



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – ESTRUCTURAS

**“ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LAS VIBRACIONES CAUSADAS POR TRÁFICO Y
SU IMPACTO EN ZONAS DE VIVIENDA”**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

NAYELI AUDELIA LÓPEZ BORRALLAS

TUTOR PRINCIPAL:

M. EN I. OCTAVIO GARCÍA DOMÍNGUEZ, FACULTAD DE INGENIERÍA

COMITÉ TUTOR:

**DR. GUSTAVO AYALA MILIÁN, INSTITUTO DE INGENIERÍA
DR. OSCAR ALBERTO LÓPEZ BÁTIZ, FACULTAD DE INGENIERÍA
DR. ORLANDO JAVIER DÍAZ LÓPEZ, INSTITUTO DE INGENIERÍA
DR. DARÍO RIVERA VARGAS, FES ACATLÁN**

MÉXICO, D. F. SEPTIEMBRE 2014



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.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Gustavo Ayala Milián
Secretario: Dr. Oscar Alberto López Bátiz
Vocal: M. I. Octavio García Domínguez
1^{er.} Suplente: Dr. Orlando Javier Díaz López
2^{do.} Suplente: Dr. Darío Rivera Vargas

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

Posgrado de Ingeniería, UNAM, Cd. Universitaria, Coyoacán, México D.F.

TUTOR DE TESIS:

M. I. Octavio García Domínguez

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

“Porque Jehová da la sabiduría, y de su boca viene el conocimiento y la inteligencia” Prov. 2:6

De esta forma quiero agradecer en primer lugar a Dios por ayudarme a alcanzar esta meta y permitirme del bien íntegro para disfrutar de ello, así mismo decir que lo que yo tuve, tenga y tendré es de Él y para Él.

También quiero agradecer el apoyo incondicional de parte de mis padres, el señor Antonio y la señora Magdalena, maravillosos padres que Dios mandó especialmente para formar una buena persona de mí. A mi hermana Karina, que a pesar de ser menor que yo, me ha enseñado muchas cosas y siempre me ha respaldado con cariño. A cada uno de mis familiares y amigos que han estado conmigo y me han motivado a seguir adelante.

De la misma manera quiero recalcar que la realización de este trabajo de tesis fue gracias al apoyo de personas e instituciones, a las cuales les agradezco de manera infinita.

Al departamento de la Dirección de Ingeniería Civil y Geomática de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, también a la empresa OHL por el patrocinio del proyecto. Así mismo a los participantes del proyecto:

Dr. Gustavo Ayala Milián
M. I. Octavio García Domínguez
M. I. Marco Antonio Escamilla García
Ing. Herlindo Méndez Romero

También quiero incluir a los miembros del jurado de examen para obtener el grado de Maestra en Estructuras, los cuales me ayudaron con muy buenas aportaciones que contribuyeron mejorar el trabajo presente, hecho que se los agradezco en gran manera.

Dr. Oscar López Bátiz
Dr. Darío Rivera Vargas
Dr. Orlando Díaz López
Dr. Gustavo Ayala Milián

En particular quiero agradecer a mi Tutor, el M. en I. Octavio García Domínguez porque además de ser una persona llena de conocimientos y experiencia profesional, también posee grandes cualidades humanas y siempre encontré en él, el apoyo necesario para la realización de este proyecto de tesis.



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 OBJETIVOS Y METAS	2
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.4 JUSTIFICACIÓN Y ALCANCES	4
1.5 ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO	5
2 VIBRACIONES PRODUCIDAS POR TRÁFICO	7
2.1 ESTADO DEL ARTE	7
2.2 VIBRACIONES AMBIENTALES	10
2.2.1 Características de las Vibraciones Ambientales	11
2.2.2 Fuentes de las Vibraciones Ambientales	11
2.3 VIBRACIONES GENERADAS POR EL TRÁFICO VIAL	12
2.3.1 Descripción del Problema	12
2.3.2 Acciones Dinámicas	13
2.3.3 Criterio Estructural	15
2.3.4 Efectos	15
3 REGLAMENTACIÓN SOBRE EL CONTROL DE VIBRACIONES	17
3.1 PANORAMA GENERAL	17
3.2 CRITERIOS DE ACEPTACIÓN DE VIBRACIONES	18
3.3 NORMAS NACIONALES	19
3.4 NORMAS INTERNACIONALES	24
3.4.1 Control de la afectación al Confort Humano	24
3.4.2 Control del Daño Estructural	28
3.5 COMPARACIÓN ENTRE NORMAS NACIONALES E INTERNACIONALES PARA EL CUIDADO DEL CONFORT HUMANO	37
4 REGISTRO Y ANÁLISIS DE SEÑALES	39
4.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS SEÑALES REGISTRADAS	39
4.2 ANÁLISIS DE FOURIER	40
4.2.1 Series de Fourier	41
4.2.1.1 Series de Fourier de Cosenos y Senos	42
4.2.2 Forma Compleja de la Serie de Fourier	42
4.2.3 De la Serie a la Transformada de Fourier	43
4.2.4 Análisis Discreto de la Transformada de Fourier	44
4.2.5 Ventanas de Atenuación	46
4.2.6 Filtros	49



4.2.7 Funciones de Correlación para la Identificación de Frecuencias	53
4.3 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE LAS ESTRUCTURAS	53
4.3.1 Frecuencias propias de vibrar	50
4.3.2 Determinación de las Formas Modales	55
4.3.3 Porcentaje de Amortiguamiento Crítico	56
4.4 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE NAKAMURA	57
4.4.1 Tipos de Ondas Sísmicas Generadas en el Suelo	59
4.4.1.1 Ondas de Cuerpo	60
4.4.1.2 Ondas Superficiales	61
5 DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO	63
5.1 ZONA DE ESTUDIO	63
5.1.1 Ubicación	63
5.1.2 Geografía	63
5.2 CONDICIONES GEOTÉCNICAS DEL SITIO	64
5.2.1 Geología de la Zona	64
5.2.2 Perfil Estratigráfico de la Zona	64
5.3 MONITOREO DE VIBRACIONES DEBIDAS AL TRÁFICO VEHICULAR	66
5.3.1 Estadísticas del Aforo Vehicular	70
5.4 EQUIPOS DE MEDICIÓN	76
6 PROCESAMIENTO DE SEÑALES OBTENIDAS EN LA ZONA DE ESTUDIO	80
6.1 REGISTROS DE ACELERACIÓN VS TIEMPO	80
6.2 REGISTROS DE VELOCIDADES MÁXIMAS	89
6.3 MANEJO DE LAS SEÑALES PARA DETERMINAR LAS CARACTERÍSTICAS DEL SUELO	92
6.3.1 Espectros de Fourier del Suelo	92
6.3.2 Obtención de las Características Dinámicas de las Vibraciones en el Subsuelo Mediante la Técnica de Nakamura	93
6.4 PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES REGISTRADAS EN UNA VIVIENDA TÍPICA DE LA ZONA DE ESTUDIO	104
6.4.1 Espectros de Fourier Característicos de una Vivienda Típica de la Zona	105
6.4.2 Frecuencias de Vibrar de la Vivienda Tipo	109



7	EVALUACIÓN DE VIBRACIONES CONFORME A LA NORMATIVIDAD EXISTENTE	111
	7.1 VALORES LÍMITE PARA EL CONTROL DE LAS VIBRACIONES PRODUCIDAS POR TRÁFICO CON EL FIN DE EVITAR DAÑO ESTRUCTURAL	111
	7.2 VALORES LÍMITE PARA EL CONTROL DE LAS VIBRACIONES PRODUCIDAS POR TRÁFICO CON EL FIN DE EVITAR AFECTACIONES AL CONFORT HUMANO	113
8	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	116
	8.1 DAÑO ESTRUCTURAL	116
	8.2 AFECTACIONES AL CONFORT HUMANO	119
	8.3 CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS DEL SUELO	123
9	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	128
10	BIBLIOGRAFÍA	133

RESUMEN

Las vibraciones inducidas por el tráfico vehicular en autopistas que cruzan zonas habitacionales suelen causar afectaciones en las ciudades de todo el mundo. Sus habitantes frecuentemente se quejan por las molestias en el confort, daños y deterioro en sus edificaciones y, eventualmente, afectaciones a su salud.

Los efectos de la vibración pueden variar en función de algunos factores tales como: la magnitud de la excitación generada por la fuente de vibración, las condiciones particulares del terreno, localizado entre la fuente y el receptor y la amplia gama de características de las edificaciones en términos de su estructuración, dimensiones, tipos de materiales y calidad de la construcción, entre otras. Por otro lado, la intensidad, la duración, la frecuencia y el número de apariciones de una vibración, juegan un papel importante tanto en los niveles de molestias causadas y los esfuerzos inducidos en estructuras.

En este trabajo se presenta la evaluación del nivel de vibraciones inducidos a las edificaciones de una zona habitacional aledaña al Circuito Exterior Mexiquense, en su intersección con la Autopista México–Querétaro en Cuautitlán Izcalli, Estado de México, de acuerdo a los resultados obtenidos del análisis de las señales registradas en el sitio por parte del personal técnico de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Para ello se hizo una revisión detallada de los estudios realizados por numerosos investigadores y de la normatividad especializada en el tema, tales como las normas DIN, entre otras. Del procesamiento de las señales se determinaron las características dinámicas de una vivienda representativa de la zona y las características dinámicas del suelo y su relación con los efectos de las vibraciones inducidas o generadas en las viviendas por el tráfico vehicular. Es así que con ayuda de la normatividad presentada se muestran las evaluaciones para determinar los efectos de las vibraciones al confort Humano y a la estructura de la vivienda representativa.



1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Debido al desarrollo creciente de la zona metropolitana de la ciudad de México y, en particular, a su incremento de población, se han construido, en forma paralela, diversas vías de comunicación que buscan satisfacer las necesidades de sus habitantes y aquellas que demanda la importante actividad económica de esta región.

De acuerdo con las políticas del gobierno del Estado de México y, siguiendo los lineamientos de su plan de desarrollo territorial, se construyó el Circuito Exterior Mexiquense, el cual fue diseñado para facilitar la movilidad eficaz de vehículos ligeros y pesados con beneficios evidentes a la población urbana e Industrias locales, así como ofrecer una ruta alterna para evitar y aliviar zonas de alto congestionamiento vehicular. Sin embargo, por la cercanía a zonas habitacionales, el flujo vehicular resultante podría generar un impacto negativo tanto a las edificaciones colindantes como a sus habitantes debido a las vibraciones inducidas al subsuelo.

A pesar de la problemática mencionada en el párrafo anterior, la literatura técnica y científica existente no contiene estudios detallados sobre la respuesta de los suelos de esta parte de la metrópoli a nivel de vibraciones. Sobre todo no se cuenta con datos de la caracterización de las fuentes de vibración y de la respuesta de la superficie del terreno. Además de atender una inquietud expresada por los habitantes de la zona de estudio, el presente trabajo pretende contribuir a incrementar el conocimiento en el tema.

Para evaluar los efectos de las vibraciones se revisó la normatividad nacional e internacional, relacionada con el posible daño a edificaciones y alteraciones en el confort humano.

- **ESTUDIOS PREVIOS**

Para la construcción del Circuito Exterior Mexiquense se realizaron estudios previos de vibración ambiental por parte de la empresa ERN, con objeto de llevar a cabo el monitoreo de la zona y determinar los niveles de vibración en el lugar. Los alcances del estudio fueron:



- 1) Mediciones de vibración ambiental en el terreno en 8 puntos distribuidos de manera estratégica con el fin de determinar las características dinámicas del suelo.
- 2) Se realizaron mediciones de vibración ambiental en dos edificaciones con el fin de determinar sus frecuencias fundamentales, sus respuestas espectrales y el nivel relativo de vibración respecto al suelo.

Mediante el estudio se llegó a los siguientes resultados:

1. Se determinó que el sitio no presenta una frecuencia predominante ni efectos de resonancia entre el suelo y las edificaciones, así mismo se clasifica al suelo como de tipo firme; de los espectros de respuesta obtenidos del terreno para las mediciones de vibración realizadas, se concluye que la respuesta del sitio es del orden de 17 veces menor al coeficiente de diseño sísmico reducido recomendado por las Normas Técnicas Complementarias para diseño por Sismo. (NTC- Diseño por sismo 2004).
2. Se realizó un estudio de vibración en dos edificaciones con la finalidad de identificar sus frecuencias fundamentales (denominados Edificio 1 y Edificio 2). Las frecuencias fundamentales del Edificio 1 son: de 8.4 Hz (0.12 s) y 13.8 Hz (0.07 s), para las direcciones transversal y longitudinal, respectivamente. No fue posible identificar las frecuencias de vibrar del Edificio 2, debido a las características de la unidad habitacional en la que se encuentra la vivienda analizada. Para la determinación de las mismas se requieren realizar mediciones que no estuvieron dentro de los alcances de este estudio.

Así mismo, en este estudio se determinó que el nivel de vibración registrado en el sitio, no representa una amenaza para las estructuras vecinas, en ese momento cuando la autopista del circuito no existía. También se dijo que el nivel de vibración necesario para que las estructuras circundantes comiencen a presentar algún tipo de daño durante o después de concluidos los trabajos de construcción, debe ser por lo menos 17 veces mayor al reportado en este estudio.

1.2 OBJETIVOS Y METAS

En el presente trabajo se tiene como objetivo realizar el estudio detallado de las señales que se obtuvieron de los registros del monitoreo de vibraciones en la zona de estudio por la operación del denominado Paso Superior Vehicular (PSV), rama 41, del Circuito Exterior Mexiquense Fase III, Tramo I, que cruza y da acceso a la Autopista México-Querétaro (entronque la pera) en Cuautitlán Izcalli, Estado de



México y evaluar e interpretar sus resultados para compararlos con la normatividad especializada en materia de afectaciones inducidas al confort humano y a las estructuras.

Entre las metas que se proponen para este trabajo se encuentra la realización del análisis y procesamiento de señales obtenidas en el suelo cercano a las viviendas, usando técnicas de Fourier, para estimar los periodos fundamentales del sitio y de una edificación representativa de la zona de estudio. Además se pretende hacer una evaluación de los resultados con base en reglamentación nacional e internacional sobre las posibles afectaciones que estas vibraciones pudieran ocasionar al confort humano y a la estructura de la vivienda.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La vibración es un problema frecuente en los edificios; algunas de las fuentes más comunes que la generan son el funcionamiento de maquinaria interna, sistemas de climatización, ascensores y las actividades de los ocupantes, entre otras. Las fuentes externas incluyen terremotos, viento, voladuras, trabajos de construcción, tráfico ferroviario y automotriz, entre otras. Las vibraciones inducidas por el tráfico de carretera son una preocupación común en las ciudades de todo el mundo, sus habitantes frecuentemente se quejan por las molestias y daños en sus edificaciones, además de la alteración de sus niveles de confort y, eventualmente, en su salud.

Los efectos de la vibración pueden variar en función de un número de factores que incluyen: la magnitud de la fuente de vibración, las condiciones del terreno, en particular entre la fuente y el receptor y la amplia gama de estructuras que existen en términos de diseño (dimensiones, materiales, tipo y calidad de construcción). La intensidad, la duración, la frecuencia y el número de apariciones de una vibración, juegan un papel importante tanto en los niveles de molestias causadas y los esfuerzos inducidos en estructuras.

Con base a lo anterior, en el presente trabajo se incluye un caso de estudio enfocado a evaluar el problema de vibraciones inducidas por el tráfico vehicular que ha causado molestias entre los habitantes de la zona, la evaluación también incluye a la estructura de una de las edificaciones, ya que este tipo de vibraciones puede causar grietas o fisuras por sí mismas o ayudar al aumento de patologías existentes, si se tiene un alto nivel de ellas; el caso de estudio se tomó de una zona habitacional de Cuautitlán Izcalli, Estado de México, por la que cruza la Autopista Circuito Exterior Mexiquense en su intersección con la Autopista México–Querétaro, desde que esta entró en funcionamiento recientemente.



1.4 JUSTIFICACIÓN Y ALCANCES

El país se encuentra en pleno desarrollo educativo, económico y tecnológico. La infraestructura requerida para alcanzar los niveles que permitan satisfacer las necesidades de la población, tendrá que crecer aún más en años siguientes. En este sentido, las vías de comunicación juegan un papel fundamental en sus diferentes modalidades. En este trabajo se abordan los efectos que pudiese ocasionar el tráfico vehicular que circula por vías rápidas o viaductos sobre unidades habitacionales localizadas en su vecindad, como lo es la obra denominada PSV, Rama 41, del Circuito Exterior Mexiquense Fase III, Tramo 1, que cruza y proporciona el acceso a la AUTOPISTA MÉXICO-QUERÉTARO.

Una vez que la autopista entró en funcionamiento, los habitantes de las zonas vecinas a ella, mostraron inconformidad y molestia al sentirse afectados por las vibraciones generadas por los vehículos. Con base en lo anterior, se solicitó a la Facultad de Ingeniería de la UNAM realizar el monitoreo de las vibraciones inducidas, cuyos resultados se tomaron como base para la realización de la presente tesis, que tuvo como actividad inicial analizar y procesar las señales registradas para evaluarlas con base en la normatividad especializada existente, y así verificar el impacto que estas tienen sobre la zona.

Este tipo de problemática es una queja en todas las ciudades del mundo, a la cual, por alguna razón, no se le da la atención requerida. De la investigación realizada se encontró que nuestro país no cuenta con las normas necesarias para establecer límites permisibles para evitar o mitigar el daño en construcciones. Dado que las vibraciones inducidas a los edificios, en su mayoría, no son percibidas y, por lo mismo, hay poca evidencia de los daños que pudieran traer consigo, incluyendo simples daños estéticos. Al realizar el trabajo se pretende no solo conocer más sobre el tema, sino generar un documento que sirva de base para estudios futuros en nuestro país.

Los alcances considerados en la realización de este trabajo fueron:

- Análisis profundo y procesamiento de las señales registradas en la zona de estudio.
- Estimación de las características dinámicas del suelo sobre el que se desplantan las edificaciones consideradas en este estudio, a partir del análisis y procesamiento de las señales registradas en el sitio.
- Identificación de las características del tránsito vehicular en la zona.
- Determinación de las propiedades dinámicas de una vivienda tipo.



- Evaluación de los resultados de las vibraciones inducidas por el tráfico, a partir de la normatividad especializada, para determinar el impacto que se tiene en el confort humano y el posible daño a la estructura de las viviendas.
- Emitir recomendaciones encaminadas a la mitigación de los efectos de las vibraciones producidas por tráfico en la zona.
- Con este trabajo se pretende aportar con el hecho de dar a conocer la normatividad y sus aplicaciones en problemas relacionados con los efectos de vibraciones producidas por el tráfico vehicular.

1.5 ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO

El presente trabajo consta de 10 capítulos. Una vez que se ha descrito el panorama general del tema, así como los objetivos y alcances, en el capítulo 2 se trata de inducir al conocimiento y estudio de las vibraciones ambientales, particularmente aquellas debidas al tráfico vial, de manera que pueda tenerse un entendimiento de sus principales características y en qué consisten sus acciones y efectos.

En el capítulo 3 se describen las normas nacionales e internacionales, las cuales fueron tomadas en cuenta para realizar la evaluación sobre el daño estructural y las afectaciones al confort humano.

En el capítulo 4 se proporciona toda la base teórica sobre los conceptos básicos que fueron aplicados para desarrollo del proyecto, como lo son las características de las señales, el análisis de Fourier, la obtención de las propiedades dinámicas de las estructuras y el método de Nakamura, entre otras.

En el capítulo 5 se hace una descripción general del caso en estudio: ubicación, geografía, condiciones geotécnicas, así como las estadísticas del tráfico vehicular.

En el capítulo 6 se presenta el procesamiento de señales que se realizó, mostrando los resultados obtenidos partiendo de los registros de aceleración y velocidad contra tiempo, donde se identificaron los valores máximos. Así mismo, se muestran los resultados obtenidos de aplicar el análisis de Fourier y las técnicas de Nakamura para la obtención de las características dinámicas de la vivienda y del suelo.

En el capítulo 7 se presenta el análisis y evaluación de los resultados obtenidos de las señales tomando como base las normas existentes sobre el daño a edificaciones y afectaciones al confort humano.



En el capítulo 8 se dan las interpretaciones para el caso de estudio. Siguiendo con el capítulo 9, en el que se presentan las conclusiones también se emiten algunas recomendaciones basadas en la investigación y los resultados arrojados por el presente trabajo, para mitigar los efectos de vibraciones.



2. VIBRACIONES PRODUCIDAS POR TRÁFICO

2.1 ESTADO DEL ARTE

La vibración es un movimiento oscilatorio que fluctúa rápidamente en un medio y hace que las partículas se muevan en un movimiento ondulatorio. Las fuentes que pueden ocasionar una vibración son variadas; el presente trabajo estará orientado a las inducidas por tráfico vehicular.

Cada vez más, los expertos en los espacios periurbanos y diseñadores de edificios urbanos deben tener en cuenta en su análisis, el impacto de las vibraciones en los edificios y en las personas que viven en ellos. Los usuarios de los edificios esperan que las vibraciones que se producen en su entorno no produzcan daños en el edificio ni su deterioro acelerado; por otro lado, tampoco quieren que resulte afectada la comodidad en edificaciones diseñadas para el alojamiento de personas. En las zonas urbanas más densamente pobladas, el número de fuentes de vibración de tráfico está creciendo y se requiere contar con más y mejores herramientas para la medición, diagnóstico, control y mitigación de éstas.

Actualmente, la tecnología de sensores ha tenido un importante desarrollo; es así como a través del uso de transductores de vibración adaptados, junto con la difusión de los algoritmos de procesamiento digital, ha dado lugar a un notable incremento en el estudio de las vibraciones mecánicas en estructuras. Las aplicaciones varían desde la identificación modal (ya sea simplificada o completa) a la caracterización de los problemas de vibraciones. Estos problemas están relacionados con problemas de incomodidad, salud humana, y el posible daño a las construcciones (en sus componentes estructurales) y a equipos sensibles.

Para poder evaluar correctamente el efecto de las vibraciones inducidas por el tráfico en carreteras, actualmente se cuenta con lineamientos básicos para realizar un buen trabajo, ejemplo de ello son los siguientes:

- Instrumentación adecuada para el registro de señales de vibración, que por lo general incluye sensores de vibración, acondicionadores de señal y equipos de grabación, los cuales deben tener suficiente resolución y sensibilidad.



- Las mediciones deben hacerse en los lugares donde los niveles de vibración reflejan el propósito de la evaluación. Para evaluar el efecto de las vibraciones con respecto a la molestia humana, las medidas deben ser tomadas en lugares donde el nivel de vibración es mayor. (BS-7385).

Aunque ya se ha dado un gran avance en la materia, todavía hace falta el desarrollo de estudios que traten más a fondo el tema de vibraciones, así como su difusión; en la mayoría de ellos frecuentemente se tiene como medida de vibración a la velocidad de la partícula, la cual se toma como indicador de daño estructural y también en las delimitaciones de los valores para proteger el confort humano. La ventaja de ello es que es uno de los parámetros más fáciles de medir y cuya importancia, se explicará más adelante.

En estudios previos, realizados en su mayoría por autores extranjeros, como ejemplo tenemos a Hunaidi y a Kaweckí, los cuales en su trabajo hacen mención de algunos parámetros que influyen en la vibración inducida por tráfico; dentro de estos factores se encuentran: las características de la fuente de vibración, la forma de transmisión, y el receptor. Así mismos autores como Bachmann presentan trabajos donde se han desarrollado algunas formulaciones matemáticas que intentan representar la complejidad del fenómeno.

En materia de reglamentación relativa a la regulación de los niveles de vibración debidas al flujo vehicular, países como Gran Bretaña, Suiza, Alemania, España, etc., han desarrollado normas que delimitan los niveles de vibraciones emitidas por distintas fuentes, de manera de que no se afecten a las estructuras ni al confort humano. Desafortunadamente hay países que no tiene normas bien establecidas que regulen esta problemática, tal es el caso de nuestro país, el cual solo tiene algunas especificaciones en materia de confort humano.

Para el año 2001 México contaba con la norma NOM-024-STPS-2001, en la que se tienen algunas especificaciones para mantener el confort humano debido a vibraciones. En vista de la escases de normas aplicables para regular las emisiones de este agente contaminante y a raíz de las quejas emitidas por las frecuentes denuncias ciudadanas, la PAOT (Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del Distrito Federal) propuso, en el 2003, al Comité de Normalización Ambiental del Distrito Federal (CONADF), instalar el Grupo de Trabajo que se encargaría de desarrollar el Proyecto de Norma Ambiental para el Distrito Federal en esta materia.



De los trabajos realizados por este grupo, en el 2005 se publicó en la Gaceta Oficial del Distrito Federal la Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-004-AMBT-2004, que establece las condiciones de medición y los límites máximos permisibles para vibraciones mecánicas, que deberán cumplir los responsables de fuentes emisoras en el Distrito Federal, la cual entró en vigor al día siguiente de su publicación. Sin embargo, esta última norma también solo protege el confort humano.

A nivel internacional se han desarrollado normas con especificaciones más apropiadas a las características de las fuentes que generan las vibraciones, por ejemplo en el caso de las normas que competen al cuidado del confort humano se tiene que si el rango de frecuencias de la fuente está entre 1-10 Hz (oscilaciones por segundo), entonces se debe usar la aceleración máxima de la partícula como medida de evaluación pero si el rango está entre 10-100 Hz se utiliza el valor de la velocidad máxima (ISO-4866) . En el caso de la normatividad que establece los valores de vibraciones límite para evitar daño estructural, la mayoría de las recomendaciones usa la velocidad máxima como parámetro de evaluación, algunas indican el rango de frecuencias en que se debe encontrar la estructura para evitar daño según sus características como lo son: tipo de estructuración, materiales y su uso; otras más hacen uso del rango de frecuencias de la fuente para indicar los valores límite de vibraciones en las edificaciones, para verificar cada uno de los criterios que las normas toman en cuenta, en el capítulo 3 se muestra un resumen de las consideraciones de cada norma plasmadas en la tabla 3.18.

En las tablas 2.1 y 2.2 se enlistan algunas normas que se han generado en otros países para regular las vibraciones y sus efectos, sobre el confort humano y las edificaciones.

Tabla 2.1 Normas extranjeras para regulación de vibraciones en el cuidado del confort humano

Procedencia	Nombre de reglamentación	Fecha de expedición
Internacional	ISO 4866	1990
Internacional	ISO 2631-1	1997
Alemania	DIN 4150 parte 2	1999
Reino Unido	BS 6472	1992
Reino Unido	BS 5228-2	1992

Tabla 2.2 Normas extranjeras para regulación de vibraciones para evitar el daño estructural

Procedencia	Nombre de reglamentación	Fecha de expedición
Internacional	BS 5228	1990
Gran Bretaña	BS 7385 PARTE 2	1993
Cámara Tecnológica de la Antigua República Democrática Alemana	DIRECTRIZ KDT 046/72	1972
Alemania	DIN 4150 parte 3	1999
Suiza	SN 640312	1978
USA	CALTRANS	2004
Internacional	ISO 4866	1990

Finalmente cabe resaltar que, en la actualidad, los desarrollos tecnológicos recientes permiten realizar la instrumentación de estructuras ante acciones dinámicas tales como, sismos, trabajos de construcción, etc. y constituyen una opción económicamente viable y justificable para el monitoreo de su comportamiento dinámico; sin embargo, este tipo de estudios se ha enfocado fundamentalmente a estructuras importantes.

2.2 VIBRACIONES AMBIENTALES

Durante la evaluación estructural de edificaciones existentes, es altamente recomendable determinar las características dinámicas del edificio con objeto de desarrollar modelos consistentes con la respuesta real de la estructura ante acciones de esta naturaleza. El uso de vibraciones ambientales ha demostrado ser una técnica económica y confiable en tales casos, brindando información valiosa respecto de las propiedades elásticas de las edificaciones.

Es común que las vibraciones ambientales también sean conocidas como microtrepidaciones, microsismos, ruido sísmico de fondo, campo natural, microtremores. También pueden definirse de varias maneras:

- Vibraciones en la superficie debidas a la incidencia oblicua de ondas de cuerpo que se propagan en todas direcciones con la misma energía.
- Una superposición de ondas superficiales, que constituyen un campo estacionario y homogéneo.
- La vibración ambiental generada por fuentes naturales y antropogénicas, como el tráfico vehicular o la actividad humana (Cuadra, 2007).



d) Ondas sísmicas con energía relativamente baja, con amplitudes típicas dentro del rango de 10^{-3} a 10^{-4} mm. (Cuadra, 2007).

2.2.1 Características de las Vibraciones Ambientales

La propagación y las características de las fuentes de las vibraciones ambientales han sido estudiadas desde el siglo XIX, desde entonces se observó la complejidad de la propagación multimodal y multidireccional. Sin embargo, no fue hasta mediados del siglo XX que se comenzaron a utilizar registros de vibraciones ambientales con el objetivo de estudiar los efectos locales; aunque la idea original de esos trabajos era errónea en cuanto al origen e interpretación de estos, ya que se consideraba que su fuente era ruido blanco.

El ruido blanco es una señal aleatoria, que se caracteriza porque sus valores de señal en dos instantes de tiempo diferentes no guardan correlación estadística, por lo que su densidad espectral de potencia es una constante, su gráfica es plana y la señal contiene todas las frecuencias con la misma potencia. (Cuadra, 2007).

La mayoría de las vibraciones ambientales de interés práctico sólo ocurren en el intervalo de frecuencias de 0.01 a 30 Hz; cabe mencionar que en la banda de 0.1 a 10 Hz, la energía se transmite como ondas Rayleigh, cuyos modos y velocidades de propagación se pueden estimar y medir con arreglos instrumentales para obtener información sobre las características de los parámetros elásticos de la corteza terrestre hasta profundidades de 20 Km. (Asten, 1976).

2.2.2 Fuentes de las Vibraciones Ambientales

Generalmente, las vibraciones ambientales con frecuencias menores a 1 Hz son el resultado de fenómenos naturales como la acción de las olas, viento y variaciones atmosféricas mientras aquéllos con frecuencias mayores a 1 Hz, son producidos por fuentes artificiales que se deben a la actividad humana, como trenes, vehículos y el funcionamiento de maquinaria pesada. Detalladamente tenemos:

- A bajas frecuencias (por debajo de 0.5 hasta 0.3 Hz.) son causados por las olas oceánicas que ocurren a grandes distancias, y es posible encontrar buena correlación de las vibraciones ambientales con condiciones meteorológicas de gran escala en el océano.

- A frecuencias intermedias (entre 0.3-0.5 Hz y 1 Hz.) las vibraciones ambientales son generados por el oleaje que rompe en las costas, por lo que su estabilidad es significativamente menor.
- Para altas frecuencias (mayores a 1 Hz.) las fuentes de las vibraciones ambientales están ligadas a la actividad humana, por lo que reflejan los ciclos de esta actividad, y se manifiestan por cambios en la amplitud de éstos.

Siempre que se utilicen registros de vibraciones ambientales en la estimación de efectos de sitio se debe recordar que se suponen trayectorias de las ondas simples y similares, esto implica que no existe dispersión tridimensional. (Cuadra, 2007).

2.3 VIBRACIONES GENERADAS POR EL TRÁFICO VIAL

2.3.1 Descripción del problema

Los vehículos aplican fuerzas dinámicas directamente al pavimento. Las fuerzas son transmitidas a través del pavimento a la subestructura o a través del subsuelo hacia las estructuras adjuntas. Un vehículo es un sistema dinámico complejo el cual interactúa con el pavimento y el subsuelo o estructura. La magnitud y contenido de frecuencia de las vibraciones inducidas dependen entre otros parámetros de:

- Masa del vehículo
- Aceleración del vehículo
- Comportamiento vibracional del vehículo
- Características de los neumáticos del vehículo
- Rugosidad del pavimento de la carretera
- Rigidez del pavimento o subestructura
- Propiedades del subsuelo
- Distancia entre la carretera y las estructuras afectadas

El grado de detalle necesario en el análisis de las señales de vibración depende de la naturaleza y el propósito de la investigación. Para una evaluación preliminar, podría ser suficiente encontrar el pico de la señal de vibración, ya que una vez obtenido el registro de aceleración *vs* tiempo del equipo, se puede encontrar el valor máximo; por otro lado si se tuviera una señal que fuera una senoide perfecta, para determinar su frecuencia simplemente se hace el recuento del número de picos positivos y negativos en un determinado intervalo de tiempo, es decir, que con esto se obtienen los ciclos por segundo, pero para

nuestro caso de estudio no se tratan de señales idealizadas por lo tanto el procedimiento no es así de simple.

Hay tres componentes en cualquier sistema de vibración (fig. 2.1):

- La fuente
- La vía de transmisión
- El receptor (la estructura, habitantes)

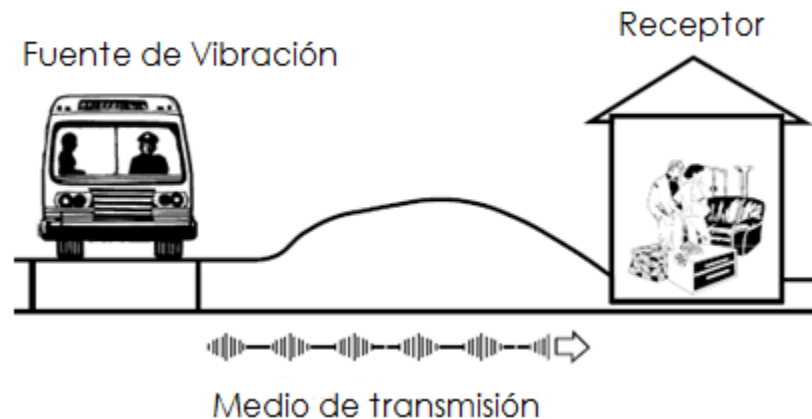


Fig. 2.1 vibraciones por tráfico pueden ser caracterizadas por un escenario de fuente-medio o vía de transmisión-receptor

2.3.2 Acciones dinámicas

El tráfico vial tiende a producir vibraciones con frecuencias predominantemente en el rango de 5 a 25 Hz. La amplitud de las vibraciones medidas como aceleración, varía entre 0.005 y 2 m/s^2 o 0.05 a 25 mm/s, medida como velocidad. Las frecuencias predominantes y amplitudes de la señal de vibración debidas por tráfico dependen de muchos factores ya mencionados, que son interdependientes y resulta difícil establecer una relación simple entre ellos. (Hunaidi, 2000).

El efecto de la velocidad del vehículo, por ejemplo, depende de la rugosidad de la carretera. Generalmente, la rugosidad de la carretera y una mayor velocidad afectan la amplitud de la vibración. El efecto del sistema de suspensión también depende de la velocidad del vehículo y la rugosidad de la superficie, ya que para una baja velocidad y una superficie más lisa el efecto de sistema de suspensión no es significativo. En la tabla 2.3 y la fig. 2.2 se puede ver como es este efecto.

Tabla 2.3 Comparación entre niveles de vibración (mm/s²) inducidos por un autobús o un camión de un peso similar, para demostrar el efecto del sistema de suspensión a diferentes velocidades*.

Ubicación	25 km/h		50 km/h	
	Autobús	Camión	Autobús	Camión
Terreno enfrente de la casa	20.5 mm/ s ²	19.9 mm/ s ²	64.5 mm/ s ²	33.2 mm/ s ²
Muro de cimentación externo	11.2 mm/ s ²	10.1 mm/ s ²	30.9 mm/ s ²	15.7 mm/ s ²
Punto medio del piso en el 1er nivel	20.3 mm/ s ²	20.8 mm/ s ²	62.9 mm/ s ²	30.1 mm/ s ²
Punto medio del piso en el 2o nivel	35.0 mm/ s ²	37.3 mm/ s ²	96.2 mm/ s ²	46.7 mm/ s ²

*El autobús tenía sistema de suspensión de bolsas de aire; el camión tenía hojas múltiples sistema de suspensión de resortes de acero.

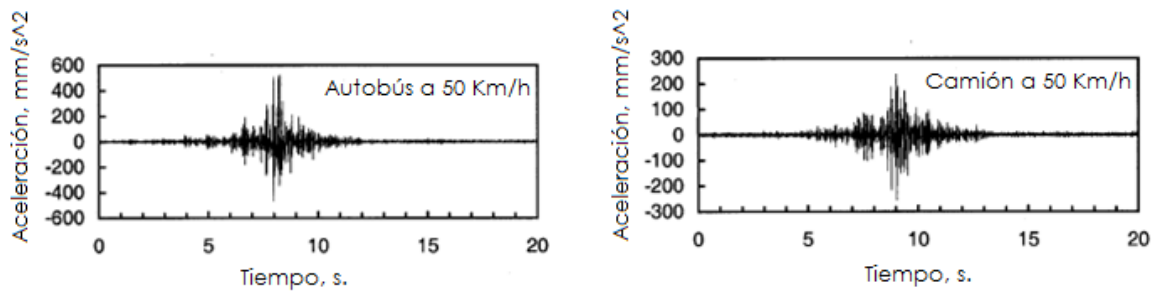


Fig. 2.2 Comparación entre los niveles de vibración inducidos por el tránsito de un autobús y de un camión de un peso similar. Los niveles de vibración son significativamente diferentes debido a los diferentes sistemas de suspensión que estos tienen.

Ahora como ya se dijo anteriormente la desigualdad de la superficie de rodamiento y la aceleración del vehículo son las causas primarias de vibración como resultado de la interacción entre el vehículo con el pavimento. La fuerza dinámica que interactúa con el pavimento se debe a los efectos de impulsos cortos, es decir, a impactos en tiempos cortos entre el automóvil y la superficie de rodamiento. Las deflexiones locales y globales del pavimento y de la subestructura bajo el peso del vehículo dan lugar a excitaciones de mayor duración.

Pavimentos de asfalto y concreto deben ser diseñados para soportar las descargas de las ruedas, efectos de temperatura, entre otros; un pavimento continuo se supone que es una placa flexible que descansa sobre un medio elástico. Los pavimentos de concreto segmentados pueden ser esforzados debido a los diferentes niveles en que se encuentre cada parte del pavimento fragmentada respecto a los segmentos adyacentes.

Lo anterior conduce principalmente a los daños de las uniones de la superficie de rodamiento donde los impactos de los neumáticos de vehículos inician las ondas que luego se transmite a través del suelo a las estructuras adyacentes. Esta transmisión es gobernada por las características dinámicas del suelo.

La aceleración y desaceleración de los vehículos conduce a fuerzas dinámicas adicionales por cizallamiento en la dirección del movimiento del vehículo y estos tienen que ser tomados en cuenta principalmente para el diseño del pavimento cerca de las paradas de autobús, uniones etc.

2.3.3 Criterio Estructural

Las estructuras adyacentes pueden ser afectadas por las excitaciones dinámicas generadas en el pavimento, dentro de los efectos que se deben tomar en cuenta son los de resonancia ya que pueden tener lugar en los pisos superiores de estas estructuras (con un factor arriba de 5 o más). Los pisos con una frecuencia natural en el rango de 8 a 25 Hz son particularmente sensibles a esa excitación. Esto aplica también a los muebles colocados sobre los pisos, los cuales también pueden exhibir efectos de resonancia. El coeficiente de amortiguamiento en pisos es usualmente más bien modesto ($\xi=0.01$ a 0.02) y así las amplificaciones resonantes son sustanciales y las vibraciones decaen lentamente. (Bachmann, 1997).

