

Manual de Mecánica de Suelos.

Instrumentación y Monitoreo Sísmico
del Comportamiento de Obras Hidráulicas



**GOBIERNO
FEDERAL**

SEMARNAT



Vivir Mejor

Contenido

Prólogo

V

Capítulo 1. Introducción

1.1

1.1 Ingeniería sísmica

1.6

1.2 Ingeniería sísmica geotécnica

1.7

1.2.1 Asentamientos inducidos por sismos

1.7

1.2.2 Licuación de arenas

1.7

1.2.3 Estabilidad de taludes

1.8

1.2.4 Estabilidad de estructuras de retención durante sismos

1.8

1.2.5 Capacidad de carga de cimentaciones sometidas a sismos intensos

1.8

1.2.6 Amplificación y resonancia por sismos

1.8

1.3 Dinámica de suelos

1.9

1.4 La observación sísmica de obras hidráulicas

1.9

1.5 Propósito del manual

1.9

Capítulo 2. Conceptos básicos

2.1

2.1 Vibraciones mecánicas

2.1

2.2 Respuesta de un sistema de un grado de libertad amortiguado

2.2

2.2.1 Vibración libre de un SEI/LA

2.3

2.2.1.1 Decremento logarítmico

2.3

2.2.2 Vibración forzada de un SEI/LA

2.4

2.3 Fundamentos de propagación de ondas

2.5

2.3.1 Ondas longitudinales

2.5

2.3.2 Ondas transversales

2.5

2.3.3 Ondas superficiales

2.6

2.3.4 Reflexión de ondas

2.6

2.3.5 Refracción de ondas

2.6

2.3.6 Ondas en medios estratificados

2.6

2.3.6.1 Reflexión de una onda en una superficie

2.6

2.3.6.2 Reflexión y refracción de una onda en una frontera entre dos medios

2.7

2.4 Definición de términos

2.7

2.4.1 Términos generales

2.7

2.4.2 Términos relacionados con ondas sísmicas

2.8

2.4.3 Términos relacionados con sismicidad

2.9

2.4.4 Términos relacionados con instrumentos sísmicos

2.10

2.4.5 Términos relacionados con dinámica de suelos

2.10

Capítulo 3. Sismos: Génesis, medición y distribución	3.1
3.1 La estructura interna de la Tierra	3.2
3.2 Tectónica de placas	3.3
3.2.1 Fronteras entre placas	3.3
3.3 Generación de sismos	3.4
3.3.1 Sismógrafos	3.5
3.3.2 Magnitud de un sismo	3.5
3.3.3 Intensidad de un sismo	3.6
3.3.3.1 Intensidad sísmica en ingeniería	3.8
3.3.4 Localización de epicentros	3.8
3.3.5 Atenuación de ondas sísmicas	3.9
3.4 Sismicidad mundial	3.9
3.5 Sismicidad de México	3.9
3.6 Riesgo sísmico	3.10
Capítulo 4. Instrumentación sísmica	4.1
4.1 Sismometría	4.1
4.2 Sistema pendular inercial	4.2
4.3 Características importantes de los acelerógrafos	4.3
4.4 Acelerógrafos modernos	4.4
4.5 Recomendaciones generales para la instalación de estaciones acelerográficas	4.5
4.5.1 Acelerógrafo	4.5
4.5.2 Cimentación	4.6
4.5.2.1 Construcción de la cimentación	4.7
4.5.3 Caseta	4.7
4.5.3.1 Torre metálica y accesorios	4.7
4.6 Arreglo acelerográfico para una obra hidráulica	4.7
4.7 Instrumentación sísmica en México	4.8
4.8 Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes	4.9
4.8.1 Expansión de la red	4.10
4.8.2 Redes acelerográficas en ciudades	4.10
Capítulo 5. Procesamiento de acelerogramas	5.1
5.1 Parámetros para la caracterización de acelerogramas	5.2
5.1.1 Parámetros en el dominio del tiempo	5.2
5.1.1.1 Parámetro de amplitud	5.2
5.1.1.2 Parámetros de duración	5.4
5.1.2 Parámetros en el dominio de la frecuencia	5.4
5.1.2.1 Serie de Fourier	5.5
5.1.2.2 Transformada de Fourier	5.5
5.1.2.3 Propiedades de la transformada de Fourier	5.6
5.1.2.4 Espectro de potencia	5.7
5.1.2.5 Espectro de respuesta	5.7
5.1.2.6 Formas espectrales normalizadas	5.9

Capítulo 6 Propiedades dinámicas de los suelos

6.1 Efecto de la velocidad de aplicación de la carga

6.2 Efecto de la carga repetida

6.3 Ensayos de laboratorio

6.3.1 Ensayo con elementos bender

6.3.2 Ensayo con columna resonante

6.3.3 Ensayo triaxial cíclico

6.3.4 Ensayo de corte simple cíclico

6.3.5 Ensayo de torsión cíclica

6.3.6 Ensayo en mesa vibradora

6.3.7 Centrífuga

6.4 Ensayos de campo

6.4.1 Ensayos de ondas de superficie

6.4.2 Ensayo de refracción sísmica

6.4.3 Ensayos up-hole y down-hole

6.4.4 Ensayo Cross-hole

Referencias

6.1

6.2

6.2

6.3

6.3

6.4

6.5

6.6

6.6

6.6

6.7

6.7

6.8

6.9

6.10

Prólogo

El objetivo del presente manual es proveer una herramienta básica y didáctica, de uso ágil para los profesionales que en su práctica enfrentan problemas relacionados con la instrumentación y monitoreo sísmico de obras hidráulicas.

Entre los **fenómenos naturales** que producen irremediables pérdidas de vidas humanas y cuantiosos daños materiales se encuentran los sismos. Las zonas sísmicamente activas que se localizan en los bordes de las placas tectónicas de la litosfera, forman una extensa red que abarca a todo el planeta Tierra.

México está sujeto a la ocurrencia de sismos severos, razón por la cual uno de los **problemas de importancia nacional** es el relacionado con los sismos y sus efectos sobre el comportamiento de las obras de ingeniería civil. Para la ingeniería civil los sismos representan un riesgo importante que debe tomarse en cuenta en el diseño de toda obra. En muchos proyectos el **riesgo de falla por sismo** suele dominar otras consideraciones de diseño.

Los retos que enfrenta la ingeniería civil son cada vez más importantes, el diseño y construcción de grandes e importantes obras hidráulicas. La meta de la ingeniería civil es que toda obra sea resistente a los sismos.

Un **macrosismo** es un fenómeno sobrecogedor, con energía descomunal, inevitable, de efectos rápidos y que una vez desencadenado, sus consecuencias son fatales e impredecibles. Un sismo es un ajuste periódico que el planeta efectúa durante su evolución, es la vibración de la Tierra producida por la liberación de la energía acumulada a lo largo de una falla. Un macrosismo se cuenta entre las fuerzas más destructivas del planeta. No se puede evitar que ocurran los sismos, tampoco se puede predecir con certeza su fecha de ocurrencia y localización. Lo que sí podemos hacer es aplicar el conocimiento adquirido para minimizar los daños y reducir el riesgo sísmico.

El interés de la ingeniería en los grandes sismos, radica en la necesidad de diseñar y construir estructuras críticas tales como presas, reactores nucleares, puentes y edificios de gran altura para resistir los efectos de un sismo. El **análisis de la respuesta sísmica** de tales estructuras se basa en el registro y la interpretación de la historia de aceleraciones durante la ocurrencia de un sismo.

Uno de los retos que se enfrentaron para realizar el presente manual fue sintetizar la creciente información disponible sobre la instrumentación sísmica y sus aplicaciones. Se consideró conveniente incluir la palabra en inglés de cada término (al citarse por primera vez en el

texto) para que el presente manual facilite al usuario la lectura y comprensión de la literatura especializada, así como de los manuales de instrucciones de los fabricantes de equipo.

El presente manual está estructurado en seis capítulos y referencias bibliográficas.

El capítulo 1 está dedicado a destacar la importancia de la observación sísmica de las obras hidráulicas. El capítulo 2 concentra la definición de los conceptos básicos y términos, empleados en el manual con objeto de facilitar la consulta de los temas. El capítulo 3 explica la génesis, medición y distribución de los sismos tanto en el ámbito mundial como en el nacional. El capítulo 4 está dedicado a la instrumentación sísmica, en particular a los acelerógrafos digitales, se destaca la importancia de la Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes, en tanto que el capítulo 5 al procesamiento de los acelerogramas, la piedra angular de la medición de los movimientos sísmicos. Se describen los parámetros para la caracterización de dichos acelerogramas. Finalmente el capítulo 6 está dedicado a la medición de las propiedades dinámicas de los suelos.

Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería

Capítulo 1

Introducción

Entre los fenómenos naturales que producen irremediables pérdidas de vidas humanas y cuantiosos daños materiales, se encuentran los sismos. Las zonas sísmicamente activas, que se localizan en los bordes de las placas tectónicas de la litósfera, forman una extensa red que abarca todo el planeta Tierra (Figura 1.1). A la fecha no se tienen los conocimientos suficientes para predecir cuándo y en qué lugar ocurrirá un terremoto o sismo de gran magnitud, y todo parece indicar que esa meta es lejana de alcanzar. Sin embargo, se puede afirmar que se tienen los conocimientos para prevenir o limitar los daños que los sismos pueden producir.

Los retos que enfrenta la ingeniería civil son cada vez más importantes: el diseño y construcción de grandes obras hidráulicas, edificaciones de gran altura, hospitales, escuelas, puentes y centrales nucleares. La meta de la ingeniería civil es que toda obra sea sismorresistente.

Un sismo se produce por la ruptura súbita del equilibrio elástico de una región del interior de la Tierra. La ruptura ocurre en una superficie de contacto compleja, a partir de la cual se propagan las ondas sísmicas que originan el movimiento de la superficie del terreno.

Los sismos en muchas ocasiones han devastado el paisaje de alguna región del planeta, por ejemplo, en

China, a lo largo del siglo XX, ocurrieron diez grandes sismos que causaron la pérdida de más de un millón de vidas humanas y arrasaron con más de una docena de ciudades. En Kobe, Japón, el sismo de Great Hanshin, ocurrido el 16 de enero de 1995, produjo una pérdida de más de 5,100 vidas humanas, hubo 36,896 heridos, 200,000 edificios se dañaron o destruyeron, las pérdidas materiales se estimaron en aproximadamente 200 billones de dólares. Los sismos ocurren en cualquier lugar del mundo: Chile (1985), México (1985), Armenia (1988), San Francisco (1989) y Northridge (1994) en California, EUA.

La Tabla 1.1 muestra los grandes sismos históricos ($M \geq 8$), donde se puede observar que el 22 de mayo de 1960 ocurrió el sismo de Chile con magnitud de 9.5, la mayor registrada hasta la fecha. La Tabla 1.2 presenta los sismos del siglo XXI; aquí destacan los de Sumatra (2004), Chile (2010), y Honshu, Japón (2011). La Tabla 1.3 lista los grandes sismos ocurridos en México hasta el siglo XX, entre los que sobresalen los sismos de Jalisco (1932) y de Michoacán (1985). Finalmente, la Tabla 1.4 muestra los sismos ocurridos en México en lo que va del siglo XXI.

