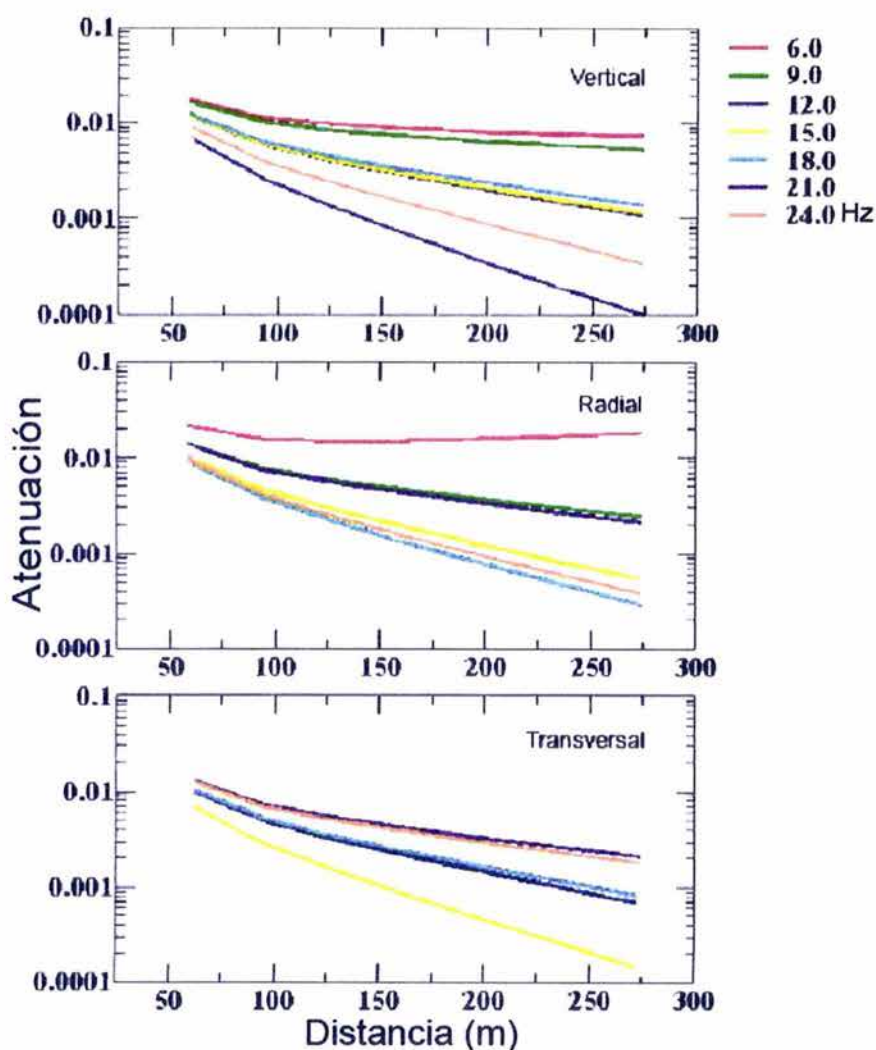


Figura 4.2 Curvas de atenuación para la explosión 1 (4kg) del sitio 1. En la parte superior derecha se indican las frecuencias en Hz, a las que se leyeron los valores de amplitud. (Facultad de Ingeniería 2005)

Para llevar a cabo el análisis de las curvas de atenuación obtenidas para la explosión 2 (5kg), se presenta la figura 4.3, donde se observa que las curvas en la componente vertical presentan una marcada atenuación para todas las frecuencias, de la primera a la segunda estación, siendo la frecuencia más baja (6Hz) la que menor atenuación presenta.

A partir de los cien metros, las curvas muestran un decaimiento normal en función de la distancia, siendo las altas frecuencias (12 y 24Hz) las que tienen mayor dispersión.

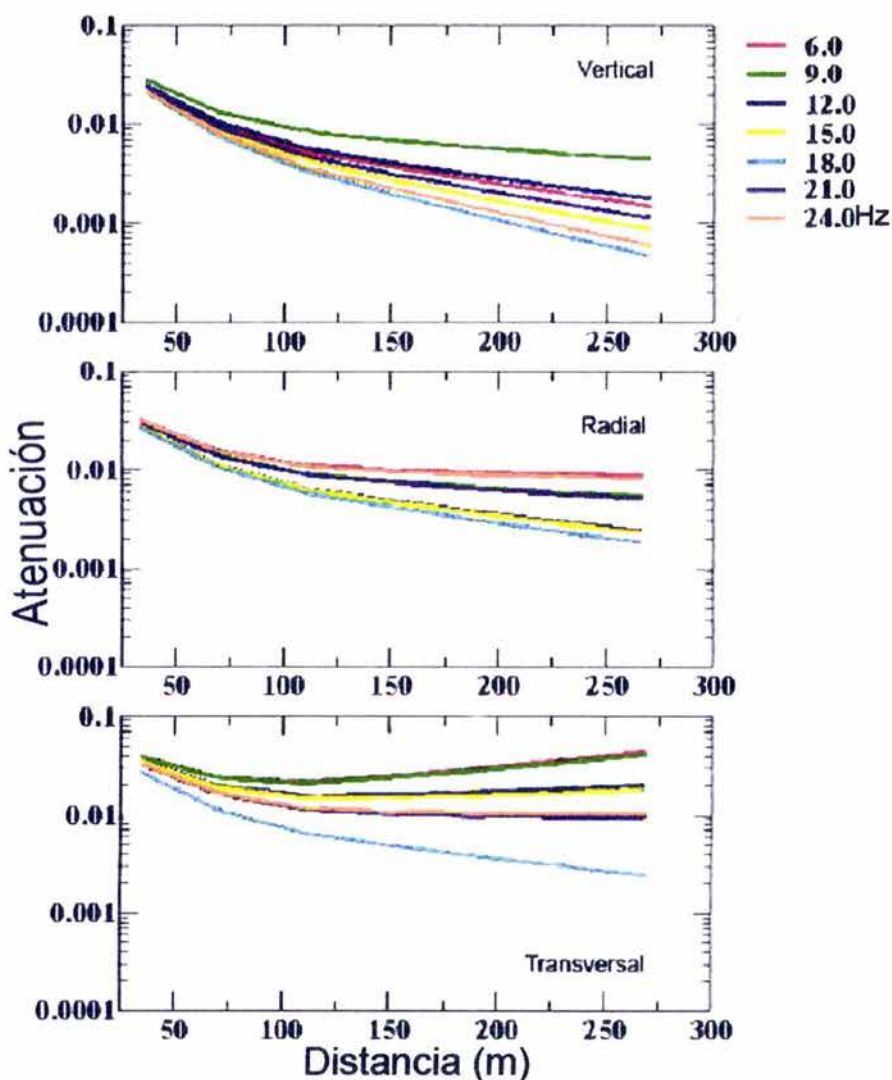


Figura 4.3 Curvas de atenuación para la explosión 2 (5kg) del sitio 1. En la parte superior derecha se indican las frecuencias en Hz, a las que se leyeron los valores de amplitud. (Facultad de Ingeniería, 2005)

La componente radial presenta nuevamente una marcada atenuación en todas las frecuencias, de la primera a la segunda estación, aunque no tan marcada como en la componente vertical. El comportamiento de atenuación registrado en el resto de las estaciones, tiende a ser más uniforme y suave estando de nuevo las altas frecuencias, relacionadas a mayor atenuación que las bajas frecuencias.

Para la componente transversal, se repite nuevamente el comportamiento de atenuación pronunciada, de la primera a la segunda estación en la mayoría de las frecuencias, sin embargo, a partir de la segunda estación de medición, a 86m de distancia a la fuente, a excepción de la curva de 18Hz, la mayoría de las curvas muestran una notable amplificación.

Dado que el estudio de vibración ambiental no arrojó resultados de efectos de sitio importantes en esta zona, se puede suponer que las amplificaciones mencionadas en algunas de las curvas se deben a la existencia de materiales poco consolidados donde fueron ubicados los acelerómetros, que causaron amplificaciones muy locales, dichas amplificaciones se observan en los espectros de Fourier (figura 4.1), sobre todo para las tres primeras estaciones de registro.

Puesto que la geología regional de la zona (subtema 2.1), nos dice que el suelo está compuesto, principalmente de intercalaciones arrítmicas de areniscas, tobas, brechas volcánicas (lahares) y acumulaciones fluviales, es probable que la vibración propagándose, encontrara a su paso estratos con frecuencia de vibración dentro de la banda de frecuencia igual a la frecuencia principal de vibrar de la onda, produciendo así los efectos de amplificación observados en las curvas.

Sitio 2

Espectros de Fourier

A continuación se muestran los espectros de Fourier (figura 4.4), para cada componente de movimiento, obtenidos para los datos registrados durante la explosión 2, en el sitio 2. Estos espectros fueron suavizados mediante una ventana triangular de 10 puntos.

Se observa en la figura 4.4 que el espectro de la primera estación de registro, a 47m de la fuente, presenta amplitud relativamente alta (0.0016), entre 10 y 20Hz, en sus componentes radial y transversal, mientras que el espectro de la componente vertical presenta amplitud igual o menor, que la observada en el espectro de la segunda estación a 79m de la fuente.

Por otro lado, la estación tres, a 113m de distancia, presenta un espectro muy errático en la componente radial, iniciando con amplitud baja a frecuencias entre 10 y 20Hz, para ascender a mayores amplitudes a partir de los 30Hz.

El mismo descenso de amplitud que se observa entre los 20 y 30Hz en esta componente, se puede ver en la componente vertical, mientras que la componente transversal presenta un comportamiento más uniforme, de acuerdo a los espectros de otras estaciones.

Los espectros obtenidos para el resto de las estaciones muestran un claro comportamiento similar entre ellos, es decir, amplitud ascendente en función de la frecuencia, concentrando la mayor parte de energía sísmica en frecuencias mayores a 35Hz.

Del mismo modo que se hizo en el sitio 1, se eligieron ciertas frecuencias, las cuales estuvieron contenidas, en este caso, entre 0.3 y 50Hz (9 frecuencias); para llevar a cabo la

regresión por mínimos cuadrados con sus valores de amplitud espectral. Se procedió entonces a elaborar una base de datos con las amplitudes espectrales de las nueve frecuencias, para resolver la ecuación 4.5.

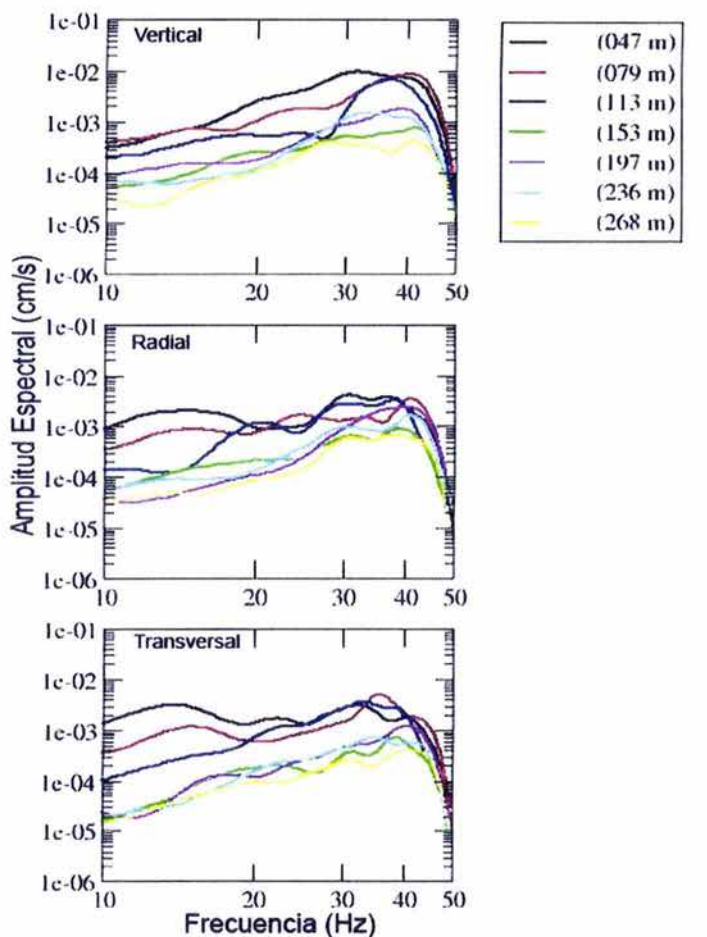


Figura 4.4 Muestra los espectros de Fourier de las 3 componentes de los registros de aceleración para la explosión 2 (2kg) del sitio 2 (Facultad de Ingeniería, 2005)

Efecto de sitio

Nuevamente se llevó a cabo en el sitio 2, el registro de vibración ambiental, con acelerómetros distribuidos estratégicamente en el terreno. Utilizando la técnica de cocientes espectrales, Lermo y Chávez García, (1993), fue posible evaluar los periodos dominantes del suelo y las amplificaciones relativas del mismo.

La figura 2.8 (subtema 2.2), muestra la distribución de los acelerómetros utilizados para el registro de microtemores. Los resultados arrojados por los cocientes espectrales, indican que en la estación de registro JL (cercana a la segunda estación de registro de vibración inducida) se presenta el efecto de sitio, para frecuencias de entre 25 y 35Hz, con amplitud relativa que no sobrepasa el valor de 4.

El resto de los acelerómetros que registraron vibración ambiental, arrojaron resultados en el estudio de cocientes espectrales, en los que prácticamente no existe un efecto de los materiales blandos o poco consolidados del subsuelo.

Curvas de atenuación

Las curvas de atenuación obtenidas en el sitio 2 (a partir de las tres explosiones), se muestran en la figura 4.5. Al igual que en el sitio 1, estas curvas representan la atenuación del movimiento sísmico en función de la distancia, sin la contribución de la fuente.

En este sitio se cuenta con curvas de atenuación generadas a partir de los datos de tres explosiones (2Kg) equidistantes a 50m (figura 2.8, subtema 2.2)

Las frecuencias elegidas en este sitio fueron nueve, en un rango de 0.39 a 50Hz, mismas que sirvieron para llevar a cabo la regresión y por consiguiente, la obtención de las curvas, las cuales muestran que no se presentan fenómenos de amplificación tan marcados como los observados en las curvas correspondientes al sitio 1

El estudio de vibración ambiental en el sitio 2 nos dice que prácticamente no se registran efectos de sitio en ninguna de las estaciones, excepto en la JL (figura 2.8), esto para frecuencias entre 25 y 30Hz, sin embargo, las curvas de atenuación cercanas a las frecuencias mencionadas, no presentan ninguna variación importante, o amplificaciones, por lo que se concluye que el efecto de sitio registrado en la estación JL, se debe a características muy locales de ese punto de medición que no tienen consecuencias sobre el resto de las estaciones de registro; principalmente la estación 2, ubicada a 79m de distancia a la fuente.

Iniciando con el análisis de las curvas en la componente radial, se tiene que el comportamiento de atenuación, en función de la distancia es muy uniforme en todas las frecuencias, siendo la curva correspondiente a 19Hz, la que presenta mayor atenuación y la de 25Hz, la que presenta menor atenuación.

No se distingue una diferencia marcada entre las atenuaciones de frecuencias altas y bajas como en el sitio 1, puesto que presentan atenuación marcada las frecuencias de 44, 37 y 6Hz, mientras que las frecuencias de 50, 31 y 12Hz, presentan menores atenuaciones.

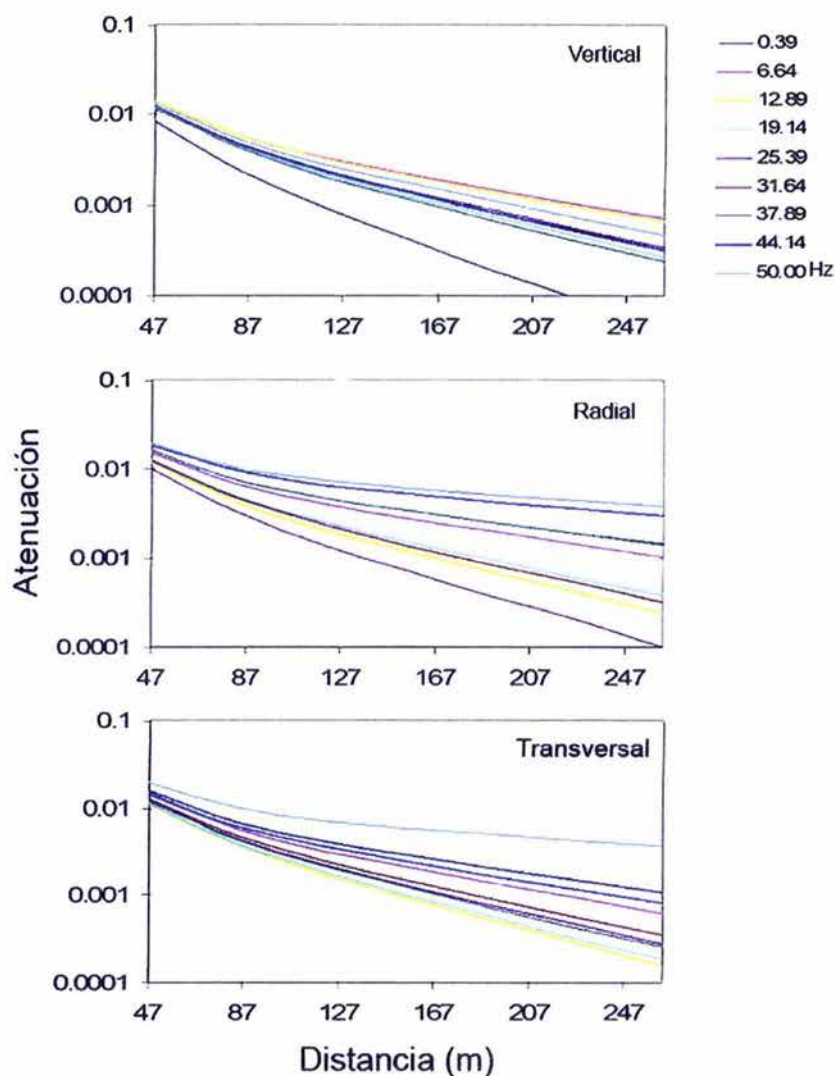


Figura 4.5 Curvas de atenuación para 3 explosiones (2Kg) del sitio 2. En la parte superior derecha se indican las frecuencias en Hz, a las que se leyeron los valores de amplitud. (Facultad de Ingeniería, 2005)

El comportamiento observado en las curvas de la componente vertical es el de un atenuamiento un poco menos suave que el comentado para las curvas de la componente radial, presentando nuevamente mucha atenuación a distancias cortas a la fuente, como se puede ver a los 47m.

A distancias más alejadas de la fuente, como los 247m, se ve claramente como las bajas frecuencias (6 y 12Hz), se atenúan menos que las altas frecuencias.