2.3.4 Efectos

Las excitaciones debidas al tráfico en carreteras pueden causar afectaciones, dependiendo de ciertas características de la vibración, como lo es la intensidad, medidas en velocidades o aceleraciones, y el contenido de frecuencias, que las normas reportan como altas. Así es como los niveles altos de vibración pueden afectar:

- Estructuras
- Personas (molestia de vibraciones)
- Instalaciones y otros contenidos del edificio



También como resultado del ruido directamente generado por la vibración de vehículos, ventanas y otros objetos pueden sonar. Cabe mencionar que el movimiento rápido de los vehículos puede causar fuerzas de viento especialmente en el diafragma de túneles, que pueden dar lugar a fallas por fatiga en elementos cercanos, como lo son los señalamientos de tráfico.



3. REGLAMENTACIÓN SOBRE EL CONTROL DE VIBRACIONES

3.1 PANORAMA GENERAL

Las vibraciones causadas por el ser humano pueden causar daños desde estructurales a cosméticos en las edificaciones; en la mayoría de los casos tales vibraciones son generadas por voladuras, maquinaria de construcción y tráfico vehicular o férreo. Estas vibraciones inducen esfuerzos dinámicos en las edificaciones, generando deformaciones temporales en todos los elementos constitutivos de la edificación. Sumados a los esfuerzos estáticos preexistentes, estas deformaciones dinámicas combinadas a los efectos de fatiga, pueden causar daños en la edificación.

La relación entre velocidad de partícula y los esfuerzos, en el caso idealizado de una onda que se mueve de manera unidimensional, está dada por.

$$\sigma = \varepsilon E \dots\dots\dots (3.1) \quad \varepsilon = \dot{u}/c \dots\dots\dots (3.2) \quad \sigma = \dot{u}E/c \dots\dots\dots (3.3)$$

Siendo σ el esfuerzo, ε la deformación, E el módulo de elasticidad, \dot{u} la velocidad de partícula y c la velocidad de propagación de la onda sísmica (Persson *et al.*, 1994). En consecuencia, para un estrato geológico y un tipo de edificación determinado (i.e, velocidad de propagación y módulo de elasticidad constante), la velocidad de vibración de partícula es la variable decisiva, es decir, es la que determina los esfuerzos que pueden ser los causantes de daños. Por esta razón, todas las normas y recomendaciones relativas al potencial de daños por vibraciones de causa humana utilizan la velocidad de la partícula como variable básica. (Benjumea, 2003).

Por otro lado, la magnitud de las deformaciones que un nivel de vibración dado genera en una estructura también depende del comportamiento dinámico de ésta, y en particular de sus frecuencias de resonancia o respuesta (las de la estructura en conjunto y las de los elementos individuales). Por esto, la frecuencia (el inverso del periodo) de la vibración incidente es la segunda variable básica en la evaluación del potencial de daños.

Sin embargo, la probabilidad de daños por vibraciones depende de muchos otros factores, tales como:

- La duración de las vibraciones,
- La cantidad de solicitaciones a las que es sometida la estructura,
- 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)
- Y de manera preponderante el nivel de mantenimiento y conservación de la estructura.

La principal medida de referencia para las vibraciones inducidas por tráfico en carretera es la velocidad de vibración, y esto es usualmente medido en la base de la estructura afectada, para evaluar los efectos en las personas, instalaciones y otros contenidos en el edificio, sin embargo no es aconsejable confiar únicamente en la velocidad de vibraciones medidas en el área de la base de una estructura afectada. Se prefiere medir los valores directamente en los lugares afectados y hacer una evaluación final basada con alguna norma en rigor.

3.2 CRITERIOS DE ACEPTACIÓN DE VIBRACIONES

Los criterios para la aceptación o limitación de los valores tolerables en estructuras peatonales o edificios se definen en relación a los tres posibles efectos (magnitud de oscilaciones o vibraciones) que se indican a continuación:

- Sobreesfuerzos en los elementos que forman la estructura.
- Efectos psicológicos o de sensaciones en las personas.
- Efectos en actividades profesionales o procesos productivos (problemas con tolerancias de algunos productos) así como también incremento de tensiones en maquinaria (deformaciones, fatiga, esfuerzos).

Los efectos psicológicos sobre las personas responden a parámetros de sensibilidad personales y por lo tanto resultan de difícil evaluación objetiva dada la posibilidad de valoraciones subjetivas individuales distintas. Tampoco resulta sencillo valorar los efectos de las vibraciones en la maquinaria o instalaciones de algún proceso productivo, mientras que los valores tolerables o aceptables para evitar sobreesfuerzos en estructuras pueden determinarse de manera más segura, pues se pueden medir y valorar de manera real.

Lo anterior permite establecer esencialmente tres tipos de criterios:

1. Criterios estructurales
2. Criterios psicológicos
3. Criterios de calidad en la producción

En este trabajo solo se tratarán los dos primeros que hablan del cuidado del confort humano y del posible daño a las estructuras.



3.3 NORMAS NACIONALES

Dentro de las normas que regulan la emisión de vibraciones para evitar afectaciones al confort humano en nuestro país, se encuentran las siguientes:

- La Norma Ambiental para el Distrito Federal **NADF-004-AMBT-2004**
- **NOM-024-STPS-2001**, Vibraciones-Condiciones de Seguridad e Higiene en los Centros de Trabajo.

Cada uno de los criterios que se hacen mención en ellas y los límites permisibles que establecen se muestran en los apartados enseguida

3.3.1 LA NORMA AMBIENTAL PARA EL DISTRITO FEDERAL NADF-004-AMBT-2004

Con motivo de poder regular la emisión de vibraciones en el distrito federal, las autoridades indicadas se dieron a la tarea de crear esta norma, la cual establece las condiciones de medición y los límites máximos permisibles para vibraciones mecánicas, que deberán cumplir los responsables de fuentes emisoras en el Distrito Federal. Dentro del contenido de la norma se puede encontrar en el punto 7 que trata sobre la evaluación de vibraciones y en sus subcapítulos 7.1 y 7.2, que nos habla de las evaluaciones básicas y de la evaluación de vibraciones transitorias.

Para las evaluaciones básicas de vibración, se dice que debe obtenerse la magnitud de la vibración (m/s^2) en el intervalo de 1 Hz a 80 Hz en cada uno de los ejes ortogonales de los puntos de medición. Para calcular la magnitud de la vibración deberá utilizarse **la raíz de la aceleración cuadrática media** conforme a la siguiente ecuación:

$$a_w = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{1/2} \dots\dots\dots (3.4)$$

donde:

$a_w(t)$ Es la aceleración ponderada determinada en un tiempo de medición T y expresada en (m/s^2).

T es la duración de la medición, expresada en seg.

Por otro lado para la evaluación de vibraciones transitorias se hace mención de que será necesario evaluar el nivel de vibración a la cuarta potencia ($m/s^{1.75}$) conforme a la siguiente ecuación:



$$VDV = \left\{ \int_0^T [a_w(t)]^4 dt \right\}^{1/4} \dots\dots\dots (3.5)$$

donde:

VDV es el Valor de la Dosis de Vibración, es decir indica nivel de vibración a la cuarta potencia ($m/s^{1.75}$), este parámetro se emplea para cuantificar un tipo de exposición humana a la emisión de vibraciones mecánicas en función del tiempo.

$a_w(t)$ Es la aceleración instantánea ponderada en frecuencia; se trata de la magnitud de la vibración calculada a partir de la ponderación de las frecuencias contenidas en el intervalo de 1 a 80 Hz.

Así también se encontró que dentro del punto número 8 de la norma están los Límites máximos permisibles de aceleración que se refieren a la percepción y al confort de las personas expuestas a vibraciones mecánicas en los sitios o inmuebles aledaños a la fuente emisora.

Los límites máximos permisibles de la magnitud de la vibración mecánica para cada uno de los ejes ortogonales considerados en esta norma, son los siguientes:

Tabla 3.1 Límites máximos permisibles para la raíz de la aceleración cuadrática media

Eje Z, dirección vertical	Eje X, dirección horizontal, paralelo a la colindancia	Eje Y, dirección horizontal, perpendicular a la colindancia
0.015 m/s²	0.015 m/s ²	0.015 m/s ²

También establece que el límite máximo permisible para el Valor de Dosis de Vibración (VDV) en el Punto de Medición será de $0.26 m/s^{1.75}$.

3.3.2 NOM-024-STPS-2001, VIBRACIONES-CONDICIONES DE SEGURIDAD E HIGIENE EN LOS CENTROS DE TRABAJO

Esta norma tiene como objetivo establecer los límites máximos permisibles de exposición y las condiciones mínimas de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se generen vibraciones que, por sus características y tiempo de exposición, sean capaces de alterar la salud de los trabajadores. La presente norma rige en todo el territorio nacional y aplica en todos aquellos centros de trabajo en donde por las características de operación de la maquinaria y equipo, se generen vibraciones que afecten a los trabajadores en cuerpo entero o en extremidades superiores. La norma en su apartado 7 muestra los **límites máximos permisibles de exposición a vibraciones** haciendo referencia a los de **cuerpo entero y para extremidades superiores**.

Para los límites permisibles para el **cuerpo entero** del ser humano se dice que cuando se conoce la frecuencia de un mecanismo que genera vibración y se relaciona con la aceleración en m/s^2 ya sea en el eje de aceleración vertical a_z , o en los ejes de aceleración transversal a_x y a_y (cada una de las direcciones de incidencia son como se indica en la figura 3.3), se obtiene el tiempo de exposición que puede variar de un minuto a veinticuatro horas. Los límites de exposición a vibraciones en el eje longitudinal a_z y en los ejes transversales a_x y a_y , se establecen en las Tablas 3.2 y 3.3, respectivamente.

En la figura 3.1 se muestran las curvas del tiempo de exposición a vibraciones por día en un intervalo de 1 a 80 Hz de frecuencia en el eje longitudinal a_z ; en la figura 3.2 se muestra el tiempo de exposición por día para los ejes de aceleración transversal a_x y a_y , en un intervalo de frecuencia de 1 a 80 Hz. El tiempo de exposición se obtiene relacionando la frecuencia con la aceleración.

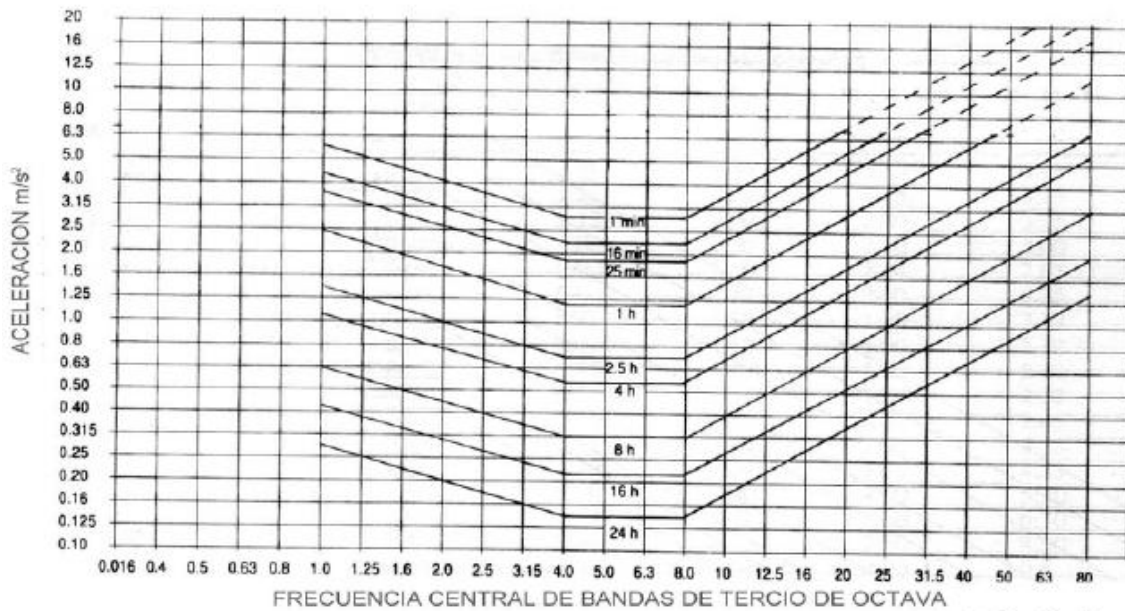


Fig. 3.1 Límites de aceleración longitudinal (a_z) como función de la frecuencia y del tiempo de exposición.

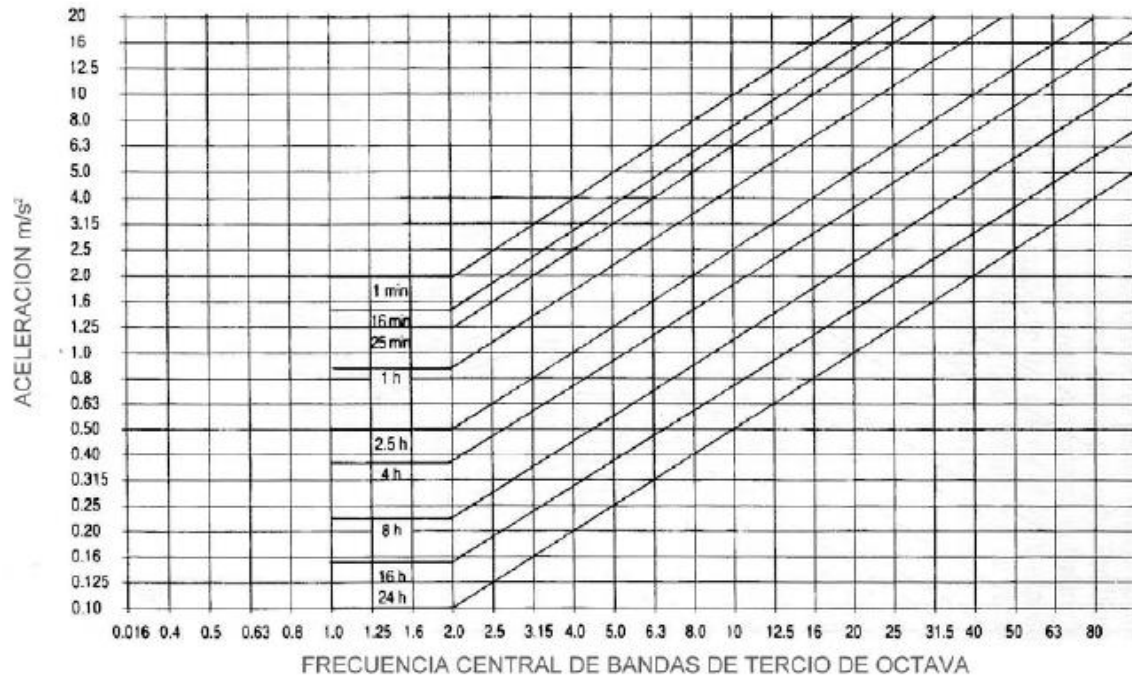


Fig. 3.2 Límites de aceleración transversal (a_x , a_y) como función de la frecuencia y del tiempo de exposición.

Tabla 3.2 Límites de aceleración longitudinal (a_z) como función de la frecuencia y del tiempo de exposición.

FRECUENCIA CENTRAL DE TERCIO DE OCTAVA (Hz)	TIEMPO DE EXPOSICION								
	24 h	16 h	8 h	4 h	2.5 h	1 h	25 min	16 min	1 min
	LIMITE DE ACCELERACION LONGITUDINAL EN (a_z), m/s ²								
1.00	0.280	0.383	0.63	1.06	1.40	2.36	3.55	4.25	5.60
1.25	0.250	0.338	0.56	0.95	1.26	2.12	3.15	3.75	5.00
1.60	0.224	0.302	0.50	0.85	1.12	1.90	2.80	3.35	4.50
2.00	0.200	0.270	0.45	0.75	1.00	1.70	2.50	3.00	4.00
2.50	0.180	0.239	0.40	0.67	0.90	1.50	2.24	2.65	3.55
3.15	0.160	0.212	0.355	0.60	0.80	1.32	2.00	2.35	3.15
4.00	0.140	0.192	0.315	0.53	0.71	1.18	1.80	2.12	2.80
5.00	0.140	0.192	0.315	0.53	0.71	1.18	1.80	2.12	2.80
6.30	0.140	0.192	0.315	0.53	0.71	1.18	1.80	2.12	2.80
8.00	0.140	0.192	0.315	0.53	0.71	1.18	1.80	2.12	2.80
10.00	0.180	0.239	0.40	0.67	0.90	1.50	2.24	2.65	3.55
12.50	0.224	0.302	0.50	0.85	1.12	1.90	2.80	3.35	4.50
16.00	0.280	0.383	0.63	1.06	1.40	2.36	3.55	4.25	5.60
20.00	0.355	0.477	0.80	1.32	1.80	3.00	4.50	5.30	7.10
25.00	0.450	0.605	1.00	1.70	2.24	3.75	5.60	6.70	9.00
31.50	0.560	0.765	1.25	2.12	2.80	4.75	7.10	8.50	11.2
40.00	0.710	0.955	1.60	2.65	3.55	6.00	9.00	10.6	14.00
50.00	0.900	1.19	2.0	3.35	4.50	7.50	11.2	13.2	18.0
63.00	1.120	1.53	2.5	4.25	5.60	9.50	14.0	17.0	22.4
80.00	1.400	1.91	3.15	5.30	7.10	11.8	18.0	21.2	28.0

Tabla 3.3 Límites de aceleración transversal (a_x , a_y) como función de la frecuencia y del tiempo de exposición.

FRECUENCIA CENTRAL DE BANDA DE TERCIO DE OCTAVA (Hz)	TIEMPO DE EXPOSICION								
	24 h	16 h	8 h	4 h	2.5 h	1 h	25 min	16 min	1 min
	LIMITE DE ACELERACION TRANSVERSAL EN (a_x, a_y), (m/s^2)								
1.00	0.100	0.135	0.224	0.355	0.50	0.85	1.25	1.50	2.0
1.25	0.100	0.135	0.224	0.355	0.50	0.85	1.25	1.50	2.0
1.60	0.100	0.135	0.224	0.355	0.50	0.85	1.25	1.50	2.0
2.00	0.100	0.135	0.224	0.355	0.50	0.85	1.25	1.50	2.0
2.50	0.125	0.171	0.280	0.450	0.63	1.06	1.6	1.9	2.5
3.15	0.160	0.212	0.355	0.560	0.8	1.32	2.0	2.36	3.15
4.00	0.20	0.270	0.450	0.710	1.0	1.70	2.5	3.0	4.0
5.00	0.250	0.338	0.560	0.900	1.25	2.12	3.15	3.75	5.0
6.30	0.315	0.428	0.710	1.12	1.6	2.65	4.0	4.75	6.3
8.00	0.40	0.54	0.900	1.40	2.0	3.35	5.0	6.0	8.0
10.00	0.50	0.675	1.12	1.80	2.5	4.25	6.3	7.5	10.0
12.50	0.63	0.855	1.40	2.24	3.15	5.30	8.0	9.5	12.5
16.00	0.80	1.06	1.80	2.80	4.0	6.70	10.0	11.8	16.0
20.00	1.00	1.35	2.24	3.55	5.0	8.5	12.5	15.0	20.0
25.00	1.25	1.71	2.80	4.50	6.3	10.6	15.0	19.0	25.0
31.50	1.60	2.12	3.55	5.60	8.0	13.2	20.0	23.6	31.5
40.00	2.00	2.70	4.50	7.10	10.0	17.0	25.0	30.0	40.0
50.00	2.50	3.38	5.60	9.00	12.5	21.2	3.5	37.5	50.0
63.00	3.15	4.28	7.10	11.2	16.0	26.5	40.0	45.7	63.0
80.00	4.00	5.4	9.00	14.0	20.0	33.5	50.0	60.0	80.0

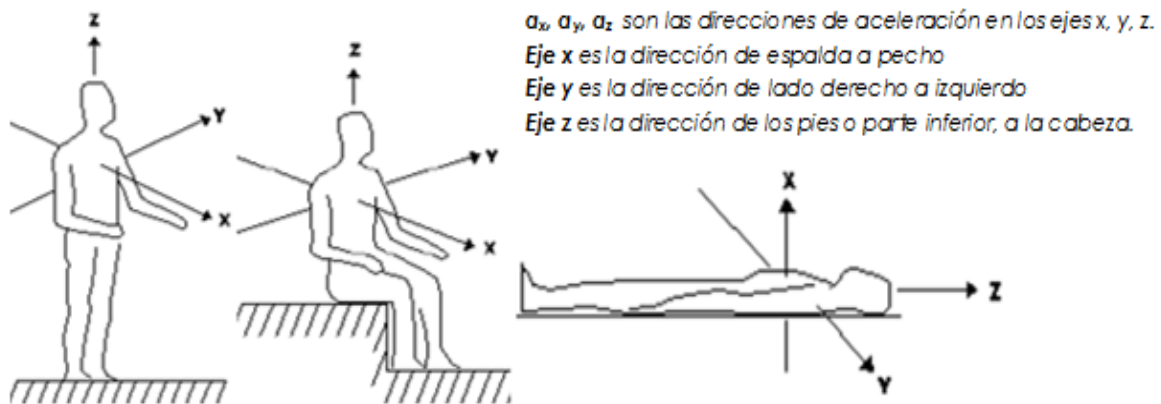


Fig. 3.3 Direcciones de incidencia de las vibraciones sobre el cuerpo humano

Por su parte para **extremidades superiores**, se dice que dependiendo del tiempo de exposición, se establecen los valores máximos permitidos de aceleración ponderada que se deben calcular según se establece en el Apartado 8.3.2.2.6 de la norma y en la Tabla 3.4.



El apartado 8.3.2.2.6 dice que se debe realizar un análisis espectral en bandas de tercios de octava (de 8 a 1600 Hz) por cada eje y calcular el componente direccional de la aceleración ponderada conforme a la siguiente ecuación:

$$a_k = \left[\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n (k_j)^2 T_i \right]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (3.6)$$

donde:

a_k : es el componente direccional de la aceleración ponderada;

T: es la duración de la exposición diaria;

k_j : es la iésima frecuencia ponderada, valor cuadrático medio de la componente de la aceleración con duración T_i .

TABLA 3.4 LÍMITES MÁXIMOS DE EXPOSICIÓN EN MANOS A VIBRACIONES EN DIRECCIONES Xh, Yh, Zh.

Tiempo total de exposición diaria a vibraciones, en horas.	Valores cuadráticos medios dominantes de la componente de las aceleraciones de frecuencia ponderada que no deban excederse (*)
	a_k , en m/s^2
De 4 a 8	Hasta 4
De 2 a 4	Hasta 6
De 1 a 2	Hasta 8
Menor de 1	Hasta 12

(*) Nota: Comúnmente, uno de los ejes de vibración domina sobre los dos restantes. Si uno o más ejes de vibración sobrepasan la exposición total diaria, se han sobrepasado los valores de los límites máximos de exposición.

3.4 NORMAS INTERNACIONALES

3.4.1 Control de la afectación al Confort Humano

La sensibilidad humana a las vibraciones de los edificios o estructuras es muy sutil. Como ejemplo, el cuerpo humano percibe desplazamientos de amplitudes de vibración de sólo 0.001 mm mientras que las yemas de los dedos pueden llegar a detectar amplitudes 20 veces inferiores. Sin embargo, la reacción humana a una vibración dada depende mucho de las circunstancias. La sensación personal de falta confort o bienestar se percibe a niveles diferentes en cada una de las situaciones; sentados en una mesa de trabajo en la oficina, operando una máquina, conduciendo un coche, etc.



La actitud de la persona también es determinante en la percepción de las oscilaciones; la costumbre de percibir las, o el hecho de ser el protagonista que crea las vibraciones (ya que en este caso no son provenientes de una agresión externa) puede disminuir su importancia subjetiva.

En la percepción de las vibraciones por parte de las personas influyen un gran número de factores como por ejemplo: la posición de la persona afectada (de pie, sentada o acostada), la dirección de incidencia de la vibración respecto a la columna vertebral, la actividad que esté desarrollando la persona en ese momento (descansar, andar, correr...), encontrarse solo o en grupo (algunos compañeros pueden percibir vibraciones que nosotros no percibimos), la edad, el sexo, frecuencia de ocurrencia de las vibraciones, momento del día en que se producen las oscilaciones, tiempo de decaimiento de las oscilaciones (amortiguamiento).

A pesar del gran número de factores que influyen en la percepción de las vibraciones, la intensidad de esta percepción depende de parámetros físicos objetivos de las oscilaciones como por ejemplo: amplitud del desplazamiento, velocidad, aceleración, duración de las vibraciones y frecuencia de vibración. Para efectos de este trabajo enseguida se presentan diversos criterios de percepción de las vibraciones por las personas en función de las frecuencias, velocidades y aceleraciones según la normatividad internacional consultada.

Para fines de este trabajo se planea utilizar la siguiente normatividad internacional para la regularización de vibraciones que regulan la emisión de vibraciones para cuidar el bienestar humano, estas normas ya fueron listadas en la tabla 2.1.

3.4.1.1 NORMATIVA ISO 4866 (1990) (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION)

Esta normativa proviene de un organismo internacional y plantea criterios para evaluar los efectos de las vibraciones en los seres humanos, en este apartado se nos indican dos maneras de evaluar las vibraciones, la primera es usando la aceleración máxima de la partícula, si la fuente de vibración está entre 1-10 Hz, la segunda es usando la velocidad máxima de la partícula como parámetro de evaluación, si la fuente de vibración está dentro de 10-100 Hz. Enseguida se muestran en la tabla ambos criterios de evaluación y los efectos que se tienen sobre las personas.

Tabla 3.5 Normativa ISO 4866 para evaluación de los efectos de vibraciones sobre los humanos

EFFECTOS DE LAS VIBRACIONES EN LAS PERSONAS	FRECUENCIAS 1/10 HZ Amax (mm/s ²)	FRECUENCIAS 10/100 HZ Vmax (mm/s)
Imperceptible	10	0.16
Solo perceptible	40	0.64
Claramente perceptible	125	2.0
Molesto	400	6.4
Desagradable, Doloroso si dura.	1000	16.0
Perjudicial, dañino.	>1000	>16.0

3.4.1.2 ISO 2631-1 (1997) (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION)

La normativa ISO 2631 "Mechanical Vibration and SOC-Evaluation of human exposure to whole body vibration" en su parte primera "General requirements" establece unos criterios de aceptación para las vibraciones en función de su afectación a la salud y su percepción y afectación al confort.

Para la sensación de confort, la normativa ISO 2631-1 presenta unos valores de referencia. En este caso el dato que determina la sensación de confort de la persona es la aceleración:

Tabla 3.6 Normativa ISO 2631-1

VALORES	SENSACIÓN EN LAS PERSONAS
Valores menores a 0.315 m/s ²	Confortable
De 0.315 a 0.63 m/s ²	Un poco inconfortable
De 0.5 a 1 m/s ²	Bastante inconfortable
De 0.8 a 1.6 m/s ²	Inconfortable
De 1.25 a 2.5 m/s ²	Muy inconfortable
Valores superiores a 2.5 m/s ²	Extremadamente inconfortable

3.4.1.3 DIN 4150 PARTE 2

La norma trata sobre los efectos de las vibraciones de muy diversos orígenes sobre personas en edificios residenciales o similares, usando como parámetro de evaluación a la velocidad máxima de la partícula.



Tabla 3.7 Los niveles de vibración y la percepción humana del movimiento

Nivel de vibración aproximado	Grado de percepción
0.1 mm/s	No se siente
0.15 mm/s	Umbral de percepción
0.35 mm/s	Poco notable
1.0 mm/s	Notable
2.2 mm/s	Facilmente notable
6 mm/s	Fuertemente notable
14 mm/s	Muy fuertemente notable

Nota: Estos valores aproximados de vibración (en pisos de edificios) son vibraciones que tienen un contenido de frecuencia en el rango de 1 a 80 hz.

3.4.1.4 BS (BRITISH STANDARDS INSTITUTION) 6472 – 1992 “GUIDE TO EVALUATION OF HUMAN EXPOSURE TO VIBRATION IN BUILDINGS (1 HZ TO 80 HZ)”

Es una guía que proporciona parámetros simples de evaluación en cuanto a la exposición de los humanos a las vibraciones, estableciendo que funciona para cuando la fuente de vibración está entre 8-80 Hz y también si las vibraciones de ésta son continuas o intermitentes; las evaluaciones se puntualizan solo para edificios residenciales y solo se hace mención del nivel de vibraciones preferentes y máximas a las que pueden estar expuestas las personas, ya sea durante el día o durante la noche; de manera igual como lo hacen otras normas también toma como parámetro de evaluación a la velocidad máxima de la partícula.

Tabla 3.8 BS 6472 Límites de vibración para el confort humano de 8 Hz a 80 Hz (mm/s PPV)

Tipo de receptor	Periodo	Vibración continua		Vibración Intermitente e impulsiva	
		Preferido	Máximo	Preferido	Máximo
Residencial	Día	0.28	0.56	8.6	17
	Noche	0.2	0.4	2.8	5.6

3.4.1.5 BS (BRITISH STANDARDS INSTITUTION) 5228-2 “CODE OF PRACTICE FOR NOISE AND VIBRATION CONTROL ON CONSTRUCTION AND OPEN SITES - PART 2: VIBRATION”.

Es un código usado en la práctica para establecer límites en la emisión de vibraciones y ruido, para control en sitios de construcción y lugares libres, en esta se dan a conocer los efectos que traen consigo ciertos niveles de vibración, caracterizando esos efectos solo cualitativamente como también lo hacen las demás normas.

Tabla 3.9 Guía sobre el efecto de los niveles de vibración (Tabla B.1 de BS 5228-2:2009)

Nivel de Vibración (ppv, mm/s))	Efecto
0.14 mm/s	La vibración podría ser sólo perceptible en las situaciones más sensibles para la mayoría de las frecuencias de vibración asociados con la construcción. A frecuencias más bajas, las personas son menos sensibles a las vibraciones.
0.3 mm/s	La vibración podría ser sólo perceptible en entornos residenciales
1.0 mm/s	Es posible que la vibración de este nivel en entornos residenciales cause queja, pero puede ser tolerada si previo aviso y explicación han sido dados a los residentes.
10 mm/s	Es probable que la vibración sea intolerable para cualquiera, con solo una breve exposición a este nivel.

3.4.2 Control del Daño Estructural

Las vibraciones producidas por las personas, maquinaria, tráfico de vehículos, trabajos de construcción, entre otros, pueden causar deformaciones, así como pequeñas o grandes afectaciones a los edificios o a los elementos estructurales o no estructurales que los constituyen. Algunas de estas incidencias son:

- Rotura, agrietamiento o fisuración de paredes o marcos del edificio.
- Deterioro de patologías existentes por otras causas de elementos estructurales o no-estructurales.



- Caídas de equipos o maquinaria de trabajo con los consecuentes daños en equipos o personas.

Las vibraciones continuas, además de los efectos descritos anteriormente, pueden producir en las estructuras de los edificios problemas de fatiga, incremento de tensiones o sobreesfuerzos en los elementos resistentes principales de la estructura. Los criterios de aceptación de los valores de las vibraciones deben tener en cuenta los siguientes factores, entre otros: calidad y características de los materiales de construcción (especialmente la ductilidad), tipología del edificio, propiedades de la cimentación del edificio, dimensiones de los principales elementos resistentes, edad de la construcción, duración de los efectos de las vibraciones, caracterización de la oscilación.

Aunque los criterios de aceptación se toman de manera independiente de la frecuencia, los valores más convenientes como indicadores varían en función del rango de frecuencia; mientras que el límite para las vibraciones lo marca la aceleración para frecuencias bajas, para frecuencias altas, debemos atender a las velocidades pico. A pesar de esto, la mayoría de los criterios se basan en valores de velocidades por lo que ya se explicó anteriormente.

En la tabla 2.2 se enlistaron algunas de las normas internacionales relativas a los efectos de vibraciones sobre estructuras, mismas que se describen enseguida.

3.4.2.1 NORMA DIN 4150, PARTE 3 (1999) (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, INSTITUTO ALEMÁN DE NORMALIZACIÓN).

La normativa Alemana DIN 4150, en su tercera parte, trata los efectos en edificios y sus elementos estructurales de vibraciones de carácter internas o externas. Partiendo de los tiempos de actuación de las vibraciones, aparecen tres criterios de aceptación:

- Vibraciones estructurales de corta duración (transitorias)
- Vibraciones estructurales permanentes
- Vibraciones permanentes particulares de los marcos

Tabla 3.10 Guía de valores para velocidad, V_i (mm/s). DIN 4150, PARTE 3 (1999)

LÍNEA	TIPO DE ESTRUCTURA	VIBRACIÓN EN LA BASE CON UNA FRECUENCIA DE			VIBRACIÓN EN EL PLANO HORIZONTAL DEL PISO MAS ALTO
		1 A 10 HZ	10 A 50 HZ	* 50 A 100 HZ	
1	Edificio usado para propósitos comerciales, edificios industriales y edificios con un diseño similar	20	20 to 40	40 to 50	40
2	Viviendas y edificios de diseño y/o de ocupaciones similares.	5	5 to 15	15 to 20	15
3	Estructuras que, debido a su particular sensibilidad a la vibración, no pueden ser clasificadas en las líneas 1 y 2 y que son de gran valor intrínseco (por ejemplo, edificios catalogados bajo orden de conservación).	3	3 to 8	8 to 10	8

*Para frecuencias superiores a 100 Hz, los valores indicados en esta columna se pueden utilizar como valores mínimos.

Tabla 3.11 Valores de velocidad de vibración (mm/s) basados en la norma DIN 4150-3:1986

Línea	Tipo de estructura	Guía valores para la velocidad (mm/s) de la vibración en el plano horizontal del piso más alto, en todas las frecuencias.
1	Edificio usado para propósitos comerciales, edificios industriales y edificios con un diseño similar.	5
2	Viviendas y edificios de diseño y/o de ocupaciones similares.	10
3	Estructuras que, debido a su particular sensibilidad a la vibración, no pueden ser clasificadas en las líneas 1 y 2 y que son de gran valor intrínseco (por ejemplo, edificios catalogados bajo orden de conservación).	2.5



3.4.2.2 NORMATIVA SN 640312 (1978)

La Asociación Suiza de Ingenieros en Carreteras en su normativa SN 640312, diferencia cuatro tipos de construcciones o edificios de acuerdo, principalmente, con el tipo de construcción.

El criterio de aceptación de esta normativa es la velocidad pico de las vibraciones, considerando dos casos distintos en función de la causa de las vibraciones que se distinguen también en su forma de producirse; el primer grupo incluye tráfico, maquinaria y equipos de trabajo mientras que el segundo se refiere a vibraciones producidas por explosiones que al ser poco frecuentes se permiten límites superiores.

Tabla 3.12 Categorías Estructurales según la Normativa SN 640312

CATEGORÍA ESTRUCTURAL	DEFINICIÓN
I	Concreto reforzado y estructuras de acero (sin yeso), como naves industriales, puentes, postes, muros de contención, tuberías sin enterrar; estructuras subterráneas como cavernas, túneles, galerías, alineadas y desalineadas.
II	Los edificios con pisos de concreto y muros de sótano, en los niveles superiores con paredes de concreto, ladrillo o cantería; muros de cantería de contención, tuberías enterradas, estructuras subterráneas como cavernas, túneles, galerías, con revestimiento de mampostería.
III	Los edificios con plantas de sótanos de concreto y paredes en niveles superiores de mampostería, pisos con viguetas de madera.
IV	Edificios que son particularmente vulnerables o vale la pena proteger.

Tabla 3.13 Límites para vibraciones según la categoría estructural

CATEGORÍA ESTRUCTURAL	FUENTE M		FUENTE S	
	F (HZ)	VMAX (MM/S)	F(HZ)	VMAX(MM/S)
I	10/30	12	10/60	30
	30/60	12/18*	60/90	30/40**
II	10/30	8	10/60	18
	30/60	8/12*	60/90	18/25**
III	10/30	5	10/60	12
	30/60	5/8*	60/90	12/18**
IV	10/30	3	10/60	8
	30/60	3/5*	60/90	8/12**

Fuente M: Maquinaria, el tráfico, las obras de construcción-(*) el valor más bajo se aplica a 30 hz, el superior a 60 hz, con interpolación entre ambos.

Fuente S: Las operaciones de voladura-(**) el valor más bajo se aplica a 60 hz y el valor superior a 90 hz, con interpolación entre ambos.

3.4.2.3 CALTRANS (CALIFORNIA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, DEPARTAMENTO DE TRANSPORTE DE CALIFORNIA).

Este departamento cuenta con un manual, en el cual se establecen valores de vibraciones máximas en edificios. La tabla 3.15 indica que el umbral de daño por vibración es de 12.7 PPV (milímetros por segundo [mm/s]) para edificios históricos y algunos antiguos y estructuras residenciales muy antiguas, y 5.08 PPV (mm/s) para edificios frágiles.

Para los edificios históricos extremadamente frágiles, ruinas y monumentos antiguos, el umbral es de 3.05 PPV (mm / s) a partir de una fuente transitoria. Sin embargo, para las nuevas estructuras residenciales y edificios comerciales modernos, el umbral de daño por vibración es de 25.4 y 50.08 PPV, respectivamente.

Tabla 3.14 Criterios de umbral de vibraciones potenciales

ESTRUCTURA Y CONDICIÓN	MAXIMA PPV (mm/s)	
	FUENTES TRANSITORIAS ¹	FUENTES CONTINUAS/ FRECUENTES/ INTERMITENTES ²
Edificios históricos extremadamente frágiles, ruinas, monumentos antiguos	3.05	2.03
Edificios frágiles	5.08	2.54

Edificios históricos y antiguos	12.7	6.35
Estructuras residenciales muy antiguas	12.7	7.62
Nuevas estructuras residenciales	25.4	12.7
Edificios modernos comerciales / industriales	50.8	12.7

1 Fuentes transitorias, son de un evento único, vibración aislada, como lo son las voladuras.

2 Fuentes intermitentes/continuas/frecuentes incluyen martinets de impacto, compactadores, grietas y asientos, equipos, martinets vibratorios, y equipo de compactación vibratoria.

mm/seg. = milímetros por segundo

PPV = velocidad de partícula máxima (VdB)

3.4.2.4 DIRECTRIZ KDT 046/72 (1972)

La directriz presentada por la Cámara Tecnológica de la Antigua República Democrática Alemana. También toma en cuenta cuatro tipos de edificaciones o construcciones para los que proporcionan unos valores límite para sus velocidades pico en oscilaciones.

Tabla 3.15 Velocidades de vibración admisibles según la categoría del edificio

CATEGORÍA DEL EDIFICIO		Vz,adm (mm/s)
I	Monumentos Históricos	2
II	Casas medio enmaderadas	5
II	Construcciones de pared (por ejemplo, edificios de paredes de losa, bloques, mampostería, etc.)	10
IV	Construcción a base de marcos (por ejemplo, edificios de acero, concreto armado, madera, etc.)	30

3.4.2.5 ISO 4866: AÑO 1990; GUÍA PARA LA MEDICIÓN DE VIBRACIONES Y EVALUACIÓN DE SUS EFECTOS SOBRE LAS ESTRUCTURAS.

Esta norma establece los principios para la realización de mediciones de vibración y procesamiento de datos en lo que respecta a la evaluación de los efectos de la vibración en estructuras, excluyendo la medición de la presión del sonido en el aire y otras fluctuaciones de presión. La norma no habla sobre las características de la fuente de excitación. La evaluación de los efectos de la vibración estructural se obtiene principalmente de la respuesta de la estructura,

utilizando los métodos analíticos apropiados por el cual la frecuencia, duración y amplitud pueden ser definidas.