Tabla 1.1 Grandes sismos históricos con $M \geq 8$

Año	Fecha	Magnitud	Lugar
1960	22/ Mayo	9.5	Chile
1964	28/ Marzo	9.2	Bahía del Principe Guillermo, Alaska
2004	26/ Diciembre	9.1	Sumatra-Islas Andaman
2011	11/ Marzo	9	Cerca de la costa Este de Honshu, Japón
1952	4/ Noviembre	9	Kamchatka, Rusia
1868	13/ Agosto	9	Arica, Chile
1700	26/ Enero	9	Zona de subducción de Cascadia (Canadá y EUA)
2010	27/ Febrero	8.8	Cerca de la Costa de Bio-Bio, Chile
1906	31/ Enero	8.8	Frente a las costas de Esmeraldas, Ecuador
1965	4/ Febrero	8.7	Islas Pata, Alaska
1755	1/ Noviembre	8.7	Lisboa, Portugal
1730	8/ Julio	8.7	Valparaíso, Chile
2012	11/ Abril	8.6	Costa Oeste Norte de Sumatra
2005	28/ Marzo	8.6	Norte de Sumatra, Indonesia
1957	9/ Marzo	8.6	Islas Andean, Alaska
1950	15/ Agosto	8.6	Assam, Tíbet
2007	12/ Septiembre	8.5	Sur de Sumatra, Indonesia
1963	13/ Octubre	8.5	Islas Kuriles
1938	1/ Febrero	8.5	Mara de Banda, Indonesia
1923	3/ Febrero	8.5	Kamchatka, Rusia
1922	11/ Noviembre	8.5	Frontera Chile-Argentina
1896	15/ Junio	8.5	Sanriku, Japón
1687	20/ Octubre	8.5	Lima, Perú
2001	23/ Junio	8.4	Cerca de la costa de Perú
1933	2/ Marzo	8.4	Sanriku, Japón
1917	26/ Junio	8.4	Tonga
1905	9/ Julio	8.4	Mongolia
2006	15/ Noviembre	8.3	Islas Kuriles
2003	25/ Septiembre	8.3	Hokkaido, Japón
1994	4/ Octubre	8.3	Islas Kuriles
1977	19/ Agosto	8.3	Sur de Sumbawa, Indonesia
1958	6/ Noviembre	8.3	Islas Kuriles
1924	14/ Abril	8.3	Mindanao, Filipinas
1903	11/ Agosto	8.3	Isla Kytthera, Sur de Grecia

Tabla 1.1.1 Grandes sismos históricos con $M \geq 8$ (continuación)

Año	Fecha	Magnitud	Lugar
1897	12/ Junio	8.3	Assam, India
1877	10/ Mayo	8.3	Tarapacá, Chile
1843	8/ Febrero	8.3	Islas Leeward
2012	11/ Abril	8.2	Fuera de la costa este del norte de Sumatra
1996	17/ Febrero	8.2	Irian Jaya, Indonesia
1994	9/ Junio	8.2	Bolivia
1969	11/ Agosto	8.2	Islas Kuriles
1968	16/ Mayo	8.2	Costa este de Honshu, Japón
1959	4/ Mayo	8.2	Cerca de la costa este de Kamchatka
1948	24/ Enero	8.2	Panay, Filipinas
1943	4/ Junio	8.2	Illapel, Salamanca, Chile
1942	24/ Agosto	8.2	Fuera de la costa central de Perú
1941	25/ Noviembre	8.2	Loma Cabo San Vicente, Azores
1940	24/ Mayo	8.2	Callao, Perú
1938	10/ Noviembre	8.2	Islas Shumagin, Alaska
1919	30/ Abril	8.2	Tonga
1918	7/ Septiembre	8.2	Islas Kuriles
1908	12/ Diciembre	8.2	Fuera de la costa central de Perú
1906	17/ Agosto	8.2	Valparaíso, Chile
1835	20/ Febrero	8.2	Concepción, Chile
1821	10/ Julio	8.2	Camana, Perú
2009	29/ Septiembre	8.1	Islas Samoa
2007	13/ Enero	8.1	Este de Islas Kuriles
2007	1/ Abril	8.1	Islas Salomón
2004	23/ Diciembre	8.1	Norte de Isla Macquarie
1998	25/ Marzo	8.1	Islas Ballen
1989	23/ Mayo	8.1	Isla Macquarie
1979	12/ Diciembre	8.1	Cerca de la costa de Ecuador
1977	22/ Junio	8.1	Tonga
1974	3/ Octubre	8.1	Cerca de la costa central de Perú
1971	10/ Enero	8.1	Papúa, Indonesia
1966	17/ Octubre	8.1	Cerca de la costa de Perú
1957	4/ Diciembre	8.1	Gobi-Altay, Mongolia
1952	4/ Marzo	8.1	Hokkaido, Japón
1949	22/ Agosto	8.1	Islas Reina Carlota, B.C. Canadá
1946	20/ Diciembre	8.1	Nankaido, Japón
1946	1/ Abril	8.1	Isla Unimak, Alaska

Tabla 1.1 Grandes sismos históricos con $M \geq 8$ (continuación)

Año	Fecha	Magnitud	Lugar
1944	7/ Diciembre	8.1	Tonankai, Japón
1934	15/ Enero	8.1	Bihar, India
1932	3/ Junio	8.1	Jalisco, México
1911	15/ Junio	8.1	Islas Ryuku, Japón
2007	15/ Agosto	8	Cerca de la costa central de Perú
2006	3/ Mayo	8	Tonga
2000	16/ Noviembre	8	Nueva Irlanda, Papúa, Nueva Guinea
1995	9/ Octubre	8	Cerca de las costas de Jalisco, México
1995	30/ Julio	8	Cerca de la costa del norte de Chile
1986	7/ Mayo	8	Islas Andreanof, Islas Aleutianas, Alaska
1985	19/ Septiembre	8	Michoacán, México
1985	3/ Marzo	8	Fuera de la Costa Valparaíso, Chile
1976	16/ Agosto	8	Mindanao, Filipinas
1970	31/ Julio	8	Colombia
1946	4/ Agosto	8	Samaná, República Dominicana
1945	27/ Noviembre	8	Costa Makrán, Pakistán
1939	30/ Abril	8	Islas Salomón
1931	10/ Agosto	8	Xianjiang, China
1928	17/ Junio	8	Oaxaca, México
1920	20/ Septiembre	8	Islas Loyalty
1920	5/ Junio	8	Taiwán
1918	15/ Agosto	8	Mar de Célebes
1917	1/ Mayo	8	Islas Kermadec, Nueva Zelanda
1915	1/ Mayo	8	Islas Kuriles
1914	26/ Mayo	8	Oeste de Nueva Guinea
1907	21/ Octubre	8	Qaratog, Tayikistán
1903	4/ Enero	8	Tonga
1902	11/ Junio	8	Mar de Okhotsk
1899	10/ Septiembre	8	Bahía Yakutat, Alaska
1891	27/ Octubre	8	Mino-Owari, Japón
1855	23/ Enero	8	Wellington, Nueva Zelanda
1787	2/ Mayo	8	Puerto Rico
1668	17/ Agosto	8	Anatolia, Turquía
1556	23/ Enero	8	Shensi, China

Fuente: USGS.gov

Tabla.1.2 Grandes sismo con $M \geq 7$, siglo XXI

Año	Fecha	Magnitud	Lugar
2004	26/ Diciembre	9.1	Fuera de la costa oeste norte de Sumatra
2011	3/ Noviembre	9	Cerca de la costa este de Honshu, Japón
2010	27/ Febrero	8.8	Fuera de la costa de Maule, Chile
2012	11/ Abril	8.6	Fuera de la costa oeste norte de Sumatra
2005	28/ Marzo	8.6	Norte de Sumatra, Indonesia
2007	9/ Diciembre	8.5	Sur de Sumatra, Indonesia
2001	23/ Junio	8.4	Cerca de la costa de Perú
2006	15/ Noviembre	8.3	Islas Kuriles
2003	25/ Septiembre	8.3	Hokkaido, Japón
2009	29/ Septiembre	8.1	Islas Samoa
2007	15/ Agosto	8	Cerca de la costa central de Perú
2000	16/ Noviembre	8	Nueva Irlanda, Papúa, Nueva Guinea
2008	5/ Diciembre	7.9	Este de Schuan, China
2002	11/ Marzo	7.9	Alaska Central
2000	6/ Abril	7.9	Sur de Sumatra, Indonesia
2001	26/ Enero	7.7	Gujarat, India
2005	10/ Agosto	7.6	Pakistán
2009	30/ Septiembre	7.5	Sur de Sumatra, Indonesia
2010	1/ Diciembre	7	Haití

Tabla.1.3 Grandes sismos en México hasta el siglo XX

Año	Fecha	Magnitud	Lugar
1985	19/ Septiembre	8.1	Michoacán
1932	6/ Marzo	8.1	Jalisco
1957	28/ Julio	7.9	Guerrero
1932	18/ Junio	7.8	Colima
1931	15/ Enero	7.8	Oaxaca
1907	15/ Abril	7.7	Guerrero
1911	7/ Junio	7.7	Guerrero
1999	30/ Septiembre	7.5	Oaxaca
1887	3/ Marzo	7.4	Sonora
1965	23/ Agosto	7.3	Oaxaca
1962	19/ Mayo	7.1	Guerrero
1968	2/ Agosto	7.1	Oaxaca
1999	15/ Junio	7	Puebla
1962	11/ Mayo	7	Guerrero
1964	6/ Julio	6.9	Guerrero
1959	26/ Agosto	6.8	Veracruz
1979	15/ Octubre	6.4	Valle de Mexicali

Tabla 1.4 Sismos en México en el siglo XXI

Año	Fecha	Magnitud	Lugar
2003	22/ Enero	7.6	Costas de Colima
2012	20/ Marzo	7.4	Oaxaca
2010	4/ Abril	7.2	Baja California
2012	12/ Abril	6.9	Santa Isabel, Baja California
2009	3/ Agosto	6.9	Golfo de California
2011	7/ Abril	6.6	Veracruz
2006	4/ Enero	6.6	Golfo de California
2012	11/ Abril	6.5	Michoacán
2011	11/ Diciembre	6.5	Guerrero
2008	12/ Febrero	6.5	Oaxaca
2012	2/ Abril	6	Quajinicuilapa, Guerrero
2009	30/ Diciembre	5.9	Baja California
2006	11/ Agosto	5.9	Michoacán
2002	22/ Febrero	5.7	Mexicali
2004	15/ Junio	5.1	Costas de Baja California
2002	10/ Diciembre	4.8	Mexicali, Baja California
2003	11/ Septiembre	3.7	Mexicali, Baja California

Las Tablas 1.2, 1.3 y 1.4 se obtuvieron de la Fuente: USGS.gov

Gran parte de México está sujeta a la ocurrencia de sismos severos, razón por la cual uno de los problemas de importancia nacional es el relacionado con los sismos y sus efectos sobre el comportamiento de las obras de ingeniería civil. Los sismos representan para la ingeniería civil un riesgo importante que debe tomarse en cuenta en el diseño de toda obra.