Para esta componente, la curva que representa la atenuación de la frecuencia 0.39, tiene un comportamiento distinto al de las demás frecuencias, con niveles de atenuación más bajos en todos los puntos de distancia. El resto de las curvas tienen un comportamiento muy similar entre sí, con valores muy cercanos de atenuación.

Por último, las curvas de atenuación en la componente transversal, tienen un comportamiento similar entre sí, y con las curvas analizadas para las componentes radial y vertical. Para esta componente se observa que la frecuencia de 19 Hz es la que más se atenúa a distancias cercanas a la fuente, pero su curva es mucho más suave respecto a las demás, a medida que la distancia recorrida por la vibración aumenta.

El resto de las curvas permanecen con un comportamiento uniforme de atenuación, de igual manera que en las dos componentes anteriores, sin mayor distinción entre atenuaciones de altas y bajas frecuencias.

La norma escocesa PAN 50 (2000), dice que las altas frecuencias de las vibraciones son reducidas o filtradas a distancias cortas, en medios rocosos o con material bien consolidado, mientras que las frecuencias bajas sufrirían menor atenuación, siendo posible monitorearlas a grandes distancias de la fuente, sobretodo en medios relativamente suaves, como las arcillas.

Se sabe de antemano que las unidades litoestratigráficas localizadas en la zona se componen principalmente de areniscas, tobas y brechas volcánicas, en ocasiones intercaladas entre sí, por lo que no podemos hablar de un medio ni sumamente sólido como para que las altas frecuencias muestren el comportamiento que la norma escocesa predice, ni sumamente suave, como el compuesto por arcillas; por lo que se concluye que es, hasta cierto punto normal, el hecho de que las curvas presenten comportamiento similares entre sí, indistintamente de la frecuencia a la que representan.

En este sitio, la excepción más destacable en el comportamiento de atenuación, es el que se observa en la componente vertical, donde la frecuencia más baja del rango analizado, sufre una atenuación mucho menor en función de la distancia, que el resto de las curvas.

Sitio 3

Espectros de Fourier

La figura 4.6 muestra los espectros de amplitud de Fourier, para cada componente de movimiento de los registros tomados a partir de la explosión 2 (1.5Kg) (figura 2.14, subtema 2.2) del sitio 3.

Se observa como los espectros de las primeras tres estaciones de registro a 2, 24 y 63m de distancia a la fuente, presentan amplitudes relativamente altas, para frecuencias entre 10 y 20Hz, en comparación a los espectros del resto de las estaciones, en las mismas frecuencias.

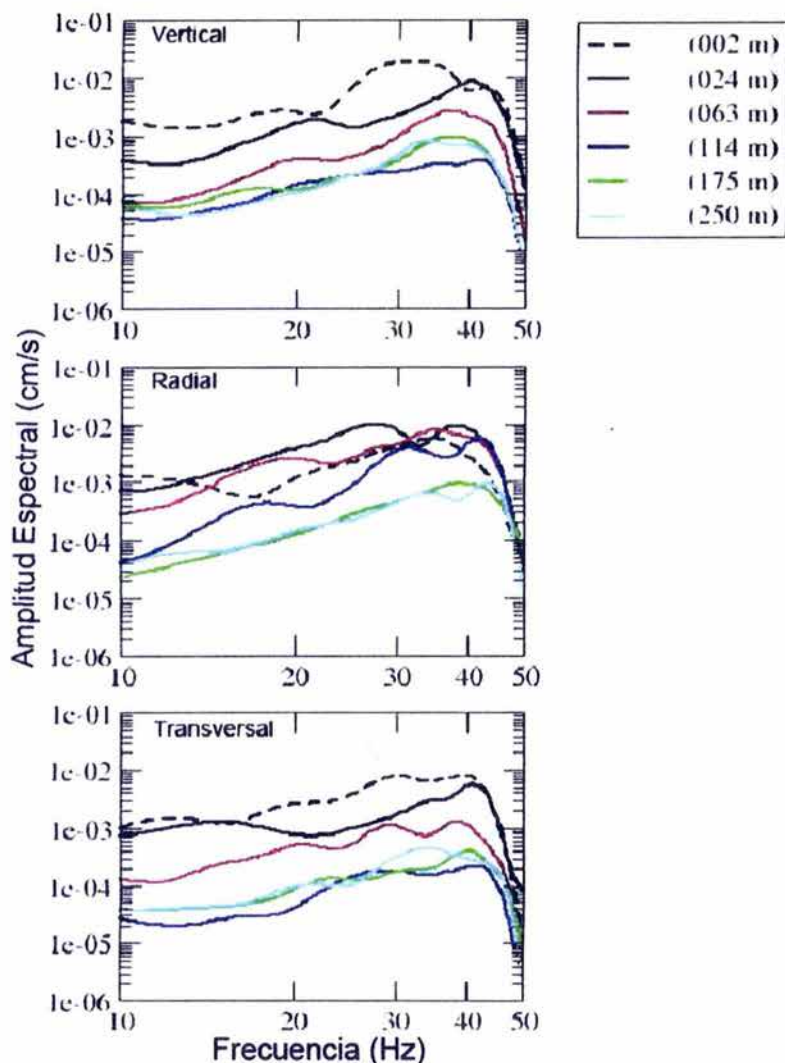


Figura 4.6 Muestra los espectros de Fourier de las 3 componentes de los registros de aceleración para la explosión 2 (1.5kg) del sitio3 (Facultad de Ingeniería 2005)

El espectro de la componente radial de la estación 3 presenta una importante contribución en el rango de frecuencias mencionado.

Posteriormente se observa que para frecuencias de entre 20 y 40Hz, la primera y segunda estación de registro, presentan una diferencia de amplitud espectral, en las tres componentes de movimiento de hasta 10 veces.

Para el resto de las estaciones, localizadas a más de 100m de la fuente, la diferencia de amplitudes, respecto a las amplitudes de los espectros de las estaciones 1 y 2, es mucho mayor, para frecuencias de 20 a 50 Hz, especialmente en las componentes radiales.

El espectro de amplitud de la estación tres, a 114m de distancia presenta amplitudes bajas en las componentes radial y transversal (aproximadamente 0.000012), para frecuencias de 10 a 20Hz, mientras que su componente vertical tiene amplitudes en el mismo rango de frecuencias de hasta 0.00015.

Todos los espectros de Fourier tienen cierta similitud, sin importar a qué estación correspondan ó que componente se observe, lo que puede ser un indicador de que el subsuelo no presenta grandes variaciones laterales.

En este sitio se eligieron siete frecuencias contenidas entre 5 y 45Hz, para la regresión por mínimos cuadrados, que permite resolver la ecuación 4.5

Efecto de sitio

En el sitio 3 también se llevaron a cabo mediciones de vibración ambiental, mediante el registro de la misma en varios acelerómetros ubicados en el terreno, de acuerdo a la figura 2.14, del subtema 2.2.

Utilizando nuevamente el método de cocientes espectrales de Lermo y Chávez-García (1993), se evaluaron las amplificaciones relativas del suelo, observando lo siguiente: en las estaciones KK, KL, KO y KS, se tiene una respuesta con amplitud promedio de 4, para frecuencias aproximadas a 20Hz.

Dichas estaciones se encuentran cerca de la línea de acelerómetros que registraron las 3 explosiones, por lo que si las condiciones de amplificación en ciertas capas de suelo se mantuvieron constantes de manera horizontal en el terreno, será posible visualizar el fenómeno en las curvas de atenuación. En el siguiente subtema se comentan los resultados observados en estas.

La estación KW, se encuentra relativamente lejos de la línea principal de registro, por lo que el efecto de sitio encontrado en esta tiene poca probabilidad de influir en las curvas que representan el comportamiento de atenuación de la zona.

El resto de las estaciones de registro de vibración ambiental, no presentaron efectos importantes.

Curvas de atenuación

Las curvas de atenuación obtenidas en el sitio 3 (a partir de las dos explosiones), se muestran en la figura 4.7. AL igual que en los sitios 1 y 2; estas curvas representan la atenuación del movimiento sísmico en función de la distancia, sin la contribución de la fuente.

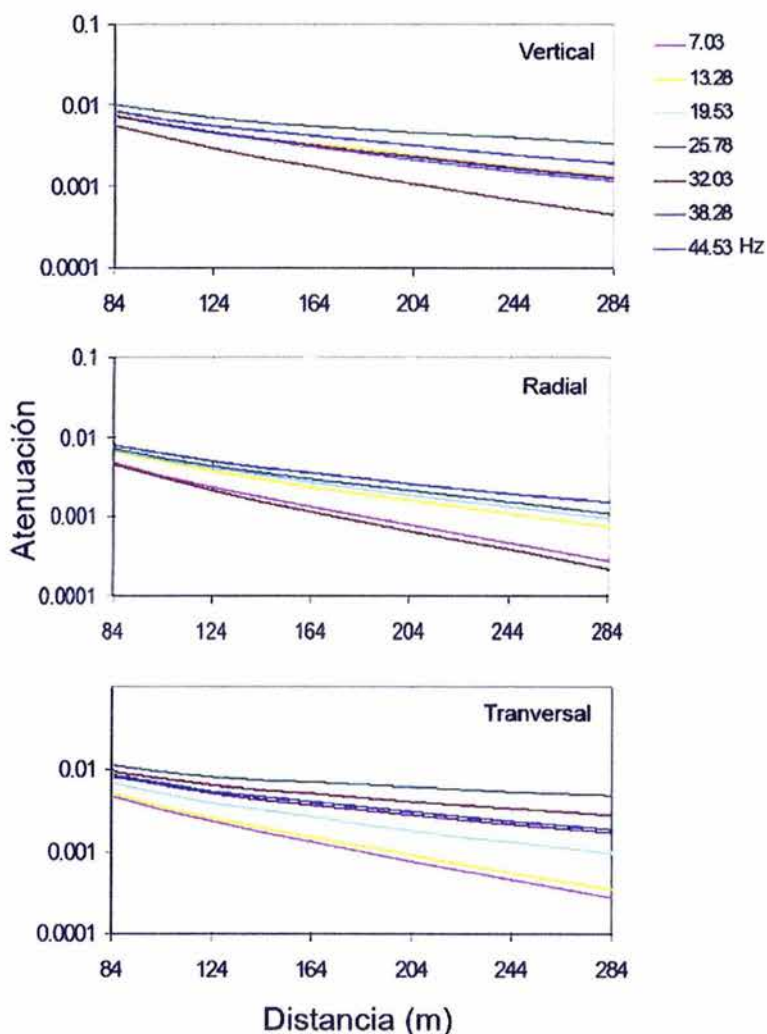


Figura 4.7 Curvas de atenuación para 2 explosiones del sitio 3. En la parte superior derecha se indican las frecuencias en Hz, a las que se leyeron los valores de amplitud. (Facultad de Ingeniería, 2005)

En el sitio 3, se recabaron datos para dos explosiones llevadas a cabo a cincuenta metros de distancia, una de la otra. (figura 2.14, subtema 2.2).

Las curvas de atenuación presentadas (figura 4.7) corresponden a dos explosiones (1kg y 1.5kg). Se eligieron siete frecuencias, en un rango de entre 7 y 44Hz, para llevar a cabo las regresiones que arrojaron las curvas que se comentan a continuación.

En la primera componente a analizar, que es la radial, se observa claramente como las altas frecuencias (44 y 38Hz) son mayormente atenuadas cerca de la fuente, a 84m de distancia, que las frecuencias bajas (13 y 7Hz), sin embargo, la curva que representa la atenuación de la frecuencia 32Hz, es la que presenta menor atenuación a la distancia mencionada, por lo que no se puede generalizar que en este sitio, las altas frecuencias son atenuadas cerca de la fuente, al menos en la componente radial.

El resto de las curvas presentan un comportamiento de atenuación regular, sin ampliaciones, con valores similares entre sí, a excepción de las frecuencias 7 y 32Hz, las cuales se atenúan mucho menos que las curvas de 19 y 13Hz.

Analizando la componente vertical, se tiene que nuevamente es la curva que representa los 32Hz, la que menos se atenúa, mientras que los 38 y 44Hz generan curvas que se atenúan más que el resto.

El mismo comportamiento de atenuación que se repite para las curvas de las componentes radial y vertical, no vuelve a suceder en la componente transversal, donde la curva de los 32Hz, junto con la de los 38Hz, son las que mayor atenuación presentan, siendo las de 13 y 7Hz, las que menos se atenúan.

En esta componente todas las curvas tienen una pendiente muy suave, y presentan un comportamiento uniforme entre sí.

En las tres componentes se tiene mayor atenuación a menor distancia de altas frecuencias, a excepción de la curva que representa los 32Hz, en las componentes radial y vertical. Tal comportamiento podría ser explicado por la presencia de una capa de suelo bien consolidado, ya que sabemos que si las altas frecuencias se ven atenuadas a distancias cercanas a la fuente, es debido a material sólido.

En este sitio, el estudio de vibración ambiental, nos dice que se registró un efecto de sitio con amplitud aproximada de 4 unidades, para frecuencias cercanas a los 20Hz, en las estaciones que midieron tal fenómeno, cercanas a la línea de acelerómetros que registraron la explosión (figura 2.14), sin embargo, las curvas de atenuación obtenidas no ven reflejada ninguna amplificación.

4.3 COMENTARIOS A LA LEY DE ATENUACIÓN

Las curvas de atenuación obtenidas mediante el método de regresiones independientes, en el dominio de la frecuencia expuesto en el subtema 4.1, nos permiten conocer el comportamiento de atenuación de la vibración, en función de la distancia.

Tal método (Cárdenas et al (1993, 1994a, 1994b)), manejado en el dominio de las frecuencias, trabaja con amplitudes de la señal, en función de la distancia y ha sido aplicado a los datos obtenidos en cada uno de los tres sitios, de tal manera que sea posible comparar los resultados adquiridos por este, con el método de escalamiento cúbico.

A diferencia del método ingenieril, donde las curvas de atenuación obtenidas representan la velocidad máxima de partícula en función de la distancia, en el dominio del tiempo; a partir de una resultante de las tres componentes; el método geofísico presenta curvas de atenuación, para cada una de las componentes, radial, longitudinal y transversal en función de la distancia en el dominio de las frecuencias.

El método geofísico está diseñado para trabajar con ondas S, por lo que al observar el comportamiento de atenuación en todas las gráficas de las curvas dadas, encontramos que, hasta cierta distancia, las curvas de una sola componente presentan un decaimiento similar entre sí, con diferencias de amplitud mínimas. (Como ejemplo se presenta la figura 4.8)

Se observan las curvas de atenuación obtenidas para la componente radial en el Sitio 2. Aproximadamente a los 87m de distancia, las curvas empiezan a presentar mayores diferencias de amplitudes, en un orden de hasta mil unidades, por lo que se infiere que el predominio de ondas superficiales comienza a darse, aproximadamente cuando la vibración recorrió los 87m. (figura 4.8)

Nuestro rango de interés en la determinación de distancias permisibles, será aquel que está dado por el inicio de predominio de ondas Rayleigh.

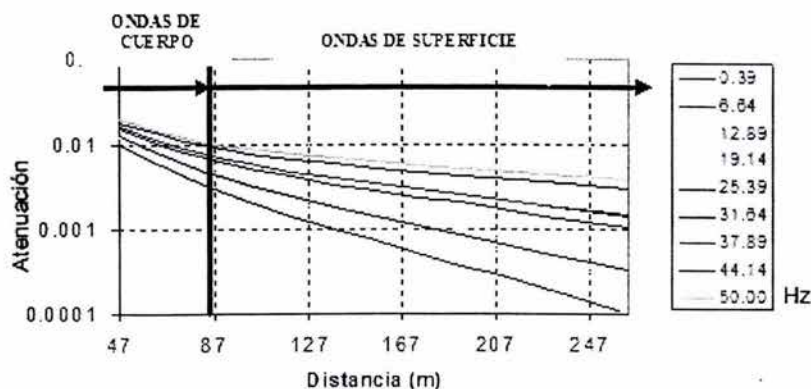


Figura 4.8 Predominio de ondas de cuerpo y superficie en las curvas de atenuación

Con base en lo anterior y en la observación de las curvas de atenuación presentadas para cada sitio (figuras 4.2, 4.3, 4.5 y 4.7), se proponen las siguientes distancias permisibles:

- Sitio 1. La figura 4.2 que representa las curvas de atenuación generadas por la explosión 1 (4kg), indica que aproximadamente a una distancia de 78m las amplitudes de las curvas se dispersan. Por otro lado, la figura 4.3 que contiene las curvas generadas a partir de la explosión 2 (5kg), muestra como las curvas se dispersan a partir de los 73 m. En conclusión, para este sitio se establece la distancia mínima permisible en 73m. Lo que significa que no sería recomendable generar explosiones a distancias menores a ésta.

- Sitio 2. En las curvas presentadas en la figura 4.5, generadas a partir de las tres explosiones llevadas a cabo (2kg). Se observa que la distancia a la cual las curvas comienzan a separarse, en sus tres componentes está aproximadamente entre 77 y 80m de distancia a la fuente. Para fines prácticos se establece que la distancia mínima permisible en este sitio es de 77m.
- Sitio 3. En este sitio se obtuvieron las curvas generadas a partir de dos explosiones de 1 y 1.5Kg, mostradas en la figura 4.7. Se tiene la mínima distancia permisible, donde las curvas empiezan a alejarse entre sí, aproximadamente a 94m.

CAPITULO 5

CONFRONTACIÓN DE RESULTADOS

5.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE LOS MÉTODOS INGENIERIL Y GEOFÍSICO

En este subtema se busca llevar a cabo el análisis de resultados obtenidos a partir de los dos métodos comparados en este trabajo, con ayuda de parámetros establecidos por normas internacionales, como las mencionadas en la tabla 1.1 del subtema 1.5.

A partir de las características geológicas descritas en el subtema 2.1 (Geología regional), que se reconocen en los tres sitios de estudio, se sabe de antemano que las zonas donde fueron recabados los datos utilizados, son, en general de suelo blando, compuesto de cenizas, arenas, tobas y conglomerados, con estratos de espesores variados, intercalados entre sí.

Se sabe que el movimiento del suelo en sitios de terreno blando, es muy diferente del que ocurre en terreno más competente, debido a la amplificación dinámica por efectos locales que pudieran presentar las ondas, al propagarse por dichos medios.

Las interfases entre estratos y las fronteras laterales de los mismos producen un fenómeno de difracción múltiple que genera interferencias constructivas y destructivas en las ondas, mismas que se traducen en amplificaciones y atenuaciones, respectivamente.

La recopilación de datos en los tres sitios incluyó estudios de microtemores, que a su vez fueron utilizados en el subtema 4.3, al comentar las curvas de atenuación obtenidas por el método ingenieril. Tales estudios permitieron conocer, por medio de cocientes espectrales, la ocurrencia del efecto de sitio, dada la alta probabilidad de que esto sucediera por ser un terreno relativamente blando.