Tabla 3.16 - El rango típico de la respuesta estructural de diversas fuentes

Función de fuerza de vibración	Rango de Frecuencia a Hz	Rango de Amplitud μm	Rango de la velocidad de la partícula mm/s	Rango de aceleración de la partícula m/s ²	Característica del tiempo	Cantidades de medición
Tráfico vial o de ferrocarril transmitido por el suelo	1 a 80	1 a 200	0.2 a 50	0.02 a 1	C/T	Pvth
Vibración por voladura transmitida por el suelo	1 a 300	100 a 2500	0.2 a 500	0.02 a 50	T	pvth
Hincado de pilotes transmitido por el suelo	1 a 100	10 a 50	0.2 a 50	0.02 a 2	T	Pvth
Maquinaria externa transmitida por el suelo	1 a 300	10 a 1000	0.2 a 50	0.02 a 1	C/T	Pvth/ath
Tráfico acústico, maquinaria externa.	10 a 250	1 a 1100	0.2 a 30	0.02 a 1	C	Pvth/ath
Presión del aire	1 a 40				T	pvth
Maquinaria interna	1 a 1000	1 a 100	0.2 a 30	0.02 a 1	C/T	Pvth/ath
Actividades Humanas a) Impacto b) Directo	0.1 a 100	100 a 500	0.2 a 20	0.02 a 5	T	Pvth/ath
	0.1 a 12	100 a 5000	0.2 a 5	0.02 a 0.2		
Sismos	0.1 a 30	10 a 10^5	0.2 a 400	0.02 a 20	T	Pvth/ath



Viento	0.1 a 10	10 a 10 ⁵	T	ath
Acústicos internos	5 a 500			

Claves
C=continua
T=transitorio
Pvth=Velocidad de la particular en tiempo-historia
Ath=Aceleración en tiempo-historia

Nota 1 Los rangos citados son extremos pero indican los valores que pueden ser experimentados y que se pueden tener para ser medidos. Los rangos extremos de amplitud de desplazamiento y la frecuencia no se han utilizado para derivar velocidad de la partícula y la aceleración.

Nota 2 El rango de frecuencia indicado se refiere a la respuesta de edificios y elementos de ellos para el tipo de excitación particular. Son sólo indicativas.

Nota 3 Los valores de vibración dentro de los rangos indicados pueden causar preocupación. No existen normas que abarquen todas las variedades de la construcción, condiciones y duración de la exposición, pero muchos códigos nacionales asocian el umbral de los efectos visibles con velocidades pico de las partículas en los cimientos de un edificio de más de unos pocos milímetros por segundo. Una probabilidad significativa de algún daño está vinculada a velocidades pico de partículas de varios cientos de milímetros por segundo. Los niveles de vibración por debajo del umbral de la percepción humana pueden ser motivo de preocupación en los procesos delicados e industriales.

3.4.2.6 BUILDINGS BRITISH STANDARD 7385-2 1993 (NORMA BRITÁNICA SOBRE EDIFICIOS)

Esta norma Británica, es una parte de la serie BS 7385, orienta sobre la evaluación de la posibilidad de daño inducido por vibraciones en los edificios debido a una variedad de fuentes, e identifica los factores que influyen en la respuesta a la vibración de los edificios.

Esta norma tiene por objeto proporcionar un procedimiento estándar para la medición, registro y análisis de vibración de los edificios, junto con un registro exacto de los daños que se produzcan. Se aplica únicamente a las vibraciones transmitidas a través del suelo y no a la vibración creada por la maquinaria dentro de un edificio. No cubre las chimeneas, puentes y estructuras subterráneas, tales como: cámaras, túneles y oleoductos.

TABLA 3.17- TRANSIENT VIBRATION GUIDE VALUES FOR COSMETIC DAMAGE

LÍNEA	TIPO DE EDIFICIO	COMPONENTE DE VELOCIDAD PICO DE LA EN UN RANGO DE FRECUENCIA DE PULSO PREDOMINANTE	
		4 HZ A 15 HZ	15 HZ Y SUPERIORES
1	Estructuras industriales reforzadas o formadas por marcos y edificios comerciales pesados.	50 mm/s en 4 Hz y superiores	
2	Estructuras residenciales no reforzadas o formadas con marcos ligeros o edificios ligeros del tipo comercial	15 mm/s en 4 Hz incrementando a 20 mm/s en 15 Hz	20 mm/s en 15 Hz incrementando a 50 mm/s en 40 Hz y superiores.
NOTA 1 Los valores mencionados son los de la base del edificio			
NOTA 2 Para la línea 2, En la frecuencias por debajo de 4 Hz, un desplazamiento máximo de 0.6 mm (cero al valor pico) no debe ser excedido.			

Ahora con la finalidad de que pueda tenerse un panorama general de las normas que controlan el daño estructural se presenta la siguiente tabla de manera resumida los criterios de cada norma presentada.

Tabla 3.18 Resumen de normas que regulan el daño estructural debido a vibraciones

NORMAS	VALOR DE REFERENCIA PARA LA EVALUACIÓN	CRITERIOS PARA ESTABLECER LOS VALORES PERMISIBLES DE EVALUACIÓN
DIN 4150, PARTE 3	Velocidad de la partícula	Para poder establecer los valores permisibles, toma en cuenta el contenido de frecuencias de la fuente de vibración y el uso de la edificación.
SN 640312	Velocidad de la partícula	Para poder establecer los valores permisibles, toma en cuenta el contenido de frecuencias de la fuente de vibración, así como del tipo de actividades por el cual se origina la fuente y el tipo de estructura.

CALTRANS	Velocidad de la partícula	Para poder establecer los valores permisibles simplemente toma en cuenta si la fuente de vibración es continua o transitoria, así como el uso de la estructura y su condición.
DIRECTRIZ KDT 046/72	Velocidad de la partícula	Solo establece los valores admisibles con base en las categorías de los tipos de estructura.
ISO 4866	Velocidad y Aceleración de la partícula	Los valores admisibles que aquí se establecen están en función de la actividad por la cual se genera la fuente de vibraciones y su contenido de frecuencias, así también del tiempo de exposición si es continuo o transitorio.
BRITISH STANDARD 7385-2	Velocidad de la partícula	Aquí los valores de evaluación están en función del uso del edificio y estructura, así también del contenido de frecuencias de la fuente de vibración.

3.5 COMPARACIÓN ENTRE NORMAS NACIONALES E INTERNACIONALES PARA EL CUIDADO DEL CONFORT HUMANO

Haciendo una comparación entre las normas nacionales e internacionales, se encuentra que las normas nacionales toman a las aceleraciones máximas como valor de referencia para hacer las evaluaciones, esa es una característica que comparte con las normas internacionales ISO, otra similitud es que entre las normas NOM-024-STPS-2001 y la ISO 4866 se toman en cuenta las características de la fuente de vibración para poder determinar la aceptación de la aceleración de la partícula; cada norma tiene un criterio propio y en la tabla 3.19 se muestran los criterios de cada una de las normas presentadas anteriormente.

Tabla 3.19 Comparativa entre normas nacionales e internacionales para el cuidado del confort humano.

NORMAS	NOMBRES	VALOR DE REFERENCIA PARA EVALUACIÓN	CRITERIOS PARA ESTABLECER VALORES DE EVALUACIÓN
INTERNACIONALES	ISO 4866	Aceleración y Velocidad de la partícula.	Usa las características del contenido de frecuencias de la fuente de vibración para poder determinar si se usarán las velocidades o aceleraciones como medida de evaluación.



	ISO 2631-1	Aceleración de la partícula	Solo establece valores permisibles de la aceleración de la partícula y el daño cualitativo que produce.
	DIN 4150 PARTE 2	Velocidad de la partícula.	Solo establece valores permisibles de la aceleración de la partícula y el daño cualitativo que produce.
	BS 6472	Velocidad de la partícula	Para establecer un límite permisible de velocidad de la partícula, toma en cuenta el tipo de receptor, si se trata de un periodo nocturno o diurno y si las vibraciones son continuas o transitorias.
	BS 5228-2	Velocidad de la partícula	Solo establece valores permisibles de la velocidad de la partícula y el daño cualitativo que produce.
NACIONALES	NADF-004-AMBT-2004	Aceleración de la partícula	Los valores permisibles están en función de la posición del cuerpo con respecto a los ejes x, y, z.
	NOM-024-STPS-2001	Aceleración de la partícula	Establece valores permisibles de aceleración en función de: la posición del cuerpo (en direcciones x, y, z.), tiempo de exposición a las vibraciones y las vibraciones producidas por la fuente



4. REGISTRO Y ANÁLISIS DE SEÑALES

El estudio de señales y sistemas empleando representaciones senoidales se denomina análisis de Fourier, en honor a Joseph Fourier (1768 - 1830) por sus contribuciones a la teoría de representación de funciones como superposiciones ponderadas de senoides. Los métodos de Fourier tienen una representación muy amplia más allá de las señales y los sistemas; se usan en todas las ramas de la ingeniería y la ciencia.

El análisis de señales inicia con el cálculo del espectro de amplitudes de Fourier, el cual se obtiene con ayuda de la transformada discreta de Fourier. Este espectro muestra la señal en el dominio de la frecuencia, así como, las frecuencias dominantes que la forman. Es de interés comentar que, las amplitudes más importantes del espectro no necesariamente corresponden a las frecuencias propias de la estructura, ya que algunos máximos corresponden a frecuencias de la excitación o al ruido. En la mayoría de los casos, el contar con una estimación previa basada en resultados analíticos permite identificar el rango de frecuencias que deben estudiarse en los espectros.

Para este trabajo, la estimación de las frecuencias se realiza calculando espectros promedio, a partir de segmentos de señales de igual longitud y atenuando cada uno de estos mediante el uso de ventanas tipo Hanning. Dada la simetría de los espectros, es común representar solo la parte positiva (espectro de un solo lado).

4.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS SEÑALES REGISTRADAS

Las señales son cantidades físicas detectables o variables por medio de las cuales se puede transmitir información. Todo fenómeno físico puede ser descrito mediante una serie de datos, los cuales se miden normalmente en términos de una amplitud versus tiempo. Los valores de amplitud que se registran, representan alguna cantidad física de interés ingenieril, como puede ser la velocidad, aceleración y temperatura. Al conjunto de esta serie de datos se le conoce como un registro de datos. En términos generales, los datos pueden ser de naturaleza determinista o aleatoria.

Los datos deterministas son aquellos que pueden describir un fenómeno físico de manera razonable por medio de una relación matemática explícita, como ejemplo, el movimiento de un satélite en órbita alrededor de la tierra, o la oscilación de un cuerpo rígido sujeto a un resorte con comportamiento lineal.

Los datos aleatorios (no-deterministas) representan al fenómeno físico observado y pueden ser descritos empleando postulados probabilísticos y promedios estadísticos debido a que cada una de las observaciones del fenómeno es única. Como ejemplo de datos aleatorios se pueden mencionar las aceleraciones sísmicas y de vibración ambiental, los cambios de temperatura durante el día, la fuerza del viento, entre otros.

A la historia de datos aleatorios registrados durante el tiempo en el que ocurre el fenómeno físico, se le llama función de muestra o registro de historia en el tiempo. La colección de todas las funciones de muestra que pudieron haber ocurrido forma un proceso aleatorio o proceso estocástico.

Así mismo puede haber señales continuas, las cuales son uno de los dos tipos básicos de señales, para las cuales la variable independiente es continua, es decir son señales que están definidas para un intervalo continuo de valores de su variable independiente. Y por otro lado están las señales discretas para las cuales la variable independiente (tiempo) es discreta, es decir que están definidas para un conjunto de valores discretos de su variable independiente.

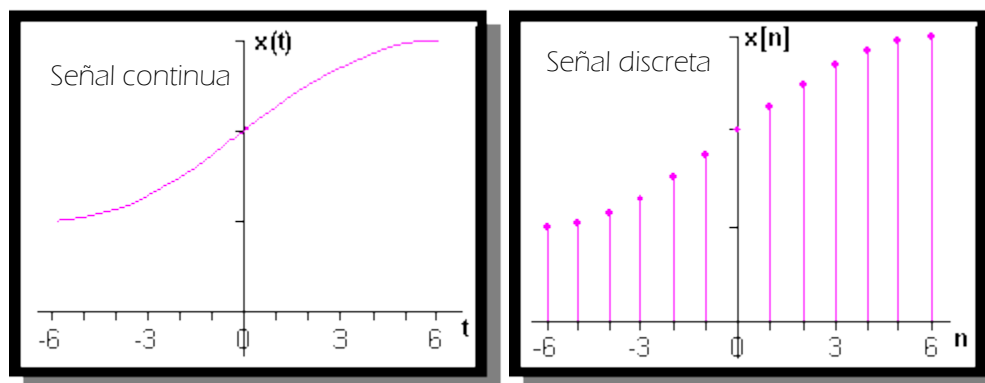


Fig. 4.1 Visualización de una señal continua y una discreta.

4.2 ANÁLISIS DE FOURIER

Para obtener las propiedades dinámicas de una estructura, es común llevar a cabo el muestreo de la señal tomando como parámetro base la aceleración registrada mediante el uso de acelerómetros. Con esta información se obtiene la representación de la señal en el dominio del tiempo, sin embargo, para el análisis de señales es necesario conocer el contenido de frecuencias de una señal, más que las amplitudes de cada muestra individual.



Por lo tanto es de mayor utilidad obtener la representación de una señal en el dominio de la frecuencia. El algoritmo que se usa para transformar las muestras a partir de datos en el dominio del tiempo al dominio de las frecuencias se conoce como **Transformada de Fourier**.

4.2.1 Series de Fourier

Esencialmente la teoría de Series de Fourier persigue dos propósitos:

- ✓ El **análisis** o descomposición de una señal como suma o superposición (en general infinita) de sinusoides.
- ✓ La **síntesis** o recomposición de una señal a partir de sus sinusoides.

Jean-Baptiste Joseph Fourier demostró que una función periódica puede expresarse como la suma de un número infinito de términos de seno y coseno. Esta suma se conoce con el nombre de la serie de Fourier. Sea la función $f(t)$ una función periódica de periodo T , la cual se puede representar por la serie trigonométrica.

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + a_1 \cos \omega_0 t + a_2 \cos 2\omega_0 t + \dots + b_1 \sin \omega_0 t + b_2 \sin 2\omega_0 t + \dots \dots \dots (4.1)$$

es decir,

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty}(a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t) \dots \dots \dots (4.2)$$

Donde $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ es la frecuencia circular y T es el periodo de la función, una serie representada como esta última se le llama serie trigonométrica de Fourier, la cual mediante transformaciones trigonométricas adecuadas se puede también representar de la siguiente manera.

$$f(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(n\omega_0 t - \theta_n) \dots \dots \dots (4.3)$$

En esta última ecuación se ve que la representación en series de Fourier de una función periódica, representa la función periódica como la suma de componentes sinusoidales que tienen diferentes frecuencias.

Así también la serie de Fourier de una función f definida en el intervalo (-p, p) se determina mediante.

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty}(a_n \cos \frac{n\pi}{p} x + b_n \sin \frac{n\pi}{p} x) \dots \dots \dots (4.4)$$



donde

$$a_0 = \frac{1}{p} \int_{-p}^p f(x) dx \dots\dots\dots (4.5)$$

$$a_n = \frac{1}{p} \int_{-p}^p f(x) \cos \frac{n\pi}{p} x dx \dots\dots\dots (4.6)$$

$$b_n = \frac{1}{p} \int_{-p}^p f(x) \sin \frac{n\pi}{p} x dx \dots\dots\dots (4.7)$$

4.2.1.1 Series de Fourier de Cosenos y Senos

La serie de Fourier de una función par en el intervalo (-p, p) es la serie de cosenos

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos \frac{n\pi}{p} x \dots\dots\dots (4.8)$$

donde

$$a_0 = \frac{2}{p} \int_0^p f(x) dx \dots\dots\dots (4.9)$$

$$a_n = \frac{2}{p} \int_0^p f(x) \cos \frac{n\pi}{p} x dx \dots\dots\dots (4.10)$$

La serie de Fourier de una función impar en el intervalo (-p, p) es la serie de senos

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin \frac{n\pi}{p} x \dots\dots\dots (4.11)$$

$$b_n = \frac{2}{p} \int_0^p f(x) \sin \frac{n\pi}{p} x dx \dots\dots\dots (4.12)$$

4.2.2 Forma Compleja de la Serie de Fourier

Si se considera la serie de Fourier para una función periódica f(t), con un periodo T= 2π/ω_o, como

$$f(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t) \dots\dots\dots (4.13)$$

Se pueden usar las relaciones de Euler y expresarse como sigue

$$\cos n\omega_0 t = \frac{1}{2} (e^{jn\omega_0 t} + e^{-jn\omega_0 t}) \dots\dots\dots (4.14)$$

$$\sin n\omega_0 t = \frac{1}{2j} (e^{jn\omega_0 t} - e^{-jn\omega_0 t}) \dots\dots\dots (4.15)$$



donde

$$j = \sqrt{-1}$$

Sustituyendo las relaciones de Euler en la ecuación de la forma trigonométrica de la serie de Fourier y considerando $\frac{1}{j} = -j$

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{jn\omega_0 t} \rightarrow \text{Forma compleja de la serie de Fourier} \dots\dots\dots (4.16)$$

4.2.3 De la Serie a la Transformada de Fourier

La serie de Fourier nos permite obtener una representación en el dominio de la frecuencia para funciones periódicas.

Si se tiene la serie $f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{jn\omega_0 t}$ y se cambia la variable discreta $n\omega_0$ (cuando $T \rightarrow \infty$) por la variable continua ω , ésta se transforma en una integral.

$$C_n = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) e^{-jn\omega_0 t} dt \dots\dots\dots (4.17)$$

Que al ser sustituida en la serie resulta

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) e^{-jn\omega_0 t} dt \right] e^{jn\omega_0 t} \dots\dots\dots (4.18)$$

Que también puede escribirse como sigue

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) e^{-jn\omega_0 t} dt \right] \omega_0 e^{jn\omega_0 t} \dots\dots\dots (4.19)$$

Y cuando $T \rightarrow \infty$, $n\omega_0 \rightarrow \omega$, y $\omega_0 \rightarrow d\omega$ la sumatoria se convierte en

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \right] e^{j\omega t} d\omega \dots\dots\dots (4.20)$$

es decir

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega \dots\dots\dots (4.21)$$

donde

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \dots\dots\dots (4.22)$$



- $\omega = \text{Frecuencia angular}$
- $t = \text{tiempo}$
- $f(t) = \text{señal dada}$
- $F(\omega) = \text{Transformada de Fourier}$

A la función $F(\omega)$ se le llama transformada de Fourier de $f(t)$ y se denota por F

$$F[f(t)] = F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \dots\dots\dots (4.23)$$

A la función que nos permite obtener $f(t)$ a partir de $F(\omega)$ se le llama transformada inversa de Fourier y se denota por F^{-1}

$$F^{-1}[F(\omega)] = f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega \dots\dots\dots (4.24)$$

4.2.4 Análisis Discreto de la Transformada de Fourier

En el caso de mediciones de sistemas estructurales en donde la señal $f(t)$ se obtiene a través de un instrumento analógico digital, la representación de la transformada de Fourier se realiza en forma discreta en un lapso de tiempo T .

Cuando una función periódica $f(t)$ es especificada solamente por N puntos a intervalos iguales de tiempo ($\Delta t = T/N$), $t_0, t_1, t_2, \dots, t_{N-1}$ donde $t_i = i\Delta t$, dadas las integrales de Fourier.

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) dt \dots\dots\dots (4.25)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos(n\omega_0 t) dt \dots\dots\dots (4.26)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \text{sen}(n\omega_0 t) dt \dots\dots\dots (4.27)$$

Estas dos últimas integrales pueden ser expresadas por sumas:

$$a_n = \frac{1}{T} \sum_{i=0}^{N-1} f(t_i) \cos(n\omega_0 t_i) \Delta t \dots\dots\dots (4.28)$$

$$b_n = \frac{1}{T} \sum_{i=0}^{N-1} f(t_i) \text{sen}(n\omega_0 t_i) \Delta t, \quad n = 0, 1, 2, \dots\dots\dots (4.29)$$

donde



$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$$

En este caso la ecuación

$$f(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \text{sen } n\omega_0 t) \dots \dots \dots (4.30)$$

Se escribe

$$f(t) = 2 \sum_{n=0}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \text{sen } n\omega_0 t) \dots \dots \dots (4.31)$$

Los coeficientes a_n y b_n expresadas en forma discreta, también pueden expresarse con la notación compleja de Fourier.

$$C_n = (a_n - j b_n)$$

$$e^{\pm j n \omega_0 t_i} = \cos n \omega_0 t_i \pm j \text{sen } n \omega_0 t_i$$

$$C_n = \frac{1}{T} \sum_{i=0}^{N-1} f(t_i) e^{-j n \omega_0 t_i} \Delta t \dots \dots \dots (4.32)$$

Ahora sustituyendo $t_i = i \Delta t$, $T = N \Delta t$ y $\omega_0 = 2\pi/T$

$$C_n = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} f(t_i) e^{-2\pi j (n_i/N)} \dots \dots \dots (4.33)$$

Para $n=0, 1, 2, \dots$

Esta última ecuación no proporciona información para obtener una función continua, pero sí permite obtener con exactitud todos los valores discretos de la serie $f(t_i)$. Este hecho nos conduce a la definición de la Transformada Discreta de Fourier (DFT) para la serie $f(t_i)$, para $i=0, 1, 2, \dots, N-1$ dada por:

$$C_n = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} f(t_i) e^{-2\pi j (\frac{n_i}{N})} \dots \dots \dots (4.34)$$

Para $n=0, 1, 2, \dots, (N-1)$

Para la transformada discreta inversa

$$f(t_i) = \sum_{n=0}^{N-1} C_n e^{2\pi j (n_i/N)} \dots \dots \dots (4.35)$$

Para $n=0, 1, 2, \dots, (N-1)$

4.2.5 Ventanas de Atenuación

El teorema de muestreo establece que se puede construir una señal continua en el tiempo a partir de muestras discretas e igualmente espaciadas, si la frecuencia de muestreo es al menos dos veces la frecuencia más alta de la señal de tiempo. Así mismo, se asume que la señal puede ser muestreada a intervalos Δt igualmente espaciados, sin pérdida de información. De este modo, la frecuencia de muestreo f_s se obtiene como el inverso del intervalo de muestreo.

$$f_s = \frac{1}{\Delta t} \dots\dots\dots (4.36)$$

De acuerdo al teorema del muestreo, la más alta frecuencia que el sistema digital puede procesar es conocida como la frecuencia de Nyquist.

$$f_{Nyq} = \frac{f_s}{2} \dots\dots\dots (4.37)$$

La obtención del espectro de Fourier mediante las transformadas discreta y rápida de Fourier, asume que existe una señal continua en el tiempo, la cual está formada por una serie de ondas de periodo T constante. En casos prácticos, donde las señales son discretas (señales de vibración ambiental o de vibración forzada) la onda de periodo T corresponde a la señal registrada. Sin embargo, aunque se tomen en cuenta rigurosamente las condiciones de muestreo, la señal registrada puede tener diferentes características espectrales respecto a la señal continua supuesta. Lo anterior se produciría si la señal registrada tiene una forma de onda truncada, equivalente a una discontinuidad en la señal periódica fig. 4.2. Estas discontinuidades producen distorsiones en los espectros calculados respecto a los que se obtendrían de la función continua. La pérdida de información producida por este efecto, es conocida como fuga espectral.

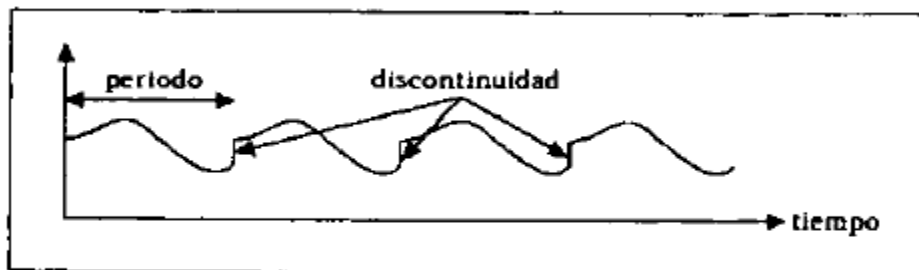


fig. 4.2 Discontinuidades en espectros calculados



Es claro que para eliminar la fuga espectral, la señal registrada tendría que ser de longitud infinita, lo que es imposible de lograr en la práctica. Sin embargo se puede disminuir la fuga espectral en señales de tiempo finito mediante el uso de ventanas de atenuación, que reducen la magnitud de la discontinuidad en los límites de cada periodo. Además de esto, las ventanas de atenuación permiten estudiar uno o varios segmentos de la señal registrada y se puede detectar dos frecuencias muy cercanas entre sí cuyas amplitudes pueden ser muy diferentes.

La aplicación de una ventana de atenuación a una señal en el dominio del tiempo, es la multiplicación de la señal por la función matemática que define a la ventana. Debido a que una multiplicación en el dominio del tiempo es equivalente a una convolución en el dominio de la frecuencia, el espectro de la señal obtenido con una ventana de atenuación, es una convolución del espectro de la señal original con el espectro de la ventana.

La convolución de dos señales f y g es la función

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t - x)f(x)dx \quad t \in R \dots\dots\dots (4.38)$$

Dicha función se representará por $f * g$ y se llama la convolución de f y g .

La integral de la función de convolución se puede interpretar como el área bajo la curva resultante del producto entre las dos funciones en cuestión. El cálculo de la integral se puede realizar de dos maneras, analíticamente (resolviendo las integrales planteadas) o gráficamente (calculando las áreas respectivas a partir de los gráficos realizados para las señales).

Es así, como la convolución en el dominio del tiempo se corresponde con la multiplicación en el dominio de la frecuencia. La convolución de funciones es una herramienta muy versátil que tiene distintos significados en distintos campos y no admite una interpretación única. Se trata de una operación que no es fácil de visualizar y que tiene cierta complicación, para calcular el valor de la convolución de dos funciones en un solo punto hay que usar todos los valores de ambas funciones y realizar una integración. La convolución de dos funciones es una función al menos tan buena como la mejor de ambas. Podemos ver la convolución como una operación para promediar y suavizar una función por medio de otra.

La operación de convolución se comporta de forma parecida a la multiplicación. Concretamente se verifican las siguientes propiedades:

- Conmutativa $f * g = g * f$



- Asociativa $(f * g) * h = f * (g * h)$
- Distributiva $(f + g) * h = f * h + g * h$

Esta operación es muy usada en comunicaciones, análisis armónico, etc., permitiendo encontrar fácilmente muchos resultados importantes. En resumen, al aplicar una ventana de atenuación cambia la forma de la señal en el dominio del tiempo y afecta al espectro correspondiente.

En el análisis de señales existen varios tipos de ventanas de atenuación, entre las que se puede mencionar la ventana rectangular, ventana Hanning, ventana haming, entre otras.

La **ventana rectangular** tiene amplitud unitaria en el tiempo. Matemáticamente, puede escribirse como:

$$w[n] = 1.0 \dots\dots\dots (4.39)$$

Para $n=0,1, 2, \dots, N-1$

donde N es la longitud de la ventana.

La ventana rectangular únicamente trunca la señal exactamente dentro de un intervalo de tiempo finito, es útil para analizar funciones transitorias que tienen una duración más corta que la de la ventana. Sin embargo, su uso es limitado debido a que este tipo de ventana es la que representa la mayor cantidad de fuga espectral.

La **ventana de Hanning** tiene una forma similar al medio ciclo de la función coseno y está definida por la siguiente ecuación:

$$w[n] = 0.5 - 0.5\cos (2\pi n/N) \dots\dots\dots (4.40)$$

Para $n=0,1, 2, \dots, N-1$

Este tipo de ventana es útil para analizar señales más grandes que el tiempo de duración de la ventana, aplicándose para propósitos generales.

Otra de las ventanas más útiles es la **ventana de Haming**, que constituye una versión modificada de la ventana Hanning. Su forma es también similar a una función coseno, sin embargo, a diferencia de la ventana de Hanning, esta no se atenúa hasta cero en sus extremos; la función matemática que define su forma se representa:

$$w[n] = 0.5 - 0.46\cos (2\pi n/N) \dots\dots\dots (4.41)$$



Para $n=0, 1, 2, \dots, N-1$

4.2.6 Filtros

En el análisis de vibraciones de estructuras, se desea manejar la información la cual debe de estar dentro de ciertas frecuencias, por lo tanto, ciertos grupos de frecuencias se deben permitir y las demás eliminar. Esta importante función es realizada por los filtros. En ellos la atenuación es variable con la frecuencia, lo cual permite discriminar las señales que pasarán libremente a través del filtro, y las que quedarán atenuadas.

Los edificios altos son estructuras con múltiples grados de libertad cuyo comportamiento dinámico puede estar determinado por modos superiores de vibrar con un amplio rango de frecuencias. En este tipo de estructuras es importante identificar cuáles son los modos que contribuyen de manera más importante a su respuesta dinámica. Para ello, se requiere restringir la banda de frecuencias de análisis a un rango determinado de valores. Una forma de lograr esto, es mediante el uso de filtros analógicos o digitales.

El diseño de filtros analógicos está reservado para especialistas porque requiere del conocimiento de matemáticas avanzadas y el entendimiento de los procesos que involucran al sistema que está afectado por el filtro. Gracias a los sistemas de muestreo moderno y a las herramientas de procesamiento digital de señales, es posible utilizar filtros digitales en aplicaciones que requieren flexibilidad y programabilidad, como audio, telecomunicaciones, geofísica, monitoreo médico y mediciones en estructuras.

Algunos filtros digitales se pueden usar para controlar parámetros, tales como: tipo de filtro, límite de frecuencias, amplitud de onda y demás. Entre las ventajas que poseen este tipo de filtros sobre los analógicos se pueden mencionar:

- Existe software programable.
- Son estables y predecibles.
- No tiene errores producidos por la humedad y no requieren componentes de precisión
- Tiene una relación costo-beneficio mayor

Cuando un filtro es capaz de transmitir sin distorsión las componentes de las frecuencias contenidas dentro de una banda dada, anulando el resto de las componentes fuera de ésta, se conoce como filtro ideal. Aunque en rigor no existe este tipo de filtros, es importante conocer sus características principales.



Para los filtros ideales, existe una clasificación muy clara dependiendo del rango de frecuencias que deben pasar o ser atenuadas. A continuación se presentan algunos de estos filtros.

a) Filtro pasa-todo: Como su nombre lo indica, este filtro tiene la propiedad de transmitir sin distorsión toda la banda de frecuencias. Su expresión matemática está definida por:

$$H(f) = H_0 e^{-i2\pi f t_0} ; -\infty < f < \infty \dots\dots\dots (4.42)$$

b) Filtro pasa-bajas. Deja pasar a las bajas frecuencias; su expresión matemática está definida por

$$H(f) = \begin{cases} H_0 e^{-i2\pi f t_0} ; -f_c < f < f_c \\ 0 ; f > f_c \end{cases} \dots\dots\dots (4.43)$$

c) Filtro pasa-altas. Este filtro únicamente deja pasar las altas frecuencias; su expresión matemática queda definida como sigue:

$$H(f) = \begin{cases} H_0 e^{-i2\pi f t_0} ; f \geq f_c \\ 0 ; f < f_c \end{cases} \dots\dots\dots (4.44)$$

d) Filtro pasa-bandas. Este filtro deja pasar una banda de frecuencias previamente definida; su expresión queda definida

$$H(f) = \begin{cases} H_0 e^{-i2\pi f t_0} ; -f_2 \leq f \leq f_1; f_1 \leq f \leq f_2 \\ 0 ; \forall f \end{cases} \dots\dots\dots (4.45)$$

En los filtros descritos, H_0 y t_0 representan la amplitud y el tiempo inicial del proceso, mientras que f es la frecuencia de análisis y f_c la frecuencia de corte del filtro. (Castelán, 2001).

4.2.7 Funciones de Correlación para la Identificación de Frecuencias

Espectro de potencia

No obstante la existencia de ruido en la señal puede provocar la aparición de múltiples picos dentro del espectro, de modo que para mejorar la definición de las frecuencias relevantes se determina el espectro de potencia, que en términos simples es un indicador de la cantidad de energía que se libera en una determinada frecuencia, se calcula utilizando la siguiente ecuación.

$$S_{XX}(\omega) = F^*(\omega)F(\omega) = |F(\omega)|^2 \dots\dots\dots (4.46)$$



donde,

$F(\omega)$ es la transformada de Fourier de la señal de entrada $f(t)$,

$F^*(\omega)$ es el conjugado complejo de $F(\omega)$.

El espectro de potencia es útil para confirmar la existencia de frecuencias en el espectro de amplitudes de Fourier, así como para determinar la fracción de amortiguamiento crítico, ya que los picos máximos están mejor definidos.

Hasta este punto la señal es procesada en forma independiente; para determinar las relaciones dinámicas entre señales de entrada y salida se utilizan cuatro herramientas adicionales; espectro cruzado, función de transferencia, función de coherencia, y determinación de fases.

Espectro cruzado

El espectro cruzado de las señales de entrada y salida, al igual que el espectro de potencia, permite confirmar la existencia de frecuencias en el espectro de amplitudes de Fourier, que a su vez se encuentran presentes en ambas señales, ello en función de la cantidad de energía presente entre ellas, su cálculo es el producto conjugado complejo de $F(\omega)$ de la señal de entrada y la transformada de Fourier de la señal de salida, $G(\omega)$.

$$S_{XY}(\omega) = F^*(\omega)G(\omega) \dots\dots\dots (4.47)$$

Función de Transferencia

Las relaciones dinámicas entre las señales de entrada y salida de la excitación, se pueden establecer a través de la función de transferencia $H(\omega)$, de acuerdo a la siguiente relación:

$$G(\omega) = H(\omega)F(\omega) \dots\dots\dots (4.48)$$

donde, $F(\omega)$ y $G(\omega)$ son las transformadas de Fourier de las señales de entrada y salida, respectivamente. El conjugado del complejo de esta ecuación es:

$$G^*(\omega) = H^*(\omega)F^*(\omega) \dots\dots\dots (4.49)$$

Y multiplicando miembro a miembro (4.48) por (4.49) resulta:

$$G^*(\omega)G(\omega) = H^*(\omega)H(\omega)F^*(\omega)F(\omega) = |G(\omega)|^2 = |H(\omega)|^2|F(\omega)|^2 \dots\dots\dots (4.50)$$

Considerando la ecuación 4.46, finalmente queda.



$$S_{YY}(\omega) = |H(\omega)|^2 S_{XX}(\omega) \rightarrow |H(\omega)|^2 = \frac{S_{YY}(\omega)}{S_{XX}(\omega)} \dots\dots\dots (4.51)$$

Por otro lado, si la ecuación 4.48 se multiplica por $F^*(\omega)$, se tiene que:

$$F^*(\omega)G(\omega) = H(\omega)F^*(\omega)F(\omega) = H(\omega)|F(\omega)|^2 \dots\dots\dots (4.52)$$

Considerando la ecuación (4.46) y sabiendo que $S_{XY}(\omega) = F^*(\omega)G^*(\omega)$ es el espectro cruzado de las señales de entrada y salida, entonces

$$S_{XY}(\omega) = H(\omega)S_{XX}(\omega) \rightarrow H(\omega) = \frac{S_{XY}(\omega)}{S_{XX}(\omega)} \dots\dots\dots (4.53)$$

Mediante la función de transferencia definida en función del espectro cruzado, entre las señales de entrada y salida, y del espectro de potencia de la señal de entrada, se puede obtener información relacionada con el factor de ganancia y con el factor de fase. Con el factor de fase $|H(\omega)|$ definido como la parte real de la función de transferencia, es posible relacionar la amplitud de la señal de entrada con la de salida. El factor de fase de la función de transferencia representa la fase de la señal de entrada para cualquier frecuencia.

Es importante mencionar que la ecuación (4.51) es teórica y normalmente en mediciones experimentales pueden existir complicaciones en el cálculo de $H(\omega)$, debido a señales adicionales que puedan existir en la salida del sistema en forma de ruido. Al considerar $S_{XY}(\omega)$ como el espectro cruzado entre las señales de entrada y salida, los cuales se asumen que no son correlacionados, al realizar promedios de eventos, este término tiende a cero, por lo tanto, es posible recuperar $H(\omega)$, aún en la presencia de ruido, mediante el uso del espectro cruzado y el espectro de potencia $S_{XX}(\omega)$ de la señal de entrada. De esta forma, la función de transferencia se calcula con la ecuación (4.53).

Función de coherencia

Otro de los parámetros importantes dentro de las mediciones de un sistema, es la función de coherencia, $\gamma^2(\omega)$, que tiene la característica de ser adimensional en el dominio de la frecuencia y representa valores entre cero y uno. Los valores de la coherencia representan la fracción de la salida del sistema que se relaciona directamente con la de entrada y proporciona un indicador de la validez de la función de transferencia estimada. Matemáticamente, la coherencia es una función de correlación cruzada en el dominio de las frecuencias y se obtiene con la siguiente expresión.

$$\gamma^2(\omega) = \frac{|S_{XY}(\omega)|^2}{S_{XX}(\omega)S_{YY}(\omega)} \dots\dots\dots (4.54)$$



El espectro de fase, que es la gráfica del ángulo de fase ϕ_n de los coeficientes C_n contra ω , sirve para determinar la dirección del movimiento de un punto de medición respecto a la de otro. Por ejemplo, si se tienen instrumentos orientados paralelamente a la dirección de medición, estarán en fase (ángulo de fase = 0°), en caso contrario estarán fuera de fase (ángulo de fase = 180°). El espectro de fase se obtiene con ayuda de las formulas siguientes.

$$C_n = |C_n|e^{j\phi_n} \dots\dots\dots (4.55)$$

$$C_{-n} = C_n^* = |C_n|e^{-j\phi_n} \dots\dots\dots (4.56)$$

donde:

$$|C_n| = \frac{1}{2}\sqrt{a_n^2 + b_n^2} \dots\dots\dots (4.57)$$

$$\phi_n = \arctan\left(-\frac{b_n}{a_n}\right) \dots\dots\dots (4.58)$$

Para los valores enteros de **n** de la frecuencia angular $\omega = n\omega_0$.

4.3 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE LAS ESTRUCTURAS

4.3.1 Frecuencias propias de Vibrar

El comportamiento dinámico de una estructura no solo depende de una frecuencia de vibrar. El cálculo de las frecuencias de vibrar de estructuras ligeramente amortiguadas, como es el caso de edificios, puede obtenerse en función del espectro de amplitudes de Fourier. Una mejor estimación se logra con el empleo de espectros de potencia y funciones de transferencia (también llamados cocientes espectrales) (Bendat y Piersol, 1993). En el espectro de potencia de una señal de salida, las frecuencias asociadas a los picos no necesariamente corresponden a las frecuencias propias de vibrar de la estructura (Frecuencias de resonancia de modos normales); también pueden corresponder a las frecuencias características de la excitación y ruido.

El factor de ganancia que puede ser obtenido a través de la función de transferencia, mostrará máximos en aquellas frecuencias llamadas de resonancia y que corresponden a modos normales de la estructura.

Para encontrar las frecuencias que corresponden a modos normales se hace uso del concepto de ángulo de fase, lo que se explica enseguida. En estructuras ligeramente amortiguadas, el espectro de transferencia de fase mostrará la relación de fase entre dos puntos cualesquiera donde hayan sido colocados instrumentos de medición, debido a que este es un espectro cruzado,



normalizado respecto al espectro de alguno de los puntos. De este modo, si para una frecuencia dada existe una relación de fase cero ó 180° entre estos instrumentos, significa que esta frecuencia corresponde a un modo normal de la estructura.