En muchos proyectos, el riesgo de falla por sismo suele dominar otras consideraciones de diseño.

1.1 Ingeniería sísmica

Los orígenes de la ingeniería sísmica se remontan a Japón desde el siglo XIX, esto como consecuencia de los sismos de Edo (1855) y Mino-Awari (1891); en los Estados Unidos de Norteamérica, el sismo de San Francisco (1906); y en Italia, el sismo de Messina (1908).

La ingeniería sísmica (earthquake engineering) trata con los efectos de los sismos sobre los seres humanos y

las construcciones, así como con los métodos para reducir tales efectos.

La naturaleza de un sismo intenso, los factores que pueden crear un desastre sísmico (Figura 1.2) y la importancia de prevenir tal desastre, son aspectos de vital importancia.

En general, los sismos pueden dañar las obras de ingeniería civil de tres diferentes maneras:

- y Provocando el fallamiento del terreno
- y Produciendo efectos que pueden afectar un obra o estructura
- y Sacudiendo el terreno sobre el que están desplantadas las obras

Los factores que han impulsado el desarrollo de la ingeniería sísmica son:

- y La necesidad de diseñar y construir obras civiles críticas en zonas sísmicas
- y El aumento de estaciones sísmicas
- y El desarrollo de mejores instrumentos, con un rango dinámico, en frecuencia y amplitud que permite el registro de sismos intensos

- y La disponibilidad de un sistema de tiempo absoluto, que permite la correlación entre registros de diversas estaciones (UT)

Ahora bien, la sismología (seismology), el estudio científico de los sismos, ha contribuido grandemente con el quehacer de la ingeniería sísmica. Las interacciones entre la sismología y la ingeniería sísmica continúan hasta la fecha y se robustecen cada vez más.

Las Figuras 1.1 a 1.6 ilustran los daños que los sismos pueden provocar en las obras de ingeniería civil. Las Figuras 1.7 a 1.11 muestran algunos daños que los sismos han provocado en la ciudad de México.

1.2 Ingeniería sísmica geotécnica

La Ingeniería sísmica geotécnica (Geotechnical earthquake engineering) se ocupa del diseño y construcción de estructuras geotécnicas resistentes a la acción de los sismos.

La ingeniería sísmica geotécnica requiere los conocimientos de la geología, la sismología, la ingeniería sísmica y la dinámica de suelos.

El punto de partida de la ingeniería sísmica geotécnica es determinar el sismo de diseño (design earthquake). Con base en el sismo de diseño, se efectúan, entre otras, las siguientes investigaciones:

- y Asentamientos inducidos por sismos
- y Liquefacción de arenas
- y Análisis de la estabilidad de taludes
- y Análisis de la estabilidad de estructuras de retención
- y Diseño de cimentaciones sometidas a sismos fuertes
- y Efectos de sitio, amplificación y resonancia de las estructuras

1.2.1 Asentamientos inducidos por sismos

La acción de los sismos puede causar asentamientos considerables en depósitos de suelos granulares secos.

Durante el sismo de San Fernando, Estados Unidos, ocurrido el 9 de febrero de 1971, se tuvieron asentamientos de edificios, los cuales variaron de 10 a 15 cm (Seed y Silver, 1972).

Daños severos de grandes estructuras en Skopje, República de Macedonia durante el sismo de 1963, fueron atribuidos a los asentamientos diferenciales causados por la densificación de lentes de arena suelta bajo las cimentaciones (Seed y Silver, 1972).

Las Figuras 1.12 y 1.13 muestran edificios que sufrieron asentamientos durante el sismo de Kobe, Japón del 17 de enero de 1995. Las Figuras 1.14 y 1.15 ilustran asentamientos súbitos de edificios en la ciudad de México durante el sismo del 19 de septiembre de 1985.

1.2.2 Liquefacción de arenas

Probablemente uno de los efectos más costosos y espectaculares que se puede encontrar en ingeniería sísmica geotécnica se debe al fenómeno de la licuación de arenas. Las condiciones bajo las cuales los suelos (como parte de la cimentación o como material de construcción) pierden una parte significativa de su resistencia, lo que conduce a fallas inducidas por sismos, constituyen un campo fértil de investigación y de gran utilidad para la práctica profesional de la ingeniería civil.

El fenómeno de licuación de arenas es causado por el desarrollo de grandes presiones en el agua que ocupa los poros del suelo. Estas grandes presiones de poro son inducidas cuando se aplican a la masa de suelo esfuerzos o deformaciones de cortante, en condiciones tales que no se permite su disipación inmediata, es decir, prácticamente a volumen constante. La forma de aplicación de los esfuerzos cortantes puede ser monotónica, cíclica o aleatoria.

Los factores que influyen en la ocurrencia de la licuación de arenas, se describen con detalle por Díaz-Rodríguez (2005).

La Figura 1.16 presenta los daños causados por la licuación de arenas en Niigata, Japón, durante el sismo ocurrido el 16 de junio de 1964 ($M = 7.4$). En la Figura 1.17 se muestra el asentamiento de un edificio debido a licuación, ocurrido en Adapazri, Turquía, el 17 de agosto de 1999 ($M = 7.4$).

1.2.3 Estabilidad de taludes

Quando ocurre un sismo se puede presentar inestabilidad de taludes y terraplenes debido a las fuerzas horizontales y verticales inducidas por el sismo. En general, las fuerzas horizontales aumentan los esfuerzos actuantes y disminuyen los esfuerzos normales, lo que ocasiona un efecto doble sobre el factor de seguridad, que lo disminuye.

El sismo de Alaska de 1964 provocó grandes movimientos de terreno (70 millones de m^3), se estima que el 56% del costo total de los daños lo ocasionaron los deslizamientos (Youd, 1978; Wilson y Keefer, 1985; Kobayashi, 1981).

Las Figuras 1.22 a 1.25 muestran los deslizamientos ocurridos en la Presa Lower San Fernando, causados por el sismo de San Fernando del 9 de febrero de 1971. Durante este sismo, 58 personas perdieron la vida y 2,400 más resultaron heridas, 1,500 edificios fueron declarados inseguros, se estima el daño en 500 millones de dólares (Seed, 1979). Este caso merece especial importancia, debido a que 5 años antes del sismo de San Fernando, se evaluó la seguridad de la presa con la conclusión de que era segura ante la acción sísmica.

La cortina de la Presa Upper San Fernando, de 43 m de altura, sufrió deslizamientos debido a licuación (pérdida de resistencia por carga sísmica) de una zona del relleno hidráulico de la base del respaldo de aguas arriba. Los movimientos sísmicos provocaron el deslizamiento del talud de aguas arriba y de la parte baja del talud aguas abajo, y dejaron un bordo libre de 1.5 m, lo cual significó una situación muy precaria, razón por la cual requirió el desalojo de 80,000 personas que habitaban aguas abajo de la presa. La cortina de la presa presentó severas grietas longitudinales, que corrían a lo largo de toda la longitud de la presa.

Como resultado de los movimientos sísmicos, la cresta de la Presa Upper San Fernando se movió 1.5-1.8 m hacia aguas abajo y se asentó 0.9 m, en tanto que el deslizamiento hacia aguas arriba fue de 21 m.

Una conclusión derivada de los análisis pseudoestáticos efectuados con un coeficiente sísmico de 0.15, indicó que se requería un coeficiente sísmico más alto, del orden de 0.2-0.3 para la Presa Lower San Fernando y de 0.5 para la Upper San Fernando. Es decir, que las presas que tengan susceptibilidad a licuación, un

coeficiente sísmico de 0.15 no proporciona las bases adecuadas para evaluar su estabilidad sísmica. Las Figuras 1.26 y 1.27 muestran los deslizamientos ocurridos en la Presa Niteko, Kobe, Japón, causados durante el sismo del 17 de enero de 1995.

1.2.4 Estabilidad de estructuras de retención durante sismos

Las estructuras de retención, como los muros y tablestacas, son elementos claves en puertos, sistemas de transporte y otras instalaciones importantes del país. Los sismos causan graves daños a este tipo de estructuras, ya que provocan deformaciones permanentes e incluso la falla total.

La Figura 1.28 muestra estructuras de retención que sufrieron daños durante el sismo de Kobe del 17 de enero de 1995.

1.2.5 Capacidad de carga de cimentaciones sometidas a sismos intensos

Los sismos severos pueden inducir fallas por disminución de la capacidad de carga del terreno. Se presentan dos casos:

- y En **suelos granulares**, los cuales están sometidos a sismos fuertes o se densifican o se licúan.
- y En **suelos arcillosos**, el factor principal en el problema es la determinación de la resistencia no drenada S_u . La reducción de la resistencia en suelos de baja sensibilidad ($S_u \leq 4$) es pequeña; en cambio, en suelos de alta sensibilidad es alta ($S_u \geq 8$).

1.2.6 Amplificación y resonancia por sismos

Quando un tren de ondas planas viaja de un medio de módulo de elasticidad grande hacia otro medio de módulo de elasticidad pequeño, los desplazamientos y aceleraciones se amplifican. Por tanto, puede esperarse que si un tren de ondas sísmicas se propaga a través de

roca hacia arriba y pasa a un material tal como arcilla, se amplificará el movimiento. Si la onda sísmica se propaga de roca hacia un depósito estratificado, el comportamiento es más complejo y difícil de predecir debido a las múltiples reflexiones y refracciones.

Un aspecto muy importante relacionado con el subsuelo es su tendencia natural a oscilar ante una perturbación de tipo sísmico; una manera de medir esta tendencia es a través del periodo natural de vibración en segundos. Si la llegada a una localidad de las ondas de esfuerzo provocadas por un sismo presentan un periodo dominante muy cercano al natural de vibración del suelo, y si además en ese lugar hay estructuras cuyo periodo natural de vibración sea cercano al periodo de vibración del suelo, el movimiento experimenta una retroalimentación en forma creciente que origina oscilaciones a valores muy grandes, y da como resultado el fenómeno que se conoce como **resonancia**, o sea, un movimiento excesivo.

1.3 Dinámica de suelos

La dinámica de suelos (soil dynamics) trata sobre las propiedades y el comportamiento de los suelos sometidos a carga dinámica, cíclica o aleatorias.

En general, la dinámica de suelos tiene un vasto campo de aplicación en los problemas de la ingeniería civil, las principales áreas de aplicación son:

- y Propiedades dinámicas de los suelos
- y Efecto de explosiones
- y Densificación mediante vibraciones o impacto
- y Liquefacción de suelos granulares
- y Vibraciones inducidas por tránsito de vehículos
- y Efecto de las condiciones locales del sitio
- y Diseño de cimentaciones para maquinaria

1.4 La observación sísmica de obras hidráulicas

Puede afirmarse que el método observacional es característico de la ingeniería moderna, y ésta como tal requiere la observación y el registro del comportamiento de las obras, así como el control de las variables y

factores relevantes; exige además, el análisis e interpretación de las mediciones.

El objetivo de la instrumentación sísmica es obtener información oportuna y confiable del comportamiento de las obras hidráulicas durante la ocurrencia de sismos intensos, mediante la colocación de instrumentos de medición, así como el registro de todo evento sísmico con su correspondiente interpretación.