Como se comentó en el mismo subtema (4.3), las implicaciones de tal fenómeno parecen haber tenido efectos de amplificación, únicamente en las curvas obtenidas en el sitio 1, puesto que en los sitios 2 y 3, las curvas presentaron un comportamiento de atenuación sin amplificación.

Ahora bien, este trabajo ha sido dedicado al desarrollo de dos métodos utilizados en la ingeniería, uno en el dominio del tiempo y otro en el de las frecuencias, con datos de campo, para tres sitios distintos, buscando conocer la respuesta del terreno ante vibraciones, y el comportamiento de atenuación de las mismas.

Es necesario entonces definir los dos parámetros que nos permitirán caracterizar la vibración desde los dos puntos de vista analizados, para comparar los resultados obtenidos entre sí.

Parámetros característicos de vibración inducida

Los dos métodos analizados en este trabajo utilizan los dos parámetros característicos más importantes en el estudio de vibración inducida, los cuales son: (según la norma Española UNE 22-381-93, 1993)

- Valor pico de la velocidad de vibración (dominio del tiempo)
- Frecuencia principal de la vibración (dominio de frecuencias)

Las vibraciones generadas por explosiones son oscilaciones transitorias y no periódicas, que se propagan por el terreno a una velocidad característica del mismo (velocidad de propagación)

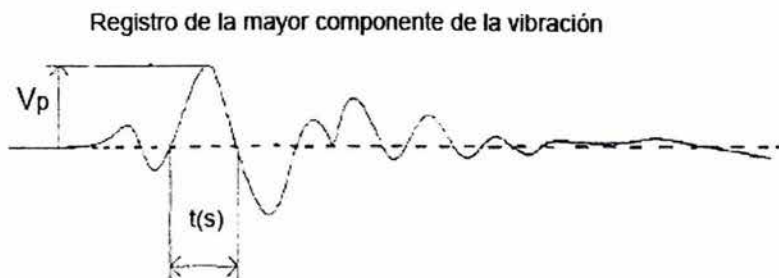


Figura 5.1 Determinación de los parámetros característicos de la vibración. V_p es velocidad de vibración pico y $1/2t$ es la frecuencia principal.

Como la vibración se lleva a cabo con movimiento espacial, es necesario realizar la medición de tres componentes, perpendiculares entre sí. Al analizar los registros obtenidos en campo se selecciona aquella componente que presente un mayor valor pico, sin importar que el valor sea positivo ó negativo respecto al eje de las abscisas. (figura 5.1)

Al ser vibraciones no periódicas, es posible que existan diferentes frecuencias, entre las cuales es necesario seleccionar una frecuencia principal característica, misma que varía de acuerdo al tipo de terreno y la distancia, siendo más baja cuanto más blando sea el terreno (velocidad sísmica baja) y mientras más distante esté el punto de registro a la fuente.

Esta frecuencia principal se determina por medio de distintos métodos, por citar algunos; el análisis de Fourier de la señal (FFT), el espectro de respuesta de la señal (pseudoespectro de velocidad) y el método de semiperiodo.

En caso de que un registro presente varios picos de velocidad de vibración del mismo orden y con diferente frecuencia, habría de ser considerada la menor de las frecuencias.

El conocimiento de los dos parámetros característicos de la vibración, permitirá la comparación entre sí, con base en las normas internacionales elegidas para este trabajo (Anexo 3) por ser las que se ajustan más adecuadamente a los resultados arrojados por los modelos de propagación y por convenir al tipo de análisis que se busca realizar.

A continuación se presentan los datos numéricos obtenidos para los métodos ingenieril y geofísico, de los parámetros a evaluar (Velocidad máxima de partícula y frecuencia fundamental), en los tres sitios de estudio, para posteriormente ser confrontados con cada una de las tres normas seleccionadas.

El primer parámetro característico de la vibración que se obtuvo en este trabajo, fue la velocidad máxima de partícula, a través de la aplicación de los datos de campo a la teoría que permite llegar al modelo de escalamiento cúbico. Los rangos encontrados en cada sitio se mencionan en el subtema 3.3.

La tabla 5.1 muestra los valores de velocidad máxima de partícula con las respectivas distancias a las que se obtuvieron.

Tabla 5.1 Velocidades máximas obtenidas a partir del método ingenieril

| Velocidad [mm/s] | Distancias Permisibles [m] | | | | | | |
|---------------------|-------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|
| | S1E1 (4Kg) | S1E2 (5Kg) | S2E1 (2Kg) | S2E2 (2Kg) | S2E3 (2Kg) | S3E1 (1Kg) | S3E2 (1.5Kg) |
| 4 | 3.57 | 3.08 | 32.36 | 19.58 | 11.40 | 37.52 | 0.56 |
| 8 | 2.33 | 2.00 | 25.87 | 14.96 | 8.11 | 30.46 | 0.31 |
| 30 | 1.03 | 0.88 | 16.88 | 8.95 | 4.24 | 20.47 | 0.10 |

S#: se refiere a los sitios 1, 2 y 3. E#: se refiere al número de explosión

Para la tabla 5.1 se escogieron los valores de velocidad máxima establecidos en la Norma Alemana DIN4150, que son 4, 8 y 30mm/s.

El segundo parámetro a considerar es la frecuencia fundamental de vibrar del terreno, misma que puede ser obtenida de los espectros de Fourier presentados en las figuras 4.1, 4.4 y 4.6 del capítulo 4. Para fines prácticos y de acuerdo a lo obtenido en informe de acceso restringido, (Facultad de Ingeniería, 2005) se utilizará en este trabajo un valor aproximado de 25Hz como parámetro de frecuencia fundamental.

Dicho valor está dentro del rango especificado para mediciones hechas en depósitos de suelo de más de tres metros de profundidad, cuya frecuencia predominante está entre 1 a 40Hz. (OCE, 1972; USACE)

Una vez definidos los parámetros de la vibración, se procederá a analizar los resultados a través de las normas internacionales, iniciando con el sitio 1.

Análisis de resultados, Sitio 1

El análisis de resultados se llevará a cabo mediante el uso de las normas internacionales descritas en el Anexo 3. En primera instancia, se analizarán los resultados contra la Norma Española UNE-22-381-93.

Recordando que en el sitio 1, el rango de velocidades de partícula fue de 30 a 4mm/s, para una distancia mínima de 0.88 y máxima de 3.57m y tomando en cuenta la frecuencia fundamental de vibrar $\omega_0 \approx 25.13\text{Hz}$, se tiene lo siguiente

El criterio de daño manejado en esta norma (tablas A.7.1 y A.7.2, Anexo 3) nos dice que a una distancia de 3.57m, en la cual la velocidad de partícula máxima obtenida fue de 4mm/s, se cae en el Grupo III, lo que significa que las condiciones dadas en esa zona, son convenientes para estructuras de valor arqueológico, arquitectónico o histórico que presenten una especial sensibilidad a las vibraciones por ellas mismas o por elementos que pudieran contener.

Analizando la figura A.7.3 (Anexo 3), y con base en el procedimiento descrito para definir el tipo de estudio de vibraciones requerido en el sitio, se llega a la conclusión de que es necesario, según la norma española, llevar a cabo el estudio preliminar de vibraciones, de acuerdo a lo descrito en ese mismo subtema.

Los modelos de escalamiento obtenidos en el sitio 1, dan como resultado distancias permisibles muy pequeñas, puesto que los valores de velocidad resultante obtenidos a partir de los registros de campo, son igualmente pequeños, (tablas 2.1 y 2.2, capítulo 2) por lo que cabe la posibilidad de que el fenómeno no esté representado adecuadamente por medio de dichos modelos.

Por otro lado, las curvas de atenuación arrojadas a partir del método geofísico en este sitio, muestran amplificaciones en el terreno, imperceptibles a partir del método ingenieril. (figuras 4.1, 4.2 y 4.3)

Analizando ahora los datos a partir de la norma escocesa PAN50, se tiene que el rango de velocidad de partícula en explosiones aisladas, definido por esta norma debe ser de entre 6 mm/s y 12 mm/s; dado que las velocidades de partícula obtenidas a partir de los modelos de escalamiento arrojan datos muy por debajo de lo esperado, no es posible hacer uso de esta norma en este sitio.

Sabiendo que el rango de frecuencias a partir del cual se generaron las curvas de atenuación mediante el modelo geofísico, va de 6 a 24 Hz. se pretende ahora analizar los resultados a través de la norma alemana DIN 4150.

Las tablas A.7.4 y A.7.5 (Anexo 3), que presentan los valores recomendados de frecuencia y velocidad máxima, nos permite catalogar este sitio, por medio de la frecuencia fundamental, como nivel 1, donde se permitiría la edificación de construcciones industriales, oficinas y similares.

El valor mínimo de velocidad de partícula recomendado es de 4 mm/s, por lo que los valores obtenidos mediante la ley de escalamiento cúbico en este sitio, están muy por debajo del mismo, lo cual debe implicar que no se corre riesgo alguno al edificar las estructuras mencionadas.

Análisis de resultados, Sitio 2

En el sitio 2, se midieron las distancias permisibles con los mismos valores de velocidades máximas; 4, 8 y 30mm/s, obteniéndose 4.24m como mínima distancia y 32.36m como máxima. Para llevar a cabo el análisis a través de las normas internacionales, se elegirá el valor más chico, a fin de abarcar el fenómeno en su máxima expresión, aumentando los niveles de seguridad de la predicción.

Se analizará primeramente la norma española, tomando en cuenta un valor de velocidad de partícula de 4mm/s a 32.36m de distancia a la fuente, y el valor de frecuencia fundamental $\omega_0 \approx 25.13\text{Hz}$, en un rango de frecuencias de 0 a 50 Hz, mismo que fue elegido al generar las curvas de atenuación mediante el método geofísico.

Según la norma española, dadas las características de velocidad de partícula y frecuencia obtenidas, en este sitio es posible llevar a cabo la edificación de Estructuras de valor arqueológico, arquitectónico o histórico que presenten una especial sensibilidad a las vibraciones por ellas mismas o por elementos que pudieran contener, ya que se cae en la clasificación del Grupo III. (figura A.7.1)

Es recomendable, al igual que en el sitio 1, llevar a cabo el estudio preliminar de vibraciones, de acuerdo a la misma norma.

Respecto a la norma escocesa, en este caso se tiene que la velocidad de partícula sigue estando muy por debajo de los parámetros establecidos por la misma, para llegar a causar si quiera, daño cosmético a las estructuras.

Y por último, la norma alemana clasifica, mediante la frecuencia fundamental, esta zona como apta para la construcción de edificaciones industriales y oficinas.

Análisis de resultados, Sitio 3

El máximo valor de velocidad de partícula obtenido en este sitio fue de 4mm/s, esto a 37.52m de la fuente. Haciendo el mismo ejercicio de análisis llevado a cabo en los sitios anteriores, tomando en cuenta una frecuencia fundamental de $\omega_0 \approx 25.13\text{Hz}$, en una banda de frecuencias de entre 7 y 44 Hz, puesto que a partir de estas se trabajaron los datos que arrojaron las curvas de atenuación en el subtema 4.2; se tiene lo siguiente:

La norma española clasifica este sitio nuevamente dentro del grupo III, por lo que es posible llevar a cabo la edificación de estructuras que presenten una especial sensibilidad a las vibraciones.

Las normas escocesas y alemana, repiten el mismo patrón de comportamiento observado en los sitios 1 y 2.

Siempre que se quiera tener un modelado adecuado del comportamiento de las vibraciones, en determinada zona, será necesario hacer el análisis tomando en cuenta tanto a la

velocidad pico de partícula, como la frecuencia fundamental, de otro modo se pueden cometer errores en predicciones, ya que cada uno de los parámetros, por sí solos no describen por completo el comportamiento del terreno.

Se puede concluir del análisis anterior, que los tres sitios presentan características muy similares entre sí, como era de esperarse, por estar ubicados dentro de una misma región geológica.

Distancias permisibles

Los modelos de propagación obtenidos a través del método ingenieril, presentaron variaciones poco significativas de un sitio a otro; lo mismo que las curvas de atenuación obtenidas a partir del método geofísico, cuya mayor variación se dio en las amplificaciones observadas en el sitio 1, que como ya se vio en el subtema 4.3, no parecen estar ligadas a los efectos de sitio observados en algunas de las estaciones que registraron vibración ambiental, sino más bien, a efectos muy locales de la capa de suelo donde fue ubicada la línea de acelerómetros.

Dowding (1985) concluyó que las estructuras responden en modo diferente, al ser sometidas a vibraciones idénticas en todos los aspectos, pero diferentes en la frecuencia principal, descubriendo que las bajas frecuencias tienen mayor probabilidad de dañar a las estructuras, que las altas (v. gr.. Una estructura residencial responderá menos a un movimiento de terreno de 12mm/s a una frecuencia principal de 80Hz que a una frecuencia principal de 10Hz, por consiguiente, el movimiento a 80Hz tiene menos probabilidad de fisurar la estructura que el movimiento a 10Hz).

Aunado a lo anterior, las bajas frecuencias pueden llegar a coincidir con la frecuencia natural de vibración de las estructuras; de suceder esto, el movimiento se amplifica y las deformaciones son mayores.

Dado que la frecuencia fundamental en los tres sitios tiene un valor promedio de ($\omega_0 \approx 25$ Hz) es posible tener poca probabilidad de que coincida con la frecuencia natural de vibrar de estructuras, por lo que se cuenta con condiciones adecuadas para edificaciones, según las clasificaciones comentadas para las normas española y alemana.

La tabla 5.2 muestra las distancias permisibles obtenidas en los tres sitios, por medio del método ingenieril, para una velocidad máxima de partícula a la cual, según la norma alemana, sea posible llevar a cabo la edificación de estructuras clasificadas en el grupo III:

Tabla 5.2 distancias máximas permisibles. Método ingenieril

| SITIO | DISTANCIA (m) | V _{max} DE PARTÍCULA (mm/s) |
|-------|---------------|--------------------------------------|
| 1 | 3.57 | 4 |
| 2 | 32.36 | 4 |
| 3 | 37.52 | 4 |

Se observa en la tabla 5.2, que para una velocidad de partícula muy similar, se tienen distancias permisibles distintas una de otra para los tres sitios, siendo el sitio 1 el que tendría la mínima distancia permisible a 3.57m, dicho valor es demasiado pequeño, por lo que puede ser que los modelos obtenidos en este sitio no arrojen datos reales de distancias permisibles.

Es posible que sea necesario llevar a cabo más explosiones en el sitio 1 para modelar adecuadamente el fenómeno de atenuación y de esta manera, obtener distancias permisibles reales, así mismo sería recomendable llevar a cabo un estudio completo de vibración ambiental, ya que según se observó en las curvas de atenuación obtenidas con el método ingenieril, es el sitio que mayormente presenta efecto de sitio.

En cuanto a las distancias permisibles obtenidas para los sitios 2 y 3, se tienen valores un poco más elevados, que pudieran estar cerca de la realidad, dada la geología del sitio.

Ahora bien, la tabla 5.3 muestra las distancias permisibles obtenidas por medio del método geofísico, para una frecuencia fundamental de vibrar de 25Hz.

Tabla 5.3 distancias máximas permisibles. Método geofísico

| SITIO | DISTANCIA (m) |
|-------|---------------|
| 1 | 73 |
| 2 | 77 |
| 3 | 94 |

Para $\omega_0 \approx 25$ Hz

Se observa en la tabla 5.3 que las distancias permisibles obtenidas mediante las curvas de atenuación que arroja el método geofísico, son hasta 3 veces mayores que las obtenidas mediante la ley de escalamiento cúbico, siendo el sitio 1, el que presenta la distancia más corta entre la fuente generadora de vibración y el peligro de daño a estructuras.

Las tablas 5.2 y 5.3 en conjunto, nos hablan de la diferencia de distancias permisibles entre ambos métodos. La única similitud entre los resultados, es que para ambos métodos en los tres sitios, se observa un orden ascendente en el valor de la distancia permitida para la generación de explosiones, lo cual pudiera significar que los resultados son acertados y que es posible manejar rangos de distancias permisibles, mediante la combinación de lo obtenido a partir de ambos métodos. En tal caso, sería necesario especificar cuál es el problema a abordar en cada zona, es decir, si se requiere controlar la distancia de las explosiones con el objetivo de evitar daños a estructuras ya edificadas; qué clase de materiales componen dicha estructura, etc¹⁵.

Una vez planteado el problema, se procedería a llevar a cabo el análisis de atenuación, ya sea por medio de uno o ambos métodos para la determinación de distancias permisibles. El mayor inconveniente que presenta el método ingenieril hasta aquí, es que a mayor número

¹⁵ en este sentido es útil clasificar las estructuras con ayuda de las normas internacionales

de datos recopilados, mayor precisión; en ocasiones esto puede ser impráctico, si no se cuenta con un buen número de instrumentos de medición, pues sería necesario hacer repetidas explosiones, lo cual, a la larga lejos de beneficiar perjudicaría al medio y los habitantes.

5.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE CADA MÉTODO

El análisis del método ingenieril, basado en relaciones empíricas, se lleva a cabo en el dominio del tiempo. Los registros de aceleración de puntos específicos, son llevados a velocidades de partícula, las cuales son graficadas, utilizando valores de resultante de velocidad máxima (V_{max}), para cada punto de distancia x , escalada con la carga w .

La estimación de leyes de atenuación conlleva gran incertidumbre, ya que a menudo los datos que se ajustan a una determinada ley presentan una gran dispersión, pudiendo estimarse sólo atenuaciones promedio, que serán más precisas para una cierta región cuanto mayor sea la muestra de datos empleada.

Por ello, es importante no extrapolar atenuaciones entre diferentes zonas e introducir en el estudio leyes de atenuación regionales, formuladas con datos propios de la zona en cuestión; o bien si esos datos son escasos, emplear leyes de otras zonas sólo con análogas características geológicas.

La extrapolación indiscriminada de leyes de atenuación, más allá de su rango de validez o de la zona fuente de los datos, puede conducir a errores muy serios en la predicción del comportamiento de atenuación.

En este trabajo se generaron modelos de atenuación para los datos de campo obtenidos en la zona de estudio, es por ello que dichos modelos representa únicamente esa zona, pues los datos obtenidos dependen de las características geológicas en la misma.

El método elegido en este caso fue la ley de escalamiento cúbico, pues es posible generarlo a partir de datos obtenidos en campo, tan sencillos como velocidades pico y la distancia escalada de las estaciones de registro a la fuente, dicho escalamiento involucra también la carga explosiva utilizada. El manejo en escala logarítmica del mismo, permite tener una mejor visión de los resultados graficados facilitando la interpretación.

El segundo método utilizado, propuesto por Cárdenas et al, (1993, 1994a, 1994b) puede aplicarse con los mismos datos de entrada utilizados en el método ingenieril, sólo que en éste caso se trabaja en el dominio de la frecuencia.