Si existe una cantidad de ruido extraño en las mediciones de salida, el acoplamiento de este ruido entre los modos normales puede distorsionar los resultados. Sin embargo, problemas de este tipo pueden revelarse por mediciones con ruido y todas las otras mediciones sean menor que la unidad. Además un acoplamiento entre modos normales causará que los datos de fase entre el mínimo de alguna de las mediciones sean diferente de cero o de 180° . Por lo tanto, como regla general, el espectro de potencia no debe ser usado para definir una forma modal normal a menos que las mediciones produzcan coherencia cercana a la unidad y fase cercana a cero o a 180° con todas las otras mediciones de salida.

Es necesario mencionar que el cálculo de espectros de potencia es útil, entre otras cosas, para determinar las formas modales. Para una frecuencia modal identificada, las amplitudes de los espectros en cada estación de medición corresponden a sus respectivas ordenadas de la forma modal. Dado que el espectro de potencia se construye con el cuadrado de las amplitudes del espectro de Fourier, es posible identificar con mayor claridad las frecuencias de interés. Además, por medio de este espectro se calcula el porcentaje de amortiguamiento crítico de la estructura, (Kawasumi y Shima, 1965).

En ocasiones, no basta con analizar las amplitudes del espectro de potencia para el cálculo de las frecuencias de resonancia, por lo que es conveniente utilizar el espectro cruzado (de amplitud y fase) de dos señales y la función de coherencia. Con la parte compleja del espectro cruzado, se pueden encontrar el ángulo de fase entre los dos instrumentos, con esto se puede definir el orden de cada frecuencia identificada.

La función de coherencia es útil para determinar la validez de la fase asociada a una frecuencia y por lo tanto, es posible corroborar que estas frecuencias corresponden a las formas modales de la estructura. La coherencia mostrará valores pequeños para aquellas frecuencias que contienen una presencia importante de ruido.

Si se cuenta con un instrumento colocado en el terreno circundante del edificio, haciendo uso de las funciones de transferencia, se pueden obtener frecuencias y formas modales ignorando los efectos de la interacción suelo-estructura. Para llevarlo a cabo, se realizan cocientes espectrales entre pisos superiores y el terreno.

4.3.2 Determinación de Formas Modales

El cálculo de las formas modales se puede llevar a cabo en función de los desplazamientos de los niveles respecto a un nivel de referencia que generalmente es la azotea (Ruiz, 1999). Por otro lado, las formas modales también pueden obtenerse a partir de los espectros de potencia de la señal de salida. Para una frecuencia f_i , los desplazamientos modales se pueden obtener con la ecuación 4.59 (Bendat y Piersol, 1993).

$$\phi_i y_j = [G_{y_j y_j}(f_i)]^{1/2} \dots\dots\dots (4.59)$$

$i = 1, 2, 3 \dots$
 $j = 1, 2, 3, \dots, r$

donde:

- ϕ_i = Forma modal en el nivel j asociado a la frecuencia f_i .
- y_j = Señal de respuesta en el nivel j .
- $G_{y_j y_j}(f_i)$ = Ordenada del espectro de potencia de la señal de salida.
- f_i = Frecuencia del modo normal i .
- j = Nivel del edificio donde está colocado el instrumento de medición.
- r = Número de niveles instrumentados en el edificio.

El número mínimo de localizaciones de los instrumentos n_i , que se requieren para definir el modo i es igual a su orden, por ejemplo, si se desea obtener el segundo modo, n_i tendría que ser 2. En términos generales, el número de niveles instrumentados dependerá de la altura total del edificio, cambios notables en rigidez o masa de la estructura y de la configuración arquitectónica. Para la obtención de los modos de vibrar de una estructura, es altamente recomendable contar con información alterna, como la estimación de formas modales normales a partir de estudios analíticos. En un estudio previo, González A. 1989, se recomienda que para determinar los 3 primeros modos de vibrar en edificios entre 6 y 20 niveles, se debe instrumentar un mínimo de 3 niveles intermedios, más los extremos.

Mediante una distribución racional de los instrumentos de medición y empleando la metodología descrita anteriormente, se pueden obtener las formas modales de traslación y de torsión en un edificio. Las formas modales en traslación se obtienen analizando las señales de equipos colocados en puntos cercanos a los centros de torsión, de tal forma que los desplazamientos torsionales se minimicen. Las formas modales en torsión pueden encontrarse relacionando las señales de equipos



colocados en un mismo nivel. Para la determinación del modo fundamental en torsión, es común colocar los instrumentos en la azotea del edificio y lo más alejado posible del centro de torsión, en donde los desplazamientos son máximos. Además, el espectro de fase requiere que las direcciones de los instrumentos sean paralelas entre sí.

Es importante mencionar que la aplicación de esta técnica para el cálculo de las formas modales está limitada al caso donde la relación de amortiguamiento sea pequeña, es decir $\xi < 0.05$, lo cual se cumple en la mayoría de los edificios. Esta limitante se debe a que los picos del espectro de potencia de salida, están asociados a las frecuencias de resonancia f_r y no a las frecuencias naturales sin amortiguamiento f_n . Para valores pequeños de amortiguamiento, la frecuencia de resonancia será, aproximadamente, igual a la frecuencia natural sin amortiguamiento, ecuación 4.60.

$$f_r = f_n \sqrt{1 - 2\xi^2} \dots\dots\dots (4.60)$$

4.3.3 Porcentaje de Amortiguamiento Crítico

Para el cálculo del porcentaje de amortiguamiento crítico, existen varios métodos, como lo son: decremento logarítmico, amplificación de resonancia, curva de resonancia y el método de Kawasumi y Shima, se explicará este último, el cual está basado en las amplitudes de un espectro de potencia definidos en forma clara, con buena resolución y suponiendo condiciones de ruido blanco. En las ecuaciones 4.61 y 4.62 se presentan las expresiones propuestas por el método.

En estas ecuaciones, los valores de frecuencia w_1 y w_2 se obtienen al trazar una línea horizontal a una altura de Y_{\max}/λ , siendo común utilizar un valor de 2 para la constante λ , fig. 4.3.

$$\xi \cong \frac{A}{2} \left(1 - \frac{3}{8} A^2 \right) \dots\dots\dots (4.61)$$

$$A = \left(\frac{w_2^2 - w_1^2}{w_2^2 + w_1^2} \right) / \sqrt{(\lambda - 1)} \dots\dots\dots (4.62)$$

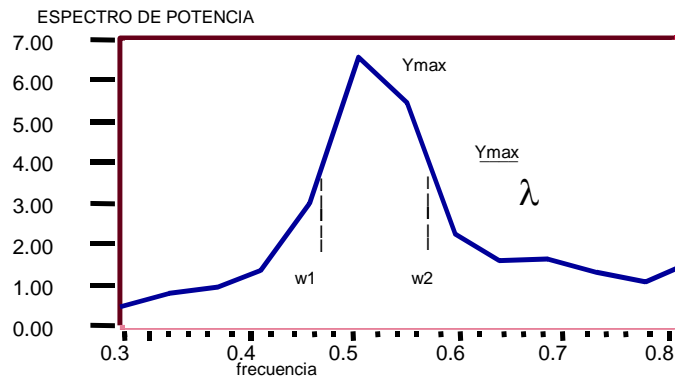


Fig. 4.3. Obtención del amortiguamiento, método de Kawasumi y Shima.

4.4 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE NAKAMURA

La técnica de Nakamura propuesta en 1989, permite obtener los periodos fundamentales de vibración del suelo por medio del análisis e interpretación de microtemblores.

En primera instancia para poder determinar la Función de Transferencia Empírica se debe obtener un estimativo del efecto de sitio (SE) por medio de la expresión.

$$S_E = \frac{H_S(w)}{H_B(w)} \dots\dots\dots (4.63)$$

donde:

H_S es el espectro de la componente horizontal superficial

H_B es el espectro de la componente horizontal en donde se origina el movimiento

Posteriormente, para calcular el efecto de sitio se debe eliminar el efecto de las ondas superficiales (A_S) que están inmersas en el espectro de ondas verticales superficiales (V_S) de las micro-trepidaciones y no en la base del movimiento (V_B):

$$A_S(w) = \frac{V_S(w)}{V_B(w)} \dots\dots\dots (4.64)$$

Al eliminar el efecto producido por las ondas Rayleigh el efecto de sitio queda determinado por la función:

$$S_M = \frac{S_E(w)}{A_S(w)} = \frac{H_S/V_S}{H_E/V_E} \dots\dots\dots (4.65)$$

Sin embargo Nakamura (1989) demostró que:

$$\frac{H_E(w)}{V_E(w)} = 1 \dots\dots\dots (4.66)$$



Por lo tanto, la técnica de Nakamura muestra que a partir de la relación de cocientes espectrales entre la componente vertical y la componente horizontal de un mismo sitio se puede obtener una estimación del efecto de sitio para las ondas internas por medio de la expresión:

$$S_M(w) = \frac{H_s(w)}{V_s(w)} \dots\dots\dots (4.67)$$

Nakamura propuso en el año 1989 que el cociente entre la componente horizontal y la componente vertical en el dominio frecuencial era un buen estimador de la respuesta de sitio. Esta técnica se aplicó por primera vez a microtemblores de zonas urbanas de Japón.

Nakamura supone que la razón H/V o ratio espectral corresponde a la función de transferencia de los niveles superficiales sometidos a movimientos horizontales. Basa su trabajo en la hipótesis de que un microtemblor está compuesto por un cuerpo principal de ondas y por ondas superficiales Rayleigh, inducidas por fuentes artificiales (trenes, tráfico, etc.). Estas ondas superficiales se consideran perturbaciones que son necesarias eliminar.

Para lograrlo, Nakamura realizó los siguientes postulados:

- Las ondas Rayleigh solo afectan a la parte superior del nivel y en cambio no afectan a la base del nivel del suelo.
- El efecto de las ondas Rayleigh es visible principalmente en el movimiento vertical, y por tanto se puede definir el ratio

$$E_s = \frac{S_{VS}}{S_{VB}} \dots\dots\dots (4.68)$$

donde, S_{VS} y S_{VB} corresponden al espectro de amplitudes de Fourier en la superficie S y en la base B del nivel. Este ratio toma el valor de 1 si no existe presencia de ondas Rayleigh y <1 si se incrementa la presencia de estas ondas superficiales.

- El efecto de la onda Rayleigh es igual en superficie para el movimiento vertical y horizontal

Nakamura propuso una función de transferencia modificada corregida para ondas Rayleigh. Una expresión de la función de transferencia clásica es:

$$S_T = \frac{S_{HS}}{S_{HB}} \dots\dots\dots (4.69)$$

donde,



S_{HS} y S_{HB} corresponden al espectro de amplitud de Fourier en la superficie S y la base B del nivel del suelo. La función de transferencia modificada propuesta por Nakamura tiene la siguiente expresión:

$$S_M = \frac{S_T}{E_S} = \frac{S_{HS} * S_{VB}}{S_{HB} * S_{VS}} \dots\dots\dots (4.70)$$

donde,

S_M es la función de transferencia modificada, S_T es la función de transferencia clásica, es el radio definido y S_{VS} y S_{VB} son los espectros de amplitudes de Fourier en la base y la superficie del estrato, respectivamente.

Esta ecuación se simplificó a partir de los resultados en tres ciudades Japonesas que para el rango frecuencial de 0.1 a 20 Hz establecían que:

$$\frac{S_{HB}}{S_{VB}} \cong 1 \dots\dots\dots (4.71)$$

Por tanto, la función de transferencia modificada de Nakamura se expresa como:

$$S_M = \frac{S_{HS}}{S_{VS}} \dots\dots\dots (4.72)$$

Es decir la función de transferencia se puede obtener con una única medida en la superficie.

El fundamento teórico de esta técnica se ha cuestionado pero estudios experimentales muestran que, utilizando esta técnica, para suelos blandos se muestra un pico claro que está correlacionado con la frecuencia de resonancia fundamental. Otros estudios, sin embargo, concluyen que la amplitud en este pico no está bien correlacionada con la amplificación de la onda S en la frecuencia de resonancia, sino que depende también del ratio de Poisson cerca de la superficie.

Salvo estas limitaciones, la técnica de Nakamura es una técnica sencilla y de bajo costo que permite estimar las frecuencias fundamentales de suelos blandos.

4.4.1 Tipos de Ondas Sísmicas Generadas en el Suelo

Las ondas sísmicas son un tipo de onda elástica fuerte en la propagación de perturbaciones temporales del campo de tensiones que generan pequeños movimientos en las placas tectónicas.

Las ondas sísmicas pueden ser generadas por movimientos telúricos naturales o también pueden ser generadas de manera artificial, un ejemplo es el uso de explosivos o camiones (vibroscis).

Cuando un sismo sucede en la Tierra, ésta es puesta en vibración, ya que un sismo consiste precisamente en la liberación repentina de los esfuerzos impuestos al terreno. Esta vibración es debida a la propagación de ondas.

En un terremoto se transmiten ondas que viajan por el interior de la tierra. Siguen caminos curvos debido a la variada densidad y composición del interior de la Tierra. A este tipo de ondas se llaman **ondas internas, centrales o de cuerpo**, transmiten los temblores preliminares de un terremoto pero poseen poco poder destructivo. Las ondas de cuerpo son divididas en dos grupos: **ondas primarias (P) y secundarias (S)**.

También se propagan ondas por la superficie. Son las que más tardan en llegar. Debido a su baja frecuencia provocan resonancia en edificios con mayor facilidad que las ondas de cuerpo causando los efectos más devastadores. Hay **ondas superficiales** de dos tipos: de **Rayleigh** y de **Love**.

4.4.1.1 Ondas de Cuerpo

Ondas Primarias (P)

Las ondas P son ondas longitudinales, lo cual significa que el suelo es alternadamente comprimido y dilatado en la dirección de la propagación.

Estas ondas generalmente viajan a una velocidad 1.73 veces de las ondas S y pueden viajar a través de cualquier tipo de material. Velocidades típicas son 330m/s en el aire, 1450m/s en el agua y cerca de 5000m/s en el granito.



Fig. 4.4 Propagación de ondas P

Ondas Secundarias (S)

Las ondas S son ondas transversales o de corte, lo cual significa que el suelo es desplazado perpendicularmente a la dirección de propagación, alternadamente hacia un lado y hacia el otro. Las ondas S pueden viajar únicamente a través de sólidos debido a que los líquidos no pueden soportar esfuerzos de corte. Su velocidad es alrededor de 58% la de una onda P para cualquier material sólido. Usualmente la onda S tiene mayor amplitud que la P y se siente más fuerte que ésta.



Fig. 4.5 Propagación de ondas S.

4.4.1.2 Ondas Superficiales

Ondas de Rayleigh

Cuando un sólido posee una superficie libre, como la superficie de la tierra, pueden generarse ondas que viajan a lo largo de la superficie. Estas ondas tienen su máxima amplitud en la superficie libre, la cual decrece exponencialmente con la profundidad, y son conocidas como ondas de Rayleigh en honor al científico que predijo su existencia.

La trayectoria que describen las partículas del medio al propagarse la onda es elíptica retrógrada y ocurre en el plano de propagación de la onda. Una analogía de estas ondas lo constituyen las ondas que se producen en la superficie del agua.

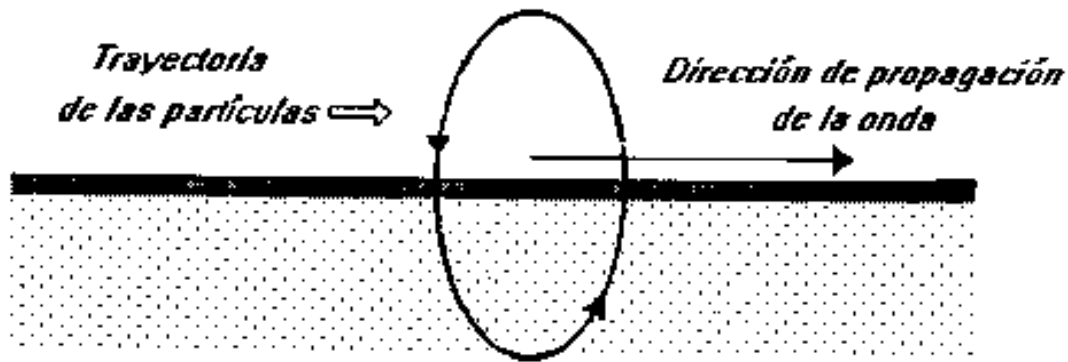


Fig. 4.6 Trayectoria y dirección de partículas en una onda Rayleigh.

Ondas de Love

Otro tipo de ondas superficiales son ondas de Love llamadas así en honor del científico que las estudió. Estas se generan sólo cuando un medio elástico se encuentra estratificado, situación que se cumple en nuestro planeta pues se encuentra formado por capas de diferentes características físicas y químicas. Las ondas de Love se propagan con un movimiento de las partículas, perpendicular a la dirección de propagación, como las ondas S, sólo que polarizadas en el plano de la superficie de la Tierra, es decir sólo poseen la componente horizontal a superficie. Las ondas de Love pueden considerarse como ondas S "atrapadas" en la superficie. Así tanto para las ondas de Rayleigh, como para las ondas de Love, la amplitud de las mismas decrece rápidamente con la profundidad. En general su existencia se puede explicar por la presencia del vacío o un medio de menor rigidez, tiende a compensar la energía generando este tipo especial de vibraciones.

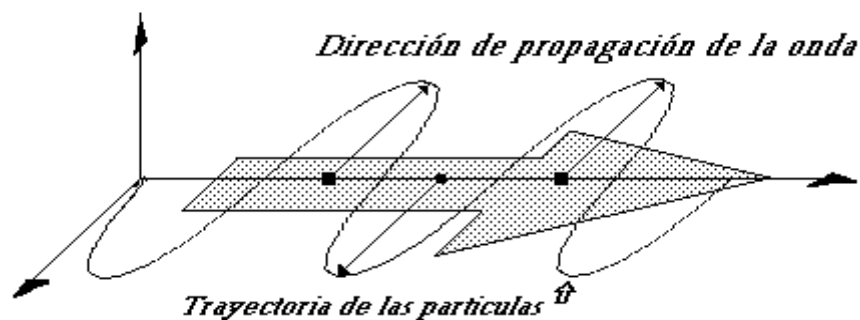


Fig. 4.7 Trayectoria y dirección de partículas en una onda Love.

5. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

5.1 ZONA DE ESTUDIO

5.1.1 Ubicación

El Municipio de Cuautitlán Izcalli, se localiza en la parte noroeste de la cuenca de México. Su cabecera municipal se ubica en las coordenadas $19^{\circ} 40' 50''$ de la latitud norte y a los $99^{\circ} 12' 25''$ de la longitud oeste. Tiene una extensión territorial de 109.9 km por lo que representa el 0.5% de la superficie del Estado; colinda al norte con el Municipio de Tepotzotlán, Cuautitlán y Teoloyucan, al este con Cuautitlán y Tultitlán, al sur con Tlalnepantla de Baz y Atizapán de Zaragoza; al oeste con Villa Nicolás Romero y Tepotzotlán.

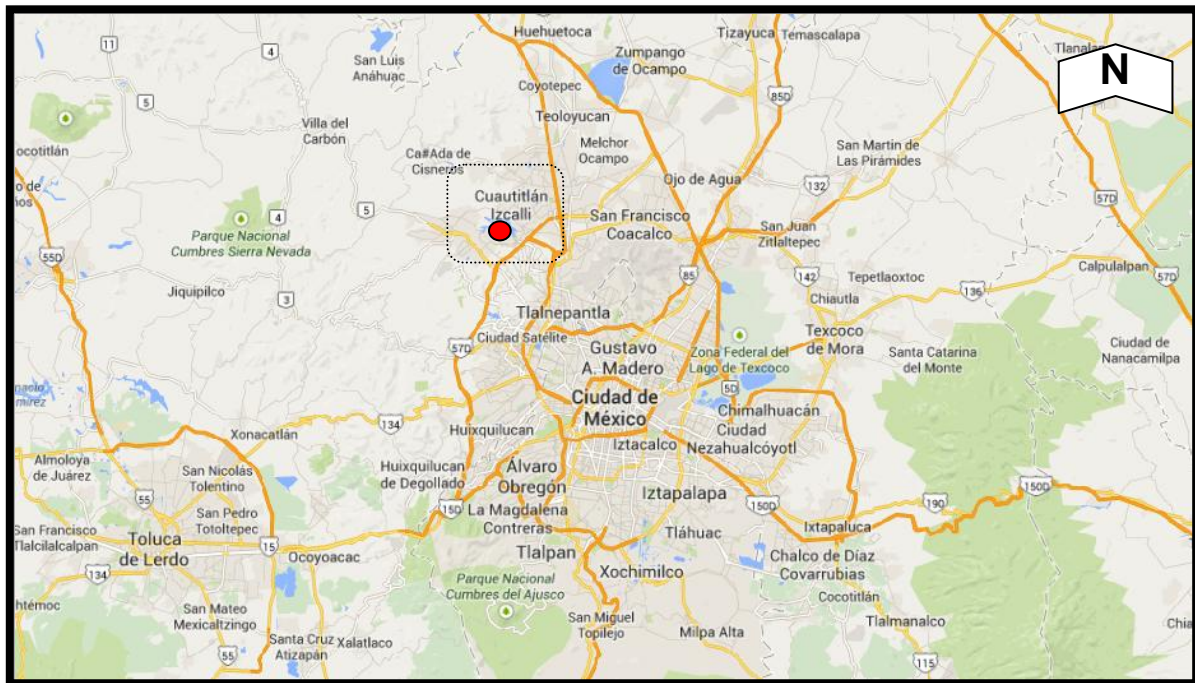


Fig. 5.1 Ubicación del municipio de Cuautitlán Izcalli.

5.1.2 Geografía

El municipio tiene una topografía cuyas principales elevaciones son el cerro de Barrientos con una altura de 2430 m. sobre el nivel del mar (msnm) y el cerro de Axotlán, de 2300 msnm, el resto del territorio presenta planicies y suaves lomeríos.



La superficie territorial está conformada por un área plana en la parte centro y norte del municipio; las áreas planas ocupan una extensión de 6,100 hectáreas las cuales están formadas por aluvión mientras en los lomeríos, que tienen una extensión de 4,700 hectáreas, forman el substrato por areniscas y tobas volcánicas. Cuautitlán Izcalli tiene una altura promedio de 2,252 msnm, sus porciones más altas están ubicadas al sur con una máxima altura de 2430 msnm y la más baja se encuentra al occidente con 2,250 msnm, la cabecera municipal está a 2,280 msnm.

5.2 CONDICIONES GEOTÉCNICAS DEL SITIO

5.2.1 Geología de la Zona

El estudio realizado se encuentra dentro de la zona septentrional de las tres en que Mooser (1956) dividió a la Cuenca de México, siendo sus principales poblaciones San Mateo Xoloc. Cuautitlán, Tultitlán, Tultepec, Tepotzotlán, Teoloyucan, Coyotepec, Melchor Ocampo, San Andrés Xaltenco, Nextialpan, Zumpango y Huehuetoca perteneciente al Estado de México, y Tizayuca perteneciente al Estado de Hidalgo.

Al igual que en la parte central de la cuenca sobre la que se encuentra la Ciudad de México, afloran los depósitos de la formación Clástica Aluvial del grupo Chichinautzin constituidos por arcilla, limo, arena, travertino y lava. Perimetralmente la planicie de la zona está en contacto con depósitos de ladera.

Al poniente está la Sierra de Guadalupe y el Río Hondo de Tepotzotlán, con las laderas de la Sierra Monte Bajo, donde se encuentran abanicos volcánicos formados por lahares, ignimbritas, capas de pómez, ceniza y algunos depósitos fluviales, que constituyen la llamada formación Tarango. También al Poniente está en contacto con las laderas de la Sierra de Tepotzotlán, donde se encuentran suelos tobáceos y pumíticos derivados de lluvias de ceniza. Al norte la planicie está en contacto con las laderas de la Sierra de Tezontlalpan, constituidas por suelos tobáceos y pumíticos originados por lluvias de ceniza. Al oriente está en contacto con las laderas del cerro de la Cruz, cerro Paula y de Chiconautla, constituidas por lavas, tobas, fenobasaltos y andesitas.

5.2.2 Perfil Estratigráfico de la Zona

De los estudios que se han llevado a cabo en la zona de estudio para determinar el perfil estratigráfico, se tienen las pruebas de Penetración Estándar, de Tubo Shelby Dentado y Broca Tricónica, los tres combinados. Ahora de los resultados

obtenidos, se tiene una descripción estratigráfica conformada por arena limosa y limo arenoso intercalados con capas de arcilla, por lo que corresponde a una zona aluvial.

Recordemos que un suelo aluvial es un tipo de suelo poco evolucionado que se constituye como los depósitos recientes de los valles y cuyas características en cuanto a composición y grado de alteración dependen, en última instancia, de las del material arrastrado por las aguas corrientes en superficie. Su tamaño varía desde la arcilla hasta las gravas gruesas, cantos y bloques. Las facies más gruesas presentan bordes redondeados. Se distribuyen en forma estratiforme, con cierta clasificación, variando mucho su densidad. Están muy desarrollados en los climas templados, ocupando cauces y valles fluviales, llanuras y abanicos aluviales, terrazas y paleocauces.

Son suelos anisotrópicos en su distribución, su continuidad es irregular, pudiendo tener altos contenidos en materia orgánica en determinados medios. La permeabilidad depende de la granulometría y generalmente presentan un nivel freático alto. Los depósitos aluviales constituyen una fuente de recursos de materiales de construcción, sobre todo como áridos. La columna tipo de un depósito aluvial es como la que se ve en la figura 5.2, recalcando que solo es un ejemplo y no se trata de la estratigrafía del sitio de estudio.

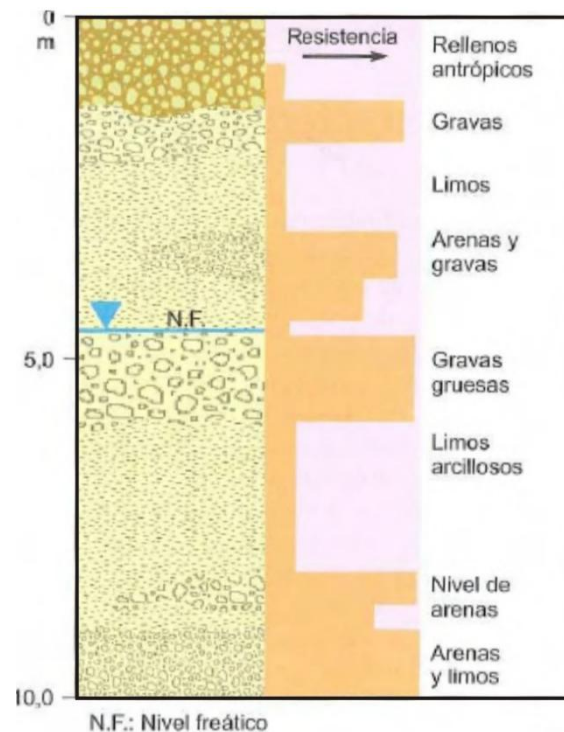


Fig. 5.2 Ejemplo modelo de una columna estratigráfica de un suelo aluvial



5.3 MONITOREO DE VIBRACIONES DEBIDAS AL TRÁFICO VEHICULAR

Una parte importante en la determinación de los efectos de las vibraciones causadas por tráfico se logra en el proceso de observación e interpretación. La observación en el caso de vibraciones causadas por actividad humana se realiza por medio de mediciones, las cuales se realizan con instrumentación especializada para el área la cual para este caso en estudio ya se hizo una breve descripción en un capítulo anterior.

En la medición de vibraciones, el objetivo es detectar y registrar el movimiento vibratorio que es causado por fuerzas que pueden variar en magnitud y dirección, y que en el caso particular de este proyecto se deben a que parte de la energía causada por el tráfico vial es transmitida a las zonas habitacionales aledañas. Esta información puede ser utilizada para: interpretación sismológica, caracterización y comparación con las normas de control de vibraciones, cálculos de dinámica de estructura y demás.

Los sitios de medición recomendados por las normas internacionales de manejo de vibraciones pueden resumir en:

- 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 esté ubicada una edificación.
- Importancia: Lugar donde se encuentre una edificación de interés, por ejemplo una edificación histórica. (Benjumea, 2003)

Para este trabajo el lugar de instrumentación se eligió de acuerdo a la ubicación y la importancia, ya que en nuestro caso se tienen edificaciones alrededor de la autopista, es decir, se tiene muy cercana la fuente de vibraciones y se pretende analizar el efecto que tienen las vibraciones en las viviendas.

Por otro lado las cantidades medidas deben reproducir el movimiento del suelo al paso de las ondas, esto requiere que se registren tres componentes ortogonales ya sea de la variable desplazamiento de partícula (u), velocidad (\dot{u}) o aceleración (\ddot{u}) y que estén función del tiempo continuo o discreto (señal análoga, discreta o serie temporal). (Bejumea, 2003).

Para poder determinar el nivel de vibraciones en la zona de estudio se hizo el monitoreo adecuado (con métodos indicados por el equipo técnico de la UNAM), ya que para establecer los lugares de mediciones finales primero se

tuvieron unas mediciones preliminares que sirvieron para afinar las nuevas ubicaciones de los equipos en las cuales se registrarían las mediciones definitivas y así lograr cubrir la zona de interés; el equipo utilizado en este proyecto permite obtener un registro de aceleración contra tiempo y fue llevado a cabo por el grupo técnico de la UNAM, este personal realizó cinco campañas con las siguientes características:

El registro de las vibraciones en el subsuelo se realizó sobre las zonas habitacionales adyacentes a la autopista, las cuales se observan en la Fig. 5.2. Dentro de estas las calles consideradas en el monitoreo fueron la 2°, 3° y 4 Cerrada de la Marquesa, localizadas hacia el norte (parte izquierda de la foto de la fig. 5.7) y la 1°, 2° y 3° Cerrada de Volcanes, localizadas hacia el sur (parte derecha de la foto).



Fig. 5.2 Autopista y zonas habitacionales adyacentes

Se hicieron diferentes arreglos implementados para el registro de las vibraciones durante las 5 campañas de medición realizadas los días 05-09-2012, 08-09-2012, 15-09-2012, 17-12-2012 y 19-01-2013. Los equipos se ubicaron principalmente en las banquetas dispuestos en diferentes lugares a lo largo de la calle sobre una línea recta y midiendo las aceleraciones en cada punto.



Fig. 5.3 Croquis de localización de equipos correspondiente a la primera campaña de mediciones: 4ª y 2ª cerrada de la marquesa (05/09/2012).



Fig. 5.4 Croquis de localización de equipos correspondiente a la segunda campaña de mediciones: 3ª cerrada de la marquesa y 2ª cerrada de volcanes (08/09/2012).

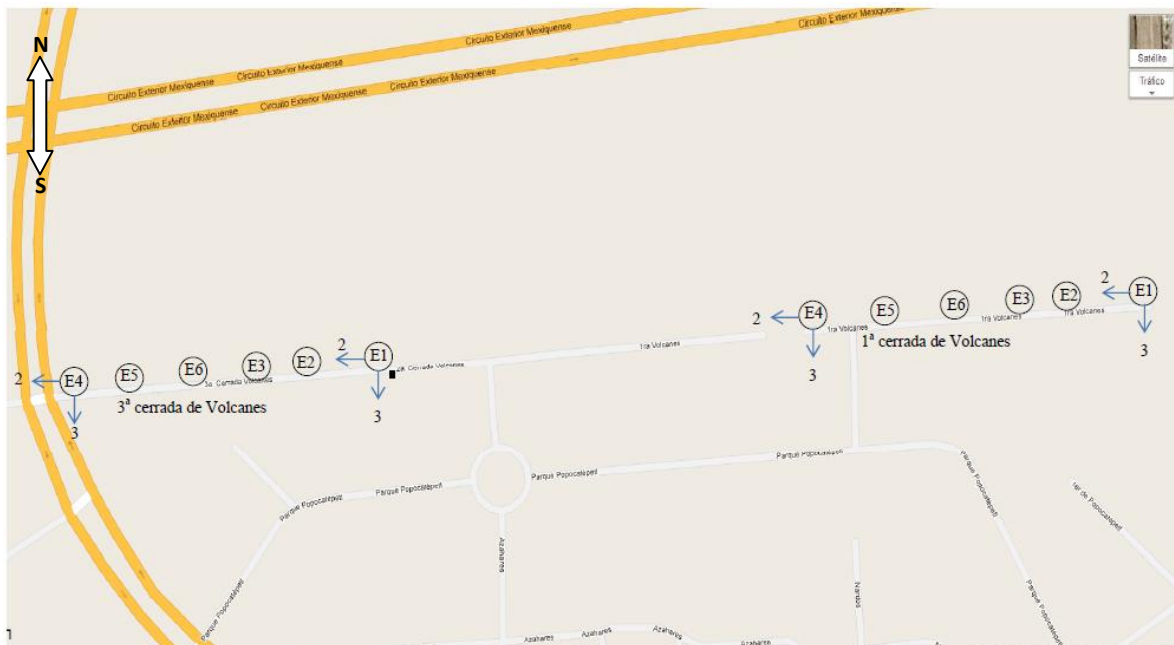


Fig. 5.5 Croquis de localización de equipos correspondiente a la tercera campaña de mediciones: 1ª y 3ª cerrada de volcanes (15/09/2012).

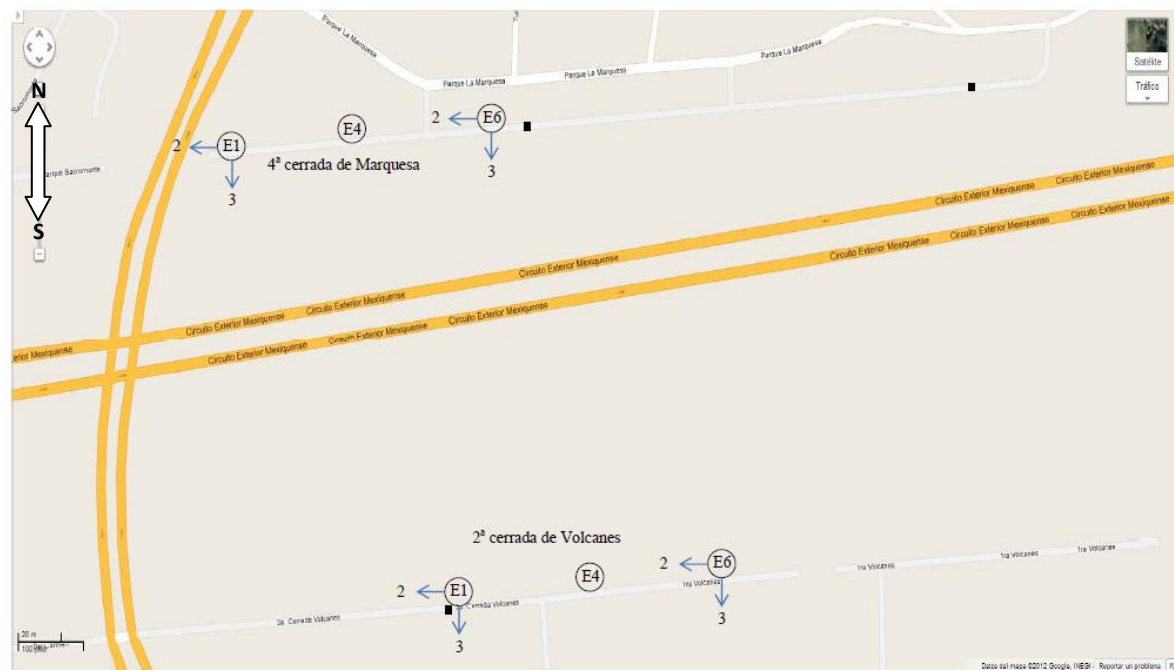


Fig. 5.6 Croquis de localización de equipos correspondiente a la cuarta campaña de mediciones: 4ª cerrada de la marquesa y 2ª cerrada de volcanes (17/12/2012).



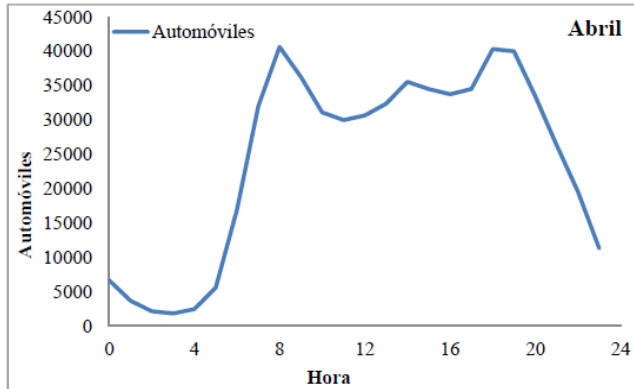
Fig. 5.7 Croquis de localización de equipos correspondiente al arreglo No. 2 realizado durante la quinta campaña de mediciones en la 3ª cerrada de la marquessa (19/01/2013).

5.4 ESTADÍSTICAS DEL AFORO VEHICULAR

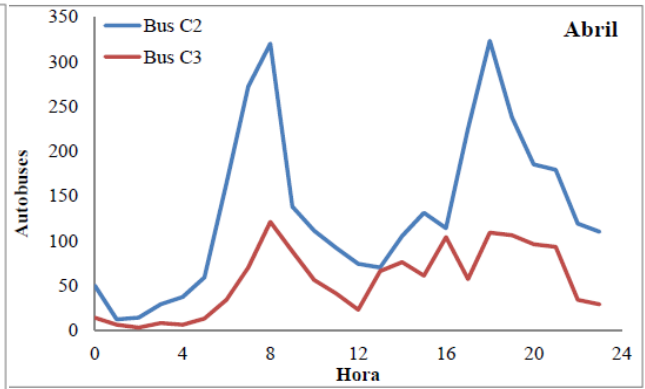
Dado que los efectos dinámicos en el subsuelo debido al tráfico dependen, entre otros factores, del peso de los vehículos, es necesario realizar un análisis de las estadísticas del aforo vehicular para contar con Información de utilidad en la selección de los puntos de medición y en la definición de estrategias para el registro de vibraciones mediante los distintos arreglos de instrumentos colocados en las campañas realizadas. La información se obtuvo del personal técnico de la UNAM, la cual fue proporcionada por los operadores de la pista. Los registros de los aforos vehiculares se hicieron del mes de abril al mes de mayo del año 2012, de ello se tienen los siguientes datos de las gráficas 5.1 a la 5.15.