La instrumentación sísmica permite conocer las condiciones de seguridad de la obra en el momento de ocurrir un evento sísmico. Asimismo ha coadyuvado a mejorar nuestro conocimiento sobre la naturaleza de los sismos y sus efectos sobre las obras de ingeniería civil. Por lo mismo, todo estudio importante se debe basar en el conocimiento del movimiento del terreno durante un sismo destructivo.

La importancia de registrar con exactitud y precisión los movimientos del terreno producidos por un terremoto es necesaria para el estudio de la propagación y atenuación de las ondas sísmicas, la localización de los epicentros, la determinación de la magnitud, entre otros.

Por tanto, la instrumentación sísmica es un objetivo de gran interés, tanto para la sismología como para la ingeniería sísmica. El comportamiento sísmico de una estructura proporciona información vital para la evaluación crítica de las teorías, los códigos y las prácticas usadas en el diseño sísmico.

1.5 Propósito del manual

El propósito de este manual es proporcionar una orientación a los ingenieros responsables del monitoreo y análisis del comportamiento de las obras hidráulicas. Cada sistema de instrumentación es único, por tanto, es necesario hacer uso del juicio en ingeniería para aplicar con éxito las recomendaciones que aquí se expresan.



Figura 1.1 Placas tectónicas de la corteza terrestre



Figura 1.2 Colapso de la autopista Hanshin, en Kobe, Japón, durante el sismo del 17 de enero de 1995, $M = 6.69$ (Fotografía de la Kobe Collection NISEE, University of California, Berkeley)



Figura 1.3 Colapso del puente Showa debido a licuación, en Niigata, Japón, durante el sismo del 16 de junio de 1964, $M = 7.4$ (Fotografía de la Godden Collection NISEE, University of California, Berkeley)



Figura 1.4 Colapso de la rampa de acceso al transbordador Higashi-Kobe, durante el sismo del 17 de enero de 1995 (Fotografía de la Kobe Collection NISEE, University of California, Berkeley)

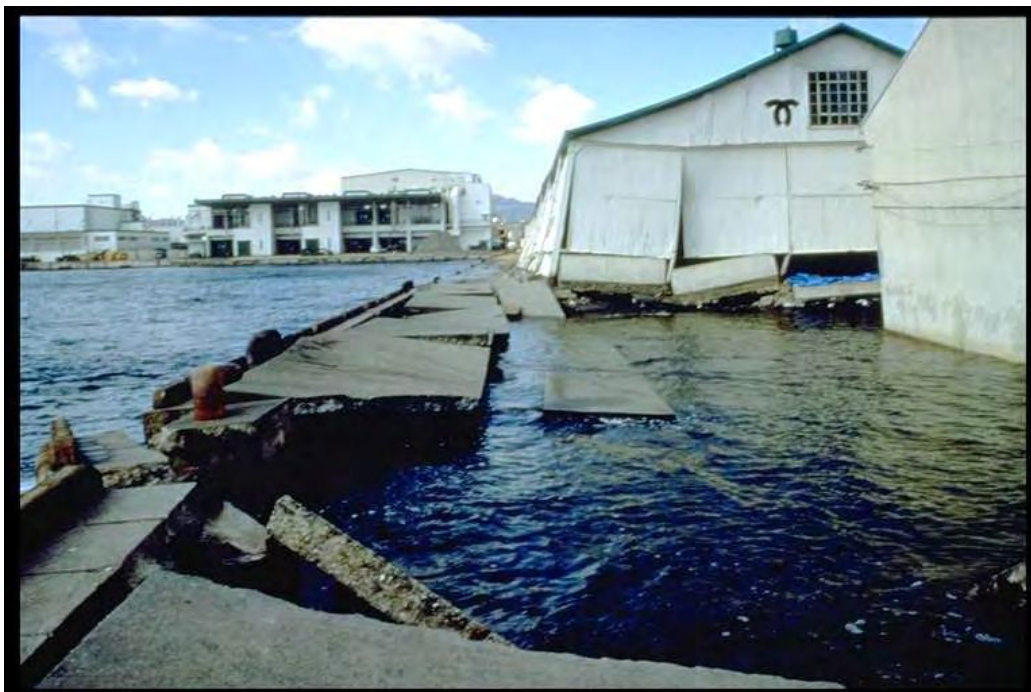


Figura 1.5 Daños en el muelle No.2 Hyogo, durante el sismo del 17 de enero de 1995 (Fotografía de la Kobe Collection NISEE, University of California, Berkeley)

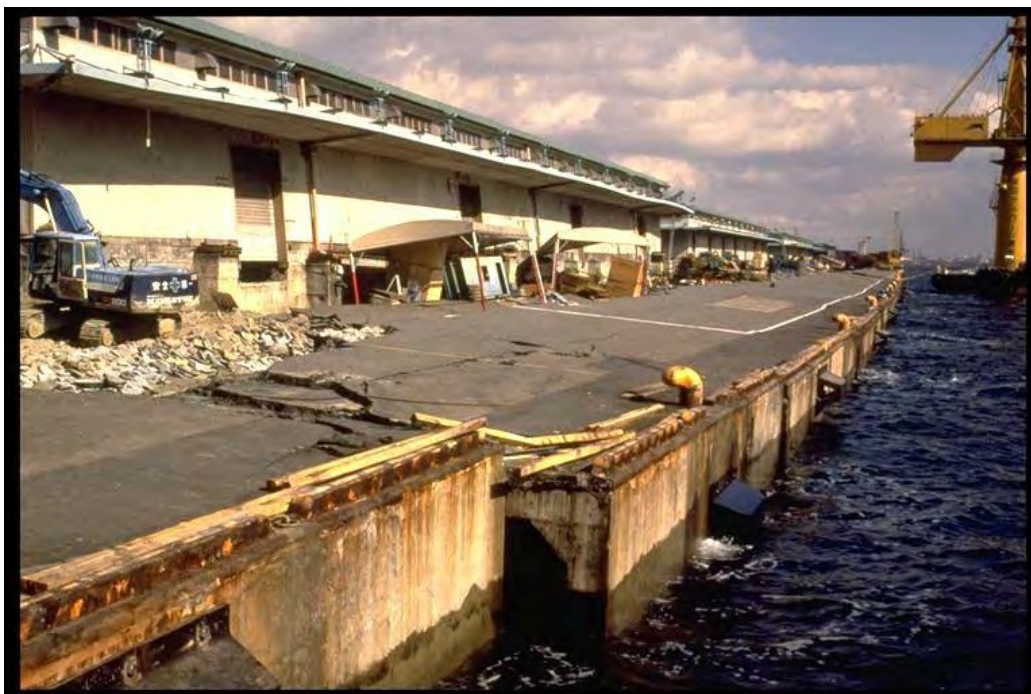


Figura 1.6 Desplazamientos laterales de las paredes del muelle Port Island, Kobe, Japón (Fotografía de la Kobe Collection NISEE, University of California, Berkeley)



Figura 1.7 Caída del Ángel de la columna de la Independencia en ciudad de México, sismo del 28 de julio de 1957



Figura 1.8 Colapso de edificios en la ciudad de México, sismo en México, 19 de septiembre de 1985

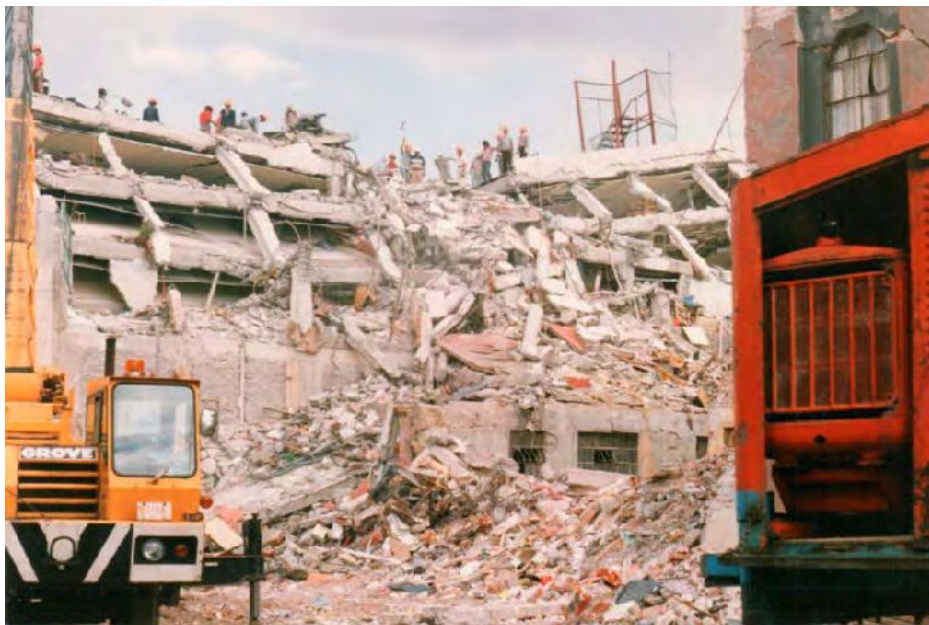


Figura 1.9 Colapso de edificios en la ciudad de México, sismo del 19 de septiembre de 1985



Figura 1.10 Colapso de edificio en la ciudad de México, debido a falla de cimentación por capacidad de carga, sismo del 19 de septiembre de 1985

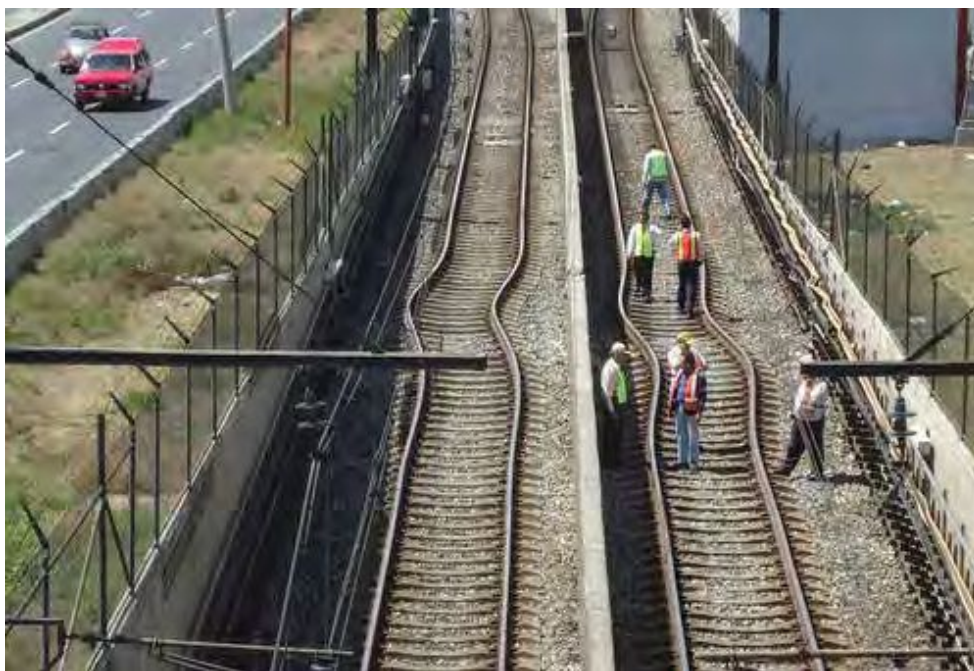


Figura 1.11 Vías del tren suburbano de la ciudad de México, sismo del 20 de marzo de 2012 (Fuente: U.S Geological Survey Photographic Library)