Tanto el método de escalamiento cúbico en el dominio del tiempo, como el método de regresiones independientes de Cárdenas et al (1993, 1994a, 1994b) arrojan gráficas de atenuación vs distancia que nos permiten observar claramente el decremento de atenuación, sin embargo, las rectas generadas por la ley de escalamiento cúbico no permiten detectar posibles amplificaciones, como las observadas en las curvas de atenuación generadas por el método geofísico.

El criterio para decidir cual método utilizar, depende del alcance del proyecto, ya que éste último sistema puede ser utilizado a nivel regional.

Mientras que en el método ingenieril se trabaja con velocidades de partícula, indistintamente a la onda que las genera, en el método geofísico es posible definir el tipo de onda que se desee trabajar, lo que produce ventajas en caso de no tener registros claros de algún tipo de onda, siempre es posible utilizar el registro más óptimo.

Por otro lado, éste modelo involucra el tipo de material a través del cual se propaga la vibración, mientras que en el método ingenieril, es necesario llevar a cabo ajustes de acuerdo a la geología, pues fue diseñado a base de pruebas, y no se cuenta todavía con un modelo preciso, para cierto tipo de material.

Es posible también en el modelo geofísico, definir un rango de frecuencias, lo cual nos permite tener una banda de estudio definida, desechando los datos que no se necesitan y poner especial atención, únicamente en el área de interés, de acuerdo a las necesidades del proyecto.

En general, los datos de entrada utilizados para ambos métodos son los mismos, lo que cambia es el dominio en el que se manejan los mismos:

- En el método de escalamiento cúbico la entrada de campo es distancias vs datos de velocidad máxima de partícula, en el dominio del tiempo. (figura 5.3)

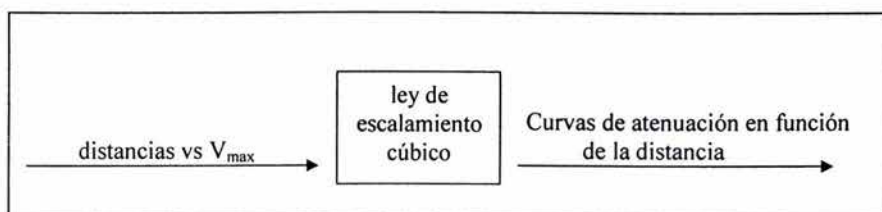


Figura 5.3 ley de escalamiento cúbico en el dominio del tiempo

- En el método geofísico Cárdenas et al (1993, 1994a, 1994b) la entrada de campo es distancias vs amplitudes máximas de velocidades en el dominio de la frecuencia. (figura 5.4)

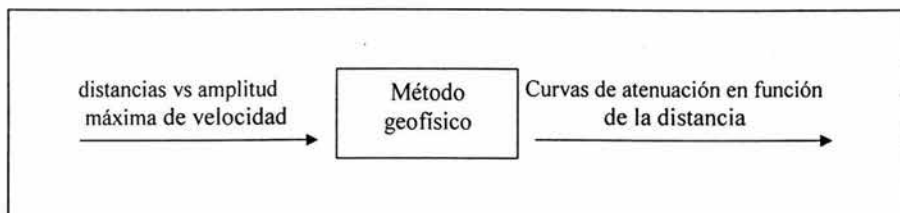


Figura 5.4 Método geofísico. Cárdenas et al (1993, 1994a, 1994b) en el dominio de la frecuencia

El método geofísico involucra un paso más en la obtención de las curvas, puesto que es necesario aplicar a los datos de campo el análisis de Fourier, de tal manera que podamos obtener las amplitudes máximas de velocidad a utilizar como datos de entrada.

Cuando la predicción de atenuación se realiza teniendo en cuenta solo los aspectos anteriores; fuente y propagación, el movimiento queda caracterizado en roca o suelo duro, sin que intervengan efectos locales, pero cuando el movimiento se produce en otro tipo de emplazamientos, (v. gr. suelos con espesor variable de sedimentos) o en ciertas irregularidades topográficas, es necesario tener en cuenta la influencia de las condiciones locales (esencialmente geología superficial y topografía) como tercer factor integrante del movimiento.

Tal fue el caso del presente trabajo, cuya recopilación de datos se dio en sitios cuya geología involucra condiciones donde fue necesario incluir el estudio de vibración ambiental, de tal manera que se pudiera entender mejor el comportamiento de atenuación del subsuelo y los resultados obtenidos.

La norma española UNE 22-381-93 (Anexo 3), establece el procedimiento a seguir, para determinar específicamente los casos en que sea necesario realizar tal estudio.

La amplificación local del suelo no afecta igual a las diferentes amplitudes del movimiento, encontrándose factores de amplificación variables para las distintas frecuencias. Los suelos blandos presentan baja frecuencia propia, y tienden a amplificar más las frecuencias de este orden, filtrando en cambio las altas frecuencias del movimiento.

Por ello, los factores de amplificación de estos suelos son mayores para aceleraciones espectrales de baja frecuencia o para el desplazamiento y la velocidad pico, de menor contenido frecuencial que la aceleración pico.

Con base en lo anterior, es necesario complementar, en algunos casos, las conclusiones del estudio de atenuación de cierta zona, con otro estudio que nos permita caracterizar el efecto de sitio en la zona, el cual puede llevarse a cabo utilizando la técnica de cocientes espectrales de los espectros de amplitud de Fourier de los componentes horizontales, entre el componente vertical (Lermo y Chávez García, 1993, 1994) por medio de un levantamiento de registros de vibración ambiental que permita evaluar los periodos dominantes del suelo y las amplificaciones relativas del mismo.

En cuanto a los parámetros que caracterizan la vibración y que son los más utilizados, (subtema 5.1) la velocidad máxima de partícula resulta fácil de encontrar, por medio de la resultante de sus tres componentes de movimiento y los criterios para su selección son pocos, mientras que para calcular la frecuencia existen varios métodos que pueden ser utilizados, como se mencionó en el subtema 1.4 y los criterios para esto, todavía no están bien unificados.

En cuanto a la utilización de normas internacionales para la caracterización de la zona de estudio, ambos métodos se encuentran bien representados en las mismas, por medio de sus parámetros de velocidad máxima de partícula y frecuencia fundamental, y como se vio en

el subtema 5.1, es conveniente trabajar con los dos parámetros en conjunto si se buscan predicciones de comportamiento del suelo más acertadas.

Una desventaja importante que presenta el método ingenieril, es que involucra dentro de sus variables a la carga explosiva utilizada, por lo que, en caso de que no se cuente con una tecnología de voladura apropiada, o con un mal acoplamiento de la carga al pozo desde donde se detona, las vibraciones generadas y transmitidas pueden ser modificadas por esto, influyendo a su vez, en el tipo de resultados registrados.

Este problema no se presenta en el método geofísico, puesto que en el mismo, el efecto de la fuente es eliminado.

Las curvas de atenuación generadas por el método ingenieril, representan la resultante de velocidad máxima de partícula, por lo que en una sola curva se tiene la posibilidad de analizar el decaimiento en sus tres componentes, mientras que el método geofísico genera una curva de atenuación, para cada una de las componentes de registro. Esto en la práctica puede generar dificultades en la interpretación del fenómeno.

5.3 RECOMENDACIONES

Todo trabajo realizado siempre puede generar experiencias en la práctica, a través de las cuales es posible proponer ciertas recomendaciones, para tratar de omitir al máximo los factores causantes de error para que posteriormente no se vuelvan a cometer.

En este trabajo se proponen las siguientes observaciones:

Sitios de medición

Conviene en primera instancia identificar el sitio de medición. Las normas internacionales de manejo de vibración establecen lo siguiente:

- Representativos: Lugar en donde las condiciones geológicas (como eventuales modificadores de la vibración) son las más comunes.
- Ubicación: El sitio más cercano a la fuente de vibración donde este ubicada una edificación
- Importancia: Lugar donde se encuentre un edificación de interés, por ejemplo una edificación histórica.

Puede darse el caso en que la zona de estudio no presenta ninguna edificación de interés, sin embargo es necesario llevar a cabo esta clase de estudios para caracterizar el comportamiento del terreno al ser sometido a vibraciones inducidas.

Equipo de medición

La norma Suiza SN 640 312 (1992) establece que el equipo de medición (sensores y amplificadores de medición) debe garantizar un rango dentro de los 5 - 150 Hz, así como almacenamiento o graficación de los valores del vector de velocidad de vibración y sus tres componentes en función del tiempo, además de la determinación de la frecuencia dominante.

El buen funcionamiento del equipo de medición debe ser verificado periódicamente. La calibración del equipo debe poder ser objeto de verificación posterior. En casos especiales se debe calibrar todo el sistema de medición en sitio antes y después de cada campaña de medición.

Método ingenieril

A partir de las especificaciones establecidas por la norma española UNE 22-381-93 (Anexo 3), llevar a cabo un análisis previo en la zona de estudio, saber con anticipación qué clase de estudio será requerido (proyecto tipo de vibraciones, medición de control de vibraciones ó estudio preliminar de vibraciones).

Una vez sabiendo a qué tipo de terreno estamos a punto de entrar, y con base en los estudios previos realizados, llevar a cabo la planeación de las campañas de obtención de datos. Los mismos estudios previos, nos darán una idea de la frecuencia a la cual deben ser realizados los eventos, de tal suerte que sea posible recopilar la mayor cantidad de datos posibles, pues en la medida de que se cuente con un mayor número de mediciones, los modelos de propagación serán más precisos.

La norma escocesa PAN 50, especifica que para determinar el periodo de tiempo en que se deben realizar mediciones, es necesario considerar con anticipación la frecuencia con que se llevaran a cabo las explosiones, con el fin de que un número representativo de las mismas pueda ser valorado.

Así mismo, menciona que es necesario considerar que el periodo de tiempo sea representativo de cualquier variación del sitio en la ubicación de las explosiones ó el diseño que se utiliza.

La misma norma dice que el número de explosiones consideradas debe ser idealmente de 100 ó más, si se busca evaluar el cumplimiento con tal estándar, con una muy baja probabilidad de error, sin embargo, en la práctica puede ser poco viable extender el periodo de observación a más de doce meses antes de que la valoración pueda ser emprendida, cuando el número de eventos es realmente pequeño, por lo que un periodo de tiempo mínimo de tres meses puede ser considerado suficientemente representativo.

Método geofísico

En gran parte, los resultados generados por este método dependen de la adecuada elección de tipo de análisis por medio del cual se estiman las frecuencias, se recomienda tomar en cuenta lo siguiente, al ser seleccionado:

- Debe ser un tipo de análisis que estime la frecuencia en un punto determinado de la señal con una buena aproximación.
- Debe cumplir con los procedimientos utilizados en la elaboración de las normas internacionales, que permitirán la posterior evaluación de resultados
- No deben generar distorsión en la parte no estacionaria de la señal

En este trabajo se utilizó el análisis de Fourier para dicho fin, sin embargo tal técnica presenta la limitante de caracterizar a las señales mediante un promedio en la ventana de análisis, por lo que no permite analizar la variación temporal de frecuencias.

Además, el análisis de Fourier aplica siempre y cuando el objeto de estudio sea un fenómeno periódico, estacionario e invariante en el tiempo, por lo que es necesario llevar a cabo procesos de correlación, antes de manejar a la señal como tal, en la búsqueda de las frecuencias. Esto en la práctica puede representar una desventaja de tiempo y falta de precisión en el modelado del fenómeno de atenuación.

Debido a las deficiencias y limitaciones del análisis mencionado, se recomienda probar con nuevas técnicas para el cálculo de las frecuencias; como los filtros variantes de frecuencia (FVF) y el análisis de señal compleja.

La técnica de filtros variantes en frecuencia (FVF), aísla las componentes de vibración dentro de bandas frecuenciales angostas, para medir en ellas valores máximos de velocidad y estimar un espectro de amplitudes máximas. Tal técnica es utilizada con frecuencia en análisis de amplitudes de ondas superficiales (Herman, 1973; Russell et al, 1988)

El inconveniente que presenta tal método es el de cambiar la no transitoriedad de la señal. Por otro lado, la medición de máximos se lleva a cabo solo sobre una banda angosta de frecuencias, pero el máximo de la señal puede deberse a una suma de contribuciones de varias frecuencias.

El método de análisis de señal compleja es una derivación de la transformada de Fourier análoga, en el cual se realiza una separación del contenido de fase y amplitud de la señal. A partir de esa información es posible estimar la frecuencia instantánea en el espectro de frecuencias (Barnes, 1993b, 1998)

Este método provee información detallada del parámetro frecuencia; la no transitoriedad de la señal no es eliminada en esta clase de análisis. El método de análisis de señal compleja es muy utilizado en el área de ingeniería electrónica, y suele ser debatido en revistas técnicas como Transactions on signal processing y Signal processing letters, de la IEEE (Institute of electrical and electronics Engineers)

Todas las técnicas de estimación de frecuencias presentan ciertas limitaciones, por lo que la aplicación de varias técnicas a la vez podría ser una buena opción para mejorar la precisión con la que se determinan las frecuencias que serán introducidas en el método ingenieril, mediante la comparación de resultados en las mismas, podrían ser elegidos los valores de frecuencia más aptos para la clase de estudio requerido.

Reducción del nivel de vibración en campo

Diversos autores hacen recomendaciones de toda índole con el objetivo de reducir los niveles de vibración producidos por explosiones (Dowding, 2001; Persson et al, 1994; USACE, 1989 y OCE, 1972). Se hará mención de manera breve de los aspectos más relevantes a ser tomados en cuenta, en la búsqueda de tal objetivo.

En principio es necesario tomar en cuenta que las vibraciones dependen de la cooperación entre cargas, es decir, la adición constructiva y destructiva de las ondas generadas por las cargas, así como de las condiciones de confinamiento, las características geológicas y geotécnicas de la zona donde se detona el explosivo y la distancia de la fuente al sitio de interés.

En general, la reducción en los niveles de vibración se logra adaptando los métodos patrones de barrenos, esquemas de carga y de ignición (como los especificados en normas internacionales), de la mejor manera posible, a cada zona de estudio.

Los métodos más comúnmente utilizados para la reducción de vibraciones se basan en la reducción de la cantidad de explosivo por unidad de tiempo y en la adición destructiva de las ondas, conocida como cooperación entre cargas, la cual se logra por medio de la adaptación de los patrones de ignición con el fin de que las cargas estén repartidas en un intervalo mayor de tiempo. La reducción del número de barrenos y su diámetro es otra forma de lograr el objetivo de reducir niveles de vibración.

El desacople de las cargas logra también reducir la vibración; consiste en la utilización de diámetros menores de explosivos que el diámetro del pozo donde se deposita la carga.

CONCLUSIONES

- Los daños causados por vibración inducida, han sido modelados por distintos autores durante las últimas décadas, por lo que se cuenta con una amplia bibliografía y distintos criterios para ser clasificados a través de normas internacionales.
- Con base en los estudios llevados a cabo por dichos autores y los establecidos por normas internacionales, se cuenta con una amplia gama de parámetros comparativos para los resultados obtenidos, sin embargo se necesita tener bien definido el tipo de análisis que se requiere en la zona de interés, a fin de evitar pérdida de tiempo y recursos al llevar a cabo estudios innecesarios o que aporten información distinta a la requerida, así como la adecuada elección de la norma o parámetro con que serán comparados los resultados.
- Para determinar el tipo de estudio requerido en cada zona, se cuenta con herramientas como el procedimiento presentado en la norma española UNE 22-381-93.
- Las normas internacionales de manejo de vibraciones, trabajan en general con dos parámetros característicos de las mismas: velocidad máxima de partícula y frecuencia fundamental de vibrar del suelo; dichos parámetros son los mismos que se obtuvieron a partir de cada uno de los métodos descritos en este trabajo.
- En un principio, los estudios de control de vibración se llevaban a cabo únicamente mediante la utilización de fórmulas matemáticas y la aplicación de reglas establecidas empíricamente, en la actualidad tales técnicas están siendo reemplazadas por métodos más sofisticados que involucran el uso de la tecnología computacional, como el análisis de Fourier, sin embargo, estas nuevas técnicas han sido utilizadas sin tomar en cuenta sus limitaciones, lo cual puede conducir a interpretaciones físicas erróneas.
- La comparación de dos técnicas en este trabajo, una en el dominio del tiempo y otra en el de las frecuencias, ha permitido modelar el comportamiento de atenuación a partir de los mismos datos adquiridos en campo, para tres zonas distintas, cuya geología regional es semejante, observando lo siguiente;
- Los modelos obtenidos en los tres sitios generaron rangos de velocidad máxima de partícula, que al ser comparados con normas internacionales, parecen estar por debajo de aquellos que pudieran causar daños a estructuras delicadas como edificaciones arqueológicas.
- Las curvas de atenuación obtenidas mediante el método geofísico en los tres sitios no muestran diferencias importantes en el comportamiento de distintas frecuencias, es decir, en general, las altas y las bajas frecuencias se atenúan de manera similar.
- Se observa el efecto de sitio en las curvas de atenuación generadas por los datos de campo en el sitio 1, mediante ampliaciones perceptibles en sus tres componentes de

movimiento. Los sitios 1 y 2 no presentan ampliaciones en las curvas de atenuación obtenidas mediante el método ingenieril, a pesar de que el estudio de microtemores en ambos sitios arrojó algunos resultados positivos al respecto.

- Las distancias permisibles obtenidas mediante el método ingenieril, variaron ampliamente en cada zona estudiada, siendo de 3.57m, 32.36m y 37.52m, respectivamente en los sitios 1, 2 y 3. Dichas distancias fueron medidas en aquellos puntos donde la velocidad máxima de partícula alcanzó valores apenas por debajo de los 4mm/s, que según la norma alemana DIN 4150, es la velocidad de partícula mínima permisible, para evitar daños a estructuras.
- La misma norma alemana establece un rango de frecuencias fundamentales permisibles para evitar daños en estructuras, en tal caso, los resultados arrojados por el método geofísico indican que, para una frecuencia fundamental de vibrar de 25 Hz, el terreno de los tres sitios es apto para la edificación de oficinas y estructuras similares con diseños robustos, a partir de las distancias permisibles obtenidas en las curvas; 73 m, 77 m y 94 m respectivamente para los sitios 1, 2 y 3.
- Las distancias permisibles obtenidas a partir de ambos métodos son distintas entre sí, siendo menores las determinadas mediante la ley de escalamiento cúbico.
- Al llevar a cabo la caracterización del comportamiento de atenuación en cualquier sitio, es recomendable llevar a cabo estudios, que definan los dos parámetros principales de la vibración (velocidad máxima de partícula y frecuencia fundamental), a fin de contar con las herramientas necesarias en la interpretación de resultados.
- El método ingenieril no involucra a la frecuencia como variable, por lo que el único parámetro que está tomando en cuenta es la velocidad máxima de partícula, lo dicho se traduce en que el cálculo de distancias permisibles a partir de este método arroja resultados incompletos.
- El método geofísico involucra tanto a la velocidad de partícula (mediante los registros de aceleración), como a las frecuencias, por lo que los resultados obtenidos a partir de éste pueden ser fácilmente analizados a través de las normas internacionales. Además de generar datos más precisos de distancias permisibles, permite una mejor caracterización de la geología del terreno, puesto que involucra el tipo de onda analizada en la vibración.
- Es posible conocer el efecto de sitio que pudiese existir en la zona de estudio a partir del método geofísico, tanto en los espectros de Fourier, como en las curvas de atenuación generadas. El método ingenieril no ayuda a conocer el fenómeno mencionado.
- Mientras que el método geofísico trabaja con curvas de atenuación generadas para cada una de las componentes de movimiento, el método ingenieril trabaja con una resultante

de las mismas, lo cual podría restar precisión al modelado del fenómeno, además de limitar la interpretación física del mismo.