AUTOBUSES Y CAMIONES DE CARGA

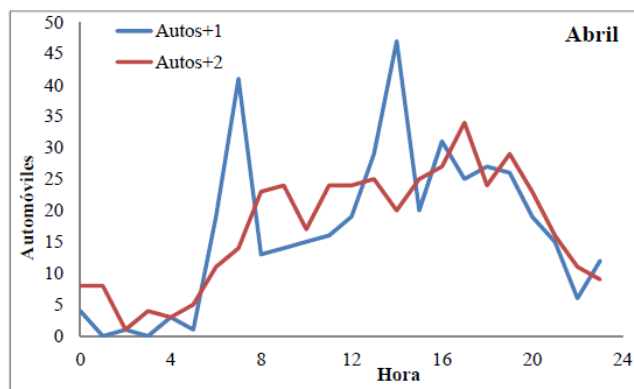


Grafica 5.1

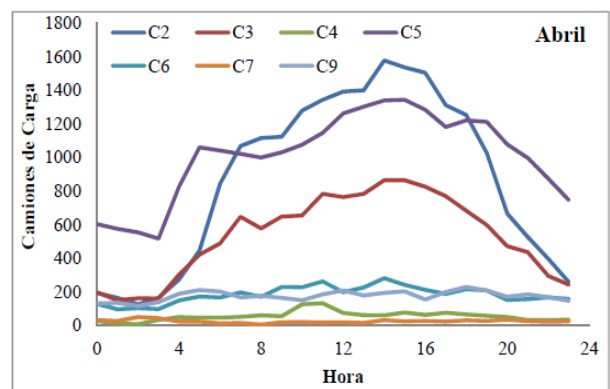


Grafica 5.2

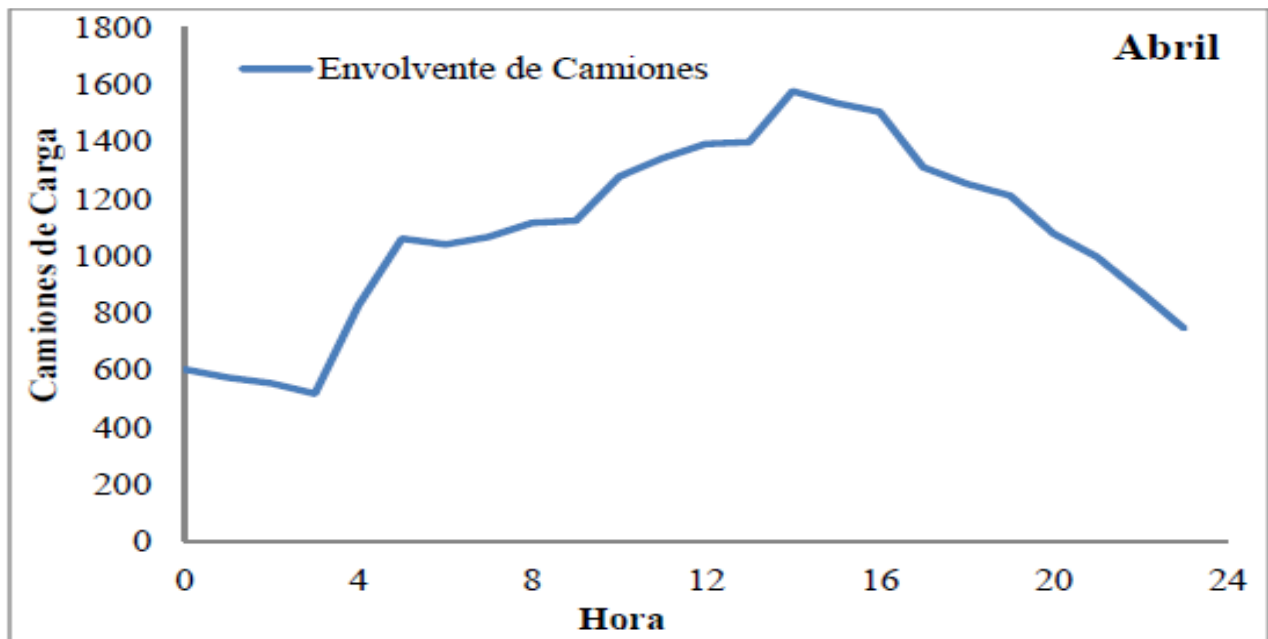
AUTOMOVILES CON UNO Y DOS REMOLQUES



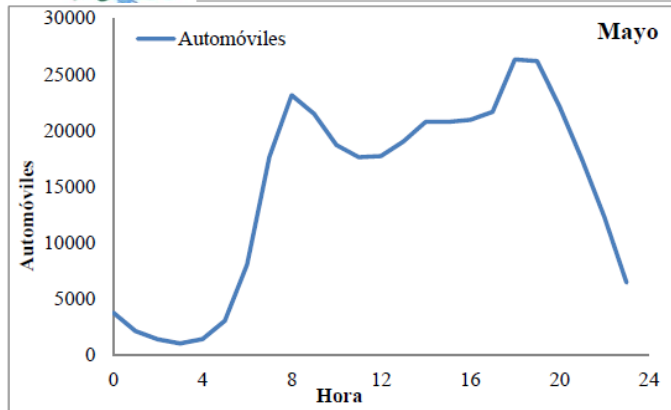
Grafica 5.3



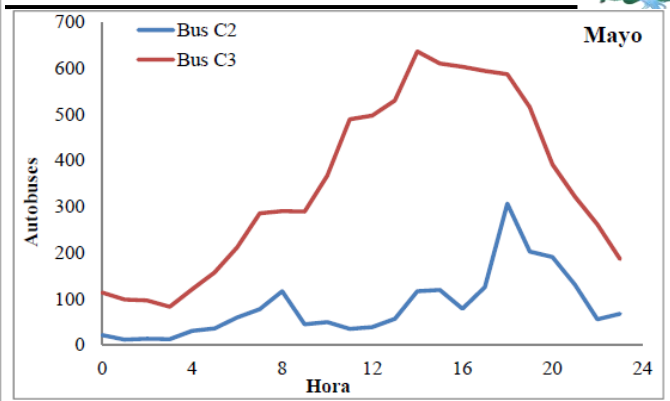
Grafica 5.4



Grafica 5.5

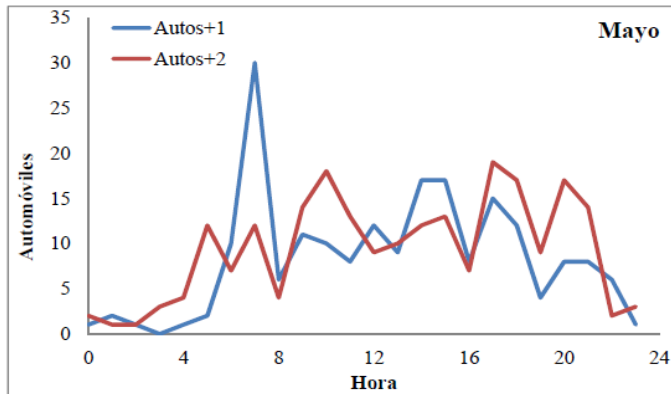


Grafica 5.6

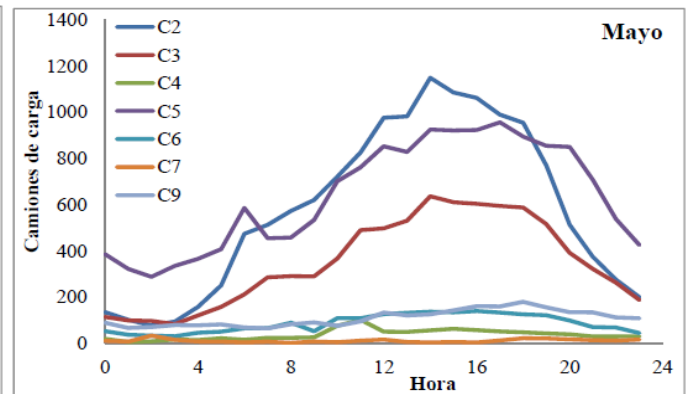


Grafica 5.7

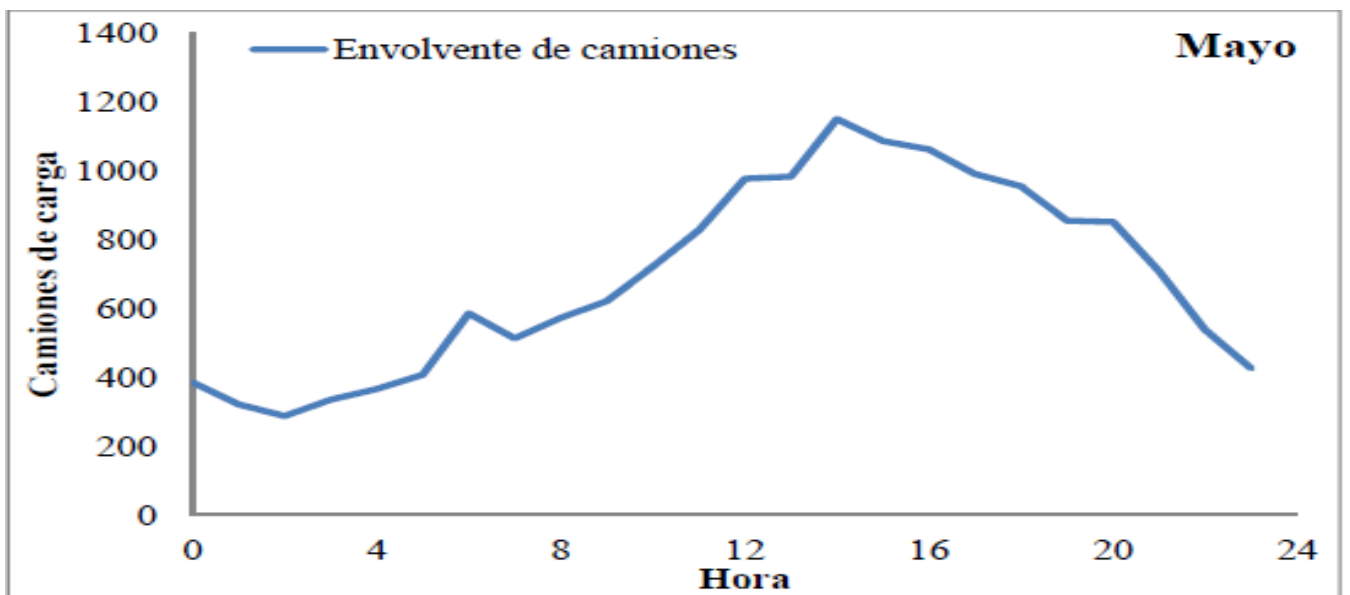
AUTOMOVILES CON UNO Y DOS REMOLQUES



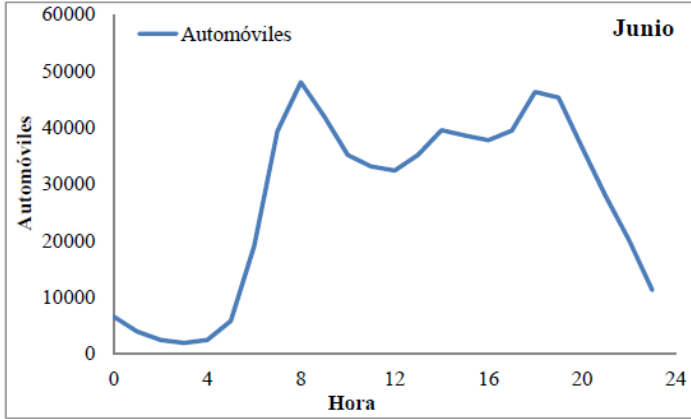
Grafica 5.8



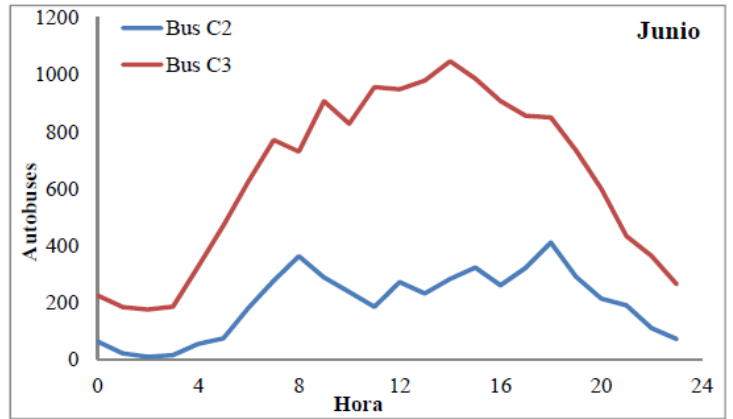
Grafica 5.9



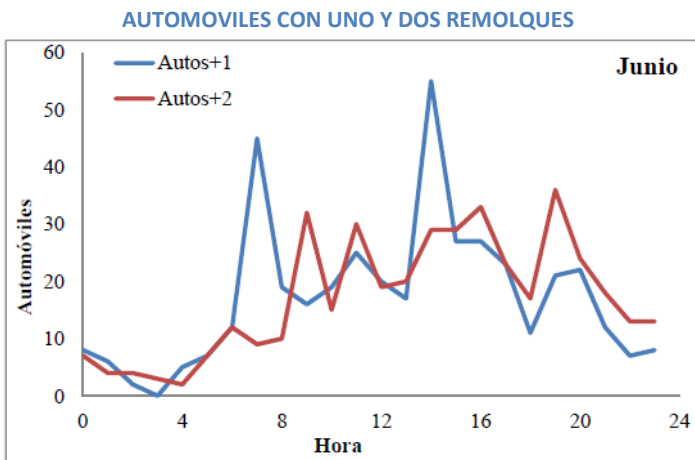
Grafica 5.10



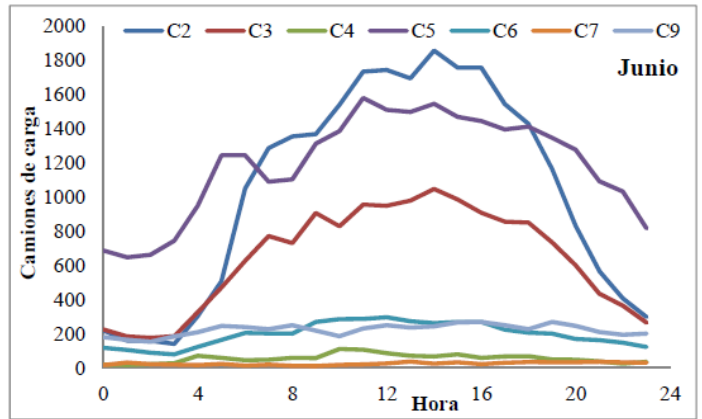
Grafica 5.11



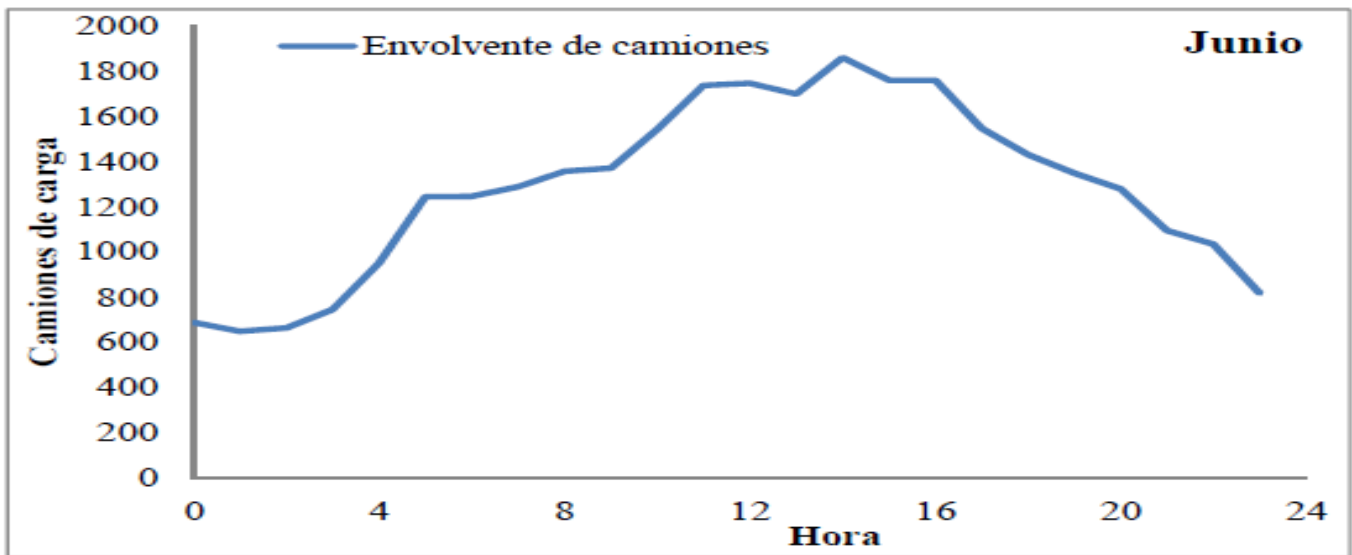
Grafica 5.12



Grafica 5.13



Grafica 5.14



Grafica 5.15

Del análisis de la información anterior y tomando como base los vehículos C2 a C9 (en la tabla 5.1 se observan las clasificaciones vehiculares), correspondientes a los camiones de carga, ya que se consideraron que son los de mayor peso que transitan por la autopista, también se tomó en cuenta que el horario donde se pudieran generar las vibraciones más intensas es entre las 11:00 y las 17:00 hrs, alcanzando valores máximos al filo de las 14 hrs. Lo anterior se tomó como base para la realización de las campañas de medición que ya se han descrito anteriormente.

También conviene dejar en claro el hecho de que las vibraciones que los vehículos van a ocasionar en la zona de estudio depende de muchas características y es por eso la importancia de tener datos estadísticos de cuando se tiene mayor afluencia vehicular.

Tabla 5.1 Clasificación vehicular

Clasificación vehicular	Descripción
Autos	Automóvil
Autos + 1	Automóvil con remolque de un eje
Autos + 2	Automóvil con remolque de dos ejes
Bus C2	Autobús de pasajeros con dos ejes
Bus C3	Autobús de pasajeros con tres ejes
C2	Camión de carga con dos ejes
C3	Camión de carga con tres ejes
C4	Camión de carga con cuatro ejes
C5	Camión de carga con cinco ejes
C6	Camión de carga con seis ejes
C7	Camión de carga con siete ejes
C8	Camión de carga con ocho ejes
C9	Camión de carga con nueve ejes

Sobre el peso de los automóviles, autobuses y camiones no se tienen los datos exactos pero para darse una idea se muestra una tabla de pesos proporcionada por el apéndice normativo de la NOM-012-SCT-2-2008 "Sobre el Peso y Dimensiones Máximas con los que pueden circular los Vehículos de Autotransporte que transitan en las Vías Generales de Comunicación de Jurisdicción Federal". Enseguida se muestra el peso bruto vehicular según el tipo de camino en la tabla 5.2 y sus nomenclaturas se explican en las tablas 5.3 y 5.4.

Tabla 5.2 Peso bruto vehicular máximo autorizado por clase de vehículo y camino

VEHICULO O CONFIGURACIÓN VEHICULAR	NÚM. EJES	NÚM. LLANTAS	PESO BRUTO VEHICULAR (t)			
			ET y A	B	C	D
B2	2	6	17,5	16,5	14,5	13,0
B3	3	8	21,5	19,0	17,0	16,0
B3	3	10	24,5	23,0	20,0	18,5
B4	4	10	27,0	25,0	22,5	21,0
C2	2	6	17,5	16,5	14,5	13,0
C3	3	8	21,5	19,0	17,0	16,0
C3	3	10	24,5	23,0	20,0	18,5
C2-R2	4	14	37,5	35,5	NA	NA
C3-R2	5	18	44,5	42,0	NA	NA
C3-R3	6	22	51,5	47,5	NA	NA
C2-R3	5	18	44,5	41,0	NA	NA
T2-S1	3	10	27,5	26,0	22,5	NA
T2-S2	4	14	34,5	31,5	28,0	NA
T3-S2	5	18	41,5	38,0	33,5	NA
T3-S3	6	22	48,0	45,5	40,0	NA
T2-S3	5	18	41,0	39,0	34,5	NA
T3-S1	4	14	34,5	32,5	28,0	NA
T2-S1-R2	5	18	47,5	45,0	NA	NA
T2-S1-R3	6	22	54,5	50,5	NA	NA
T2-S2-R2	6	22	54,5	50,5	NA	NA
T3-S1-R2	6	22	54,5	51,5	NA	NA
T3-S1-R3	7	26	60,5	57,5	NA	NA
T3-S2-R2	7	26	60,5	57,5	NA	NA
T3-S2-R4	9	34	66,5	66,0	NA	NA
T3-S2-R3	8	30	63,0	62,5	NA	NA
T3-S3-S2	8	30	60,0	60,0	NA	NA
T2-S2-S2	6	22	51,5	46,5	NA	NA
T3-S2-S2	7	26	58,5	53,0	NA	NA

NA- No Autorizado

Tabla 5.3 Nomenclatura de la clasificación vehicular

CLASE: VEHÍCULO O CONFIGURACIÓN	NOMENCLATURA
AUTOBÚS	B
CAMIÓN UNITARIO	C
CAMIÓN REMOLQUE	C-R
TRACTOCAMIÓN ARTICULADO	T-S
TRACTOCAMIÓN DOBLEMENTE ARTICULADO	T-S-R y T-S-S

5.4 Clasificación de caminos según Secretaría de comunicaciones y transportes (SCT).

Tipo de camino
A: Tiene de 3000 a 20000 vehículos como tránsito diario promedio anual (TDPA).
B: Tiene de 1500 a 3000 vehículos como tránsito diario promedio anual (TDPA).
C: Tiene de 500 a 1500 vehículos como tránsito diario promedio anual (TDPA).
D: Tiene de 100 a 500 vehículos como tránsito diario promedio anual (TDPA).

De la tabla 5.2 lo único que podemos decir es que asegura el hecho de que los camiones tiene en suma un peso mayor al de los autobuses, cosa que confirma la buena decisión de haberlos tomado como base estadística para determinar el horario en el cual realizar las mediciones.

5.4 EQUIPOS DE MEDICIÓN

Para el registro de las señales de vibración en la zona de estudio se hizo uso de 6 registradores digitales GSR, marca Terra Technology con un rango de medición de aceleración máxima de 0.25 a 2 veces la de la gravedad. Estos equipos no solo permiten el registro de movimientos de alta intensidad como el caso de sismos, sino también el registro de vibraciones de pequeñas amplitudes producto de excitaciones ambientales tales como las producidas por el movimiento de vehículos, operación de equipo o maquinaria. Los equipos de medición registran señales de aceleración contra tiempo, en tres direcciones ortogonales. En la tabla 4.1 se muestran las características generales de los equipos usados.

Tabla 4.1 Equipo utilizado en la medición de las campañas realizadas

No. De Estación	Nombre del equipo	No. de Sensores	Sensibilidad
1	E1	3D	12 bits
2	E2	3D	16 bits
3	E3	2D	12 bits
4	E4	3D	12 bits
5	E5	2D	12 bits
6	E6	3D	16 bits



ESTACIÓN No. 1.

- MODEL GSR-12 F/B SIN 318
- PART # 80-445058-42
- Nombre original: El
- 3 canales de registro (sensor triaxial interno SSA-320)
- 12Bits
- Montaje vertical
- Memoria RAM 4.0 MB
- Nivel máximo de aceleración que puede registrarse: 2.00 g
- Umbral de disparo: por software
- Tiempo de pre-evento: 25 s
- Tiempo de post-evento: 20 s
- Muestras por segundo: 100 mps.
- Equipado con GPS (unidad de geoposicionamiento).
- Equipado con módem para la comunicación a distancia.

ESTACIÓN No. 2.

- MODEL GSR-16 F/B SIN 319
- PART # 80-445058-44
- Nombre original: E2.
- 3 canales de registro (sensor triaxial interno SSA-320)
- 16 bits
- Montaje vertical
- Memoria RAM 4.0 MB
- Nivel máximo de aceleración que puede registrarse: 2.00 g
- Umbral de disparo: por software
- Tiempo de pre-evento: 25 s
- Tiempo de post-evento: 20 s
- Muestras por segundo: 100



ESTACIÓN No. 3.

- MODELGSR-12F/B S/N316
- PART # 80-445058-43
- Nombre original: E3.
- 2 canales de registro (sensor biaxial interno SSA-220)
- 12 bits
- Montaje vertical
- Memoria RAM 4.0 MB

- Nivel máximo de aceleración que puede registrarse: 1.00 g
- Umbral de disparo: por software
- Tiempo de pre-evento: 25 s
- Tiempo de post-evento: 20 s
- Muestras por segundo: 100

ESTACIÓN No. 4.

- MODELGSR-12F/B SIN 320
- PART # 80-445058-41
- Nombre original: E4.
- 12 bits
- 3 canales de registro (sensor triaxial Interno SSA-320)
- Montaje vertical
- Memoria RAM 4.0 MB
- Nivel máximo de aceleración que puede registrarse: 0.50 g
- Umbral de disparo: por software
- Tiempo de pre-evento: 25 s
- Tiempo de post-evento: 20 s
- Muestras por segundo: 100



ESTACIÓN No. 5.

- MODELGSR-12F/B S/N317
- PART # 80-445058-43
- Nombre original: E5.
- 2 canales de registro (sensor biaxial interno SSA-220)
- 12 bits
- Montaje vertical
- Memoria RAM 4.0 MB
- Nivel máximo de aceleración que puede registrarse: 1.00 g
- Umbral de disparo: por software
- Tiempo de pre-evento: 25 s
- Tiempo de post-evento: 20 s
- Muestras por segundo: 100

ESTACIÓN No. 6.

- MODEL GSR-1 6 F/B SIN 322
- PART # 80-445058-45
- Nombre original: E6.
- 3 canales de registro (sensor triaxial interno SSA-220)
- 16 bits
- Montaje vertical
- Memoria RAM 4.0MB
- Nivel máximo de aceleración que puede registrarse: 1.00 g
- Umbral de disparo: por software
- Tiempo de pre-evento: 30 s
- Tiempo de post-evento: 20 s
- Muestras por segundo: 100

6. PROCESAMIENTO DE SEÑALES OBTENIDAS EN LA ZONA DE ESTUDIO

6.1 REGISTROS DE ACELERACION VS TIEMPO

Dentro de las campañas realizadas, se obtuvieron registros de las señales en función del tiempo (segundos) contra la aceleración (en fracción de la gravedad), la grabación de las señales en los equipos de medición, se realizó de manera síncrona en todos los arreglos instrumentados. En cada punto de medición establecido se tomaron, al menos 3 registros de señales de vibración por efectos ambientales con una duración aproximada de 8 a 10 minutos cada una y una frecuencia de muestreo de 100 mps., de estos registros se presentan enseguida las gráficas que contienen el registro con el valor máximo de aceleración usando una muestra de 200 datos en cada señal a manera de mostrar una parte de la señal registrada.

Gráficas de la Campaña 1, 2ª Cerrada de la Marquesa

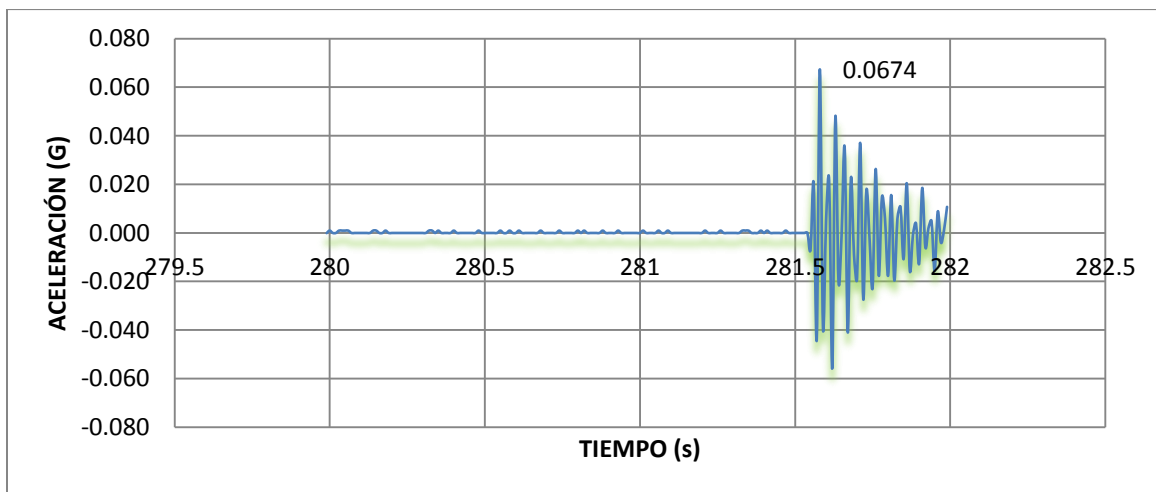


Figura 6.1 Registro acelerográfico de equipo 1, campaña 1, disparo 2, dirección 1.

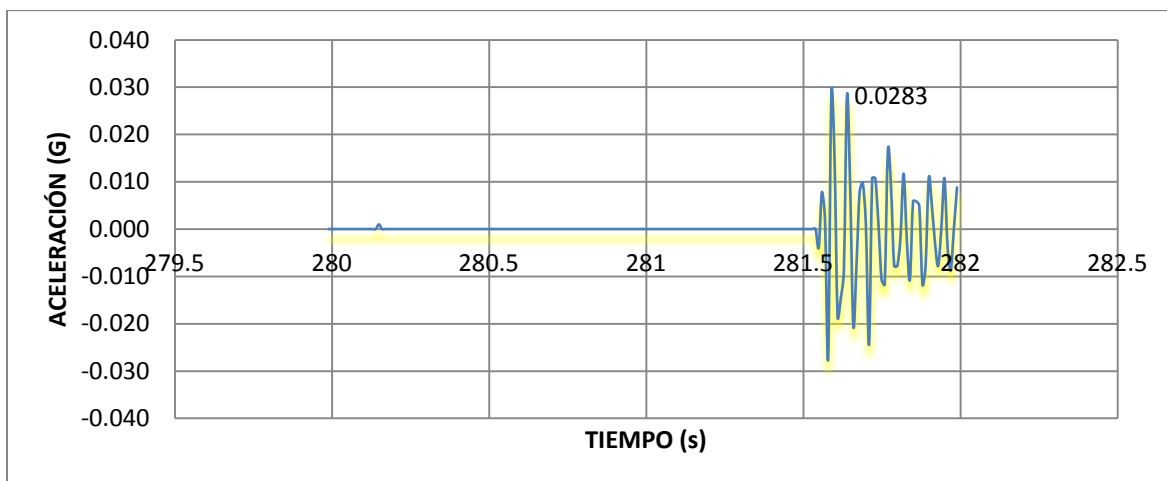


Figura 6.2 Registro acelerográfico de equipo 1, campaña 1, disparo 2, dirección 2.

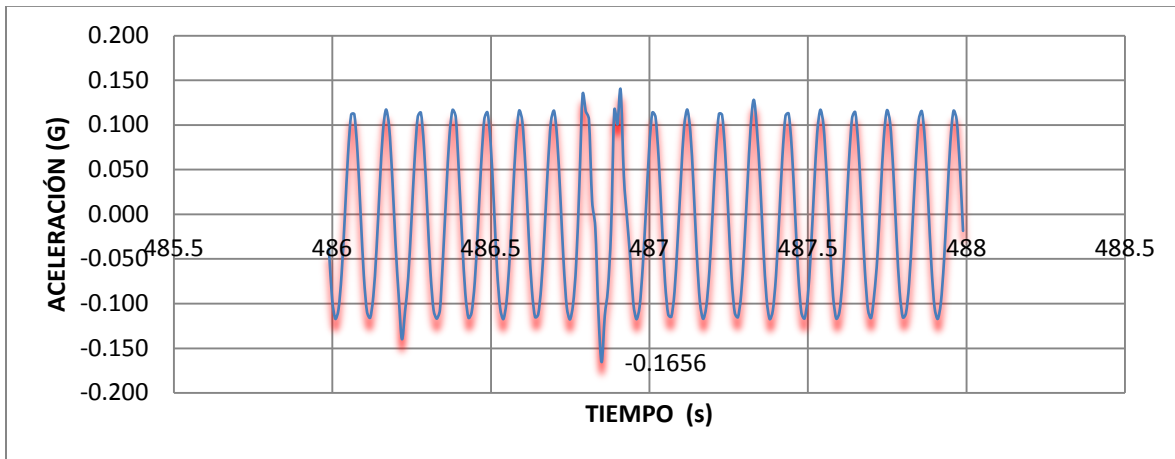


Figura 6.3 Registro acelerográfico de equipo 2, campaña 1, disparo 2, dirección 3.

Gráficas de la Campaña 1, 4ª Cerrada de la Marquesa

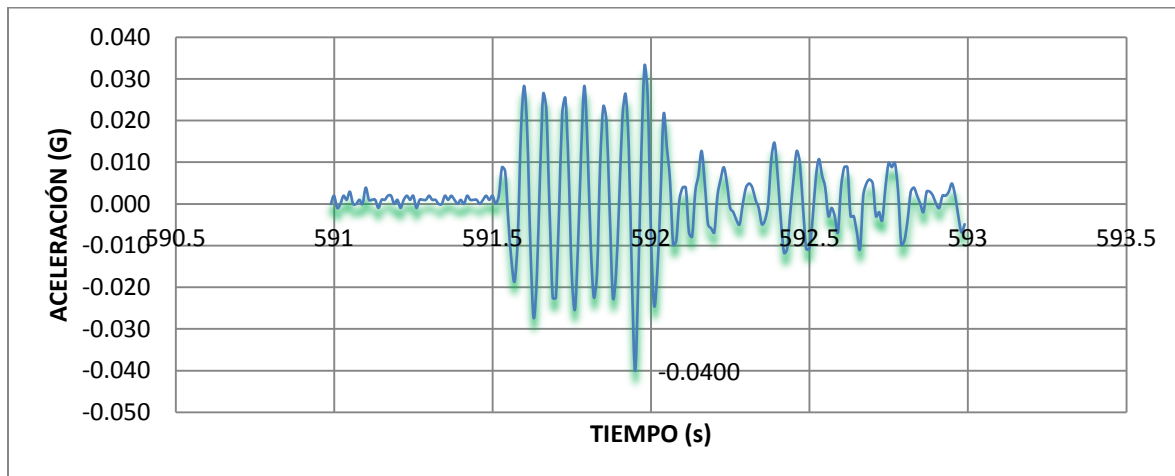


Figura 6.4 Registro acelerográfico de equipo 1, campaña 1, disparo 5, dirección 1.

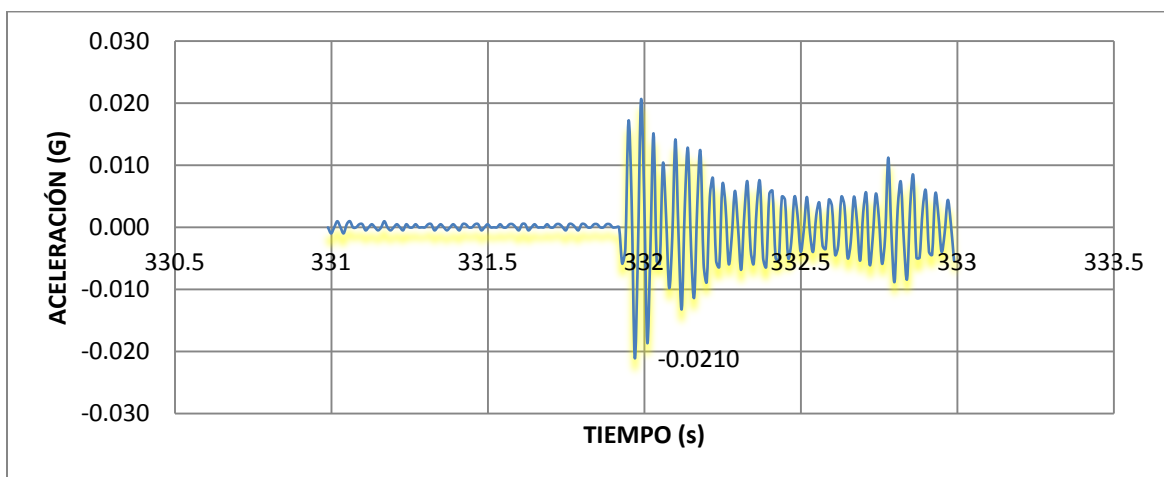


Figura 6.5 Registro acelerográfico de equipo 3, campaña 1, disparo 5, dirección 2.

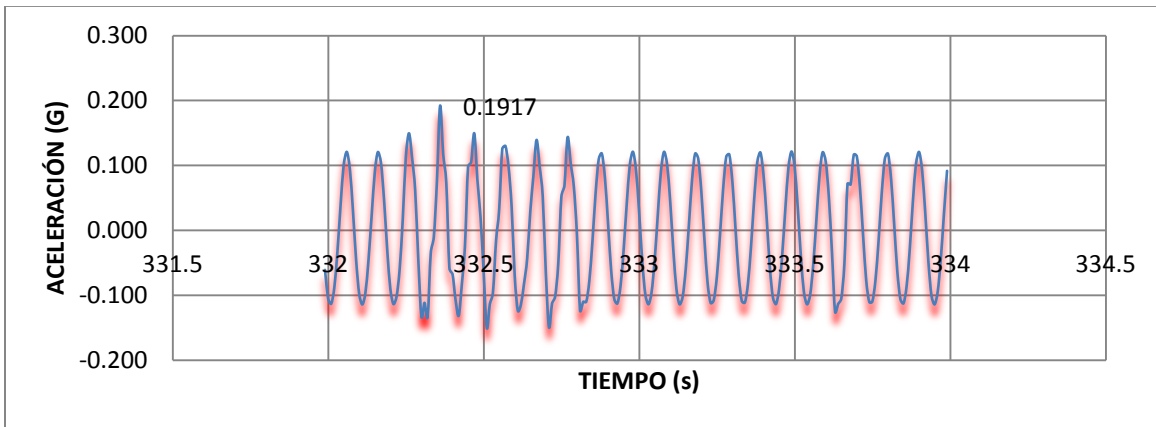


Figura 6.6 Registro acelerográfico de equipo 2, campaña 1, disparo 5, dirección 3.

Gráficas de la Campaña 2, 2ª Cerrada de los Volcanes

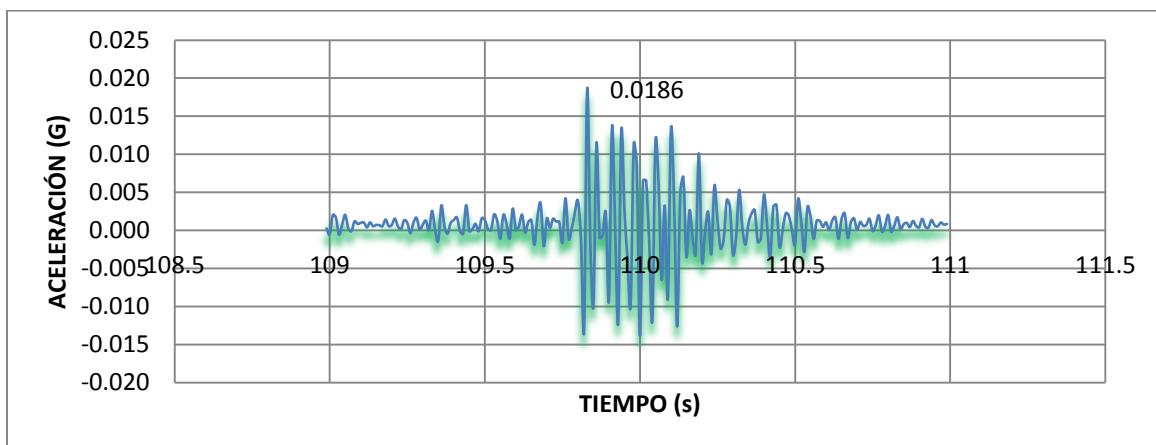


Figura 6.7 Registro acelerográfico de equipo 6, campaña 2, disparo 4, dirección 1.

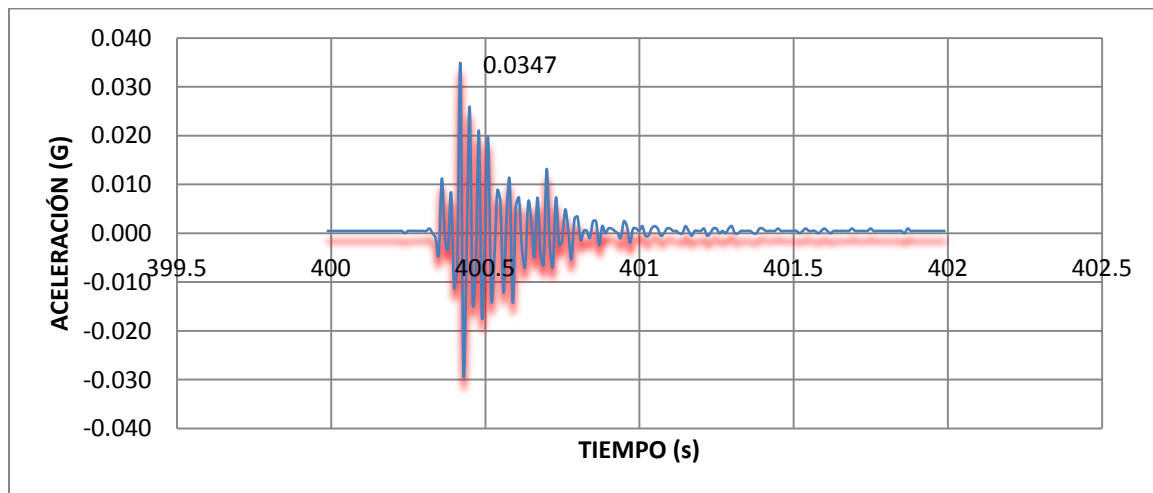


Figura 6.8 Registro acelerográfico de equipo 3, campaña 2, disparo 4, dirección 2.