Figura 1.12 Asentamiento de edificios, en Kobe, Japón, durante el sismo del 17 de enero de 1995, $M = 6.69$ (Fotografía de la Kobe Collection NISEE, University of California, Berkeley)



Figura 1.13 Asentamiento de edificios, en Kobe, Japón durante el sismo del 17 de enero de 1995, $M = 6.69$ (Fotografía de la Kobe Collection NISEE, University of California, Berkeley)



Figura 1.14 Asentamiento súbito de edificio en la ciudad de México, durante el sismo del 19 de septiembre de 1985



Figura 1.15 Asentamiento súbito de edificio en la ciudad de México, durante el sismo del 19 de septiembre de 1985

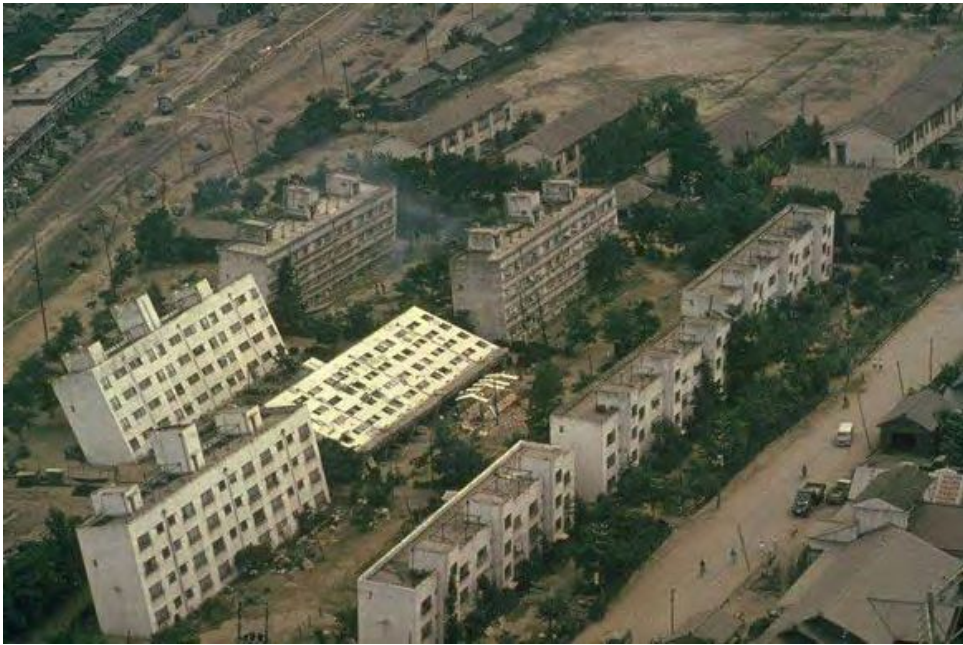


Figura 1.16 Volteo de edificios, en Niigata, Japón, durante el sismo del 16 de junio de 1964, $M = 7.4$
(Fotografía de la Godden Collection NISEE, University of California, Berkeley)



Figura 1.17 Asentamiento de edificio debido a licuación, en Adapazari, Turquía, durante el sismo del 17 de agosto de 1999, $M = 7.4$
(Fotografía de la Izmit Collection NISEE, University of California, Berkeley)

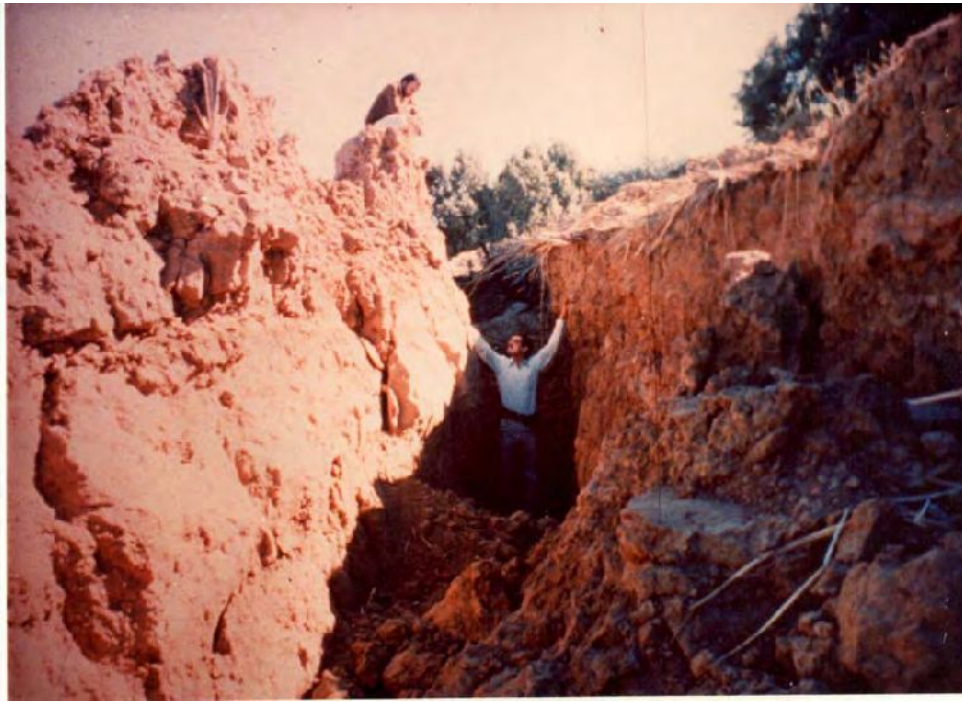


Figura 1.18 Grietas en el terreno debido a licuación, en el distrito de riego No. 14, Mexicali, Baja California, durante el sismo del 15 de octubre de 1979 ($M = 6.4$)



Figura 1.19 Vía de tren doblada debido a licuación, en el distrito de riego No. 14, Mexicali, Baja California, durante el sismo del 15 de octubre de 1979 ($M = 6.4$)



Figura 1.20 Daños debidos a la licuación, en el canal Nuevo Delta, en el distrito de riego No. 14, Mexicali, Baja California, durante el sismo del 15 de octubre de 1979 ($M = 6.4$)



Figura 1.21 Daños a la infraestructura de riego, en el distrito de riego No. 14, Mexicali, Baja California, durante el sismo del 4 de abril de 2010 ($M = 7.2$)



Figura 1.22 Daños causados al almacenamiento Lower Van Norman
(Fotografía de la Steinbrugge Collection NISEE, University of California, Berkeley)

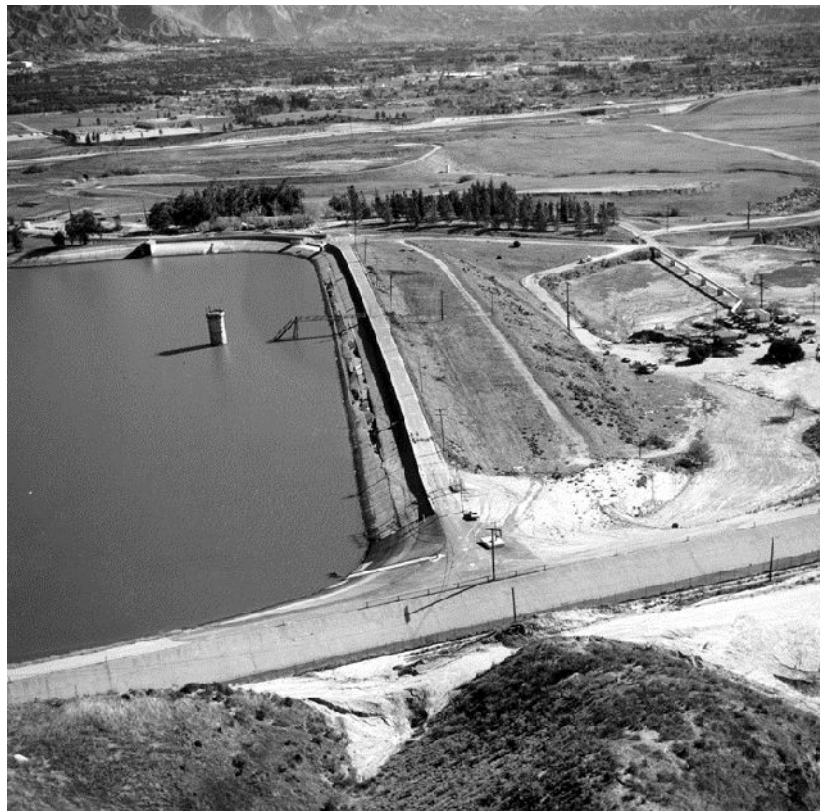


Figura 1.23 Daños causados a la cara de concreto de la Presa Upper Van Norman
(Fuente: U.S Geological Survey Photographic Library)



Figura 1.24 Deslizamiento en el almacenamiento Lower Van Norman (Fuente: U.S Geological Survey Photographic Library)



Figura 1.25 Deslizamiento en el almacenamiento Lower Van Norman (Fuente: U.S Geological Survey Photographic Library)



Figura 1.26 Falla del talud de aguas arriba de la Presa Niteko, Kobe Japón durante el sismo del 17 de enero de 1995, $M = 6.69$ (Fotografía de la Kobe Geotechnical Collection NISEE, University of California, Berkeley)



Figura 1.27 Falla de la cresta de la Presa Niteko, Kobe, Japón, durante el sismo del 17 de enero de 1995, $M = 6.69$ (Fotografía de la Kobe Geotechnical Collection NISEE, University of California, Berkeley)



Figura 1.28 Colapso de una grúa debido a movimientos de 2 m de las estructuras de retención durante el sismo de Kobe del 17 de enero de 1995 (Fotografía de la Kobe Geotechnical Collection, EERC, University of California, Berkeley)

Capítulo 2

Conceptos básicos

Este capítulo tiene como objetivo definir los conceptos y la terminología usada en el presente manual. Se consideró conveniente incluir la traducción en inglés de las denominaciones de los conceptos (al citarse por primera vez) para facilitar al usuario la lectura y comprensión de la literatura en dicho idioma.

2.1 Vibraciones mecánicas

Una vibración mecánica es un fenómeno dinámico, su amplitud varía con el tiempo. Una vibración es una oscilación en torno a una posición de equilibrio. La Figura 2.1 muestra un metrónomo, instrumento consistente en un péndulo cuya frecuencia (número de oscilaciones en una unidad de tiempo) se puede regular entre 40 y 208 ciclos por minuto. Otro ejemplo muy simple de esta clase de movimiento son las vibraciones hacia abajo y hacia arriba de una masa suspendida de un resorte o de un péndulo del reloj de pared, que repite su oscilación a intervalos regulares, lo cual nos permite medir con precisión el tiempo.