- El método ingenieril no debe ser analizado por sí sólo ya que podría generar interpretaciones erróneas o incompletas. El método geofísico podría ser utilizado para la determinación de distancias permisibles, de acuerdo a los parámetros que establecen las normas internacionales.
- No se cuenta aún con normas mexicanas para la estimación de distancias permisibles, por medio de los parámetros utilizados en normas internacionales.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Adams, W.M. y Swift, L.M. The effect of shotpoint medium on seismic coupling. *Geophysics*, vol. 26, No. 6. 1961.
- Aki, K. et al. *Quantitative Seismology – Theory and Methods. W. H. Freeman*, vol 1 San Francisco, 1980
- Barnes, A.E. When the concepts of spectral frequency and instantaneous frequency converge. *The Leading Edge*, 1993b
- Barnes, A. E. The complex seismic trace made simple. *The Leading Edge*, 1998
- Benjumea, J.M. Vibraciones causadas por actividad humana: caracterización, efectos y manejo en la Ingeniería Civil (Tesis). Universidad del Valle, Facultad de Ingenierías, Escuela de Ingeniería Civil y Geomática Santiago de Cali. 2003
- Bollinger, G.A. *Blast Vibration Analysis*. Illinois University Press, 1980
- Brown, F.W. Determinations of basic performance properties of blasting explosives. *Quarly*, Colorado School of Mines, 1956
- Cárdenas et al. Leyes de atenuación sísmica perpendicularmente a la costa del Pacífico, implicaciones para el movimiento fuerte observado en el Valle de México. Instituto de Ingeniería. UNAM. 1994a
- Cárdenas et al. Microzonificación sísmica de la zona urbana de la ciudad de Puebla. Instituto de Ingeniería. UNAM. 1994b
- Cárdenas et al. Estudio para determinar el posible impacto de trabajos de exploración sísmica...Informe de acceso restringido. Facultad de Ingeniería. UNAM. 2005 y 2006
- Chapot, P. Estudio de vibraciones provocadas por explosiones en rocas masivas. Reporte de investigación, 1981
- Chapra, S.C. et al. *Métodos Numéricos para Ingenieros*. McGraw Hill, México, 3era edición, 1999
- Chopra, A.L. *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Prentice Hall, New Jersey, 2nd edition, 2001
- Claerbout, J. *Fundamentals of geophysical data processing*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1976
- Cording, E.J. et al. *Method for geotechnical observations and instrumentation in tunneling*. Universidad de Illinois, 1974

- Crandell, F.J. Ground vibrations due to blasting and its effect upon structures. Journal of the Boston Society of Civil Engineers. 1949
- Dowding, C. H. et al. Cracking and construction blasting, Journal of the construction division, proceedings of the American Society of Civil Engineers. 1981
- Dowding, C.H. et al. Dynamic properties of structures subjected to blasting vibrations, Journal of the structural division, proceedings of the American Society of Civil Engineers. 1981
- Dowding, C.H. Blast vibration monitoring and control. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1985
- Dowding, C.H. Construction Vibrations. Prentice Hall, New York, 2da edición, 2001
- Duvall, W.I. et al. review of criteria for estimating damage of residences from blasting vibrations. U.S. Bureau of mines report of investigation 5968. Washington, 1962
- Edwards, A.T. et al. Experimental studies of the effects of blasting on structures. The Engineer 210. 1960
- Fogelson, D.E. Bureau of mines research on vibration from blasting. Revisión especial de la industria mineral. 1971
- Gray R. M. y Davidson, L. D. An Introduction to statistical signal processing. Stanford University, 1999.
- Hedlin, K.J. Seismic Attenuation Problem. University of Calgary, 2004
- Huang, N.E. et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear and non-stationary time series analysis. In Proc. R. Soc. Lond. A. Londres, 1998
- Irland G.A. Study of some seismometers. U.S. Bureau of mines Technical paper, 556 Washington. 1934
- Johnston, D.H et al. Seismic Wave Attenuation. Society of Exploration Geophysicists, United States of America, 1981.
- Joyner, W.B. and Boore D. M. Peak horizontal acceleration and velocity from strong motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake, Bull .Seism. Soc. Am.,71. 1981
- Kim, W.H. y Kisslinger, C.E. Model investigation of explosions in prestressed media. Geophysics, Vol 32. 1967
- Kjartansson, E. Constant Q-Wave propagation and Attenuation. American Geophysical Union. 1979
- Kisslinger, C. E. Mateker, E. J., and McEvelly, T. V. SH waves from explosions in soil: J. Geophysics. Res. 1961

- Kisslinger, C.E. et al. Seismic waves generated by chemical explosions. AF Cambr. Res. Lab, Bedford Mass, report No. AFCRL-63-701, final report. 1963
- Kisslinger, C. E. y Gupta, I. N. Studies of Model Explosions in Press Media explosion-generated dilatational waves in two-dimensional models: *J. Geophysics*. 68. 1963
- Kramer, S.A. Geotechnical earthquake engineering. Prentice Hall, 1996
- Langefors, U. et al. Ground vibrations in blasting. *Water power* 10. 1958
- Langefors, U. et al. The modern technique of rock blasting. Almqvist & Wiksell, Estocolmo, 3a edición. 1978
- Lee, F.W. et al. Earth vibrations caused by quarry blasting. U.S. Bureau of mines report of investigation. Washington, 1936
- Lermo, J. and F.J. Chávez-García. Site effect evaluation using spectral ratios with only one station, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 83. 1993
- Lermo, J. and F.J. Chávez-García. Are microtremors useful in site response evaluation? *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84. 1994
- Midéia, N.F. et al. Desmonte de rocas con explosivos: criterios prácticos para la determinación de cargas por espera y distancias seguras en basalto. *Construcción pesada*. 1978
- Nicholls, H. R. y Hooker, V. E. Comparative studies of explosives in salt. U.S. Bureau of mines report of investigation 6041. Washington, 1962
- Northwood, T.D. et al. Blasting vibrations and building damage. *The engineer* 215. 1963
- Office of the Chief of Engineers OCE. Engineering and design, systematic drilling and blasting for surface excavations. Manual Técnico EM 1110-2-3800, Department of the Army, 1972
- Oppenheim, A.V. et al. Tratamiento de Señales en Tiempo Discreto. Prentice Hall, Madrid, 2da edición, 2000.
- Percival, D.B. et al. Spectral analysis for physical applications –Multitaper and conventional univariate techniques. Cambridge University press. Cambridge, 1993.
- Persson, P. et al, Rock Blasting and Explosives Engineering. CRC Press, New York, 1994
- Picote, J. et al. Spectrum estimation using an analytic signal representation. *Signal Processing*, 1988.
- Rosenberg, A.G. The power spectrum does not tell frequency. *Enviado a Phys. Rev. Lett*, 2002.
- Russell, D. R. Herman, R. B y Hwang, H.J. Application of frequency variable filters to surface wave amplitude analysis. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 78(1), 1988

Sánchez, L.E. Control de vibraciones. Depto de Ing de minas, Escuela Politécnica de la Universidad de San Paulo. Publicado en "Aspectos geológicos de protección ambiental, Vol 1, UNESCO, 1995".

Siskind, D.E. et al. Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting. U.S. Bureau of mines report of investigation 8507. Washington, 1980

Stagg, M.S. et al. Measurement of blast-induced ground vibrations and seismograph calibration. U. S. Bureau of mines report of investigation 8506. Washington, 1980

Stagg, M.S. et al. Effects of repeated blasting on a wood-frame house. U.S. Bureau of mines report of investigation 8896. Washington, 1984

Thoenen, J.R. et al. Seismic effects of quarry blasting. U.S. Bureau of mines, bulletin 442. Washington 1942

Tritsch, J. Vibraciones generadas por explosiones de minas en carreteras y grandes obras. Centro de estudios e investigaciones Charbonnages. Francia 1983

U.S. Army Corps of Engineers USACE. Blasting vibration damage and noise prediction and control. Manual técnico TL 1110-1-142. Department of the Army. 1989

Woods y Jedele. Vibration problems in geotechnical engineering. Gazetas y selig eds. ASCE Special technical pub. 1985

ANEXO 1

PROPAGACIÓN DE ONDAS SÍSMICAS

Dado que las ondas sísmicas se propagan en cuerpos susceptibles a ser deformados, pueden ser representadas como ondas elásticas.

De acuerdo a la teoría de la elasticidad, el comportamiento elástico de los materiales que se suscita en determinada región, puede ser descrito en términos de dos parámetros elásticos; rigidez y compresibilidad, aunque en la práctica ambos parámetros pueden ser determinados a partir del módulo de Young y la relación de Poisson.

Las perturbaciones que se originan en la superficie, o muy cerca de ésta, se propagan en forma de ondas elásticas de compresión, dilatación y transversales, con velocidades que dependen de la naturaleza del terreno, y de las propiedades elásticas del mismo.

En las cercanías de una fuente sísmica, suponiendo un medio homogéneo e isotrópico, se genera una onda esférica que teóricamente propicia trayectorias con direcciones radiales de propagación, alejándose de la fuente. Mientras la trayectoria de una onda se encuentre en un mismo medio, sus características y forma no varían sustancialmente, y puede representarse elásticamente por una onda compresional y dos ondas tangenciales, por medio de las ecuaciones de onda que corresponden a las características del medio. Si el medio no es homogéneo e isotrópico, o estratificado, y se presentan variaciones en sus propiedades elásticas, las ondas sufrirán modificaciones que dependerán del ángulo de inclinación de la trayectoria con respecto a la estratificación y a la distribución de las propiedades elásticas.

En caso de que las ondas sísmicas se propaguen en un medio homogéneo, la función potencial de onda puede relacionarse con la dilatación y la rotación, identificándose dos tipos de ondas, conocidas como longitudinales (compresionales) y transversales (de cizallamiento) respectivamente. La velocidad de las ondas longitudinales es mayor a la de las transversales, por lo que llegan primero a un punto alejado de la fuente sísmica, por esta razón, las ondas longitudinales son conocidas también como ondas P (primera), y las transversales de distorsión como ondas S (segunda). Ver figuras A.1.1 y A.1.2

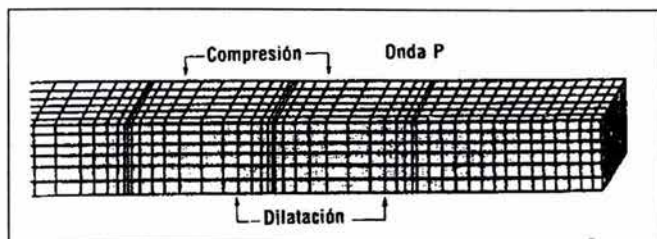


Figura A.1.1 propagación de la onda P

Las ondas P y S se identificaron en el análisis de las ondas que se presentan en un sismo, y corresponden a las que se propagan en el interior de la Tierra, por lo que también se conocen como ondas de cuerpo.

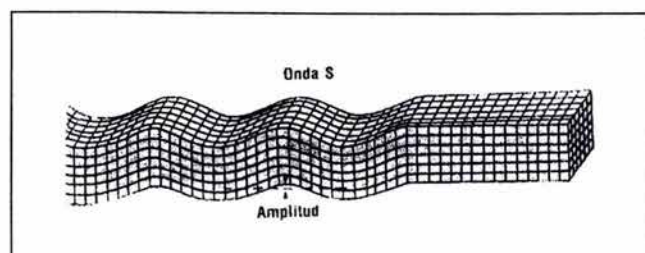


Figura A.1.2 propagación de la onda S

Haciendo coincidir el eje X de un sistema cartesiano con la trayectoria de propagación, se considera que las ondas P, se mueven en la dirección X, mientras que las ondas S se mueven en el plano YZ, perpendicular a la dirección X de propagación. Cuando las ondas S se propagan muy cerca de la superficie, se consideran dos componentes una paralela a la superficie (SH) y otra perpendicular (SV).

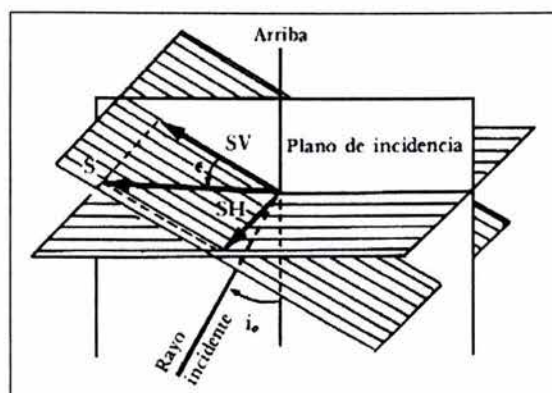


Figura A.1.3 la onda S y sus componentes SV y SH

En caso de que las ondas de cuerpo se propaguen en medios de distintas propiedades elásticas, los movimientos ondulatorios se modifican en su comportamiento dependiendo de la distribución de las propiedades elásticas, conocidas como condiciones de frontera. En las proximidades de una interfase, pueden presentarse diversas aceleraciones y desplazamientos que influyen en la forma y características de las ondas, el comportamiento de estas, no es igual si se propagan paralelamente a la interfase, si inciden perpendicularmente o inciden en una dirección intermedia.

Dentro de los diversos casos de condiciones de frontera, se tienen las ondas que se propagan paralelamente a una interfase, en la que uno de los medios es el aire, dicha condición se presenta particularmente en la superficie de la Tierra, y da origen a las ondas superficiales, que por sus características son de gran interés en la sismología, y son las causantes de los daños y manifestaciones perceptibles durante los sismos.

Las ondas superficiales más características son las ondas Rayleigh, Love y Stoneley, éstas últimas se presentan en interfases sólido-sólido cercanas a la superficie. En el caso de una interfase sólido-aire, la ecuación de onda no corresponde exactamente a un comportamiento elástico, puesto que en el aire no se producen deformaciones elásticas al no existir una propagación de los esfuerzos, aunque en la práctica se observa que pueden generarse ondas de aire y sonoras.

Rayleigh (1887) encontró que en la superficie libre se producen distorsiones que adquieren un perfil ondulante, polarizado en un plano vertical, que puede ser considerado como una onda senoidal que decrece rápidamente con la profundidad, siendo su velocidad de propagación, menor que la de las ondas de cuerpo que se propagan en un medio sólido. La definición y cuantificación físico-matemática de éste tipo de ondas puede establecerse a partir de las funciones potenciales de los desplazamientos de las partículas de un medio elástico sujeto a esfuerzos, en las cuales se introducen las condiciones de frontera que corresponden a un medio "vacío".

El análisis matemático y la observación experimental de las ondas Rayleigh han permitido establecer varias propiedades que le son características:

- La velocidad de propagación es un porcentaje ligeramente menor que la velocidad de las ondas tangenciales de cuerpo.
- La velocidad de propagación en la superficie es independiente de la frecuencia, debido a que la onda no presenta tendencia a ser dispersiva.
- Las partículas en la superficie libre se mueven en un plano vertical con una trayectoria elíptica, y con un sentido retrógrado.
- La dirección de vibración de la componente horizontal es paralela a la dirección de la propagación.
- Las ondas superficiales se distribuyen sólo en dos dimensiones, y decaen más lentamente con la distancia, que las ondas elásticas de cuerpo.
- Son ondas de baja velocidad, baja frecuencia, y tienen un espectro que no presenta un valor máximo definido, estando constituido por una amplia gama de frecuencias.
- Su amplitud presenta un decaimiento exponencial con la profundidad.
- A cierta profundidad, que depende de la frecuencia natural del medio, el movimiento de la partícula es controlado por la componente vertical SV, conservando su movimiento elíptico, pero girando en el sentido de la propagación.

Cuando se presenta el caso de considerar una capa superficial de cierto espesor, en lugar de analizar tan sólo el límite exterior, se pueden presentar ondas del tipo SH con movimientos transversales paralelos a la superficie del terreno y que pueden alcanzar valores de importancia. Dicho movimiento se observa frecuentemente en los sismos naturales, y

fueron estudiados por Love (1911), de quien tomaron el nombre con el cual se les conoce. Love estableció la factibilidad de dichas ondas, debido a que la densidad y constantes elásticas de las capas externas de la Tierra difieren considerablemente de las que se han determinado para las capas interiores profundas, por lo que pueden presentarse ondas transversales que se propagan por la superficie y que no penetran a las capas interiores.

Las ondas Love producen deformaciones tangenciales en el plano horizontal de la superficie libre, están constituidas básicamente por ondas de cizallamiento, polarizadas horizontalmente en el plano XY, y tanto el desplazamiento de las partículas como su propagación, se presenta exclusivamente en la dirección Y.

En general, las ondas Rayleigh y Love sólo pueden registrarse a grandes distancias, y es de esperarse que se generen y desarrollen con mayor facilidad en focos someros que en focos profundos.

Stoneley estudió el caso particular de las ondas Rayleigh que se propagan en la superficie de separación de dos medios sólidos muy cercanos a la superficie libre, encontrando que estas ondas de interfase presentan sus amplitudes máximas en la cercanía a la frontera entre dos medios, y bajo condiciones muy restringidas, sus características difieren de las ondas Rayleigh comunes. Para que puedan generarse, se requiere que las velocidades de las ondas tangenciales en los dos medios sean prácticamente iguales.

ANEXO 2

ATENUACIÓN DE VIBRACIONES INDUCIDAS

Comportamiento del suelo bajo condiciones de vibración

Antecedentes. Oscilaciones Lineales con 1 Grado de Libertad

Un depósito de suelo puede ser representado, como un sistema que permanece cerca de una posición de equilibrio estable pudiendo realizar, sin embargo, pequeños movimientos u oscilaciones alrededor de esa posición, en respuesta a la aplicación de cargas dinámicas. Una variante sería un sistema cuyo movimiento objetivo sea una trayectoria determinada, admitiendo pequeñas oscilaciones o variaciones acotadas respecto de la misma. En la mayoría de los casos prácticos, estas pequeñas oscilaciones se pueden considerar como lineales. Los casos más simples de oscilaciones, son los de sistemas con 1 grado de libertad. Aunque en la realidad casi todos los casos tienen varios grados de libertad, en numerosas situaciones existe un grado de libertad predominante, pudiéndose despreciar los otros modos de vibración en una primera aproximación.