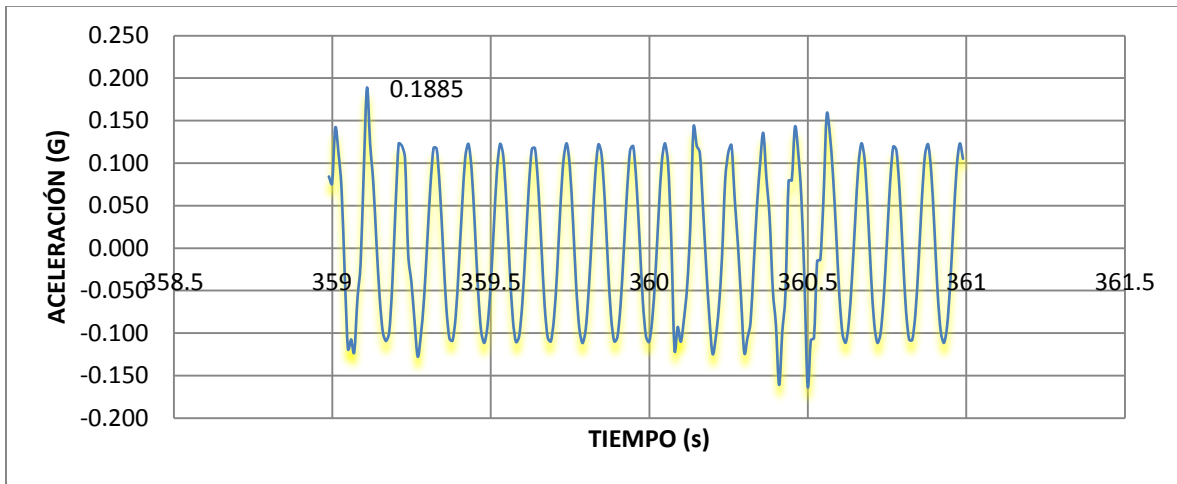


Figura 6.9 Registro acelerográfico de equipo 2, campaña 2, disparo 1, dirección 3.

Gráficas de la Campaña 2, 3ª Cerrada de la Marquesa

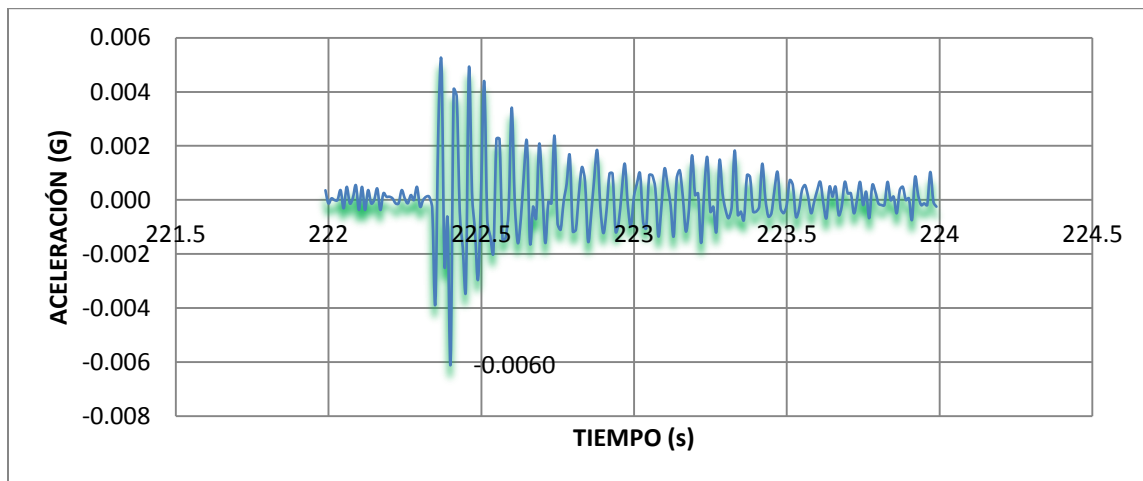


Figura 6.10 Registro acelerográfico de equipo 2, campaña 2, disparo 6, dirección 1.

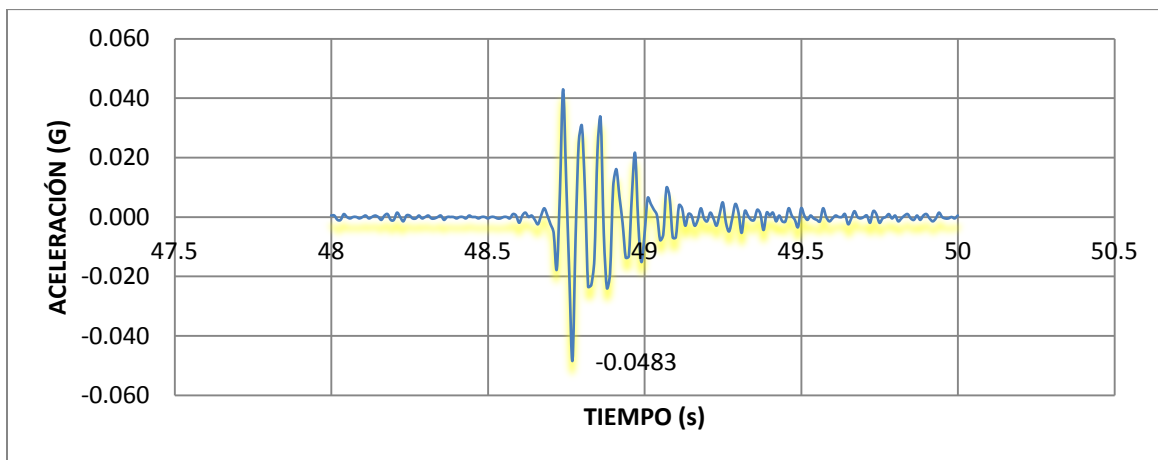


Figura 6.11 Registro acelerográfico de equipo 3, campaña 2, disparo 1, dirección 2.

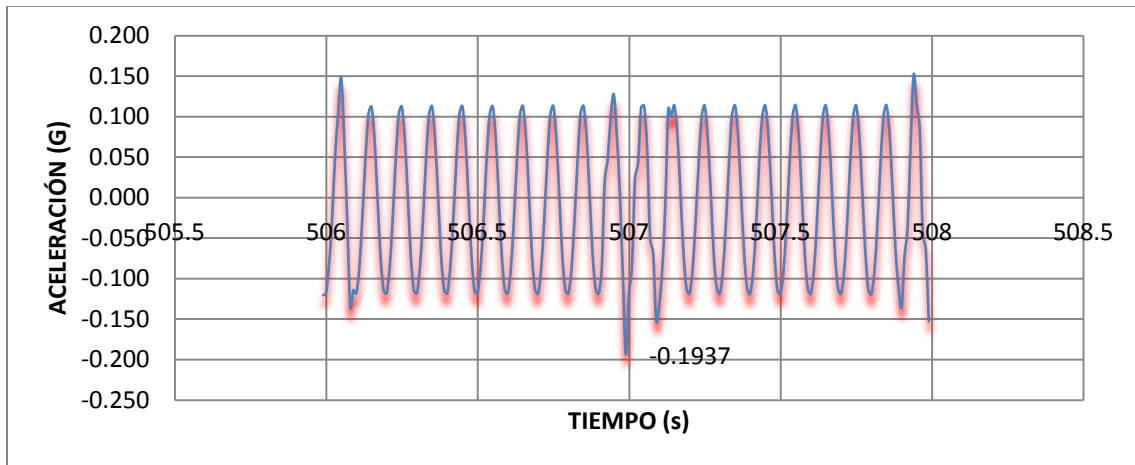


Figura 6.12 Registro acelerográfico de equipo 2, campaña 2, disparo 6, dirección 3.

Gráficas de la Campaña 3, 1ª Cerrada de los Volcanes

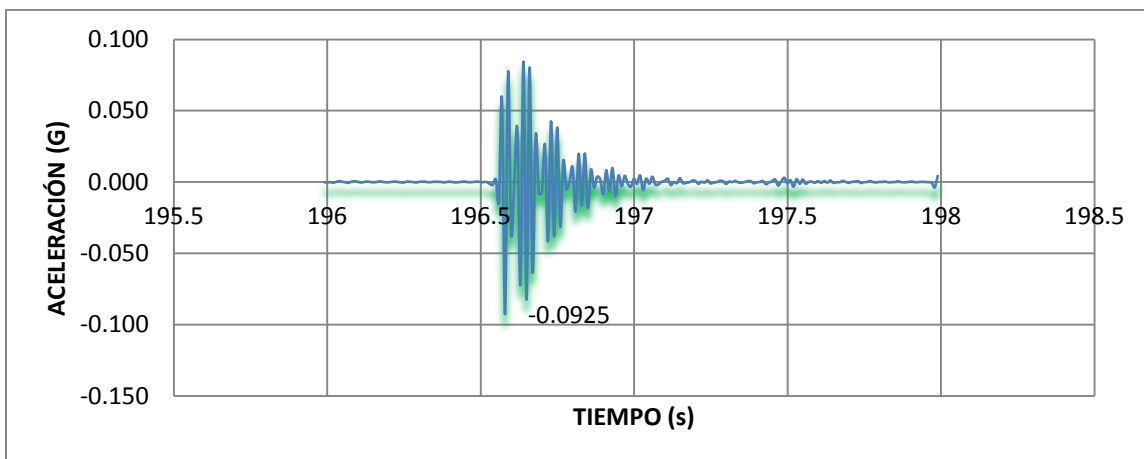


Figura 6.13 Registro acelerográfico de equipo 2, campaña 3, disparo 5, dirección 1.

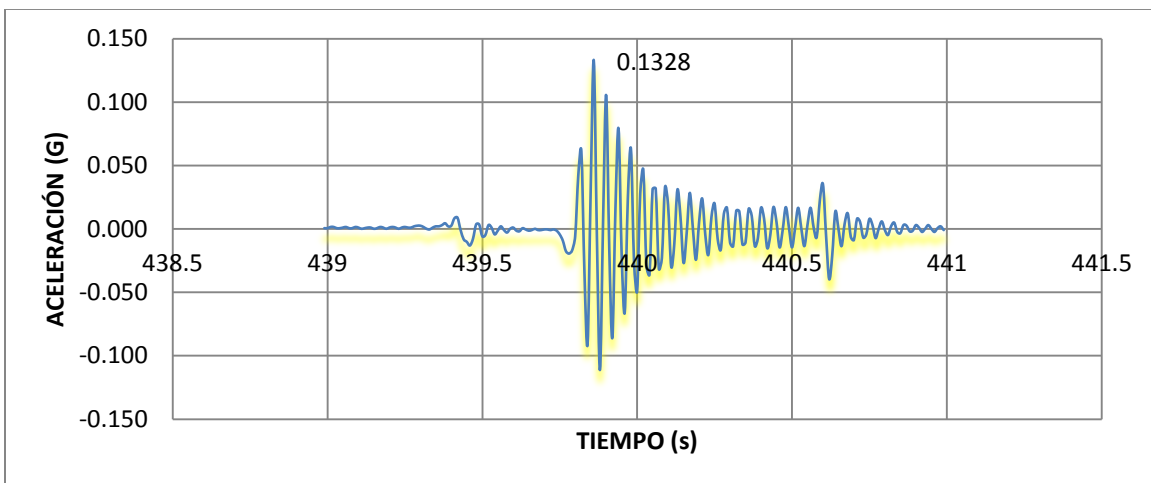


Figura 6.14. Registro acelerográfico de equipo 5, campaña 3, disparo 5, dirección 2.

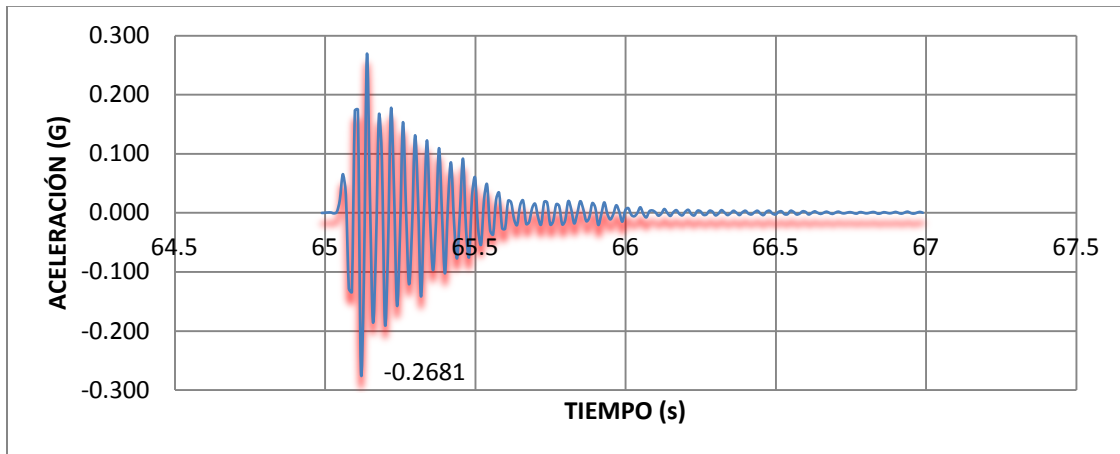


Figura 6.15. Registro acelerográfico de equipo 5, campaña 3, disparo 3, dirección 3.

Gráficas de la Campaña 3, 3ª Cerrada de los Volcanes

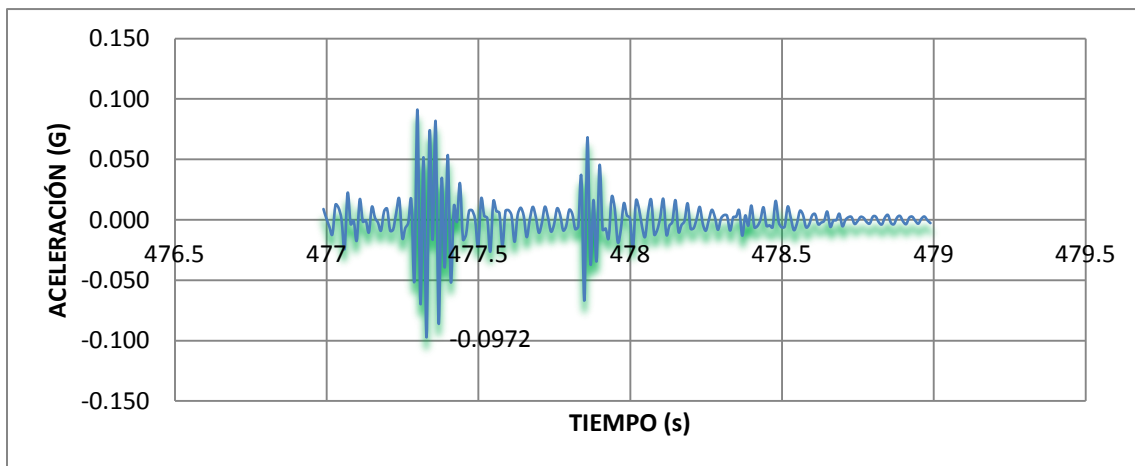


Figura 6.16. Registro acelerográfico de equipo 2, campaña 3, disparo 2, dirección 1.

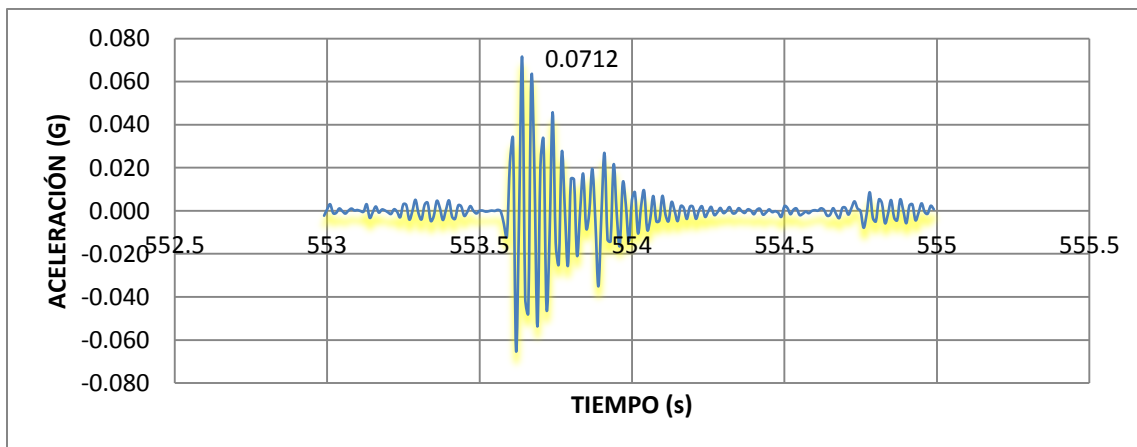


Figura 6.17. Registro acelerográfico de equipo 2, campaña 3, disparo 2, dirección 2.

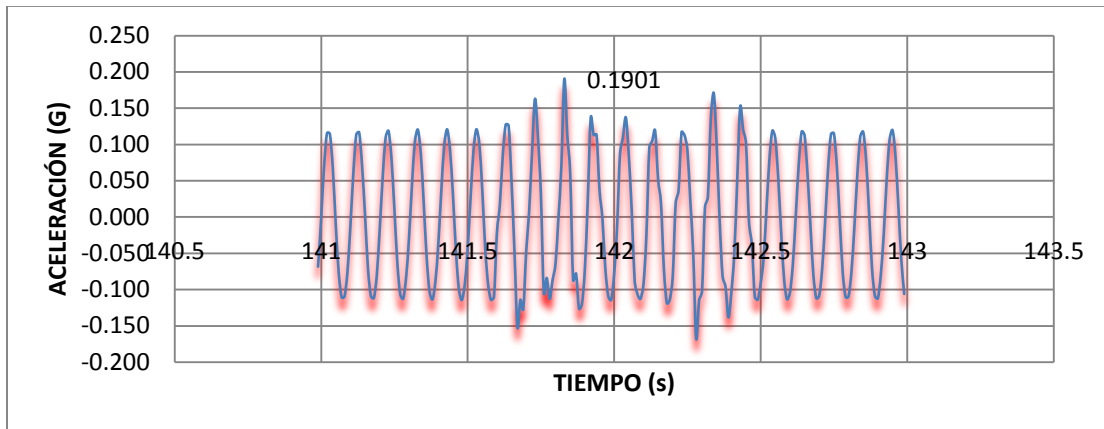


Figura 6.18. Registro acelerográfico de equipo 2, campaña 3, disparo 3, dirección 3.

Gráficas de la Campaña 4, 2ª Cerrada de los Volcanes

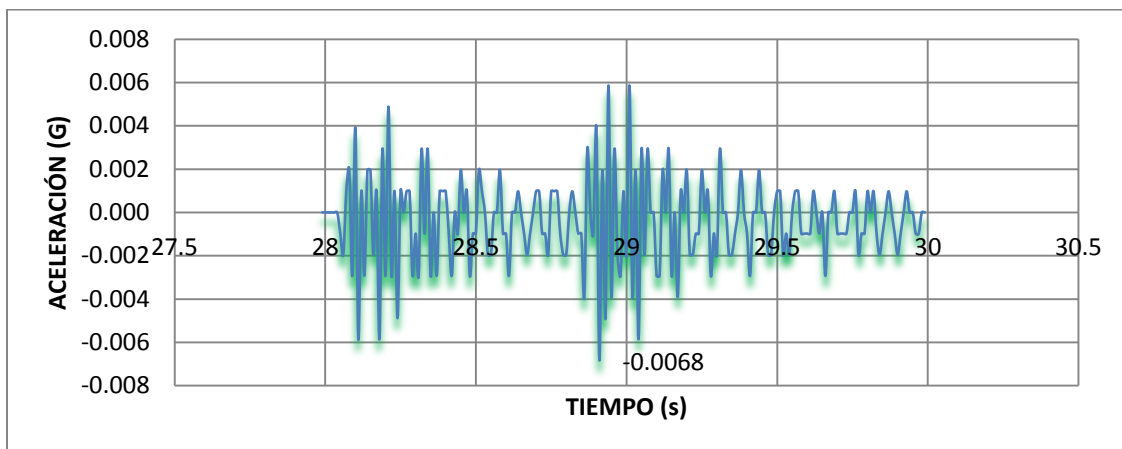


Figura 6.19. Registro acelerográfico de equipo 1, campaña 4, disparo 3, dirección 1.

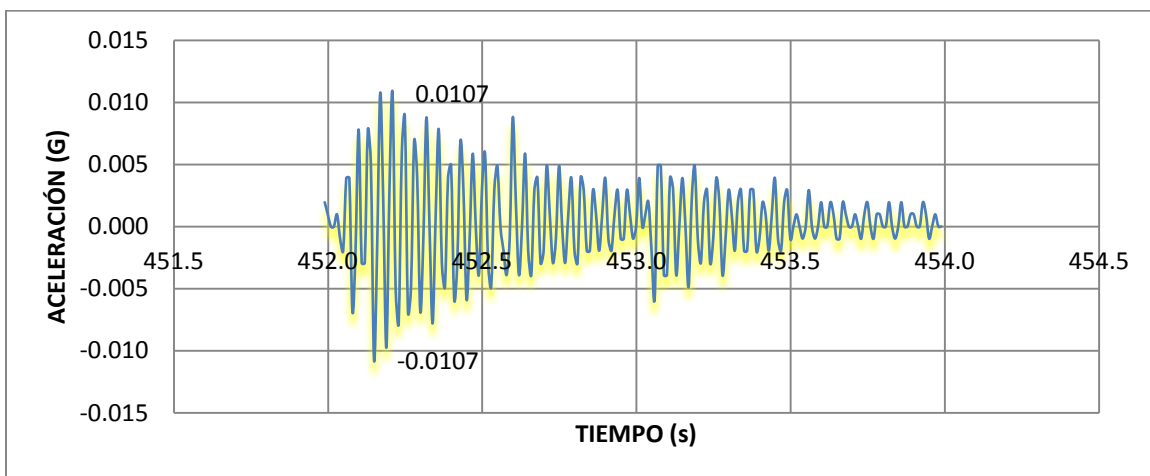


Figura 6.20. Registro acelerográfico de equipo 1, campaña 4, disparo 3, dirección 2.

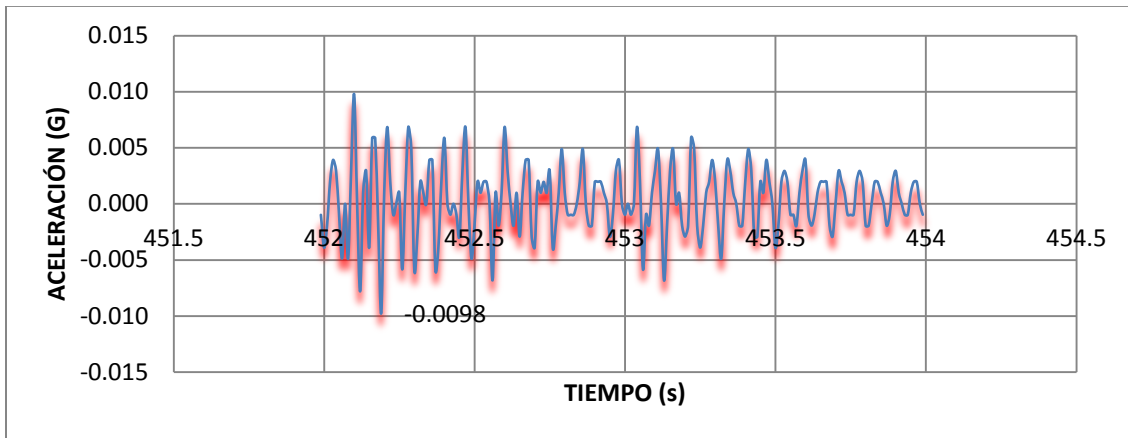


Figura 6.21. Registro acelerográfico de equipo 1, campaña 4, disparo 3, dirección 3.

Gráficas de la Campaña 4, 4ª Cerrada de la Marquesa

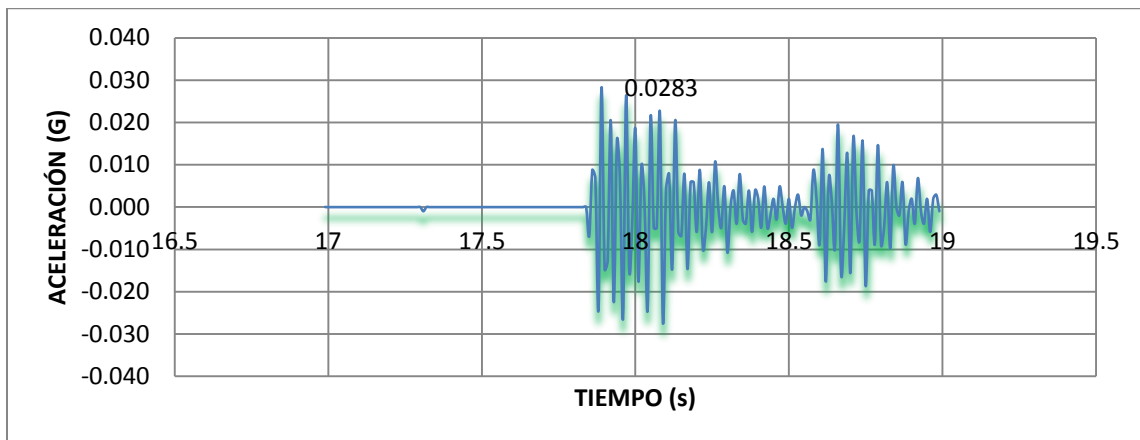


Figura 6.22. Registro acelerográfico de equipo 1, campaña 4, disparo 1, dirección 1.

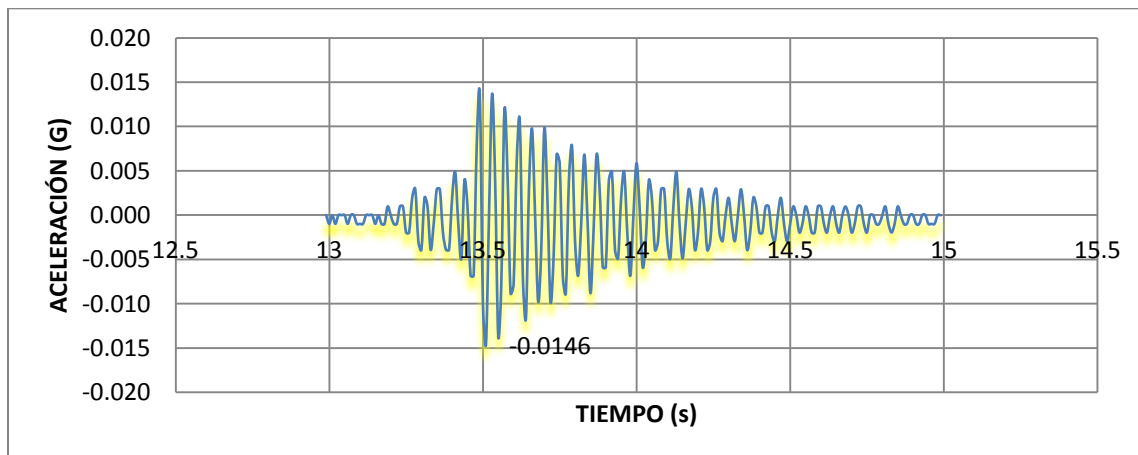


Figura 6.23. Registro acelerográfico de equipo 1, campaña 4, disparo 1, dirección 2.

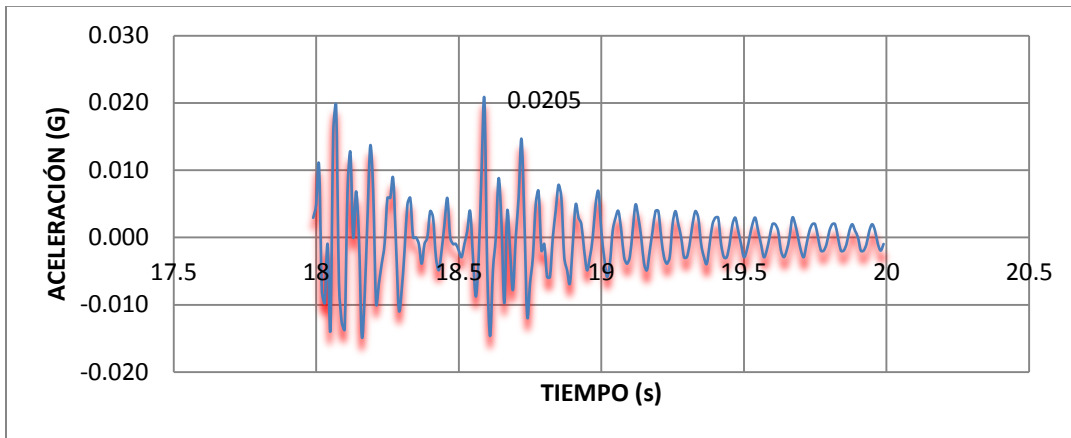


Figura 6.24. Registro acelerográfico de equipo 1, campaña 4, disparo 1, dirección 3.

Gráficas de la Campaña 5, 3ª Cerrada de la Marquesa

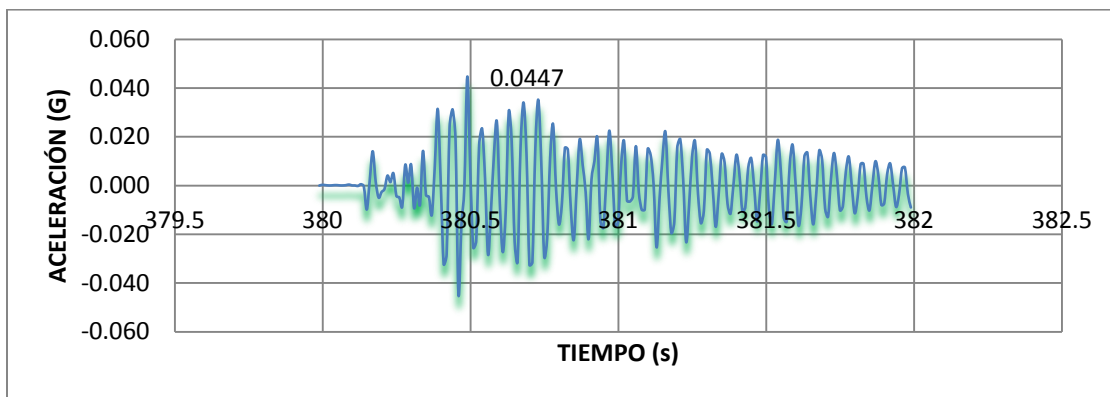


Figura 6.25. Registro acelerográfico de equipo 4, campaña 5, disparo 1, dirección 1.

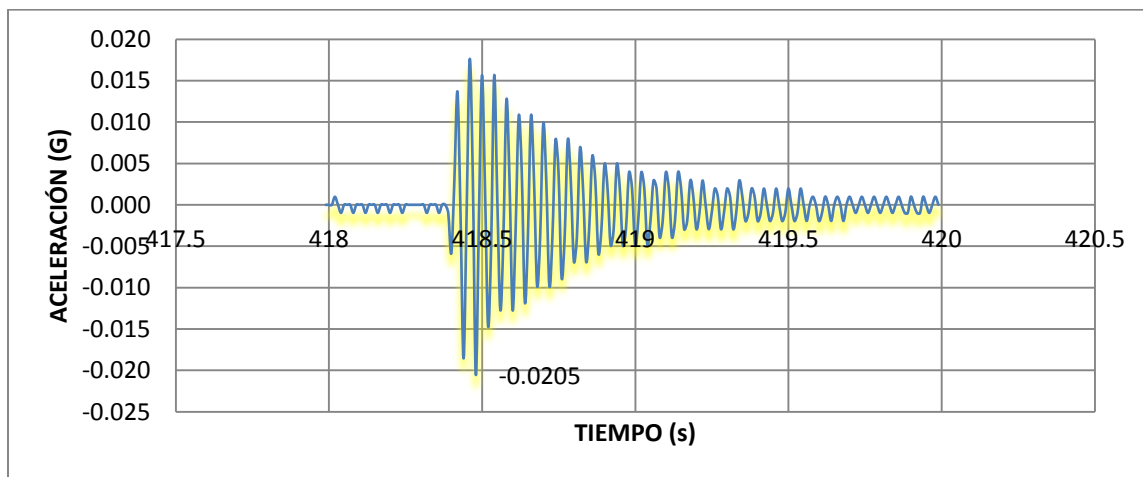


Figura 6.26. Registro acelerográfico de equipo 1, campaña 5, disparo 1, dirección 2.

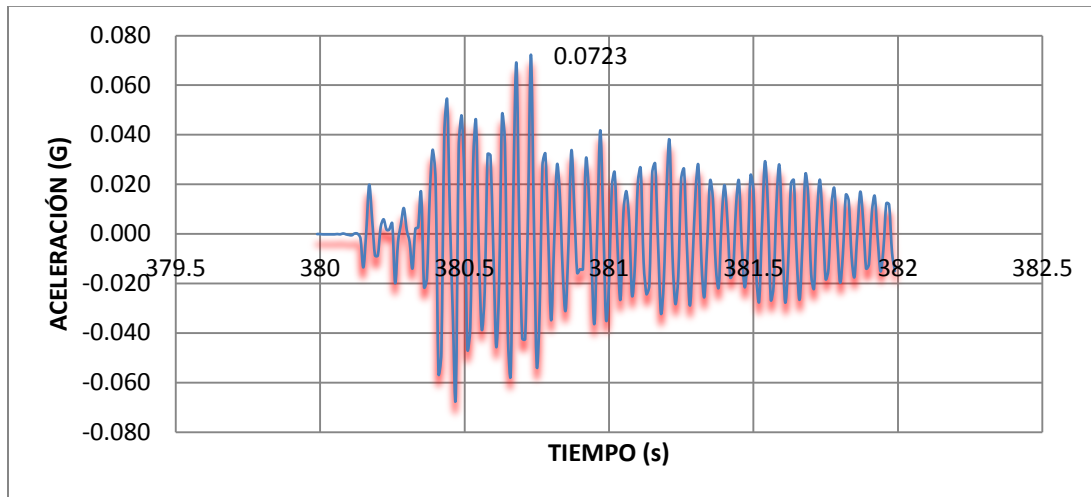


Figura 6.27. Registro acelerográfico de equipo 4, campaña 5, disparo 1, dirección 3.

6.2 REGISTROS DE VELOCIDADES MÁXIMAS

Las variables que hoy en día se consideran más relevantes en cuanto al efecto que las vibraciones de terreno debidas al tráfico tienen sobre edificaciones son la velocidad máxima de vibración y la frecuencia asociada. La velocidad depende de la energía que porta la onda y que puede ser transmitida a la edificación, mientras que la frecuencia – ciclos de vibración por segundo – determina en parte la eficiencia de la transmisión de energía.

Cinemáticamente hablando, la velocidad de un punto puede ser obtenido mediante la integración de su aceleración, por lo que para el cálculo de velocidades se utilizó un procedimiento de integración numérica de señales, que incluyó un proceso de filtrado y corrección de línea base previo a cada integración, para eliminar frecuencias espurias asociadas a ruido.

Para la obtención de las velocidades máximas se hizo uso del software GEODAS mediante el cual se procedió como sigue:

1. Aplicar un filtro pasa altas
2. Aplicar un filtro pasa bajas
3. Corrección de la línea base
4. Integración de la señal
5. Obtención de las gráficas de velocidad para cada una de las direcciones

Cada uno de los registros de aceleración vs tiempo fueron integrados con ayuda del programa y fue así como se obtuvieron las gráficas como la que se ve en la figura 6.28 para cada uno de ellos.

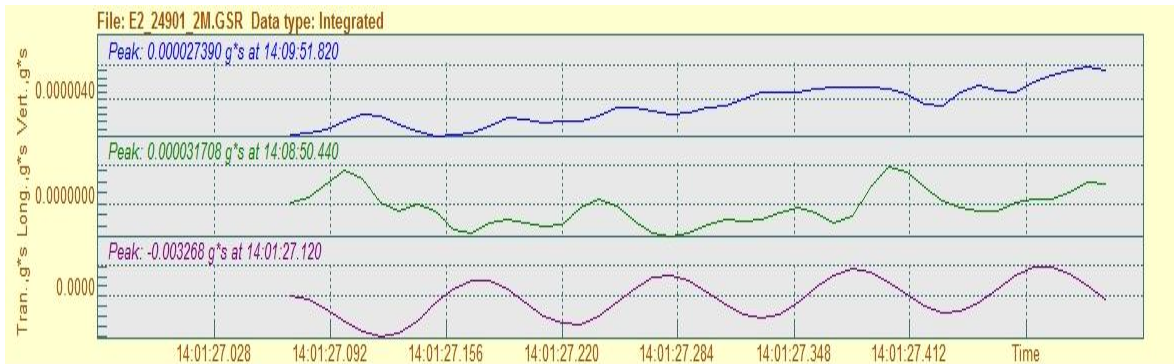


Figura 6.28 Campaña 1, 2ª cerrada la marquesa, equipo 2, disparo 1.

Una vez teniendo todas las gráficas de los registros, se elaboró la tabla 6.1 en donde se resumen los valores máximos de las velocidades.