Las vibraciones mecánicas se pueden dividir en tres tipos: armónicas, periódicas y no-periódicas o transitorias.

Las vibraciones pueden ser determinísticas, si se conoce su amplitud con respecto al tiempo. Sin embargo, existen otros fenómenos físicos que no tienen una descripción determinística con respecto al tiempo, como son las vibraciones producidas por la ocurrencia de un sismo, estas vibraciones son aleatorias (random).

Uno de los sistemas mecánicos más simples que tiene movimiento periódico es el que se muestra en la Figura 2.2, el cual consiste en una masa, m , que se mueve horizontalmente sobre una superficie sin fricción. La masa está unida a un resorte sin masa con una constante k . Nótese el origen de coordenadas para medir los desplazamientos $u(t)$ del sistema.

La vibración (Figura 2.3) del sistema elemental es una oscilación armónica (se llaman funciones armónicas a las funciones trigonométricas seno y coseno), el movimiento se repite para un tiempo definido, llamado **periodo de vibración**, T . La expresión de esta función es $f(q) = \sin q$, también se conoce como **función armónica simple**.

Como la definición de $\sin q = \text{vertical/diagonal}$, la diagonal puede tomar diferentes valores, a los que se llama **amplitud**, A . Por tanto, se puede escribir:

$$T(f) = \frac{60}{f}$$

Las unidades del periodo, T , son segundos, que es el tiempo que tarda en completar un giro de 360° . Al número de giros que se completan en 1 s, se le llama **frecuencia**, f , y se expresa en Hz (hertz). La velocidad angular w , se define como:

$$w = \frac{d\theta}{dt}$$

Entonces, una oscilación sinusoidal se puede escribir como:

$$f(t) = A \sin wt$$

Una vibración sinusoidal está caracterizada por una amplitud A , y por una frecuencia angular w (rad/s). La relación entre la frecuencia angular y el periodo se expresa mediante:

$$w = \frac{2\pi}{T} \quad \text{y} \quad T = \frac{2\pi}{w}$$

La Figura 2.4 muestra la gráfica de la expresión $f(t) = 15 \sin(12.566 t)$; en donde:

$$A = 15; w = 12.566 \text{ rad/s}; (f = 2 \text{ Hz}; T = 0.5 \text{ s})$$

Ángulo de fase. Considere dos movimientos vibratorios denotados por:

$$f_1(t) = A \sin wt$$

$$f_2(t) = A \sin(wt + f)$$

Los dos movimientos tienen la misma frecuencia angular w y la misma amplitud A , pero difieren en un ángulo f , denominado **ángulo de fase** (phase angle), lo que significa un corrimiento de la función (f_2) con respecto a la función (f_1), como se puede apreciar en la Figura 2.5. El corrimiento puede ser hacia la izquierda o hacia la derecha, según el signo de f . Nótese que un corrimiento $f = 90^\circ$ de la función seno es la función coseno.

2.2 Respuesta de un sistema de un grado de libertad amortiguado

La vibración de un cuerpo está gobernada por su inercia, su rigidez y su amortiguamiento. El sistema más simple para estudiar vibraciones con amortiguamiento es el **sistema elemental de un grado de libertad amortiguado** (SE1GLA), el cual se ilustra en la Figura 2.6.

El SE1GLA consta de tres elementos:

- y La **masa**, m , representa la cantidad de materia. La masa interviene en los sistemas dinámicos a través de la segunda ley de Newton:

$$F = ma$$

- y La **elasticidad**, representada por un resorte, responsable de proporcionar la fuerza restauradora, es decir, aquella fuerza encargada de regresar o restaurar el sistema a su posición de equilibrio. La fuerza restauradora interviene en los sistemas dinámicos mediante la expresión:

$$F = -kx$$

- y El **amortiguamiento**, representado por un amortiguador, es responsable de disipar la energía. El tipo de amortiguamiento más común utilizado en sistemas elementales es de tipo viscoso, el cual tiene la expresión:

$$F = -c\dot{x}$$

En donde:

$$F = \text{Fuerza}$$

$$m = \text{masa}$$

$$k = \text{rigidez}$$

La ecuación de movimiento de un SE1GLA se expresa:

$$m \ddot{u}(t) + c \dot{u}(t) + k u(t) = F(t)$$

2.2.1 Vibración libre de un SE1GLA

La solución de la ecuación de movimiento para el caso de vibración libre $F(t) = 0$ y $z < 1$, se expresa:

$$u_h(t) = \frac{1}{\omega_d} \left[\dot{u}_0 \cos \omega_d t - \omega_n u_0 \sin \omega_d t \right]$$

Los detalles de la deducción de esta expresión se pueden consultar en Díaz-Rodríguez (2005). En donde:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \omega_d = \omega_n \sqrt{1 - z^2}$$

$$u_h(t) = \frac{1}{\omega_d} \left[\dot{u}_0 \cos \omega_d t - \omega_n u_0 \sin \omega_d t \right]$$

$u_h(t)$ = desplazamiento del SE1GLA en vibración libre

z = fracción del amortiguamiento crítico

u_0 = desplazamiento inicial

$\dot{u}_0$ = velocidad inicial

La Figura 2.7 compara dos casos:

y La función $u_1(t)$ caracterizada por

$$u_1(t) = \frac{1}{\omega_d} \left[\dot{u}_0 \cos \omega_d t - \omega_n u_0 \sin \omega_d t \right]; \quad \eta = 10\%; \quad u_0 = 0; \quad \dot{u}_0 = 50 \text{ mm/s}$$

y La función $u_2(t)$ caracterizada por

$$u_2(t) = \frac{1}{\omega_d} \left[\dot{u}_0 \cos \omega_d t - \omega_n u_0 \sin \omega_d t \right]; \quad \eta = 20\%; \quad u_0 = 0; \quad \dot{u}_0 = 50 \text{ mm/s}$$

Nótese el efecto del amortiguamiento tanto en las amplitudes de vibración como en el tiempo requerido para que el sistema regrese al reposo. Asimismo, el efecto de la velocidad inicial, $\dot{u}_0$.

La Figura 2.8 compara otros dos casos:

y La función $u_1(t)$ caracterizada por

$$u_1(t) = \frac{1}{\omega_d} \left[\dot{u}_0 \cos \omega_d t - \omega_n u_0 \sin \omega_d t \right]; \quad \eta = 10\%; \quad u_0 = 0; \quad \dot{u}_0 = 50 \text{ mm/s}$$

y La función $u_2(t)$ caracterizada por

$$u_2(t) = \frac{1}{\omega_d} \left[\dot{u}_0 \cos \omega_d t - \omega_n u_0 \sin \omega_d t \right]; \quad \eta = 20\%; \quad u_0 = 50 \text{ mm}; \quad \dot{u}_0 = 50 \text{ mm/s}$$

Nótese el gran efecto del desplazamiento inicial, $u_0 = 50 \text{ mm}$, además de lo señalado en la figura anterior.

2.2.1.1 Decremento logarítmico

Con base en lo anterior, el amortiguamiento de un SE1GLA se puede determinar experimentalmente a partir de un registro de vibración libre del sistema.

Se denomina decremento logarítmico a la relación:

$$\Delta = \ln \frac{u_1}{u_2}$$

En donde u_1 y u_2 son dos amplitudes de vibración, separadas un periodo T .

Lo que da origen a la expresión:

$$\eta = \frac{\Delta}{\sqrt{4 \cdot \pi^2 + \Delta^2}}$$

Una expresión aproximada para calcular el amortiguamiento es:

$$\eta = \frac{\Delta}{2\pi}$$

Los detalles de la deducción de estas expresiones se pueden consultar en Díaz-Rodríguez (2005). La comparación de ambas expresiones se muestra en la Figura 2.9, donde se puede apreciar que para $\Delta \leq 2$ los resultados con ambas expresiones son iguales.

Ejemplo del cálculo de amortiguamiento: la Figura 2.10 muestra una gráfica de vibración libre, el procedimiento consiste en medir el decaimiento de dos amplitudes para determinar el amortiguamiento z :

1. Se miden dos ordenadas: $u_1 = 2.4 \text{ mm}$ y $u_2 = 1.3 \text{ mm}$, separadas un periodo.

2. Se obtiene d:

$$\gamma = \frac{u_1}{u_2} = \frac{2.4}{1.3} = \ln 1.846 = 0.613$$

3. Se calcula z:

$$\eta = \frac{0.613}{2z} = 0.0976$$

El amortiguamiento del sistema es 9.76%.

2.2.2 Vibración forzada de un SIELLA

Para el caso de un SIELLA sometido a una fuerza armónica $F(t) = F \cos(\Omega t)$, la solución particular $u_p(t)$ se expresa:

$$u_p(t) = \frac{F}{k \sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\eta r)^2}} \cos(\Omega t - \theta)$$

Los detalles de la deducción de esta expresión se pueden consultar en Díaz-Rodríguez (2005). En donde:

F = amplitud de la fuerza forzadora

Ω = frecuencia angular forzadora

θ = ángulo de fase

Se define como **factor de amplificación dinámica** a la relación:

$$H(\Omega) = \frac{u_{p \text{ máx}}}{u_{\text{est}}}$$

Donde u_{est} es el desplazamiento provocado por la fuerza F , que actúa estáticamente:

$$u_{\text{est}} = \frac{F}{k}$$

Por tanto:

$$H(\Omega) = \frac{1}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\eta r)^2}}$$

y

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{2\eta r}{1 - r^2} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{2\eta \Omega}{\omega_n^2 - \Omega^2} \right)$$

La Figura 2.11 muestra la variación del factor de amplificación dinámica $H(\Omega)$ con la relación de frecuencias, $r = \Omega/\omega_n$, para varios valores del amortiguamiento η .

Se pueden apreciar las siguientes características:

1. Para un sistema no amortiguado ($\eta=0$), $H(\Omega)$ $\rightarrow \infty$ cuando $\Omega/\omega_n \rightarrow 1$.
2. Para Ω/ω_n pequeñas, menores de 0.5, $H(\Omega)$ es ligeramente superior a 1.
3. Para Ω/ω_n comprendidas entre 0.5 y 1.40, el factor de amplificación dinámica alcanza sus valores máximos, dependiendo del amortiguamiento.
4. Para Ω/ω_n grandes, mayores de 1.40, el factor de amplificación dinámica decrece, es decir, si $\Omega/\omega_n \rightarrow \infty$, $H(\Omega) \rightarrow 0$, la inercia del sistema domina la respuesta.

La Figura 2.12 muestra la variación del ángulo de fase con la relación de frecuencias y el amortiguamiento. Se pueden apreciar las siguientes características:

1. Para un sistema con $\eta = 0$, el ángulo de fase es cero para $0 < r < 1$ y 180° para $r > 1$, esto implica que la excitación y la respuesta están en fase para $0 < r < 1$ y fuera de fase para $r > 1$.
2. Para $\eta > 0$ y $0 < r < 1$, el ángulo de fase está $0 < \theta < 90^\circ$, lo que implica que la respuesta se atrasa a la excitación.
3. Para $\eta > 0$ y $r > 1$, el ángulo de fase está $90^\circ < \theta < 180^\circ$, lo que implica que la respuesta se adelanta a la excitación.