El Oscilador Armónico Simple. Ecuación de Movimiento

Sea una masa puntual, m , obligada a moverse según una recta fija, sujeta a un punto dado de la misma por medio de un resorte elástico de constante k , sin que existan otras fuerzas aplicadas. Si se denomina x la coordenada de m a lo largo de la recta, el resorte elástico ejerce una fuerza recuperadora, que se opone a la elongación, de valor:

$$F = -k(x - x_n) \quad (\text{A.2.1})$$

Siendo x_n la longitud natural del resorte, para la cual éste quedaría sin tensión. Se observa que la fuerza desarrollada en el resorte depende linealmente de la elongación

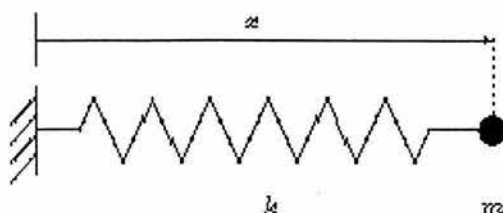


Figura A.2.1 Oscilador armónico simple

Eligiendo el origen de coordenadas en el punto x_0 , la expresión de la fuerza del resorte es:

$$F = -kx \quad (\text{A.2.2})$$

Aplicando el principio de la cantidad de movimiento, obtenemos la ecuación de equilibrio dinámico de este sistema:

$$mx'' + kx = 0 \quad (\text{A.2.3})$$

La ecuación A.2.3 es una ecuación diferencial ordinaria de segundo orden, lineal, homogénea; cuya solución está dada por:

$$x(t) = x_0 \cos \Omega t + \frac{x_0}{\Omega} \text{sen} \Omega t \quad (\text{A.2.4})$$

La ecuación A.2.4 define una onda armónica, cuyo periodo natural de vibrar es:

$$T = \frac{2\pi}{\Omega} \quad (\text{A.2.5})$$

Mientras que la frecuencia natural de vibrar del sistema queda definida como:

$$\Omega = \left(\frac{k}{m} \right)^{1/2} \quad (\text{A.2.6})$$

La constante x_0 es la amplitud de la oscilación (módulo de la elongación máxima del resorte). Se observa que cuanto más rígido sea el resorte o más ligera la masa, mayor será la frecuencia natural de oscilación. Por el contrario, sistemas flexibles y pesados, tendrán frecuencias naturales bajas.

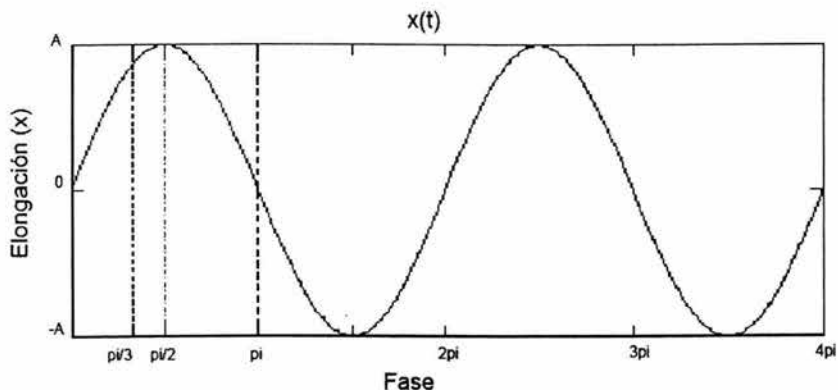


Figura A.2.2 Oscilación armónica, abarcando dos periodos completos del movimiento

Oscilaciones con amortiguamiento. Ecuación del movimiento

Para representar el comportamiento de un depósito de suelo sometido a carga dinámica, se acostumbra utilizar en geotecnia, el modelo viscoelástico mejor conocido como Kelvin-Voigt, dicho modelo es capaz de predecir la atenuación de las ondas, ocasionada por la disipación de la energía elástica.

En el modelo viscoelástico la resistencia a la deformación está dada por la suma de una componente elástica y una viscosa, y se representa gráficamente con un resorte y un amortiguador acoplados en paralelo, como se muestra en la figura A.6. Un amortiguador viscoso ejerce una fuerza de resistencia pasiva, proporcional a la velocidad y en sentido contrario a ésta, como muestra la ecuación A.2.3:

$$F_A = -cx \quad (\text{A.2.7})$$

Donde c es una constante de amortiguamiento viscoso. Se trata de una fuerza necesariamente no conservativa, pues en cualquier trayectoria cerrada, el trabajo realizado por la fuerza de amortiguamiento es esencialmente negativo

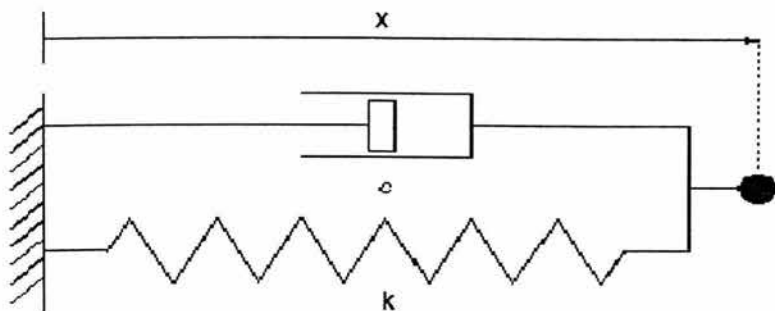


Figura A.2.3 Oscilador con amortiguamiento viscoso

A partir de la ecuación A.2.1 y A.2.7, la fuerza total sobre m es ahora:

$$F = -kx - cx \quad (\text{A.2.8})$$

Para este caso, la ecuación de equilibrio dinámico será:

$$mx'' + cx' + kx = 0 \quad (\text{A.2.9})$$

Siendo esta una ecuación diferencial de segundo orden, lineal, de coeficientes constantes y homogénea, puesto que aún no se agrega carga.

La solución de la ecuación es del mismo tipo que en el caso anterior, es decir, basada en funciones armónicas. Tan sólo es necesario generalizar la expresión de la solución vista en

el caso anterior, ecuación A.2.4, para lo cual se emplea una exponencial del tipo $x(t) = ae^{rt}$. En principio, se permite el manejo de a y r como números complejos, aunque por motivos físicos, debe obtenerse al final un resultado $x(t)$ real.

La ecuación característica es:

$$(mr^2 + cr + k)e^{rt} = 0 \quad (\text{A.2.10})$$

Por lo que:

$$mr^2 + cr + k = 0 \quad (\text{A.2.11})$$

Esta expresión, proporciona los valores que debe tomar r para que exista la solución buscada, esto es:

$$r_{1,2} = \frac{-c \pm \sqrt{c^2 - 4km}}{2m} \quad (\text{A.2.12})$$

Simplificando la ecuación A.2.12:

$$r_{1,2} = \frac{-c}{2m} \pm \sqrt{\frac{c^2 - 4km}{4m^2}} \quad (\text{A.2.13})$$

Si hacemos que:

$$\frac{c}{2m} = \xi\Omega \quad (\text{A.2.14})$$

Donde ξ representa el amortiguamiento del sistema, entonces:

$$r_{1,2} = -\xi\Omega \pm \sqrt{\xi^2\Omega^2 - \Omega^2} \quad (\text{A.2.15})$$

Finalmente:

$$r_{1,2} = -\xi\Omega \pm \Omega \sqrt{\xi^2 - 1} \quad (\text{A.2.16})$$

Según el valor del discriminante $\xi^2 - 1$ en la expresión A.2.16, pueden distinguirse varios tipos de solución:

- Sobreamortiguamiento: $\xi > 1$ por tanto r_1 es diferente a r_2 no se presenta oscilación, entonces la solución a la ecuación A.2.16 será:

$$x = Ae^{r_1 t} + Be^{r_2 t} \quad (\text{A.2.17})$$

- Amortiguamiento crítico: $\zeta=1$ por tanto $r_1=r_2=-\Omega$, entonces la solución a la ecuación A.2.16 será:

$$x = Ae^{-\Omega t} + Bte^{-\Omega t} \quad (\text{A.2.18})$$

- Amortiguamiento subcrítico: $\zeta < 1$ por tanto r_1 es diferente a r_2 , entonces la solución a la ecuación A.2.16 será:

$$x = e^{-\Omega t} (Ae^{i\Omega_0 t} + Be^{-i\Omega_0 t}) \quad (\text{A.2.19})$$

Por lo que la solución del caso subamortiguado puede expresarse de la siguiente manera:

$$x = e^{-\Omega t} (C \operatorname{sen} \Omega_0 t + D \cos \Omega_0 t) \quad (\text{A.2.20})$$

Este último caso de amortiguamiento subcrítico es el que más nos interesa, ya que es el único en que se producen vibraciones.

La expresión A.2.20 representa un movimiento oscilatorio amortiguado de amplitud decreciente, aunque el movimiento es oscilatorio, no sería correcto en rigor llamarlo periódico, ya que cada oscilación es distinta, al disminuir la amplitud.

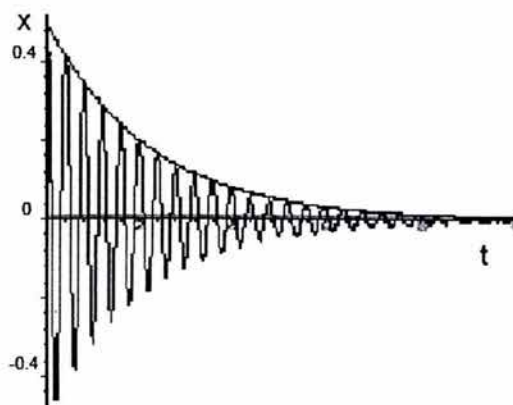


Figura A.2.4 La amplitud en el caso de amortiguamiento subcrítico decrece con el tiempo

Oscilaciones Forzadas. Ecuación del movimiento

En este caso consideramos que sobre la masa m de la figura A.2.3 actúa una fuerza externa $p(t)$, además de las fuerzas internas antes descritas correspondientes al resorte y al amortiguador.

La ecuación A.2.9 queda ahora como:

$$mx'' + cx' + kx = p(t) \quad (\text{A.2.21})$$

Al incluir el término independiente $p(t)$ la ecuación diferencial deja de ser homogénea, lo cual da lugar a una estructura de la solución distinta. Introduciendo las siguientes condiciones iniciales:

$$\begin{aligned} x(0) = 0 &\rightarrow x_0 = 0 \\ x'(0) &= x'_0 \end{aligned}$$

Para el desplazamiento:

$$x_0 = D \quad (\text{A.2.22})$$

Para la velocidad:

$$x'' = e^{-\xi\Omega t} (c\Omega_0 \cos\Omega_0 t - D\Omega_0 \text{sen}\Omega_0 t) - \xi\Omega e^{-\xi\Omega t} (C\text{sen}\Omega_0 t + D \cos\Omega_0 t) \quad (\text{A.2.23})$$

Donde, para $t=0$

$$x''_0 = C\Omega_0 - \xi\Omega D \quad (\text{A.2.24})$$

Y de la ecuación A.2.22

$$C = \frac{x_0 + \xi\Omega x_0}{\Omega_0} \quad (\text{A.2.25})$$

Finalmente la solución general para A.2.21 será:

$$x = e^{-\xi\Omega t} \left[\begin{array}{l} x'_0 + \xi\Omega x_0 \\ \Omega_0 \end{array} \text{sen}\Omega_0 t + x_0 \cos\Omega_0 t \right] \quad (\text{A.2.26})$$

La fuerza externa que mueve al oscilador, en este caso, será el movimiento del suelo. En caso que exista amortiguamiento, la solución a la ecuación A.2.9 (homogénea), al cabo de cierto tiempo tiende a desaparecer.

El intervalo durante el cual no se puede despreciar el término correspondiente a la solución homogénea, siendo significativos ambos sumandos, se llama Régimen transitorio.

El régimen permanente es el que se alcanza cuando el término correspondiente a la solución de la homogénea se amortigua hasta hacerse despreciable, quedando tan sólo la solución particular de la ecuación no homogénea. A.2.21.

Dicho de otra manera, en un movimiento forzado y amortiguado, al cabo de un tiempo el movimiento es siempre el mismo independientemente de las condiciones iniciales.

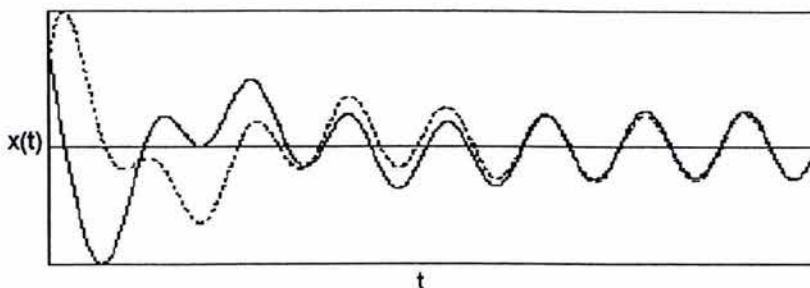


Figura. A.2.5 Movimiento oscilatorio forzado, para dos condiciones iniciales distintas; al cabo de cierto tiempo, el régimen permanente es el mismo.

Análisis de atenuación, por dispersión geométrica y amortiguamiento

La atenuación o decaimiento de vibraciones es producida por dos fenómenos; dispersión geométrica y amortiguamiento. Según estudios de Richard et al (1970), la dispersión geométrica se expresa por medio de una relación entre dos distancias, R_1 y R_2 donde la velocidad principal de partícula u_1 es conocida y u_2 desconocida.

La potencia n está en función del tipo de onda; entonces $n = 1$ para ondas de cuerpo cuya propagación es esférica, excepto en la superficie, donde $n = 2$ y $n = 1/2$ para ondas Rayleigh. (ec A.27)

La potencia n , en cierto sentido, representa el decaimiento de energía por unidad de área, sobre la superficie en la cual, la vibración se propaga.

$$u_2 = u_1 \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^n \quad (\text{A.2.27})$$

Además de la dispersión geométrica, se tiene que, por cada ciclo de movimiento, o longitud de onda λ recorrida, la onda pierde una pequeña cantidad de energía gracias a la fricción al toparse con distintos medios; este ciclo de pérdida de energía, por cada ciclo de deformación es llamado "amortiguamiento del material", y por consiguiente, está en función de las propiedades de deformación del material por el que se propaga la onda.

Dicha relación, ha mostrado ser proporcional al logaritmo de la distancia recorrida:

$$u_2 = u_1 e^{-\alpha(R_2 - R_1)} \quad (\text{A.2.28})$$

Donde α es el Coeficiente de Atenuación, que depende de la frecuencia dominante de la onda y de la rigidez del material.

Combinando las ecuaciones A.2.27 y A.2.28, se tiene que α aumenta para altas frecuencias, tomando como referencia una distancia, y disminuye cuando la onda atraviesa la misma distancia a baja frecuencia.

$$u_2 = u_1 \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{2n} e^{-\alpha(R_2 - R_1)}, \text{ para } n = \frac{1}{2} \quad (\text{A.2.29})$$

Entonces, la atenuación por amortiguamiento es función únicamente de la pérdida de energía por ciclo de deformación, no de la distancia recorrida; esto explica porqué la frecuencia dominante disminuye con la distancia para mismos tipos de onda, las bajas frecuencias recorren menos ciclos de deformación y tienen menos pérdida de energía.

Estudios de Woods y Jedele, 1985 muestran que α también aumenta en suelos y disminuye en roca.

La ecuación A.2.29 puede ser simplificada en una Relación de Atenuación simplificada, con un mejor ajuste lineal log-log de la velocidad y la distancia.

$$u = KR^{-m} \quad (\text{A.2.30})$$

Donde; K es la intersección de la distancia 1
 m es la pendiente de la curva en unidades log

Con esta simplificación se pueden predecir movimientos a diferentes distancias. Para vibración producida artificialmente, la relación queda:

$$u = K \left(\frac{R}{E} \right)^{1/2} \quad (\text{A.2.31})$$

Donde E es la energía cinética del impacto de la fuente.

Análisis de atenuación, a partir de la ecuación de onda

Amplificación del Movimiento del suelo debido a una capa de suelo blando

Analizando la amplificación relativa de una capa de suelo, en un punto dado, debido a la presencia de una capa blanda de suelo, podemos suponer que la respuesta de un depósito de suelo, se debe predominantemente a la propagación vertical de ondas de corte, desde la Formación inferior de roca, hasta la superficie libre del depósito de suelo.

Para visualizar un medio unidimensional de manera sencilla, se puede pensar en una barra de longitud infinita, área transversal A y densidad ρ . (figura A.2.6)

Bajo este supuesto se sabe que tres tipos distintos de vibración pueden ocurrir en dicha barra: vibraciones longitudinales, transversales y torsionales. Se analizará únicamente el problema de propagación de ondas transversales, puesto que la evaluación de la respuesta sísmica del terreno se llevará a cabo suponiendo que ésta se debe principalmente a la propagación vertical de ondas transversales SH. (figura A.1.3)

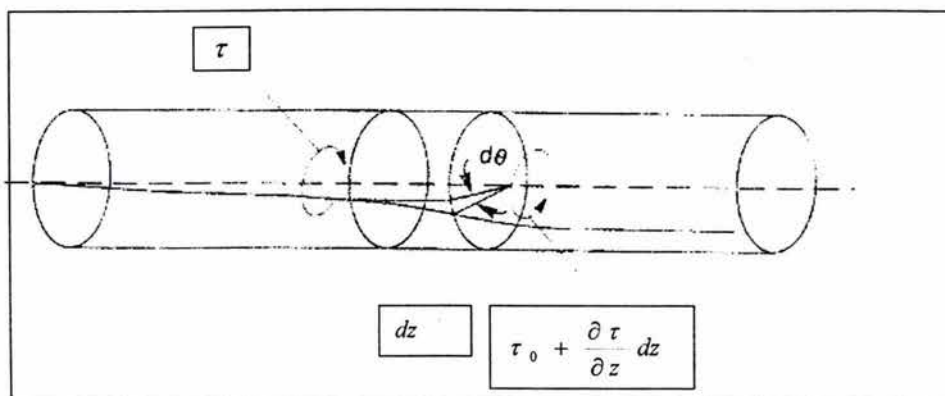


Figura A.2.6 Barra de longitud infinita, área A y densidad ρ

Si un elemento de longitud dz en dicha barra, es sometido a un esfuerzo cortante τ_0 , se llevará a cabo una deformación, generando un desplazamiento u , en la dirección x , para lo cual se tiene que una vez recorrido la longitud del elemento $(z + dz)$, el desplazamiento producido será:

$$u + \frac{\partial u}{\partial z} dz \quad (\text{A.2.32})$$

a la vez que el esfuerzo producido estará dado por:

$$\tau_0 + \frac{\partial \tau}{\partial z} dz \quad (\text{A.2.33})$$

Aplicando la segunda ley de Newton será posible establecer el equilibrio del elemento, esto es, igualando las fuerzas al producto de la masa por la aceleración que alcanza el elemento:

$$\left(\tau_0 + \frac{\partial \tau}{\partial z} dz \right) A - \tau_0 A = \rho A dz \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (\text{A.2.34})$$

Simplificando la ecuación A.2.34 se tiene lo siguiente:

$$\frac{\partial \tau}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (\text{A.2.35})$$

Esta última expresión, conocida como la ecuación diferencial de onda unidimensional, es útil en la determinación de la respuesta del suelo, y válida para cualquier comportamiento esfuerzo-deformación.