Tabla 6.1. Registro de velocidades máximas

CAMPAÑA 1 (05/09/2012)				
2ª CERRADA DE LA MARQUESA				
DIR 1	3.544353	mm/s	equipo 1	disparo 1
DIR 2	1.588239	mm/s	equipo 1	disparo 2
DIR 3	32.05908	mm/s	equipo 2	disparo 1
4ª CERRADA DE LA MARQUESA				
DIR 1	3.690522	mm/s	equipo 1	disparo 5
DIR 2	2.603574	mm/s	equipo 1	disparo 5
DIR 3	38.91627	mm/s	equipo 2	disparo 5
CAMPAÑA 2 (08/09/2012)				
2ª CERRADA DE LOS VOLCANES				
DIR 1	2.579049	mm/s	equipo 1	disparo 3
DIR 2	3.326571	mm/s	equipo 4	disparo 1
DIR 3	43.35039	mm/s	equipo 2	disparo 1
3ª CERRADA DE LA MARQUESA				
DIR 1	1.371438	mm/s	equipo 1	disparo 4
DIR 2	3.820995	mm/s	equipo 3	disparo 1
DIR 3	42.56559	mm/s	equipo 2	disparo 2



CAMPAÑA 3 (15/09/2012)				
1º CERRADA DE LOS VOLCANES				
DIR 1	4.894209	mm/s	equipo 1	disparo 5
DIR 2	9.665793	mm/s	equipo 5	disparo 5
DIR 3	43.29153	mm/s	equipo 2	disparo 4
3º CERRADA DE LOS VOLCANES				
DIR 1	3.8853486	mm/s	equipo 2	disparo 2
DIR 2	3.0869127	mm/s	equipo 2	disparo 2
DIR 3	42.82065	mm/s	equipo 2	disparo 2
CAMPAÑA 4 (17/12/2012)				
2º CERRADA DE LOS VOLCANES				
DIR 1	2.296521	mm/s	equipo 1	disparo 4
DIR 2	2.694807	mm/s	equipo 1	disparo 2
DIR 3	3.086226	mm/s	equipo 1	disparo 2
4º CERRADA DE LA MARQUESA				
DIR 1	1.418526	mm/s	equipo 1	disparo 1
DIR 2	2.979297	mm/s	equipo 1	disparo 2
DIR 3	2.365191	mm/s	equipo 1	disparo 3
CAMPAÑA 5 (19/01/2013)				
3º CERRADA DE LA MARQUESA				
DIR 1	2.7990873	mm/s	equipo 4	disparo 1
DIR 2	1.339065	mm/s	equipo 1	disparo 1
DIR 3	4.4367687	mm/s	equipo 4	disparo 1
CAMPAÑA 6 CASA MUESTRA (29/01/2013)				
4º CERRADA DE LA MARQUESA				
DIR 1	1.733427	mm/s	equipo 1	disparo 5
DIR 2	2.688921	mm/s	equipo 1	disparo 2
DIR 3	2.326932	mm/s	equipo 1	disparo 2

6.3 MANEJO DE LAS SEÑALES PARA DETERMINAR LAS CARACTERÍSTICAS DEL SUELO

Para el caso de los registros obtenidos de la zona de estudio, con la información proporcionada de los acelerógrafos, se comenzó a procesarlos, los formatos de los registros se encontraban en formatos GSR, por lo tanto se usó el programa AV, que se utiliza para el control de los equipos con el cual se transformaron todas las señales a formato ASCII. Una vez hecho esto, a cada uno de los registros se le dividió en sus tres componentes ortogonales (transversal, longitudinal y vertical).

Como puede advertirse por el tipo de información recabada de las instrumentaciones realizadas, se cuenta con un gran número de datos, por lo cual se empleó un Instrumento Virtual con una metodología programada para realizar el procesamiento de las señales y realizarlos de manera más rápida y eficiente; el programa utilizado fue desarrollado en trabajos de tesis previos (Silva, 2009 y Castelán, 2001) en ambiente LabView. Con este programa se pudieron obtener los espectros de Fourier correspondientes para estudiar las señales en el dominio de la frecuencia.

6.3.1 Espectros de Fourier del Suelo

Ahora como ya se sabe por la cantidad de datos procesados, enseguida solo se presentaran gráficas de señales representativas. Para ello se tomaron los espectros obtenidos de los registro de la Campaña 3, 1ª cerrada los volcanes, equipo 4, la cual cuenta con cinco disparos, pero cabe mencionar que todos estos espectros de Fourier sirvieron para poder aplicar la técnica de Nakamura.

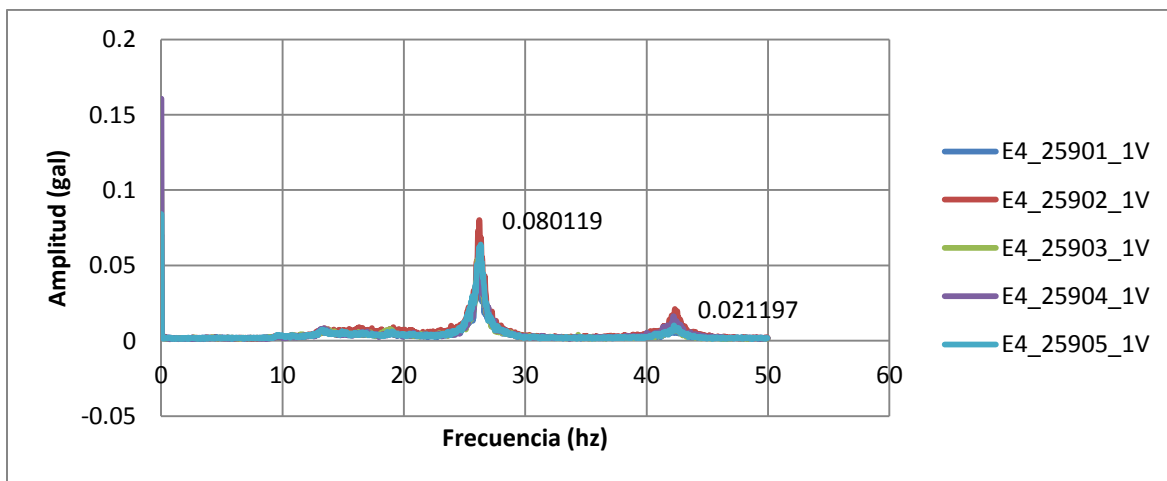


Figura 6.29 Espectro de Fourier Dirección vertical (1).

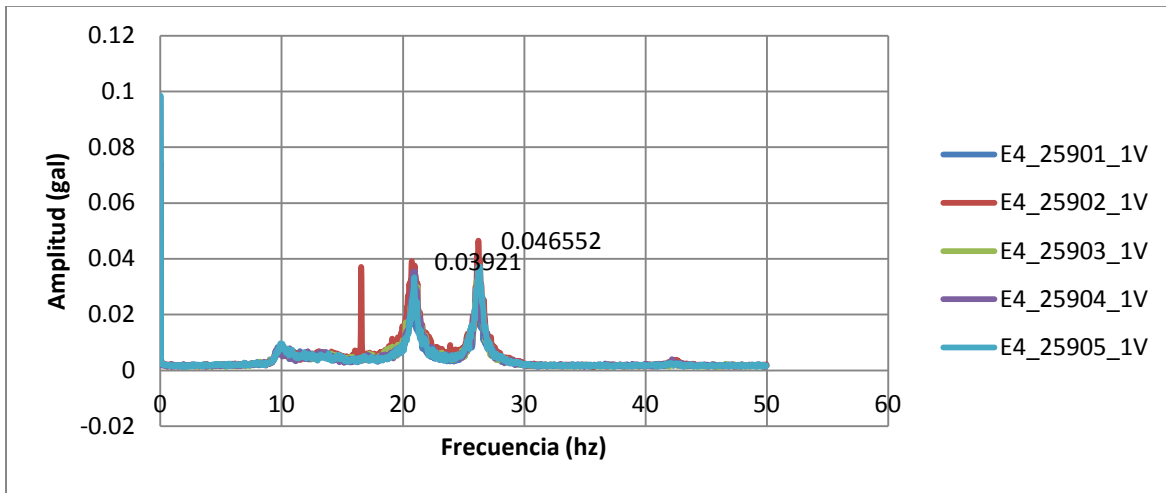


Figura 6.30 Espectro de Fourier Dirección Longitudinal (2).

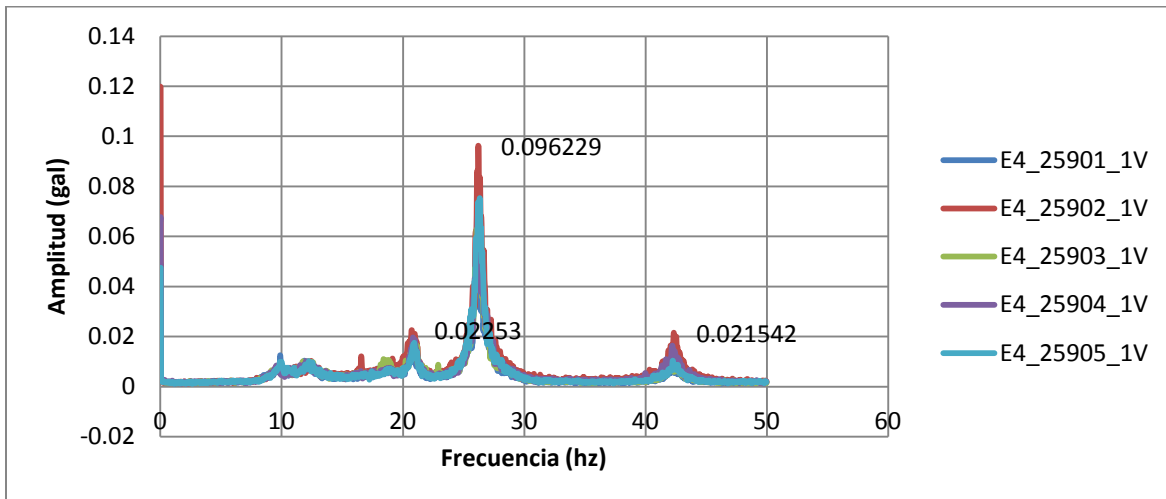


Figura 6.31 Espectro de Fourier Dirección Transversal (3).

6.3.2 Obtención de las Características Dinámicas de las Vibraciones en el Subsuelo Mediante la Técnica de Nakamura

Para poder obtener la frecuencia dominante del suelo, se aplicó la técnica de Nakamura, el cual propone estimar el período fundamental y el factor de amplificación de un depósito de suelos a partir de mediciones de vibraciones verticales y horizontales en superficie, utilizando las vibraciones asociadas a ruido ambiental, en este caso se usan las ocasionadas por el flujo vehicular.

Aplicando el método, se obtuvieron las siguientes gráficas de resultados, extraídas de las campañas. Así para realizar la técnica de Nakamura se tomaron los espectros de Fourier de cada señal y se aplicó el método ya descrito anteriormente, enseguida se tomará como ejemplo las graficas H/V de cada espectro de Fourier de la campaña 1, en la cuarta

cerrada la marquesa del equipo 1, con el fin de mostrar cómo se procedió para con las demás, ya que en las sucesivas solo se presentará la gráfica promedio de los datos sin detallar los disparos, pues como se verá en el siguiente ejemplo las frecuencias de cada disparo se mantienen aún promediándolas.

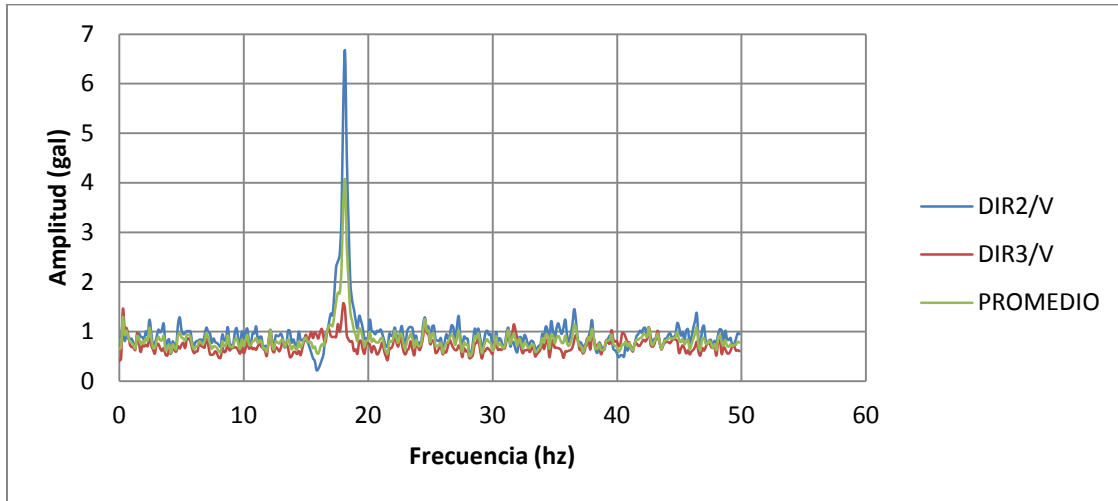


Figura 6.32 Gráfica H/V de disparo 1.

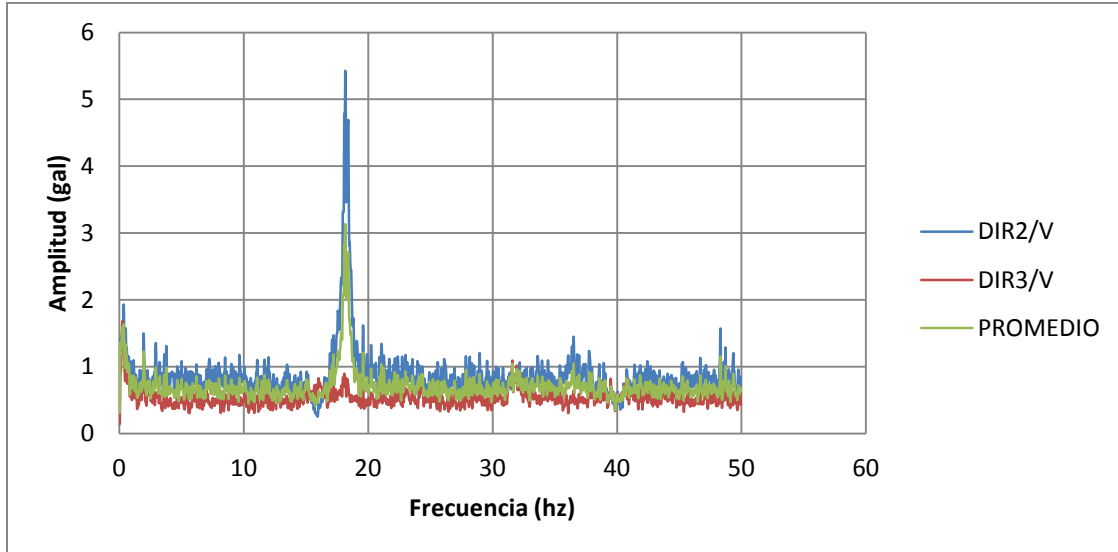


Figura 6.33 Gráfica H/V de disparo 2.

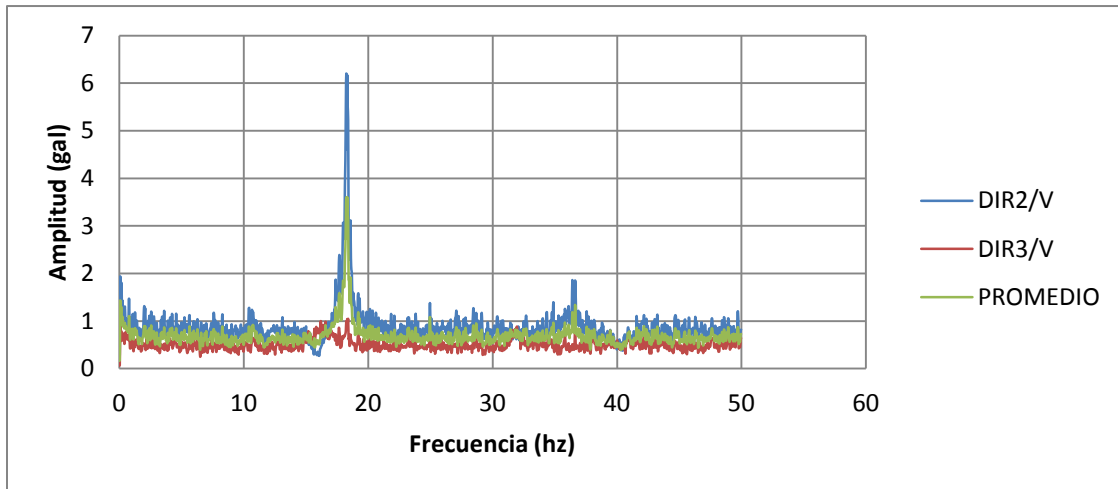


Figura 6.34 Gráfica H/V de disparo 3.

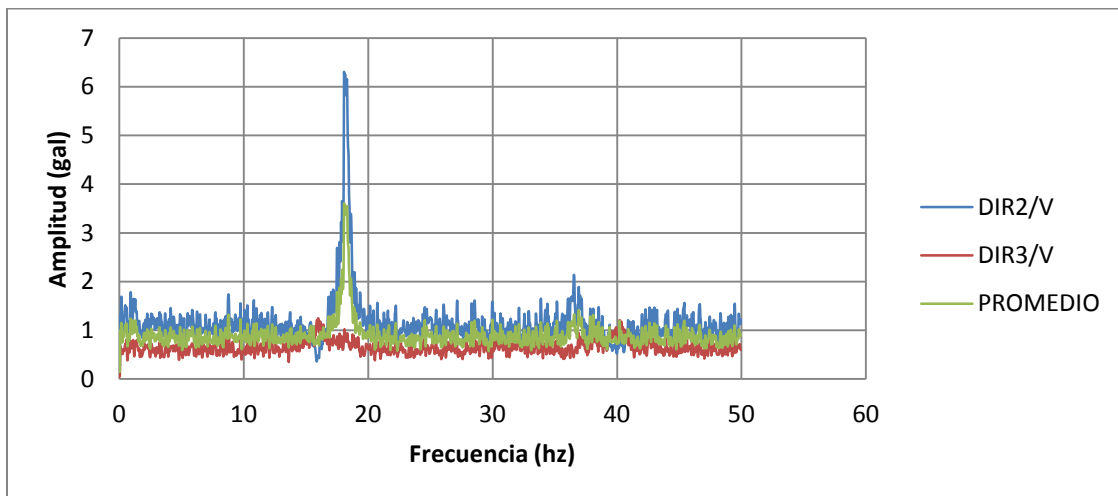


Figura 6.35 Gráfica H/V de disparo 4.

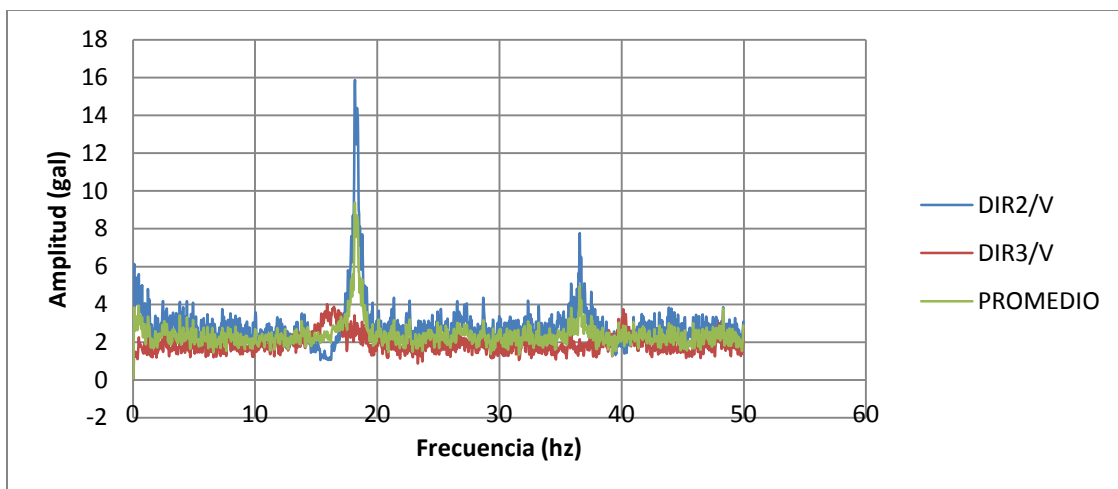


Figura 6.36 Gráfica H/V de disparo 5.

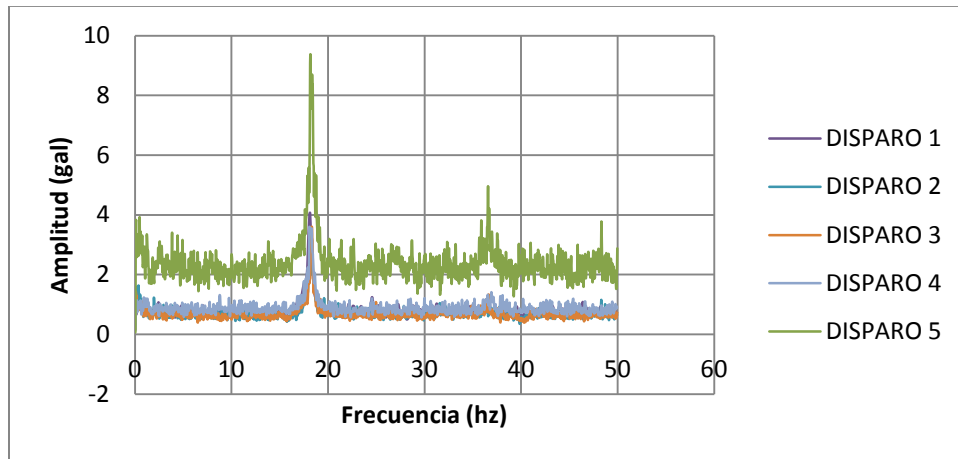


Figura 6.37 Gráfica promedio H/V de los disparos para equipo 1.

Debido a la gran cantidad de gráficas generadas, enseguida se muestran las gráficas promedio de los equipos en cada arreglo realizado en las campañas, pero solo para los cuales se lograron distinguir frecuencias bien definidas.

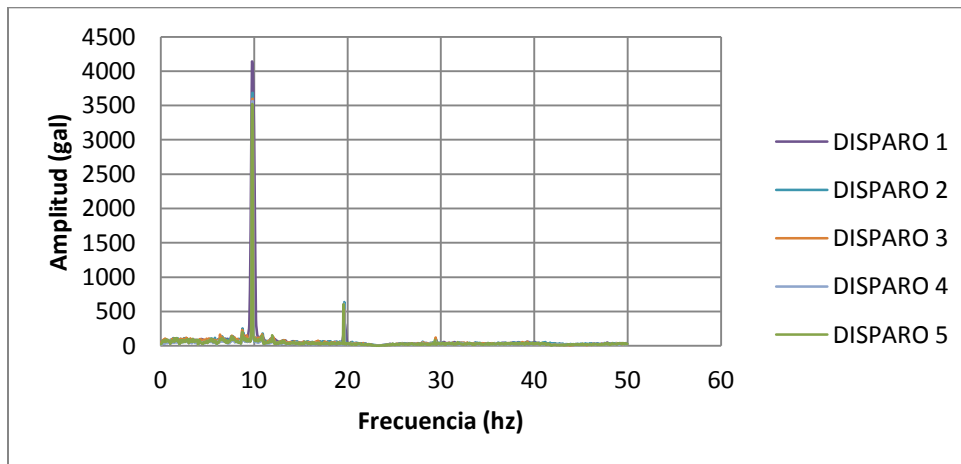


Figura 6.38 Gráfica de promedio H/V, campaña 1, cuarta cerrada la marquesa, equipo 2.

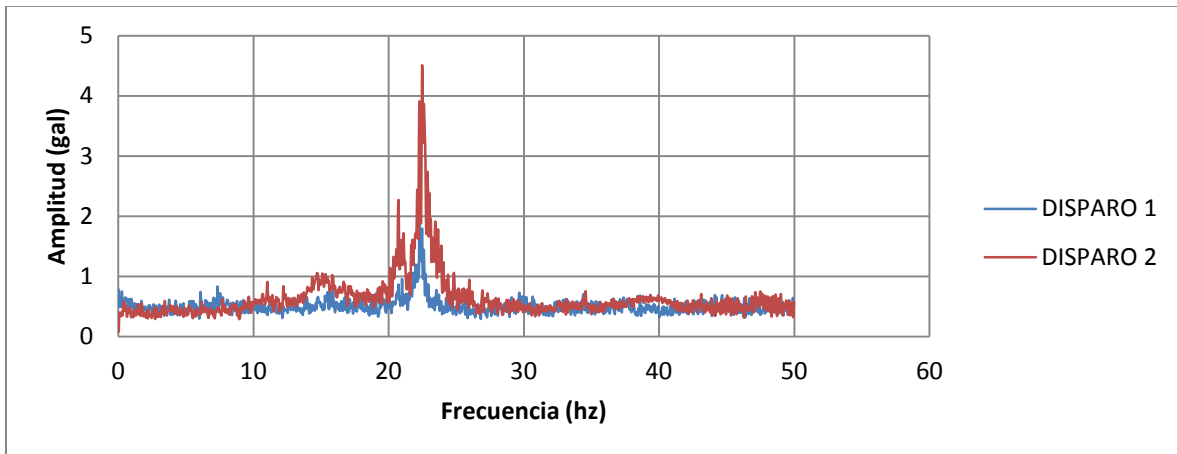


Figura 6.39 Gráfica de promedio H/V, campaña 1, segunda cerrada la marquesa, equipo 1.

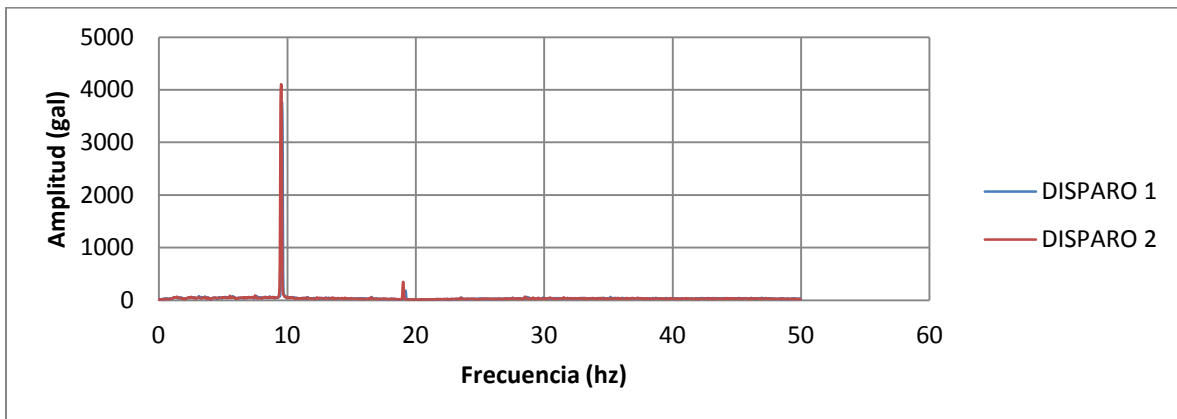


Figura 6.40 Gráfica de promedio H/V, campaña 1, segunda cerrada la marquesa, equipo 2.

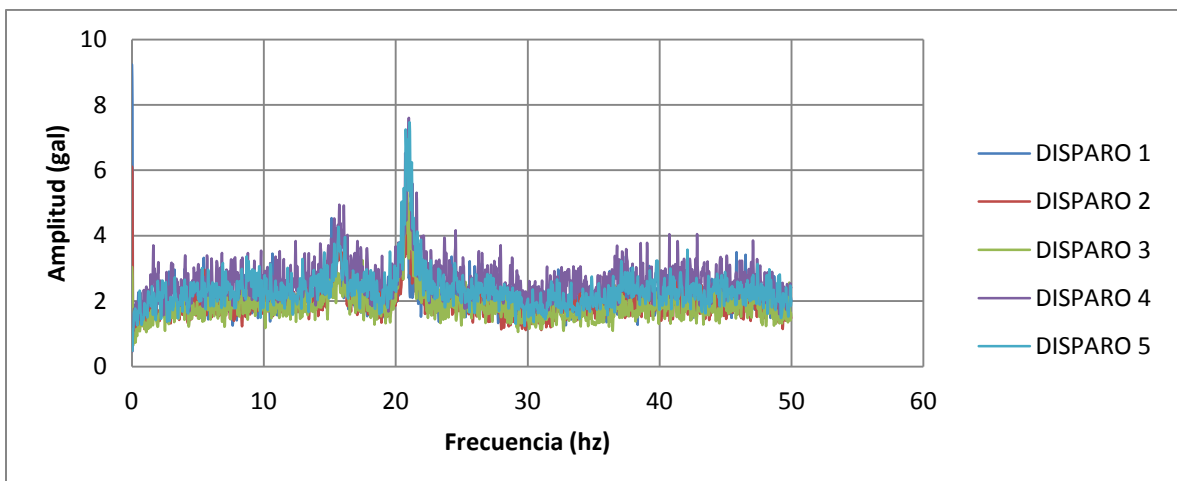


Figura 6.41 Gráfica de promedio H/V, campaña 2, segunda cerrada los volcanes, equipo 1.

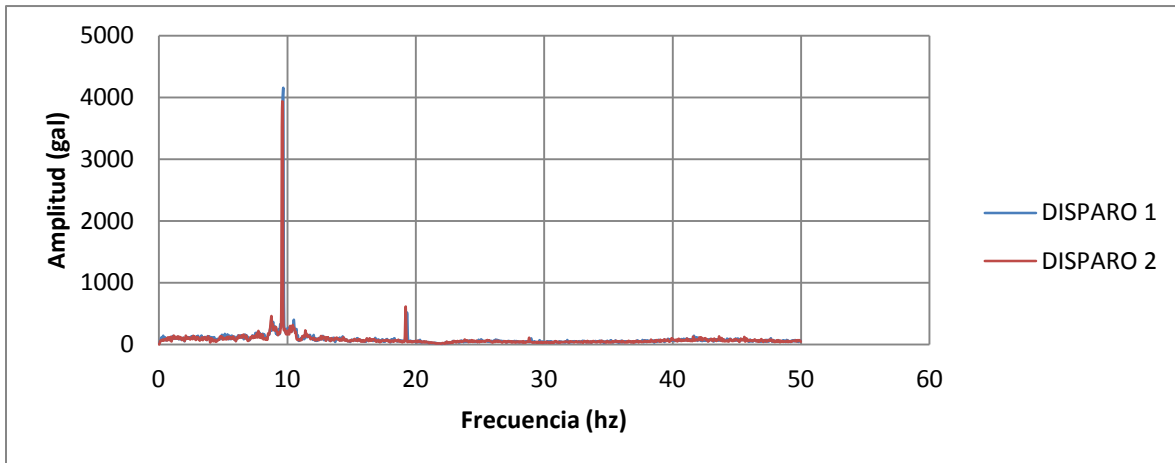


Figura 6.42 Gráfica de promedio H/V, campaña 2, segunda cerrada los volcanes, equipo 2.

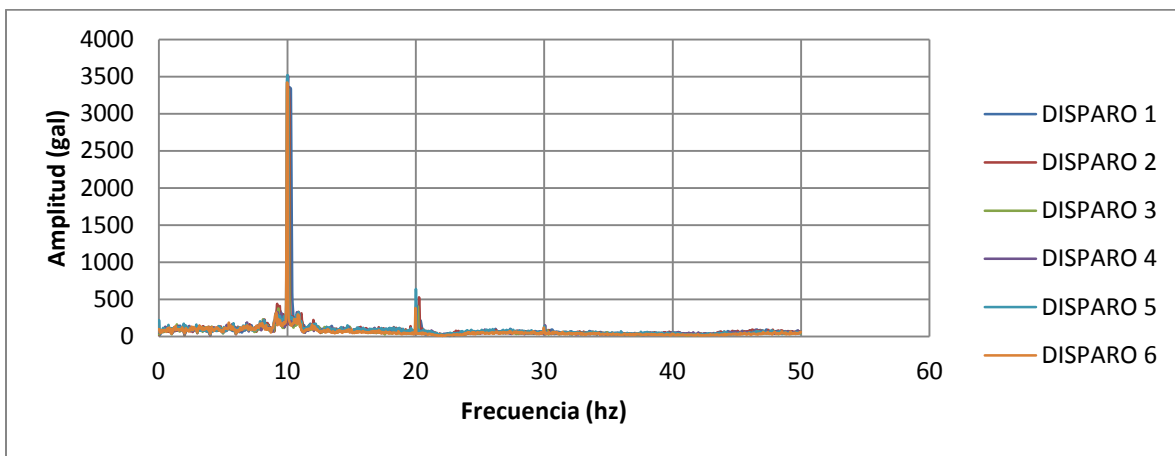


Figura 6.43 Gráfica de promedio H/V, campaña 2, tercera cerrada la marquesa, equipo 2.

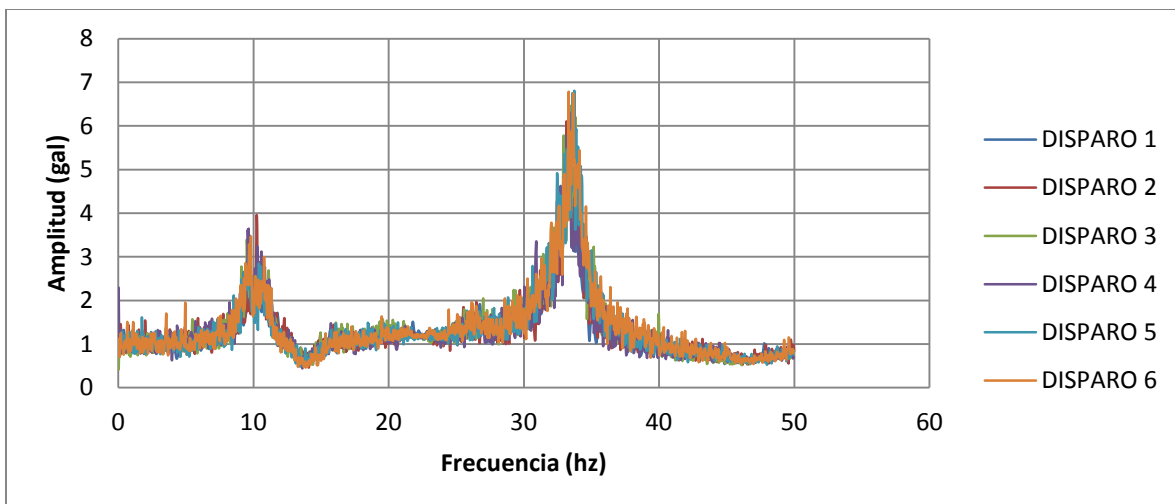


Figura 6.44 Gráfica de promedio H/V, campaña 2, tercera cerrada la marquesa, equipo 4.

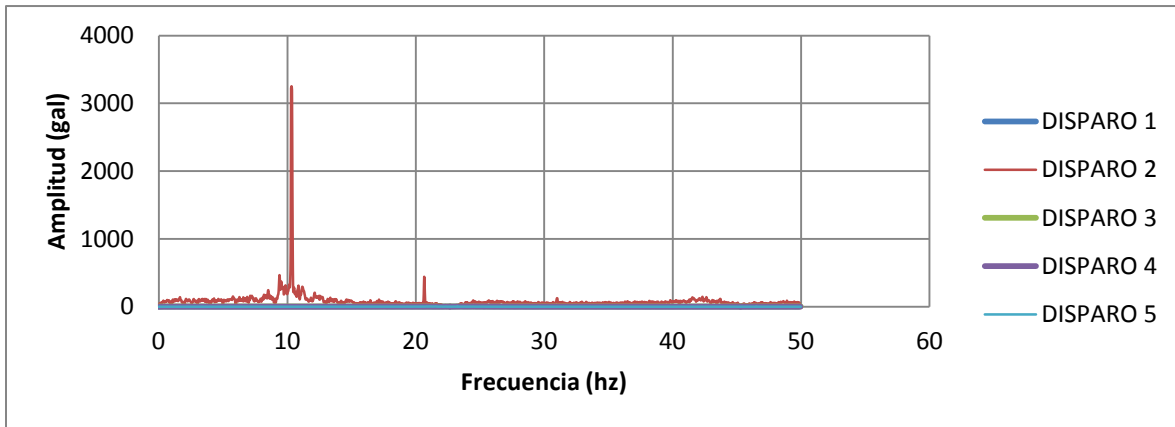


Figura 6.45 Gráfica de promedio H/V, campaña 3, primera cerrada los volcanes, equipo 1.

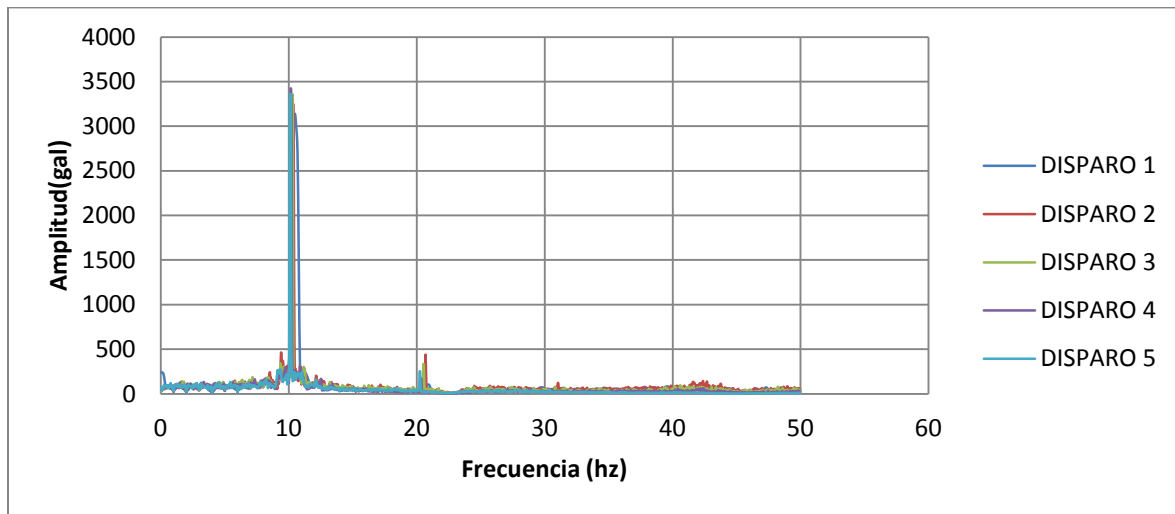


Figura 6.46 Gráfica de promedio H/V, campaña 3, primera cerrada los volcanes, equipo 2.

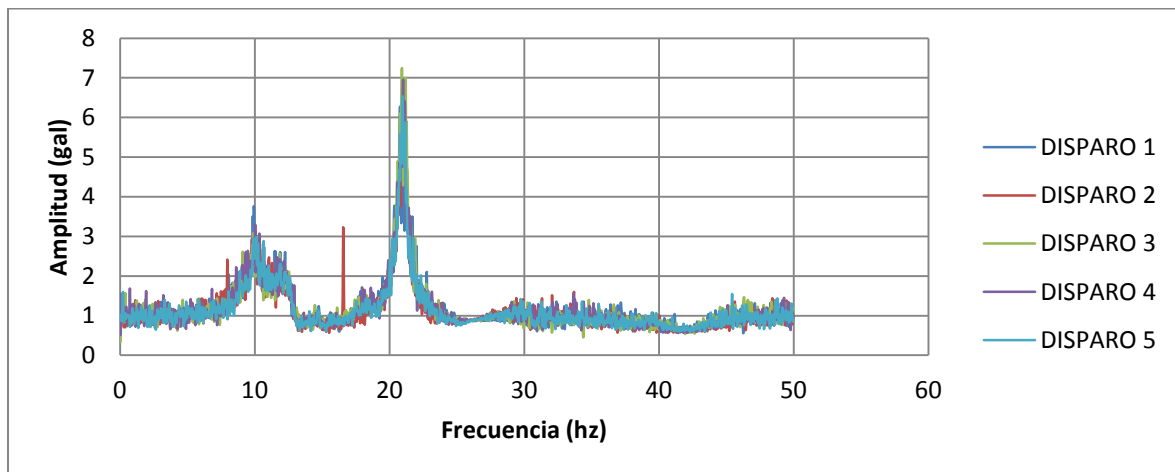


Figura 6.47 Gráfica de promedio H/V, campaña 3, primera cerrada los volcanes, equipo 4.