2.3 Fundamentos de la propagación de ondas

Una perturbación en el interior de un medio elástico, homogéneo e isótropo se propaga mediante dos tipos de ondas: las ondas longitudinales P y las ondas transversales S (ondas de cuerpo). En la superficie de un semiespacio elástico se propaga un tercer tipo de ondas, las ondas superficiales, que comprenden las de Love y las de Rayleigh.

La propagación de ondas, en forma muy simple, se puede visualizar cuando se arroja una piedra a un lago (Figura 2.13). En este caso, el frente de onda son círculos concéntricos que viajan alejándose del centro.

2.3.1 Ondas longitudinales

Dos ejemplos muy simples de esta clase de movimiento son las ondas que se propagan en una columna de aire o en un resorte, el resorte se comprime y se extiende a lo largo de la dirección del movimiento. La Figura 2.14 ilustra la propagación de las ondas longitudinales, el desplazamiento de las partículas se realiza a lo largo de la misma línea de propagación de la onda.

Quando la perturbación se propaga en el interior de un medio elástico, homogéneo e isótropo, mediante la compresión o dilatación de éste, pero sin que ocurra distorsión, se originan trenes de ondas longitudinales, cuya expresión matemática es:

$$\frac{\partial^2 \epsilon}{\partial t^2} = a^2 \nabla^2 \epsilon$$

En esta ecuación, ϵ es la deformación volumétrica unitaria, nótese que no se tienen rotaciones, por esta razón la ecuación representa la propagación de ondas planas, no distorsionales o irrotacionales, denominadas también ondas P (primarias) o compresionales.

En donde:

$$a^2 = \frac{1 + 2\mu}{\rho}$$

es la velocidad de propagación de la onda longitudinal, la cual depende de las propiedades del medio, ρ , μ y G .

2.3.2 Ondas transversales

Un ejemplo muy sencillo es el movimiento producido en una cuerda atada en un extremo y por el otro extremo se agita hacia abajo y hacia arriba, lo que produce una perturbación llamada pulso, como se ilustra en la Figura 2.14. En las ondas transversales, el desplazamiento es perpendicular a la dirección de propagación del movimiento ondulatorio.

Si la perturbación ocurre en el interior de un medio elástico, homogéneo e isótropo, las ondas se propagan en dicho medio distorsionándolo, pero manteniendo su volumen constante, se originan trenes de ondas transversales cuyas expresiones son:

$$\frac{\partial^2 \epsilon_x}{\partial t^2} = a^2 \nabla^2 \epsilon_x$$

$$\frac{\partial^2 \epsilon_y}{\partial t^2} = a^2 \nabla^2 \epsilon_y$$

$$\frac{\partial^2 \epsilon_z}{\partial t^2} = a^2 \nabla^2 \epsilon_z$$

En donde:

$$a^2 = \frac{G}{\rho}$$

es la velocidad de propagación de la onda transversal, la cual depende de las propiedades del medio, ρ , y G , y w_x, w_y, w_z son las rotaciones. El término ϵ no aparece, por esta razón se llaman ondas equivolumétricas, ondas distorsionales, ondas S (de cortante) u ondas secundarias.

La Figura 2.16 ilustra la propagación de ondas transversales en una barra.

2.3.3 Ondas superficiales

Un tercer tipo de ondas son las ondas superficiales. El movimiento de las partículas provocado por estas ondas está restringido a la superficie del medio de propagación. Se dividen en ondas de Love y ondas de Rayleigh.

Las ondas de Love se parecen a las ondas S , su movimiento es horizontal, paralelo a la superficie del terreno, no presentan movimiento vertical, como se ilustra en la Figura 2.17.

Las ondas de Rayleigh tienen movimiento tanto vertical como horizontal en un plano vertical, como se muestra en la Figura 2.18.

2.3.4 Reflexión de ondas

El hecho de que la velocidad de propagación de una onda dependa de las propiedades del medio da lugar a los fenómenos de **reflexión** y **refracción**, que ocurren cuando una onda cruza la superficie de separación de dos medios, en los cuales la onda se propaga con diferentes velocidades. Una parte de la onda incidente se refleja, otra parte es parcialmente absorbida y otra se transmite. La parte de la onda que es transmitida sufre un cambio de dirección.

La **reflexión** de las ondas obedece a las mismas leyes generales de la mecánica que rige los fenómenos de rebote. La **onda reflejada** es una nueva onda que se transmite en el medio en el cual se estaba propagando. Las dos leyes básicas de la reflexión (Figura 2.19) se enuncian como sigue:

- y El ángulo de incidencia (a_i) es igual al ángulo de reflexión (a_r).
- y La onda incidente, la onda reflejada y la normal a la superficie se encuentran en el mismo plano.

2.3.5 Refracción de ondas

Una onda se propaga en línea recta a velocidad constante en un medio uniforme. Si cambia el medio, la velocidad también cambia y la onda viajará en línea recta a lo largo de una nueva trayectoria. El ángulo a_i que se forma entre la dirección de la onda y la normal a la superficie se conoce como ángulo de incidencia. Al ángulo q_r formado entre la dirección de la onda refractada y la normal se le llama ángulo de refracción. La **onda refractada** es la onda

que se transmite al segundo medio.

Las tres leyes básicas de la refracción (Figura 2.19) se enuncian como sigue:

- y El ángulo de refracción (q_r) es diferente al ángulo de incidencia (a_i).
- y La onda incidente, la onda refractada y la normal a la superficie se encuentran en el mismo plano.
- y La relación entre el seno del ángulo de incidencia, a_i , y el seno del ángulo de refracción, q_r , es constante (ley de Snell):

$$\frac{\sin a_i}{\sin q_r} = \frac{v_1}{v_2} = \text{constante}$$

2.3.6 Ondas en medios estratificados

Un semiespacio elástico es una primera aproximación para modelar un medio de propagación. Para mejorar la correlación entre la teoría de propagación de ondas y los fenómenos observados, es necesario considerar un semiespacio estratificado como medio de propagación.

En general, cuando una onda viaja en un medio elástico y encuentra una frontera de otro medio elástico, parte de la energía de la onda incidente es reflejada y otra parte de la energía es transmitida al segundo medio.

Para medios estratificados se utilizará la siguiente nomenclatura:

a_1 = ángulo de incidencia de onda P

a_2 = ángulo de reflexión de onda P

a_3 = ángulo de refracción de onda P

b_1 = ángulo de incidencia de onda S

b_2 = ángulo de reflexión de onda S

b_3 = ángulo de refracción de onda S

2.3.6.1 Reflexión de una onda en una superficie

Considere que la superficie libre de un medio elástico, homogéneo e isótropo es un plano ($z = 0$) y que un tren de ondas planas se propaga en la dirección AO en el plano xz, el cual hace un ángulo a_i con la normal a la superficie libre (frontera).

Las Figuras 2.20 y 2.21 ilustran dos casos que se pueden presentar cuando un frente de ondas planas choca o incide contra una frontera libre horizontal.

Caso 1. Cuando una onda P incide contra la superficie libre (Figura 2.20), se generan dos ondas reflejadas. La onda reflejada P es de la misma magnitud que la onda incidente P, pero de sentido opuesto, con el ángulo de reflexión (α_2) igual al ángulo incidente (α_1). La onda reflejada S con un ángulo de reflexión (β_2) que se calcula con la ley de Shell:

$$\frac{\frac{\text{Diagrama 1}}{t_1}}{\frac{\text{Diagrama 2}}{t_2}} = \frac{\frac{\text{Diagrama 1}}{t_1}}{\frac{\text{Diagrama 2}}{t_2}}$$

Caso 2. Cuando una onda S incide contra la superficie libre (Figura 2.21), se generan dos ondas reflejadas. La onda reflejada S es de la misma magnitud que la onda incidente S, pero de sentido opuesto, con el ángulo de reflexión igual al ángulo incidente. La onda reflejada P con un ángulo de reflexión que se calcula con la ley de Shell:

$$\frac{\frac{\text{Diagrama 2}}{t_2}}{\frac{\text{Diagrama 1}}{t_1}} = \frac{\frac{\text{Diagrama 2}}{t_2}}{\frac{\text{Diagrama 1}}{t_1}}$$

2.3.6.2 Reflexión y refracción de una onda en una frontera entre dos medios

Las Figuras 2.22 y 2.23 ilustran dos casos que se pueden presentar cuando un frente de ondas planas choca o incide contra una frontera entre dos medios elásticos.

Cada onda incidente P o SV produce ondas P y SV reflejadas y refractadas. Una onda incidente SH únicamente produce una onda reflejada y una refractada, ambas de tipo SH.

Caso 1. Cuando una onda P incide contra una frontera entre dos medios elásticos (Figura 2.22), se generan dos ondas reflejadas y dos ondas refractadas. Las direcciones de las ondas se pueden calcular haciendo uso de la ley de Shell:

$$t_1 = t_2$$

$$\frac{\frac{\text{Diagrama 2}}{t_2}}{\frac{\text{Diagrama 1}}{t_1}} = \frac{\frac{\text{Diagrama 2}}{t_2}}{\frac{\text{Diagrama 1}}{t_1}} = \frac{\frac{\text{Diagrama 3}}{t_3}}{\frac{\text{Diagrama 1}}{t_1}} = \frac{\frac{\text{Diagrama 3}}{t_3}}{\frac{\text{Diagrama 1}}{t_1}}$$

Caso 2. Cuando una onda S incide contra la superficie (Figura 2.23), se generan dos ondas reflejadas y dos ondas refractadas. Las direcciones de las ondas se pueden calcular aplicando la ley de Shell:

$$t_1 = t_2$$

$$\frac{\frac{\text{Diagrama 2}}{t_2}}{\frac{\text{Diagrama 1}}{t_1}} = \frac{\frac{\text{Diagrama 2}}{t_2}}{\frac{\text{Diagrama 1}}{t_1}} = \frac{\frac{\text{Diagrama 3}}{t_3}}{\frac{\text{Diagrama 1}}{t_1}} = \frac{\frac{\text{Diagrama 3}}{t_3}}{\frac{\text{Diagrama 1}}{t_1}}$$

2.4 Definición de términos

A continuación se definen los términos más utilizados en el presente manual para facilitar su mejor comprensión y utilización.

2.4.1 Términos generales

Aparato (device). Instrumento o conjunto de instrumentos que sirven para determinado objetivo.

Aproximación (approximation). Diferencia admisible entre un valor obtenido en una medición o cálculo y el valor exacto desconocido.

Datos (data). Todos los productos de un sistema de instrumentación y medición.

Error (error). Desviación respecto a un valor teórico y el valor real. Los errores surgen por varias causas a partir de las cuales se pueden distinguir distintos tipos de error: aleatorio, craso, numérico y sistemático.

Estabilidad (stability). Es la susceptibilidad de reproducción de las lecturas medidas de un instrumento bajo condiciones de uso definidas, repetida en diferentes ocasiones separadas por intervalos, los cuales son largos en comparación con el tiempo de toma de una lectura.