La ecuación unidimensional de onda A.2.35, involucra al mismo tiempo esfuerzos y desplazamientos, por tanto no puede ser resuelta directamente, siendo necesario establecer un modelo constitutivo del suelo que permita expresar todo en términos de deformaciones.

Se acepta válido un comportamiento visco elástico representado por un modelo Kelvin-Voigt, para lo cual, Se tiene que, la relación esfuerzo-deformación en dicho elemento, sometido a esfuerzo cortante se expresa de la siguiente manera:

$$\tau = G\gamma + \eta \frac{\partial \gamma}{\partial t} \quad (\text{A.2.36})$$

Donde τ es el esfuerzo cortante, $\gamma (= \partial u / \partial z)$ es la deformación por esfuerzo cortante, G el módulo de rigidez y η es la viscosidad del material. El esfuerzo de cortante esta dado por la suma de una parte elástica, y una parte viscosa.

Sustituyendo A.2.36 en A.2.35, se obtiene una nueva ecuación unidimensional de ondas de cortante que representa la propagación vertical de ondas SH:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^2 u}{\partial z^2 \partial t} \quad (\text{A.2.37})$$

La solución de ésta ecuación puede expresarse como:

$$u_{(z,t)} = f(z + vt) + g(z - vt) \quad (\text{A.2.38})$$

Donde f y g pueden ser cualquier función arbitraria de $(z + vt)$ y $(z - vt)$ que satisfacen la ecuación A.2.32.

En dichas funciones, el argumento de g permanece constante mientras z se incrementa con el tiempo. Del mismo modo, el argumento de f permanecerá constante mientras z decrece con el tiempo. Por consiguiente, la solución dada por la ecuación A.2.38 describe el desplazamiento de ondas viajando a una velocidad v , tanto en dirección positiva, como negativa de z . Esto implica, también, que la forma de las ondas no cambia con la posición o el tiempo.

La ecuación A.2.38 puede ser expresada también en términos armónicos. En muchas aplicaciones de ingeniería las funciones senoidales en el tiempo son utilizadas debido a que es muy sencillo generarlas.

Las soluciones que involucran funciones senoidales son útiles ya que las funciones arbitrarias periódicas en el tiempo pueden expandirse en series de Fourier de componentes senoidales armónicas. La ecuación queda expresada en forma compleja de la siguiente manera:

$$u_{(z,t)} = U(z)e^{i\omega t} \quad (\text{A.2.39})$$

Sustituyendo la ecuación A.2.34 en A.2.32, y obteniendo las derivadas:

$$\frac{\partial^2 u_{(z,t)}}{\partial t^2} = -\omega^2 U(z)e^{i\omega t} \quad (\text{A.2.40})$$

$$\frac{\partial^2 u_{(z,t)}}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 U(z)}{\partial z^2} e^{i\omega t} \quad (\text{A.2.41})$$

$$\frac{\partial^3 u_{(z,t)}}{\partial z^2 \partial t} = i\omega \frac{\partial^2 U(z)}{\partial z^2} e^{i\omega t} \quad (\text{A.2.42})$$

Finalmente se tiene que:

$$G \frac{\partial^2 U(z)}{\partial z^2} e^{i\omega t} + \eta \frac{\partial^2 U(z)}{\partial z^2} i\omega e^{i\omega t} = -\rho\omega^2 U(z)e^{i\omega t} \quad (\text{A.2.43})$$

Simplificando la ecuación A.2.43, se obtiene lo siguiente:

$$-\rho\omega^2 U(z) = (G + \eta i\omega) \frac{\partial^2 U(z)}{\partial z^2} \quad (\text{A.2.44})$$

Por tratarse de un sistema visco elástico podemos introducir el término de rigidez complejo:

$$G^* = G + \eta\omega i \quad (\text{A.2.45})$$

En la ecuación A.2.45 puede ser considerada la introducción del modelo lineal equivalente, propuesto por Hardin (1965), donde se establece la respuesta del suelo independiente de la frecuencia de excitación; de tal manera que el coeficiente de viscosidad, válido para resonancia, se define como:

$$\eta = \frac{2\beta G_{\text{sec}}}{\omega} \quad (\text{A.2.46})$$

Sustituyendo A.2.46 en A.2.45, se obtiene:

$$G^* = G_{\text{sec}}(2\beta i + 1) \quad (\text{A.2.47})$$

Sustituyendo ahora A.2.46 en A.2.44

$$-\rho\omega^2 U(z) = G^* \frac{\partial^2 U(z)}{\partial z^2} \quad (\text{A.2.48})$$

Introduciendo ahora la definición de número de onda complejo:

$$K = \frac{\omega}{v} \quad (\text{A.2.49})$$

Donde:

$$v = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (\text{A.2.50})$$

El número de onda para el modelo elástico está dado por:

$$k = \frac{\omega}{v} = \omega \sqrt{\frac{\rho}{G}} \quad (\text{A.2.51})$$

Mientras que, para el modelo visco elástico será:

$$k^* = \frac{\omega}{v^*} = \omega \sqrt{\frac{\rho}{G^*}} \quad (\text{A.2.52})$$

Finalmente, sustituiré la ecuación que representa al número de onda para el modelo visco elástico A.2.52, en la solución de la ecuación de onda unidimensional ecuaciones A.2.38 y A.2.39

$$u_{(z,t)} = f(\omega t + k^* z) + g(\omega t - k^* z) \quad (\text{A.2.53})$$

Esto es:

$$u_{(z,t)} = A e^{i(\omega t + k^* z)} + B e^{i(\omega t - k^* z)} \quad (\text{A.2.54})$$

Llevando a cabo, el análisis del comportamiento de la onda SH, suponiendo propagación vertical, dentro de la capa de suelo, de acuerdo al siguiente modelo:

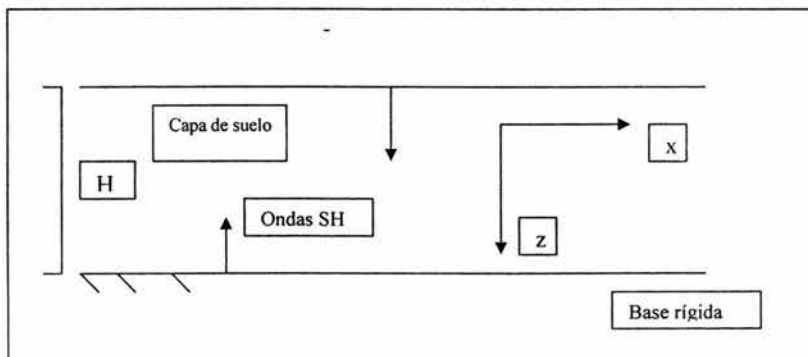


Figura A.2.7 propagación vertical de ondas SH

Se tiene que la base rígida deja que las ondas pasen a la capa de suelo y no permite que se transmitan en el semiespacio. A partir de la ecuación A.2.54

$$u_{(z,t)} = Ae^{i(\omega t + k z)} + Be^{i(\omega t - k z)} \quad \text{Donde} \quad k = \frac{\omega}{\beta}$$

Sabiendo que en la superficie libre $Z = 0$

De la ecuación de Cauchy $T_j = \Gamma_{ij} n_j$

(A.2.55) donde $n_j(0,0,1)$

Γ_{ij} Es el tensor de esfuerzos

n_j Es la normal a la superficie donde actúa

Sobre la ley de Hooke, se tiene que:

$$\Gamma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \theta + 2\mu e_{ij} \quad (\text{A.2.56})$$

El término $\lambda \delta_{ij} \theta$ en éste caso es cero, por lo que $\Gamma_{yz} = \Gamma_{zy} = 0$

Por consiguiente:

$$T_3 = 2\mu \left(\frac{1}{2} \frac{\partial U_y}{\partial Z} \right) \therefore T_3 = \mu \frac{\partial U_y}{\partial Z} \quad (\text{A.2.57})$$

Donde a su vez $\mu \frac{\partial U(0,t)}{\partial Z} = 0$ por condiciones de frontera

$$\mu [iKAe^{i(\omega t + kz)} - iKBe^{i(\omega t - kz)}]_{z=0} = 0 \quad (\text{A.2.58})$$

$$\mu [iKAe^{i\omega t} - iKBe^{i\omega t}]_{z=0} = 0 \quad (\text{A.2.59})$$

$$\mu ik[A - B]e^{i\omega t} = 0 \quad (\text{A.2.60})$$

Cuando $A=B$, existe solución;

$$U(z,t) = 2A \frac{e^{ikz} + e^{-ikz}}{2} e^{i\omega t} \quad (\text{A.2.61})$$

Entonces la ecuación de onda para la capa de suelo es:

$$U(z,t) = 2A \cos kz e^{i\omega t} \quad (\text{A.2.62})$$

La ecuación A.2.62 es de utilidad en la Función de transferencia, para conocer el comportamiento de la onda en la capa de suelo, de tal manera que:

$$F(\omega) = \frac{U \max(0,t)}{U \max(H,t)} = \frac{2Ae^{i\omega t}}{2A \cos kHe^{i\omega t}} \quad (\text{A.2.63})$$

Esto es:

$$F(\omega) = \frac{1}{\cos kH} \quad (\text{A.2.64})$$

La ecuación A.2.64 representa el movimiento de la capa de suelo, su módulo se conoce como Función de amplificación:

$$|F_1(\omega)| = \sqrt{\text{Re}(F(\omega))^2 + \text{IM}(F(\omega))^2} \quad (\text{A.2.65})$$

Finalmente:

$$F_1(\omega) = \frac{1}{\left| \cos \left(\frac{\omega H}{\beta} \right) \right|} \quad (\text{A.2.66})$$

La ecuación A.2.66 nos permite conocer la frecuencia de vibrar de la capa de suelo.

Suponiendo ahora una capa de suelo amortiguada sobre roca rígida, partiendo de nuevo de la solución de la ecuación de onda A.2.54, donde k^* es un número complejo, con parte real k_1 y parte imaginaria k_2

En éste caso la función de transferencia queda de la siguiente manera:

$$F(\omega) = \frac{1}{\cos k^* H} \quad (\text{A.2.67})$$

Sabiendo que $k^* = \frac{\omega}{V_s^*}$ entonces:

$$F(\omega) = \frac{1}{\cos\left(\frac{\omega H}{V_s^*}\right)} \quad (\text{A.2.68})$$

Sabiendo por definición, que la velocidad de ondas S está dada por la ecuación:

$$V_s^* = \sqrt{\frac{\mu^*}{\rho}} \quad (\text{A.2.69})$$

La constante de Lamé en éste caso puede ser definida en términos del amortiguamiento:

$$\mu^* = \mu(1 + i2\xi) \quad (\text{A.2.70})$$

La ecuación A.2.69, a su vez puede ser aproximada como:

$$V_s^* = \sqrt{\frac{\mu^*}{\rho}} = \sqrt{\frac{\mu(1 + i2\xi)}{\rho}} \approx \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}(1 + i\xi) \quad (\text{A.2.71})$$

Sustituyendo A.2.71 en la ecuación A.2.69

$$V_s^* = V_s(1 + i\xi) \quad (\text{A.2.72})$$

A partir de la ecuación A.2.72 la definición del número de onda k^* queda:

$$k^* = \frac{\omega}{V_s^*} = \frac{\omega}{V_s(1 + i\xi)} \approx \frac{\omega}{V_s}(1 - i\xi) \quad (\text{A.2.73})$$

Finalmente:

$$k^* = k(1 - i\xi) \quad (\text{A.2.74})$$

La función de transferencia A.2.67 se puede escribir finalmente:

$$F_2(\omega) = \frac{1}{\cos k(1 - i\xi)H} \quad (\text{A.2.75})$$

Utilizando la siguiente identidad en la ecuación A.2.75

$|\cos(x + iy)| \equiv \sqrt{\cos^2 x + \operatorname{senh}^2 y}$, la función de transferencia queda:

$$|F_2(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{\cos^2(kH) + \operatorname{senh}^2(\xi kH)}} \quad (\text{A.2.76})$$

Para valores pequeños de y : $\operatorname{senh}^2 y \longrightarrow y^2$

$$|F_2(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{\cos^2(kH) + (\xi kH)^2}} \quad (\text{A.2.77})$$

$$|F_2(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{\cos^2\left(\frac{\omega H}{V_s}\right) + \left(\xi \frac{\omega H}{V_s}\right)^2}} \quad (\text{A.2.78})$$

Donde ω_0 es la frecuencia fundamental de la capa de suelo

$$\omega_0 = \frac{\pi V_s}{2H} \quad (\text{A.2.79})$$

Y el periodo característico:

$$T_s = \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{4H}{V_s} \quad (\text{A.2.79})$$

Por medio de la Función de transferencia obtenida A.2.78, en el caso amortiguado, es posible obtener periodos característicos, para distintos puntos de estudio. Sabiendo que los datos de vibración obtenidos en función del tiempo, deberán ser siempre llevados al dominio de la frecuencia.

En conclusión, éste modelo nos permite conocer valores puntuales, que llevados a una gráfica amplitud vs distancia, presentará el comportamiento de atenuación de ondas en una zona determinada. En éste trabajo se hará uso de la ley de escalamiento cúbico, cuyo resultado es una gráfica de las mismas variables, en escala logarítmica, ajustando a una

recta, de igual manera, nos permite conocer el comportamiento de atenuación de ondas, propagándose por determinado medio terrestre.

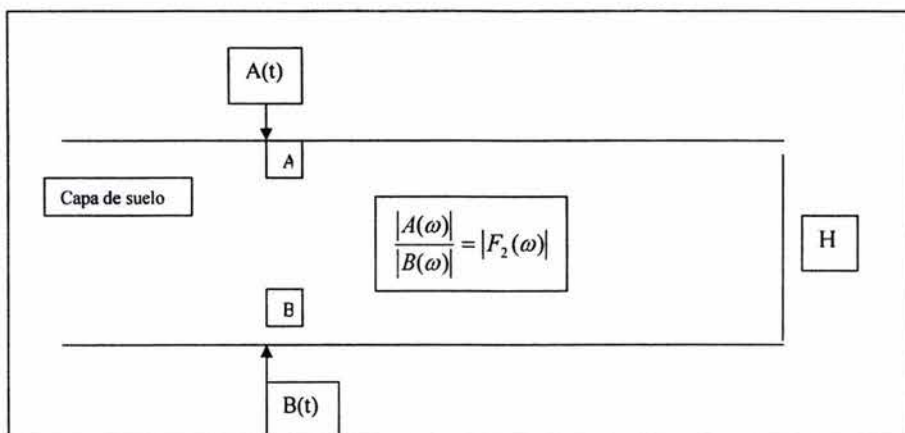


Figura A.2.8 Función de transferencia

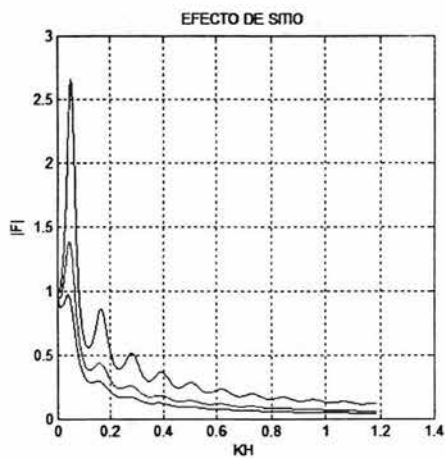


Figura A.2.9 Gráfica que muestra el efecto de sitio a partir de la ecuación A.2.78, para tres valores distintos de amortiguamiento

ANEXO 3

NORMAS INTERNACIONALES

Norma Española UNE 22-381-93

La norma española “Control de vibraciones producidas por voladuras” (AENOR, 1993), elaborada por la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR) pretende establecer un procedimiento de estudio y control de las vibraciones producidas por explosiones en trabajos de explotación de minas, canteras, obras civiles, demoliciones y otras técnicas que requieran el uso de explosivos.

La aplicación de la norma se establece para aquellos casos de explosión en que se requiere la realización de un estudio de vibración. Según el tipo de actividad, la norma aplica a trabajos con explosivos clasificados como sigue:

- Trabajos de explotación en minas y canteras, tanto en labores de extracción de materiales como en labores complementarias
- Trabajos de construcción en obras públicas
- Trabajos de demolición y especiales, en los que generalmente se emplean pequeñas cargas

Al analizar la posibilidad de llevar a cabo ensayos previos de explosiones en determinada zona, hay que tomar en cuenta que en algunos casos se puede alterar significativamente el elemento a volar con las pruebas. Tal punto se tendrá en cuenta al momento de definir el tipo de estudio requerido.

Esta norma clasifica las estructuras a efectos de la aplicación del Criterio de prevención de daños. Se entiende por estructura colindante toda obra de origen humano con una finalidad útil y que sea susceptible de experimentar vibraciones.

Los tipos de estructuras objeto de la presente norma son exclusivamente las clasificables en los siguientes grupos:

- Grupo I: Edificios y naves industriales ligeras con estructuras de hormigón armado o metálicas.
- Grupo II: Edificios de viviendas, oficinas, centros comerciales y de recreo, cumpliendo la normativa legal vigente. Edificios y estructuras de valor arqueológico, arquitectónico o histórico que por su fortaleza no presenten especial sensibilidad a las vibraciones.
- Grupo III: Estructuras de valor arqueológico, arquitectónico o histórico que presenten una especial sensibilidad a las vibraciones por ellas mismas o por elementos que pudieran contener.

NOTA - Para el resto de estructuras el estudio de vibraciones se ajustará a los criterios de la Administración encargada de velar por la seguridad de las personas y las instalaciones, en

función del objetivo del proyecto y del tipo de estructuras que previsiblemente puedan estar afectadas.

El Criterio de prevención de daños propuesto por esta norma se muestra en las figuras A.7.1 y A.7.2, donde se indican los niveles seguros para el valor pico de la mayor componente de la velocidad de vibración medida en el terreno.

El nivel está dado de acuerdo al grupo donde quede clasificada la estructura considerada, según la clasificación de grupos I, II y III mencionada, y de la frecuencia principal.