Exactitud (accuracy). Grado en que la indicación del instrumento se aproxima al valor verdadero de la magnitud medida. Se expresa generalmente mostrando el error posible en porcentaje del valor indicado. Es costumbre indicar la exactitud como un número. Una exactitud de 1 mm significa que el valor medido está dentro de 1 mm del valor real; una exactitud de 1% significa que el valor medido está dentro de 1% del valor real.

Factor (factor). Agente capaz de inducir o modificar un efecto físico, químico o biológico.

Fenómeno (phenomenon). Manifestación de actividad que se produce en la naturaleza.

Histéresis (hysteresis). Fenómeno por el cual el estado de un material o proceso depende de la historia previa.

Instrumento de medición (measuring instrument). Aparato diseñado para comparar unidades físicas mediante el proceso de medición. Como unidades de medición se usan los estándares o patrones.

Linealidad (linearity). Desviación de la curva de calibración con respecto a una recta. Una linealidad de 1% FS significa una desviación de 1% de la escala completa.

Parámetro (parameter). Variable o constante arbitraria que interviene en una expresión matemática.

Precisión (precision). Grado de finura de una medición. La precisión de un instrumento o de una observación es una medida de la resolución del instrumento u observación. La precisión no debe confundirse con la exactitud. Una precisión de 0.5% significa que el valor medido se encuentra dentro del 0.5% del valor real y que el error no es mayor de 0.5%.

Proceso (process). Secuencia temporalmente ordenada de acontecimientos, tal que cada miembro de la secuencia toma parte en la determinación siguiente.

Ruido (noise). Perturbación aleatoria en toda señal o proceso.

Sensibilidad (sensitivity). Cociente del incremento de la respuesta de un instrumento de medida entre el incremento correspondiente de la señal de entrada. Valor mínimo que es capaz de medir un instrumento. Por consiguiente, un instrumento muy sensible produce un gran movimiento del índice para un pequeño cambio en la cantidad medida.

Señal (signal). Serie de ondas y pulsos eléctricos que representan información.

Valor (value). Determinación o medición cuantitativa particular.

Variable (variable). Símbolo que se utiliza para definir la variación de un fenómeno o simplemente una correspondencia funcional. Cualquier cantidad física que esté sujeta a cambio.

2.4.2 Términos relacionados con ondas sísmicas

Amplitud (amplitude). Valor de la ordenada máxima respecto a un origen.

Ángulo de fase (phase). Ángulo de retraso o adelanto de una onda armónica con respecto a la referencia.

Armónico. Componente sinusoidal de una onda periódica cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental.

Atenuación (attenuation). Decrecimiento en amplitud y cambio en el contenido de frecuencias de las ondas sísmicas con la distancia.

Epicentro (epicenter). Punto de la superficie de la Tierra bajo el cual se origina un movimiento sísmico y en el que, por tanto, es mayor su intensidad.

Frecuencia (frequency). La frecuencia, f , es el número de ciclos en una unidad de tiempo. En el SI la unidad es el hertz ($1 \text{ hertz} = 1 \text{ Hz} = 1 \text{ ciclo/ s}$).

Frecuencia angular (angular frequency). En radianes por unidad de tiempo.

Frecuencia fundamental (fundamental frequency). Frecuencia de oscilación más baja de un sistema mecánico.

Frecuencia natural (natural frequency). Frecuencia en vibración libre de un sistema.

Frente de onda (wavefront). Es el lugar geométrico de todos los puntos adyacentes, en los cuales la fase de vibración de una cantidad física asociada con la onda es la misma.

Onda (wave). Campo variable en el espacio y en el tiempo.

Onda longitudinal (longitudinal wave). Onda cuya magnitud física característica se encuentra en la dirección de la propagación.

Onda sísmica (seismic wave). Onda producida por un movimiento sísmico, que se propaga a través del interior de la Tierra.

Onda superficial (surface wave). Vibraciones transmitidas en la superficie de la Tierra.

Onda transversal (transverse wave). Onda cuya magnitud física característica se encuentra perpendicular a la dirección de propagación.

Oscilación (oscillation). Movimiento alternativo de un cuerpo que se separa de su posición de equilibrio.

Periodo (period). El requerido para realizar una oscilación completa. Valor que, sumado a cualquier otro valor de la variable independiente, no altera el valor de la función, es decir, $f(x) = f(t + T)$ para cualquier t , siendo T el periodo.

Perturbación (disturbance). Modificación en un sistema físico debida a la acción de fuerzas externas.

Vibración mecánica (mechanical vibration). Una vibración mecánica es un fenómeno dinámico, su amplitud varía con el tiempo. Una vibración es una oscilación en torno a una posición de equilibrio.

2.4.3 Términos relacionados con sismicidad

Aceleración pico del terreno (peak ground acceleration). La máxima amplitud en un registro de aceleración.

Astenósfera (asthenosphere). Capa inferior semiplástica, de las dos que componen la tectósfera.

Atenuación (attenuation). Relación a la cual el movimiento sísmico decrece con la distancia.

Borde de placa (edge of plate). Margen o límite entre dos placas generalmente situado en los fondos oceánicos.

Brecha sísmica (seismic gap). La porción de una falla o de una zona sismogénica que ha permanecido sin movimiento durante un largo tiempo.

Cabalgamiento (thrust fault). Proceso estructural a partir del cual un conjunto de rocas es empujado por encima de otro, a lo largo de una falla, como resultado de la compresión de una placa.

Colisión entre placas continentales (collision of continental plates). Colisión de dos placas continentales durante la cual se forma, a lo largo de ambos continentes, plegamientos montañosos con intrusiones graníticas que producen montañas de tipo alpino como el Himalaya.

Corteza (rind). Capa externa de la Tierra que incluye a la rígida litósfera. Se distinguen dos tipos de corteza: corteza continental (compuesta de material granítico) y corteza oceánica (compuesta de material basáltico). La corteza y la parte superior del manto constituyen la litósfera.

Dorsal (underwater ocean ridge). Cadena montañosa submarina. Término general aplicado a una zona de

expansión centro-oceánica que incluye una larga cordillera o montaña.

Dorsal oceánica (oceanic ridge). Relieve alargado que aparece en el fondo del océano y que constituye una de las líneas estructurales básicas de la corteza terrestre.

Epicentro (epicentre). La proyección en la superficie de la Tierra del hipocentro.

Falla (fault). Fractura en una masa rocosa, a lo largo de la cual se producen deslizamientos. Fractura o grupo de fracturas a lo largo de las cuales se ha producido un movimiento en la litósfera.

Falla transformante (transform fault). Falla que afecta los bordes activos de las placas tectónicas de la corteza terrestre. Fallas secundarias y largas que son perpendiculares a las dorsales centro-oceánicas (La falla de San Andrés).

Fosa tectónica (graben). Valle formado por el hundimiento de un bloque fallado.

Hipocentro (hypocentre). Localización de radiación inicial de las ondas sísmicas (i.e., localización del inicio de la ruptura dinámica).

Intensidad (intensity). Medida de los efectos de un sismo.

Litósfera (lithosphere). La delgada y rígida capa exterior o corteza de la Tierra que está fracturada en siete grandes placas y numerosas placas pequeñas. La componen la parte superior del manto y las cortezas continentales y oceánicas.

Magnitud (magnitude). Medida única del tamaño de un sismo. Medida única de la energía liberada por un sismo.

Manto (mantle). Capa muy caliente pero sólida situada entre el núcleo y la litósfera superior. Se subdivide en una capa potente, el manto inferior, y una capa más delgada, el manto superior.

Momento sísmico (seismic moment). El momento generado durante un evento sísmico.

Núcleo (core). Región central de la Tierra dividida en un núcleo interno y un núcleo externo. El núcleo interno es una esfera sólida de aleación hierro-níquel, con un radio de 1 600 km. El núcleo externo es una mezcla caliente semilíquida de unos 2 250 km de espesor.

Réplica (aftershock). Sismos menores que siguen a uno de magnitud grande o moderada.

Sismicidad (seismicity). Se define como la frecuencia por unidad de área de la ocurrencia de sismos en una región.

Sismo (earthquake). Vibraciones de la Tierra ocasionadas por la propagación de las ondas sísmicas. Temblor o sacudida de la corteza terrestre, ocasionado por desplazamientos internos, que se transmite a grandes distancias en forma de ondas.

Sismología (seismology). Estudio y análisis de la propagación de las ondas sísmicas a través de la corteza y del manto terrestre, y su aplicación al conocimiento de la estructura del interior de la Tierra. Es el estudio de la generación, propagación y registro de las ondas elásticas en la Tierra y las fuentes que las producen.

Subducción (subduction). Proceso por el cual una placa tectónica se mueve hundiéndose bajo otra placa, y al ir descendiendo se funde.

Tectónica de placas (plate tectonic). Teoría geológica que explica la dinámica de grandes porciones de la litósfera y su relación con la ocurrencia de sismos, volcanes y deformaciones corticales.

2.4.4 Términos relacionados con instrumentos sísmicos

Acelerómetro (accelerometer). Sismógrafo para medir la aceleración como función del tiempo.

Red instrumental (instrumental network). Grupo de instrumentos de registro sísmico distribuidos en un área determinada y que funcionan bajo una base de tiempo común.

Riesgo sísmico (seismic risk). Producto de tres factores: el valor de los bienes expuestos (Q) tales como vidas humanas, edificaciones, carreteras, puentes etc.; la vulnerabilidad (V), que es un indicador de la susceptibilidad a sufrir daño; y el peligro (P), que es la probabilidad de que ocurra un sismo en un lugar determinado de cierta intensidad. Así, $R = C \times V \times P$.

Sismógrafo (seismograph). Instrumento de alta sensibilidad para registrar los movimientos del terreno ocasionados por la propagación de las ondas sísmicas.

Sismoscopio (seismoscope). Sismógrafo elemental que solo deja constancia de un movimiento del terreno, relativamente intenso, sin que el registro tenga marcas de tiempo.

Zonificación sísmica (seismic zoning). Clasificación de un territorio en función de diferentes niveles de peligro derivados de la actividad sísmica.

2.4.5 Términos relacionados con dinámica de suelos

Amortiguamiento (damping). Mecanismo de disipación de energía que conduce al decaimiento de la respuesta.

Amortiguamiento crítico (critical damping). El menor de amortiguamiento para el cual un sistema elemental regresa a su posición de equilibrio sin vibrar.

Amplificación (amplification). Incremento en el movimiento del terreno debido a la presencia de depósitos de suelo, usualmente expresado en términos de la relación de la superficie del terreno al movimiento de un afloramiento.

Curva de reducción del módulo (modulus reduction curve). Relación que expresa la reducción del módulo con la deformación.

Licuefacción de arenas (soil liquefaction). Es el fenómeno mediante el cual una muestra de arena saturada pierde una gran parte de su resistencia al esfuerzo cortante (debido a carga monotónica o cíclica) y fluye o se comporta como un líquido hasta que los esfuerzos cortantes actuantes en la masa de suelo disminuyen a valores compatibles con la resistencia del suelo licuado, el movimiento se detiene, y el suelo recupera su resistencia y estabilidad.

Relación de amortiguamiento (damping ratio). Relación de amortiguamiento con respecto del amortiguamiento crítico.