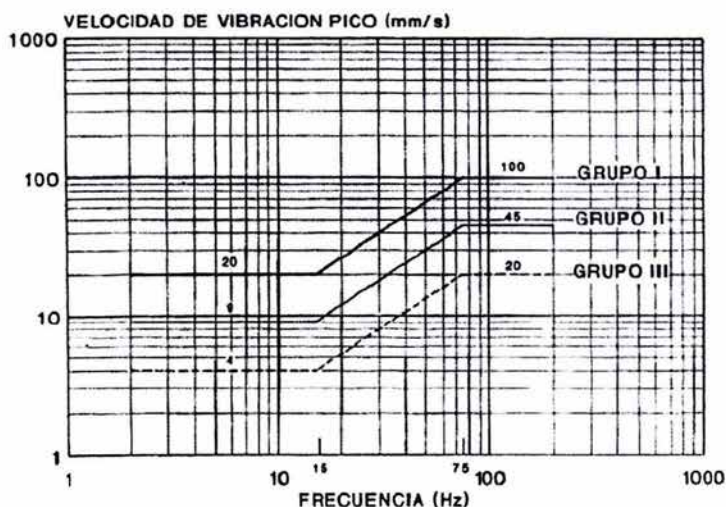


Figura A.7.1 Criterio de prevención de daño, norma Española UNE 22-381-93

| | | Frecuencia Principal (Hz) | | |
|--------------------|--|---------------------------|----------------------|----------------|
| | | 2 - 15 | 15 - 75 ^a | > 75 |
| Tipo de estructura | | Velocidad mm/s | Desplazamiento mm | Velocidad mm/s |
| I | | 20 | 0.212 | 100 |
| II | | 9 | 0.095 | 45 |
| III | | 4 | 0.042 | 20 |

^a En los tramos de frecuencias comprendidas entre 15 y 75 Hz, en los que el nivel está dado en desplazamiento, se podrá calcular la velocidad equivalente conociendo la frecuencia principal a través de la ecuación:

$$V = 2\pi f d$$

donde:

V es la velocidad de vibración equivalente en mm/s

$\pi = 3.1416$

f es la frecuencia principal en Hz

d es el desplazamiento admisible en mm indicado en la tabla

Figura A.7.2 Criterio de prevención de daño, norma Española UNE 22-381-93

Excepcionalmente, esta norma permite aprobar niveles superiores a los indicados en las figuras A.7.1 y A.7.2, en casos concretos mediante la presentación de informes detallados y técnicamente justificados

La norma Española también permite definir el tipo de estudio de vibraciones requerido, esto en función del tipo de trabajo a desarrollar mediante explosivos, de la estructura a preservar, del tipo de terreno, de la distancia existente entre la explosión y la estructura y de la carga máxima de explosivo a detonar instantáneamente o carga por secuencia

La figura A.7.3 permite determinar el tipo de estudio requerido, en función del tipo de terreno y de la estructura a considerar, para ciertas condiciones de carga y distancia determinadas.

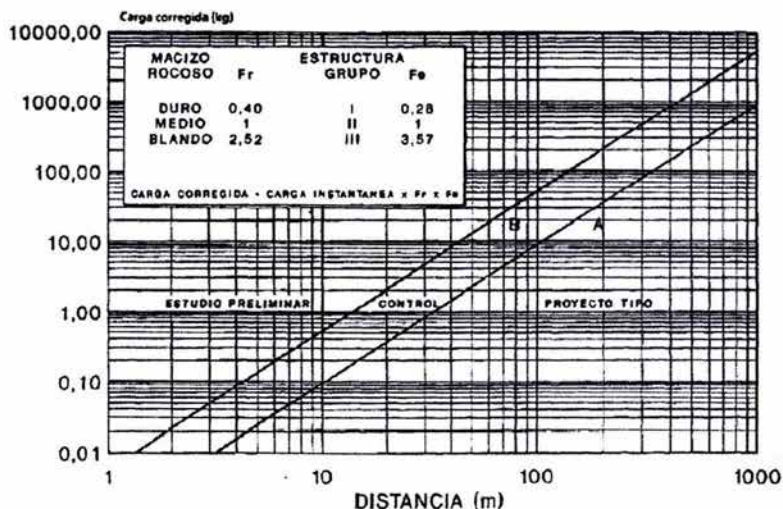


Figura A.7.3 Selección del tipo de estudio (carga vs. distancia) norma Española UNE 22-381-93

El procedimiento a seguir para determinar el tipo de estudio es el siguiente:

- Se determina el tipo de macizo rocoso sobre el que está cimentada la estructura de acuerdo con la siguiente clasificación:
 - Formación rocosa dura: Aquella cuya velocidad máxima de partícula es superior a 4mm/s
 - Formación rocosa media: Aquella cuya velocidad máxima de partícula está comprendida entre 2 y 4mm/s
 - Formación rocosa blanda Aquella cuya velocidad máxima de partícula es inferior a 2mm/s.
- Se determina el grupo al cual pertenece la estructura, de acuerdo a la clasificación mencionada en principio (grupos I, II y III)
- Se determina la distancia entre la explosión y la estructura en metros.
- Se determina la carga máxima instantánea de proyecto en kg que se prevé detonar. Esta carga, también llamada carga por secuencia, es la suma de todas las cargas de explosivos detonadas con el mismo número de detonador, y para secuencias ente números superiores a 8 ms. Si existen varias secuencias, se considerara la que tenga mayor carga.

Una vez definido el grupo de la estructura y del tipo de macizo rocoso se procede a corregir la carga instantánea multiplicándola por un factor F_e , que considera la estructura a preservar y un factor F_r , que considera la frecuencia dominante, condicionada al tipo de macizo rocoso.

$$Q_c = F_r F_e Q \quad (\text{A.7.1})$$

Las tablas A.7.1 y A.7.2, muestran los valores que F_e y F_r pueden tomar:

Tabla A.7.1 Valores de F_e

| Estructura grupo | F_e |
|------------------|-------|
| I | 0.28 |
| II | 1 |
| III | 3.57 |

Tabla A.7.2 Valores de F_r

| Macizo rocoso | F_e |
|---------------|-------|
| Duro | 0.40 |
| Medio | 1 |
| Blando | 2.52 |

Con el valor de Q_c (carga corregida), y la distancia considerada, se utiliza la figura A.7.3, encontrando el punto P del caso estudiado.

- Si el punto P está por encima de la recta B, podría ser exigible un estudio preliminar de vibraciones
- Si el punto P está entre la curva A y B, se podría requerir una medición de control de la voladura proyectada
- Si el punto está por debajo de la recta A, sólo será necesaria la inclusión en el proyecto de esta justificación con la figura A.7.3

Para aquellos trabajos en los que la realización de ensayos previos suponga una alteración importante del elemento a volar, el tipo de estudio requerido podrá ser únicamente uno de los siguientes:

- Medición de control
- Proyecto tipo de vibraciones

Los diferentes tipos de estudio de vibraciones quedan definidos por esta norma como sigue:

Proyecto tipo de vibraciones

Este es el caso que se produce cuando el punto P queda por debajo de la recta A, es decir, la carga instantánea de explosivo es tan baja para esa distancia que es descartable cualquier

incidencia de las vibraciones. En este caso bastará con adjuntar al proyecto de voladura una hoja con la figura A.7.3 en la que figure el citado punto, así como una memoria explicativa.

Medición de control de vibraciones

Este tipo de estudio puede requerirse cuando el punto *P* se ubica entre las rectas A y B. Es necesario entonces, medir el nivel de vibración de una voladura de producción en el punto *P*. Los datos que debe aportar esta prueba son: carga máxima instantánea, carga por cada secuencia y secuencias empleadas, distancia y velocidad e vibración pico para cada componente junto a las frecuencias dominantes, así como la ubicación de los puntos de disparo y registro.

También se incluye una breve descripción del terreno. Si el nivel de vibración resultante del control fuera menor que el nivel fijado por el criterio de prevención de daños (figuras A.7.1 y A.7.2), podrá incrementarse progresivamente la carga en controles posteriores, manteniendo igual el resto de los parámetros, hasta que los niveles resultantes sean iguales o inferiores al valor de vibración admisible.

Si el nivel de vibración resultante del control superase el nivel fijado por el criterio de prevención de daños, sería necesario un estudio preliminar de vibraciones para voladuras posteriores.

Estudio preliminar de vibraciones

Este tipo de estudio podría ser requerido cuando el punto *P* esté situado por encima de la recta B. Es necesario llevarlo a cabo cuando se desea conocer el comportamiento sísmico del terreno, esto es la relación existente entre la carga detonada, la vibración generada y la distancia. Para ello, será necesaria la realización de ensayos previos.

Las pruebas pasarán por las siguientes fases:

- Determinación de la componente principal con un registro de las tres componentes.
- Medición de la componente principal en posiciones distantes entre sí de manera que cubran el área de interés.
- Medición con diferentes cargas instantáneas en orden creciente hasta llegar, si es posible, a cargas del mismo orden de las que se prevén utilizar controlando los niveles obtenidos in situ.
- Ajuste de los datos de una ley de atenuación.
- Determinación de la frecuencia dominante en el rango de distancias estudiado.
- Determinación del nivel máximo de vibración obtenido del criterio de prevención de daños en función del tipo de estructura y de la frecuencia dominante.
- Cálculo de las tablas carga instantánea/distancia.
- El ajuste de los puntos de ensayo se realizará a la ley general de atenuación y a la ley cuadrática (ecuaciones A.7.2 y A.7.3):

$$V = KQ^{\alpha} D^{\beta} \quad (\text{A.7.2})$$

$$V = K \left(\frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^\beta \quad (\text{A.7.3})$$

Las pruebas se han de plantear con base en la detonación de voladuras con diferentes cargas instantáneas, o bien, con base a la ejecución de barrenos individuales confinados con diferentes cargas.

Los ensayos confinados suelen generar niveles de vibración más altos que las voladuras de producción; por tanto, en caso de haber realizado el estudio con cargas confinadas, se podría revisar el estudio con datos posteriores en voladuras de producción.

La realización de controles sucesivos, como se mencionó en la medición de control de vibraciones, puede aportar datos suficientes para la realización de un estudio preliminar de vibraciones y, por lo que se convierte en una vía alternativa para la realización de un estudio preliminar.

Una vez obtenida la ley que relacione la velocidad de vibración máxima pico con la carga por secuencia detonada y la distancia, se podrá calcular la tabla carga por secuencia/distancia con base al límite de vibración fijado por el criterio de prevención de daños.

Norma escocesa PAN50. Control de efectos ambientales de trabajos en minería superficial. (Anexo D: Control de voladuras en minería superficial)

Esta norma se desarrolló en Escocia y fue publicada en febrero de 2000 basada en los estándares: BSI (British Standard Institute) BS-6472 de 1992 y BS-7385 partes 1 (sobre la medición) y 2 (sobre los efectos) de 1993, las guías de planeación nacional NPPG (National Planning Policy Guidelines) 4, 14 y 16, y las PAN (Planning Advice Notes) 56 y 58.

Para esta norma son cuatro los parámetros interrelacionados que pueden ser usados para definir la magnitud de vibraciones en el suelo en cualquier lugar:

- 1) Desplazamiento de partícula. La distancia a la que se mueve la partícula antes de regresar a su posición original, medida en milímetros
- 2) Velocidad de partícula. La tasa a la cual cambia el desplazamiento de la partícula, medida en milímetros por segundo
- 3) Aceleración de la partícula. La tasa de cambio de la velocidad de partícula, medida en milímetros por segundo al cuadrado
- 4) Frecuencia. el número de oscilaciones por segundo al cual una partícula esta sometida, medido en Hertz (Hz).

En cuanto al contenido frecuencial de las vibraciones causadas por explosiones, esta norma afirma que es un factor importante en la determinación de niveles de amplificación y respuesta a las vibraciones tanto en humanos como en estructuras.

La frecuencia es en mayor parte determinada por las condiciones geológicas entre la fuente y el receptor, la distancia desde la fuente y en menor proporción por el diseño de la voladura y la geometría del barrenado.

Entre menos firme o sólido sea el medio de transmisión, las altas frecuencias de las vibraciones van a ser reducidas o filtradas sobre distancias cortas. De manera que, las frecuencias del movimiento del suelo serán relativamente altas cuando se monitorea cerca a la voladura y/o sea roca sólida.

Las frecuencias serán relativamente bajas cuando se monitorea a gran distancia de la fuente y/o cuando el medio de transmisión sea relativamente suave, como el caso de arcillas y suelos.

Los rangos típicos de frecuencias de vibraciones en el suelo producidos por trabajos en minería superficial es entre 5 y 40Hz, con niveles predominantes entre 20 y 30Hz en canteras de extracción de roca y de 5 a 15Hz en el caso de minas a cielo abierto con menor capacidad de transmisión de ondas al medio.

La norma escocesa establece que la respuesta humana a vibraciones del suelo inducidas por explosiones son un fenómeno relativamente complejo que depende de una gama de factores de los cuales la amplitud de vibración es únicamente uno y no necesariamente el más importante.

Está bien identificado que el cuerpo humano es muy sensible a cambios bruscos en el nivel de vibraciones, sin embargo tiene poca capacidad para distinguir magnitudes relativas. Aunque la sensibilidad a las vibraciones varía significativamente entre individuos, una persona generalmente puede ser consciente de vibraciones inducidas por explosiones con una velocidad pico de partícula de alrededor de 1.5mm/s, y bajo algunas circunstancias a niveles menores a 0.5mm/s.

La norma escocesa clasifica los daños a estructuras de tipo residencial de la siguiente manera:

- Daño cosmético o umbral de daño. Con la formación de grietas finas o el crecimiento de grietas existentes en el estuco, superficie de paredes aligeradas y juntas en mortero
- Daño menor. Con la formación de grietas largas o pérdida y caída de superficies tanto de estuco como de paredes aligeradas o grietas en bloques de concreto y ladrillo
- Daño mayor o daño estructural. Daño en elementos estructurales o en la edificación

La BS 7385 de 1993 (norma Inglesa) da una guía de valores respecto a la clasificación de daño a estructuras residenciales mencionada, en términos de la velocidad pico de partícula y frecuencia. Estos valores se basan en los niveles más bajos sobre los cuales el daño ha sido convincentemente demostrado.

Se puede presentar daño cosmético a una frecuencia de 4Hz con valores de velocidad pico de partícula de 15mm/s, incrementándose a una velocidad pico de 20mm/s a los 15Hz y de 50mm/s hacia los 40Hz y frecuencias superiores.

Se presenta daño menor con magnitudes de vibración dos veces mayor a las dadas por las de daño cosmético y posiblemente daño mayor en la estructura a niveles cuatro veces mayores a los valores que causan daño cosmético. Estos valores aplican también cuando una estructura experimenta eventos repetidos de vibraciones.

La variación en el peso de carga de explosivos detonada en un instante de tiempo esta relacionado estrechamente a la variación en la magnitud de vibración. Tal parámetro junto con la distancia a la fuente forma la base para la predicción de niveles de vibración.

El método aceptado de predicción es el de graficar el valor de velocidad pico de partícula contra la distancia escalada de las mediciones. La distancia escalada es el valor de la distancia entre la fuente y el sensor dividido por la raíz cuadrada (o cúbica) de la máxima carga instantánea de explosivos detonada para la cual se realizó la medición.

Esta norma reconoce que es la geología del medio de propagación, la que determina en gran parte la manera en la cual se transmitirán las vibraciones, y por lo tanto las características predominantes de las vibraciones, incluyendo su magnitud a cualquier distancia dada.

Un factor importante al respecto, es que la velocidad de propagación es una medida indirecta de las características geológicas, las que afectan la tasa de decaimiento de las vibraciones. Las variaciones en las velocidades de propagación en un tipo de roca, e inclusive entre tipos de roca, pueden ser significativos, por lo tanto es importante realizar mediciones de vibraciones específicas para cada sitio.

Generalmente los niveles registrados de velocidad máxima de partícula en explosiones individuales no deben exceder los 12mm/s. El nivel promedio no debe exceder los 10mm/s, y comúnmente no deben estar debajo de 6mm/s en el 95% de todas las voladuras registradas. (de acuerdo a la norma BS 6472 de 1992 y la BS 7385 de 1993 parte 2)

Bajo circunstancias excepcionales puede ser apropiado que los niveles estén fuera del rango de 6 a 10mm/s, tales circunstancias deben ser cuidadosamente examinadas, ya que niveles mayores a estos pueden incrementar la probabilidad de daño en las estructuras, mientras que niveles menores al rango recomendado, pero con mayor frecuencia de eventos de explosión, podrían generar el mismo daño que los niveles de velocidad de partícula altos.

Norma Alemana DIN4150

El Instituto de Normalización Alemana o DIN (Deutsches Institut für Normung) ha publicado varios criterios de niveles máximos de vibración, siendo el primero el de 1975, el cual fue desglosado (3 partes) y actualizado en 1999 y 2001.

La tabla A.7.3 muestra los valores indicativos de la DIN 4150 de 1975, según Persson et al. (1994)

Tabla A.7.3 Resumen de criterios en la norma alemana DIN 4150

| RESUMEN DE LOS VALORES INDICATIVOS DE LA NORMA DIN 4150 | |
|---|--|
| Campo de aplicación | Vibraciones producidas por cualquier fuente |
| Variables medidas | Velocidad vertical pico (mm/s) y velocidad de partícula pico ó resultante (mm/s) |
| Valores indicativos | Ver tablas A.7.4 y A.7.5 |

Los valores indicativos recomendados por la DIN 4150:1975 dependen del tipo de edificación, como se muestra en las tablas A.7.4 y A.7.5

Tabla A.7.4 Valores guía para frecuencias DIN 4150 (1999)

| | CLASE DE CONSTRUCCIÓN | FRECUENCIA FUNDAMENTAL | | | NS ^a |
|---|---|------------------------|-----------|------------|-----------------|
| | | 1 – 10Hz | 10 – 50Hz | 50 – 100Hz | TF ^b |
| 1 | Edificaciones industriales, oficinas y similares o con diseños robustos | 20 ^c | 20 - 40 | 40 - 50 | 40 |
| 2 | Edificaciones residenciales y construcciones militares | 5 | 5 – 15 | 15 - 20 | 15 |
| 3 | Otras edificaciones sensibles a vibraciones o las no incluidas en las dos anteriores clases | 3 | 3 - 8 | 8 – 10 | 8 |

^a Nivel superior componente horizontal; ^b Todas las frecuencias; ^c Velocidades de partícula en mm/s
Adaptado de DIN (2001.)

Tabla A.7.5. Velocidades pico recomendadas por la DIN 415 (1979)

| | CLASE DE EDIFICACION | VALORES INDICATIVOS | |
|-----|--|-------------------------|-------------------------|
| | | VPP ^a (mm/s) | VVP ^b (mm/s) |
| I | Residencias, oficinas y otras similares construidas de forma tradicional y en condiciones normales | 8 | 4.8 - 8 |
| II | Edificaciones estables en condiciones normales | 30 | 18 – 30 |
| III | Otras edificaciones y monumentos históricos | 4 | 2.4 - 44 |

^a Velocidad de partícula pico; ^b Velocidad vertical pico
Tomado de Persson et al (1994)

Las tablas A.7.4 y A.7.5 muestran los valores de velocidad máxima de partícula y frecuencia fundamental recomendados, para los distintos tipos de estructuras, según esta norma.

Erika Samantha Sobodka Trevino

96 61 88 05

SamySobodka@yahoo.com

9520579-1