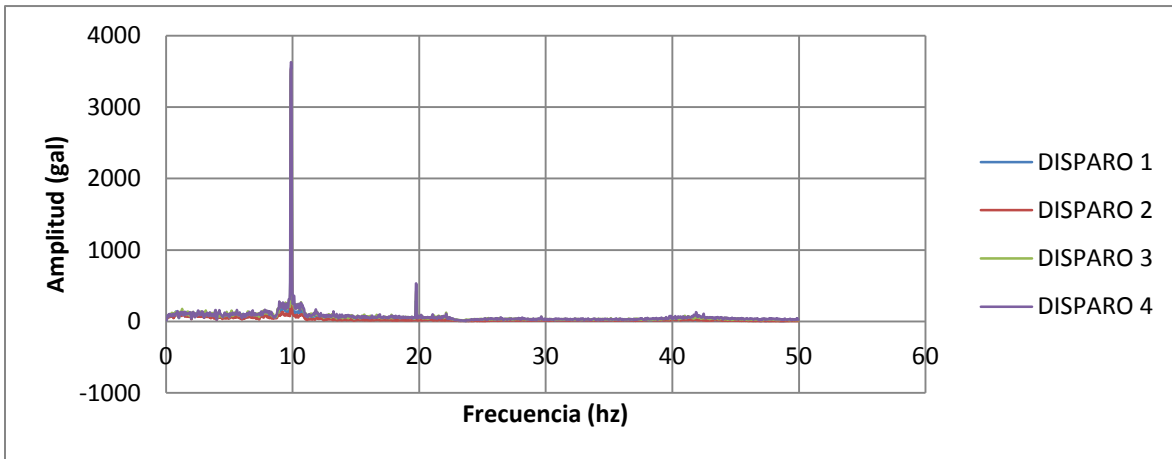


Figura 6.48 Gráfica de promedio H/V, campaña 3, tercera cerrada los volcanes, equipo 2.

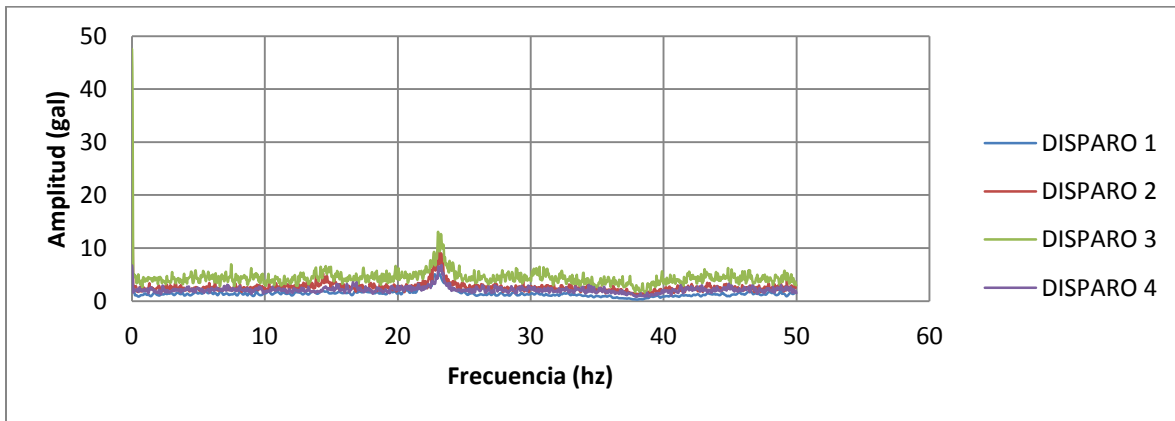


Figura 6.49 Gráfica de promedio H/V, campaña 4, cuarta cerrada la marquesa, equipo 1.

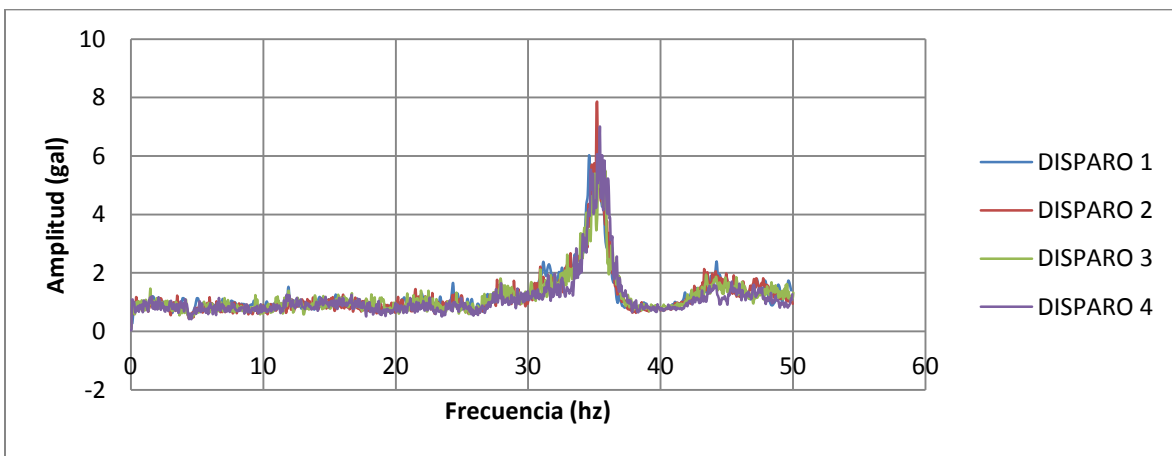


Figura 6.50 Gráfica de promedio H/V, campaña 4, cuarta cerrada la marquesa, equipo 6.

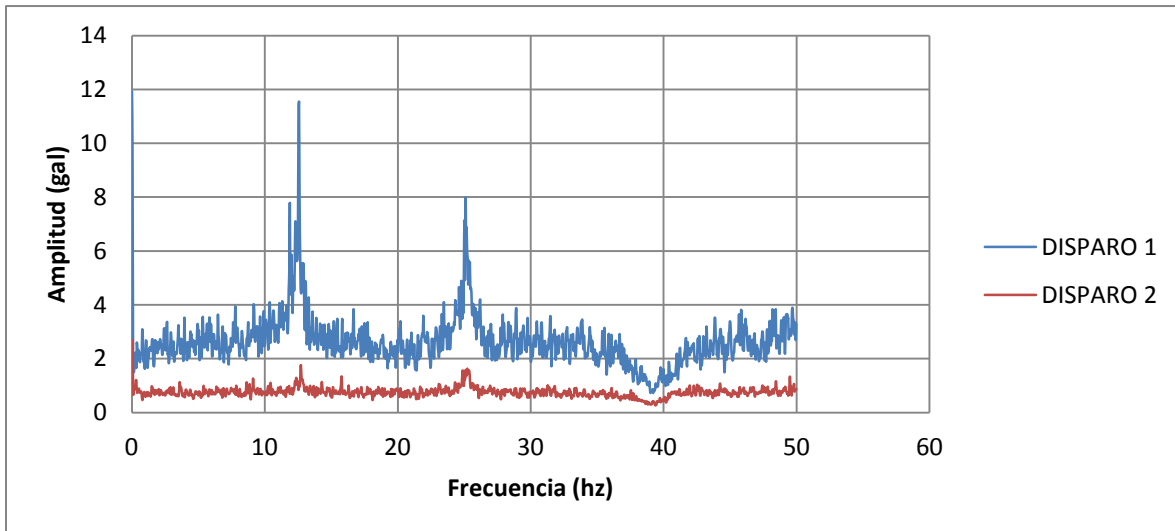


Figura 6.51 Gráfica de promedio H/V, campaña 5, tercera cerrada la marquesa, equipo 1.

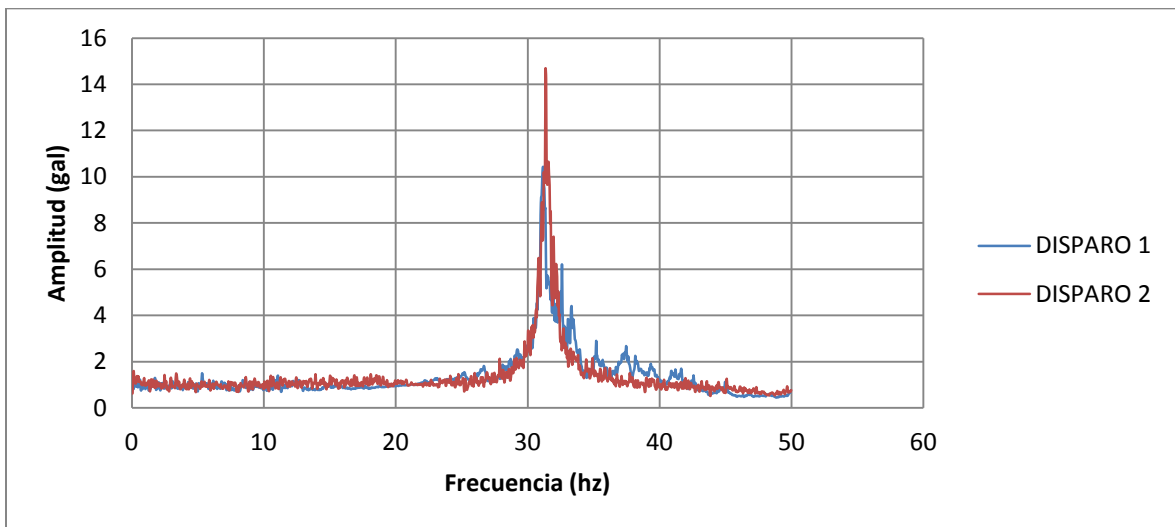


Figura 6.52 Gráfica de promedio H/V, campaña 5, tercera cerrada la marquesa, equipo 4.

Ahora dadas las gráficas obtenidas se procedió a concentrar la información en las tablas 6.2 a la 6.6, a manera de tener ya concretas las frecuencias que se definen en lo que se obtuvo. Dados los resultados no se puede determinar la frecuencia dominante del suelo, pero se puede notar que la menor frecuencia encontrada es una de 9.51 Hz y la mayor de 22.47 Hz, de eso se tiene que a pesar de ser una zona aluvial, el suelo se comporta de manera firme.

Tabla 6.2 frecuencias del suelo en la campaña 1

CAMPAÑA 1			
2ª CERRADA MARQUESA			
EQUIPO 1	DISPARO 1	22.27 Hz	
	DISPARO 2	22.47 Hz	
EQUIPO 2	DISPARO 1	9.57 Hz	19.05 HZ
	DISPARO 2	9.51 Hz	19.02 Hz
4ª CERRADA MARQUESA			
EQUIPO 1	DISPARO 1	18.13 Hz	
	DISPARO 2	18.15 Hz	
	DISPARO 3	18.31 Hz	
	DISPARO 4	18.06 Hz	
	DISPARO 5	18.17 Hz	
EQUIPO 2	DISPARO 1	9.76 Hz	19.52 Hz
	DISPARO 2	9.82 Hz	19.61 Hz
	DISPARO 3	9.84 Hz	19.64 Hz
	DISPARO 4	9.82 Hz	19.57 Hz
	DISPARO 5	9.80 Hz	19.54 Hz
EQUIPO 4	DISPARO 1	NO DEFINE	
	DISPARO 2	NO DEFINE	
	DISPARO 3	NO DEFINE	
	DISPARO 4	NO DEFINE	
	DISPARO 5	NO DEFINE	
EQUIPO 6	DISPARO 1	NO DEFINE	
	DISPARO 2	NO DEFINE	
	DISPARO 3	NO DEFINE	
	DISPARO 4	NO DEFINE	
	DISPARO 5	NO DEFINE	

Tabla 6.3 Frecuencias del suelo en la campaña 2

CAMPAÑA 2			
2ª CERRADA VOLCANES			
EQUIPO 1	DISPARO 1	20.84 Hz	
	DISPARO 2	20.99 Hz	
	DISPARO 3	20.85 Hz	
	DISPARO 4	20.98 Hz	
	DISPARO 5	21.03 Hz	
EQUIPO 2	DISPARO 1	9.68 Hz	19.3 Hz
	DISPARO 2	9.60 Hz	19.21 Hz
EQUIPO 4	DISPARO 1	NO DEFINE	
EQUIPO 6	DISPARO 1	NO DEFINE	
	DISPARO 2	NO DEFINE	
	DISPARO 3	NO DEFINE	
	DISPARO 4	NO DEFINE	
	DISPARO 5	NO DEFINE	
3ª CERRADA MARQUESA			
EQUIPO 1	DISPARO 1	NO DEFINE	
	DISPARO 2	NO DEFINE	
	DISPARO 3	NO DEFINE	
	DISPARO 4	NO DEFINE	
	DISPARO 5	NO DEFINE	
	DISPARO 6	NO DEFINE	
EQUIPO 2	DISPARO 1	10.17 Hz	20.35 Hz
	DISPARO 2	10.1 Hz	20.24 Hz
	DISPARO 3	10.08 Hz	20.16 Hz
	DISPARO 4	10.06 Hz	20.03 Hz
	DISPARO 5	10.02 Hz	19.97 Hz
	DISPARO 6	9.97 Hz	19.97 Hz
EQUIPO 4	DISPARO 1	10.31 Hz	
	DISPARO 2	10.23 Hz	
	DISPARO 3	9.51 Hz	
	DISPARO 4	9.64 Hz	
	DISPARO 5	9.71 Hz	
	DISPARO 6	9.81 Hz	
EQUIPO 6	DISPARO 1	NO DEFINE	
	DISPARO 2	NO DEFINE	
	DISPARO 3	NO DEFINE	
	DISPARO 4	NO DEFINE	
	DISPARO 5	NO DEFINE	
	DISPARO 6	NO DEFINE	

Tabla 6.4 Frecuencias del suelo en la campaña 3

CAMPAÑA 3			
1ª CERRADA VOLCANES			
EQUIPO 1	DISPARO 1	NO DEFINE	
	DISPARO 2	10.32 Hz	20.65
	DISPARO 3	NO DEFINE	
	DISPARO 4	NO DEFINE	
	DISPARO 5	NO DEFINE	
EQUIPO 2	DISPARO 1	10.48 Hz	
	DISPARO 2	10.34 Hz	20.68
	DISPARO 3	10.31 Hz	20.52
	DISPARO 4	10.15 Hz	20.34
	DISPARO 5	10.13 Hz	20.26
EQUIPO 4	DISPARO 1	20.96	
	DISPARO 2	21.21	
	DISPARO 3	20.91	
	DISPARO 4	21	
	DISPARO 5	20.94	
EQUIPO 6	DISPARO 1	NO DEFINE	
	DISPARO 2	NO DEFINE	
	DISPARO 3	NO DEFINE	
	DISPARO 4	NO DEFINE	
	DISPARO 5	NO DEFINE	
3ª CERRADA VOLCANES			
EQUIPO 1	DISPARO 1	NO DEFINE	
	DISPARO 2	NO DEFINE	
	DISPARO 3	NO DEFINE	
	DISPARO 4	NO DEFINE	
EQUIPO 2	DISPARO 1	9.87 Hz	19.74 Hz
	DISPARO 2	9.87 Hz	19.75 Hz
	DISPARO 3	9.88 Hz	19.76 Hz
	DISPARO 4	9.86 Hz	19.73 Hz
EQUIPO 4	DISPARO 1	NO DEFINE	
	DISPARO 2	NO DEFINE	
	DISPARO 3	NO DEFINE	
	DISPARO 4	NO DEFINE	
EQUIPO 6	DISPARO 1	NO DEFINE	
	DISPARO 2	NO DEFINE	
	DISPARO 3	NO DEFINE	
	DISPARO 4	NO DEFINE	

Tabla 6.5 Frecuencias del suelo en la campaña 4

CAMPAÑA 4		
2ª CERRADA VOLCANES		
EQUIPO 1	DISPARO 1	NO DEFINE
	DISPARO 2	NO DEFINE
	DISPARO 3	NO DEFINE
	DISPARO 4	NO DEFINE
	DISPARO 5	NO DEFINE
EQUIPO 4	DISPARO 1	NO DEFINE
	DISPARO 2	NO DEFINE
	DISPARO 3	NO DEFINE
	DISPARO 4	NO DEFINE
	DISPARO 5	NO DEFINE
EQUIPO 6	DISPARO 1	NO DEFINE
	DISPARO 2	NO DEFINE
	DISPARO 3	NO DEFINE
	DISPARO 4	NO DEFINE
	DISPARO 5	NO DEFINE
4ª CERRADA MARQUESA		
EQUIPO 1	DISPARO 1	NO DEFINE
	DISPARO 2	NO DEFINE
	DISPARO 3	NO DEFINE
	DISPARO 4	NO DEFINE
EQUIPO 4	DISPARO 1	NO DEFINE
	DISPARO 2	NO DEFINE
	DISPARO 3	NO DEFINE
	DISPARO 4	NO DEFINE
EQUIPO 6	DISPARO 1	NO DEFINE
	DISPARO 2	NO DEFINE
	DISPARO 3	NO DEFINE
	DISPARO 4	NO DEFINE

Tabla 6.6 Frecuencias del suelo en la campaña 5

CAMPAÑA 5		
3ª CERRADA LA MARQUESA		
EQUIPO 1	DISPARO 1	12.56 Hz
	DISPARO 2	12.7 Hz
EQUIPO 4	DISPARO 1	NO DEFINE
	DISPARO 2	NO DEFINE
EQUIPO 6	DISPARO 1	NO DEFINE
	DISPARO 2	NO DEFINE

6.4 PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES REGISTRADAS EN UNA VIVIENDA TÍPICA DE LA ZONA

Para caracterizar como la vibración del suelo, en función de aceleraciones y velocidades, se transmiten a las edificaciones, se colocaron 3 acelerómetros con capacidad para obtener registros en 3 direcciones ortogonales, uno en la entrada (banqueta, Equipo E1), otro en la planta baja (Equipo E4) y otro sobre la azotea de una de las edificaciones (Equipo E6), correspondiente a la casa No. 21 de la 4ª cerrada de la Marquesa.

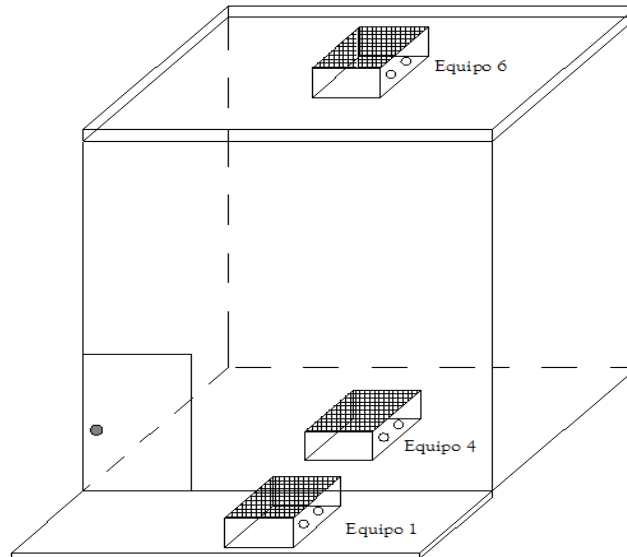


Fig. 6.53 Figura esquemática del arreglo de los equipos en la casa

Así mismo de los registros que se obtuvieron con estos equipos también se pueden presentar las gráficas representativas de las aceleraciones máximas registradas en cada equipo y en cada una de las direcciones.

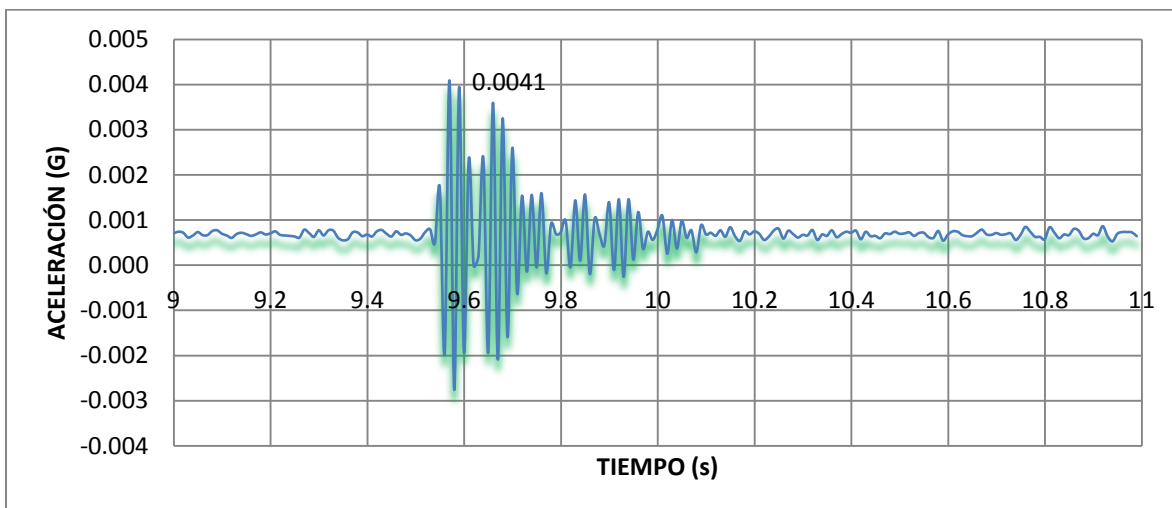


Figura 6.54 Registro acelerográfico para la casa de equipo 6, campaña 6, disparo 3, dirección 1.

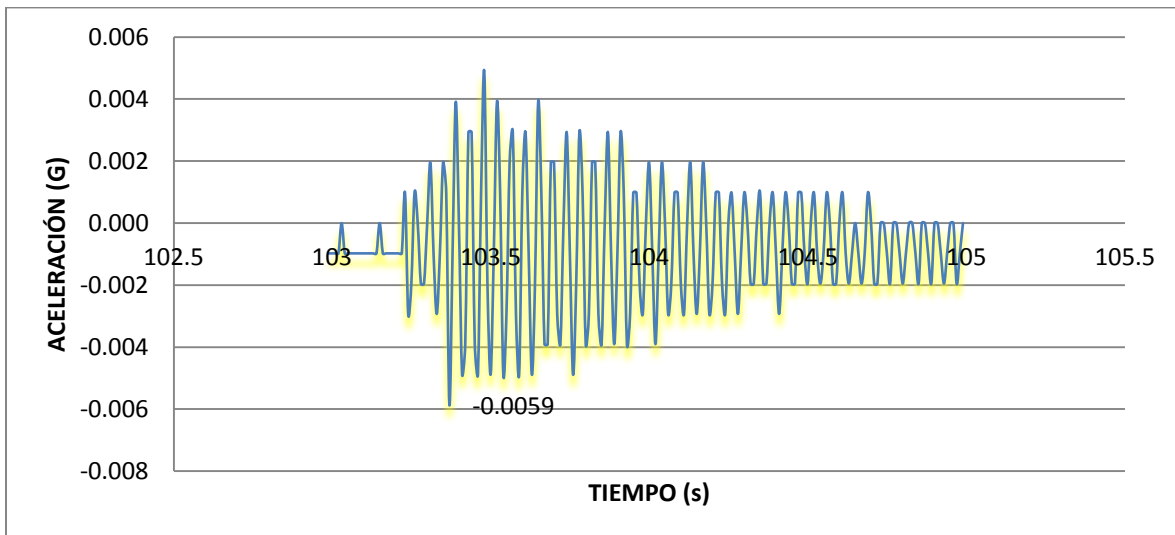


Figura 6.55 Registro acelerográfico para la casa de equipo 1, campaña 6, disparo 2, dirección 2.

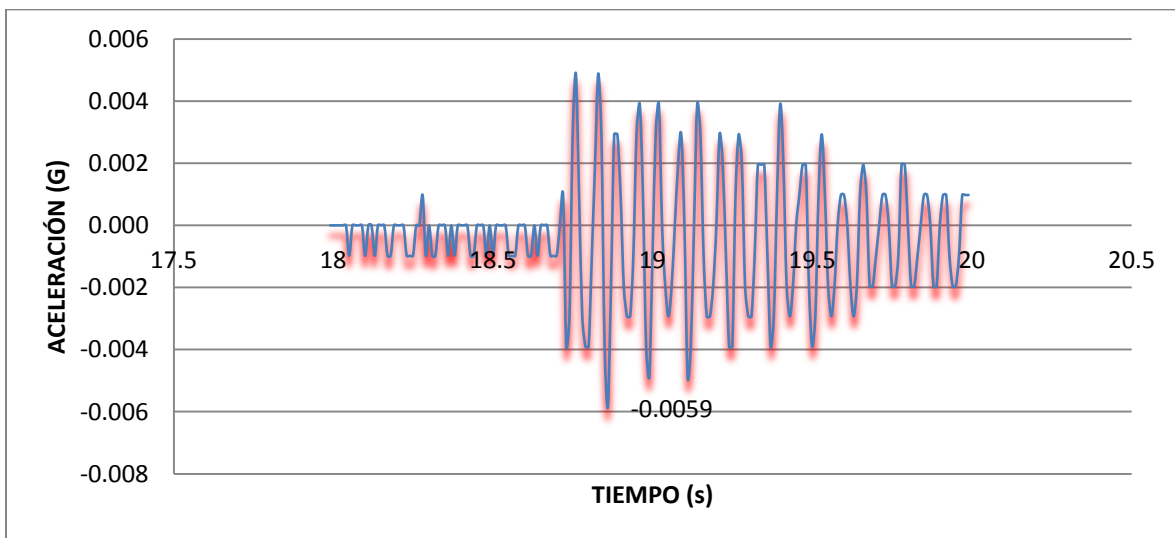


Figura 6.56 Registro acelerográfico para la casa de equipo 1, campaña 6, disparo 2, dirección 3.

6.4.1 Espectros de Fourier Característicos de una Vivienda Típica de la Zona de Estudio

Dentro del análisis de los registros obtenidos de la vivienda tipo, se tienen los siguientes espectros de Fourier, de las cuales como se observa en el equipo 1 y el equipo 4, algunas de las frecuencias que se definen son muy altas y obviamente no pertenecen a la estructura, pero en el equipo 6 se nota en una primera y simple inspección que hay una frecuencia interesante para el análisis.

Para el registro del equipo 1

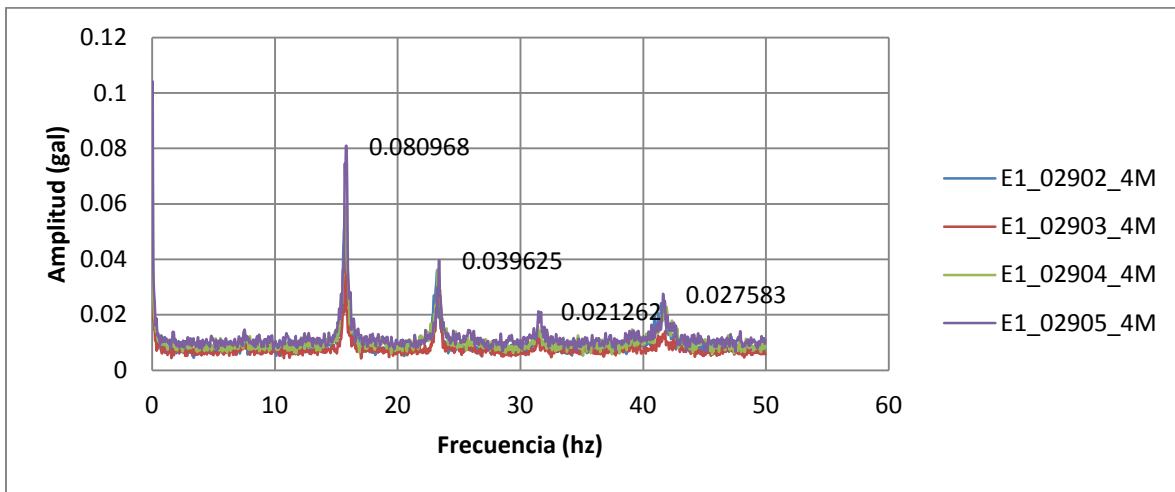


Figura 6.57 Espectro de Fourier Dirección Vertical (1).

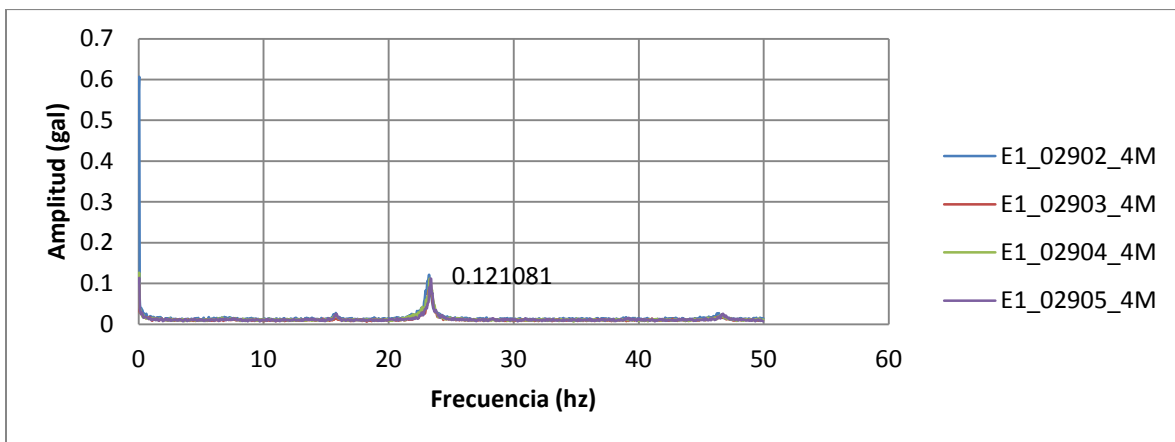


Figura 6.58 Espectro de Fourier Dirección Longitudinal (2).

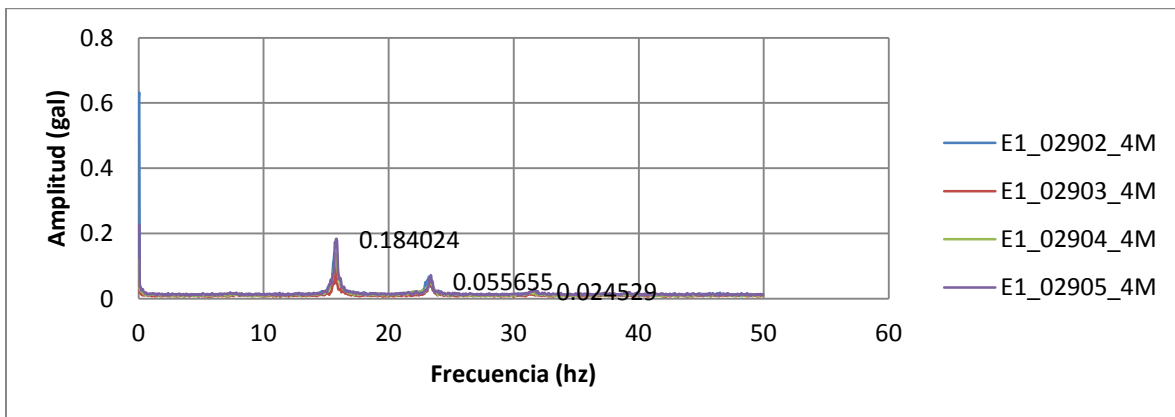


Figura 6.59 Espectro de Fourier Dirección transversal (3).

Para el equipo 4

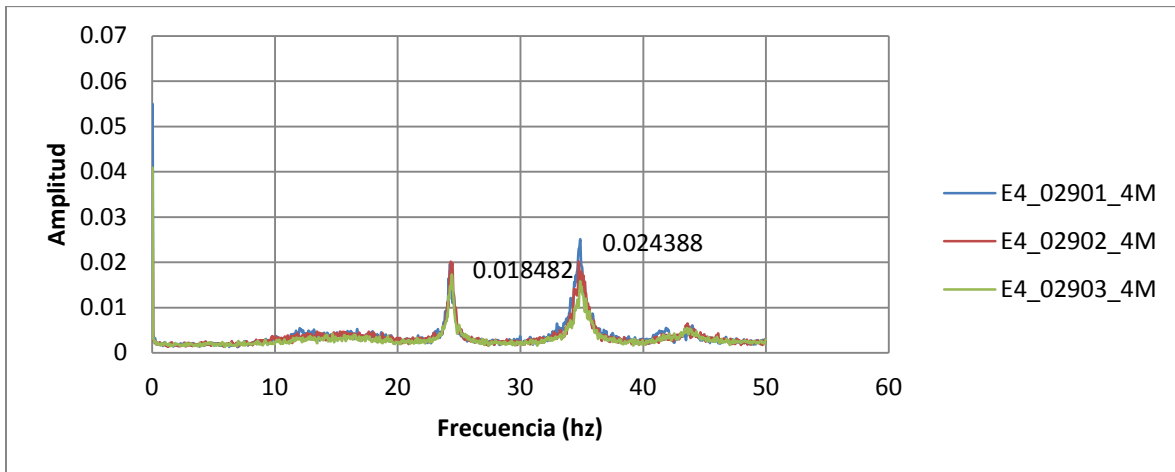


Figura 6.60 Espectro de Fourier Dirección Vertical (1).

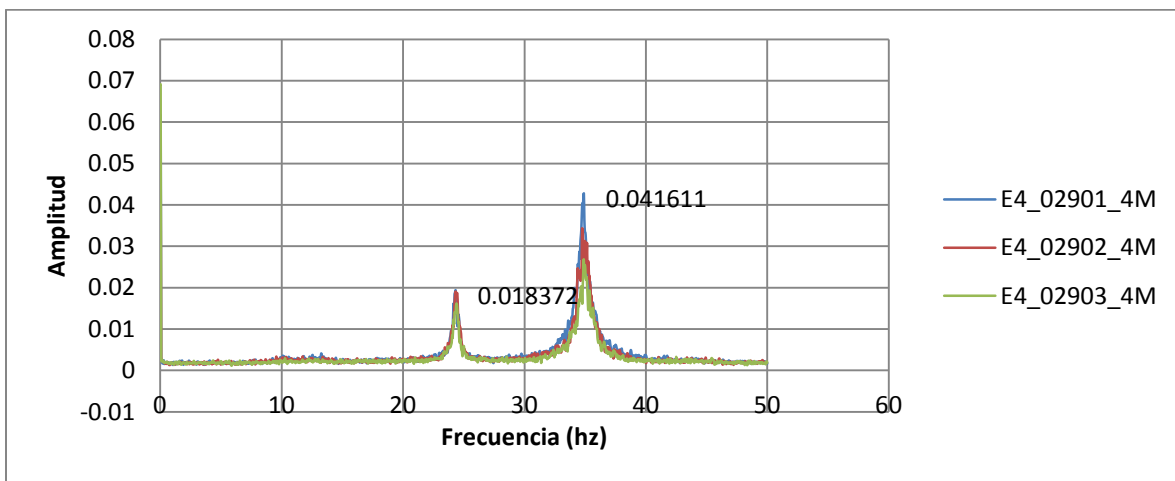


Figura 6.61 Espectro de Fourier Dirección Longitudinal (2).

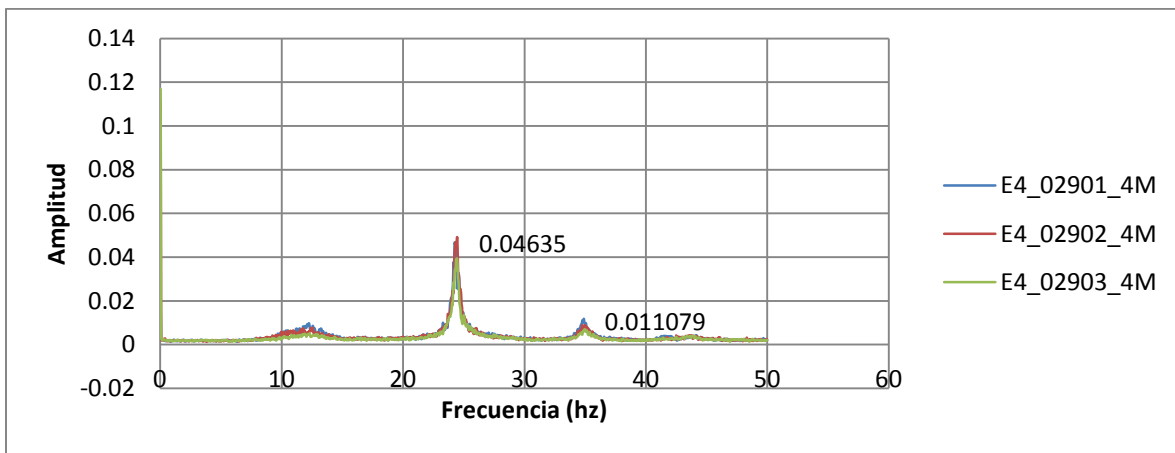


Figura 6.62 Espectro de Fourier Dirección Transversal (3).

Para el equipo 6

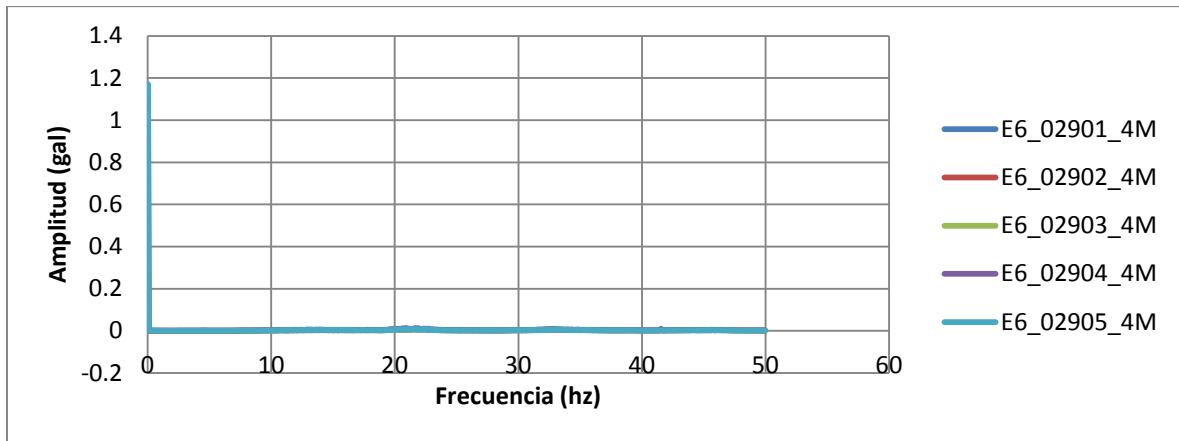


Figura 6.63 Espectro de Fourier Dirección Vertical (1).

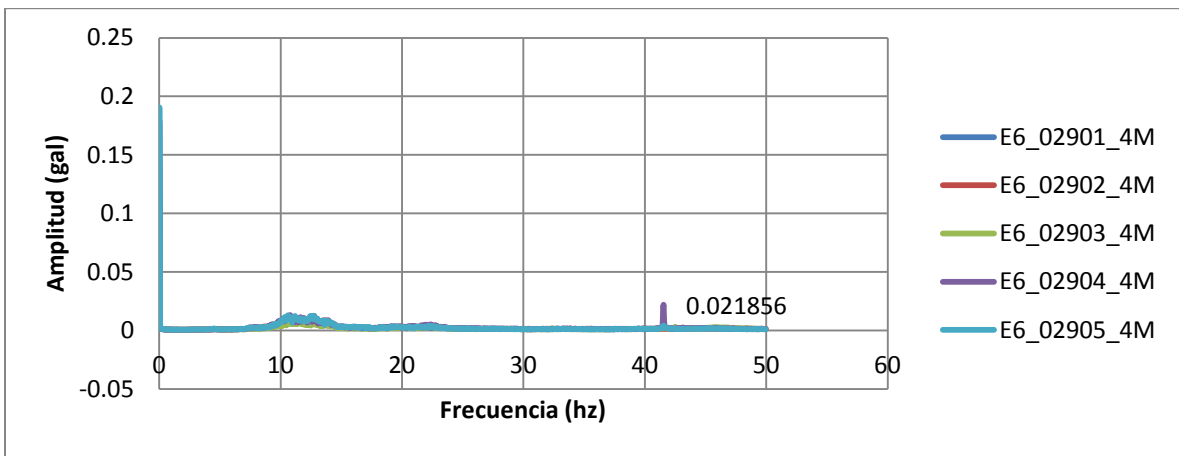


Figura 6.64 Espectro de Fourier Dirección Longitudinal (2).

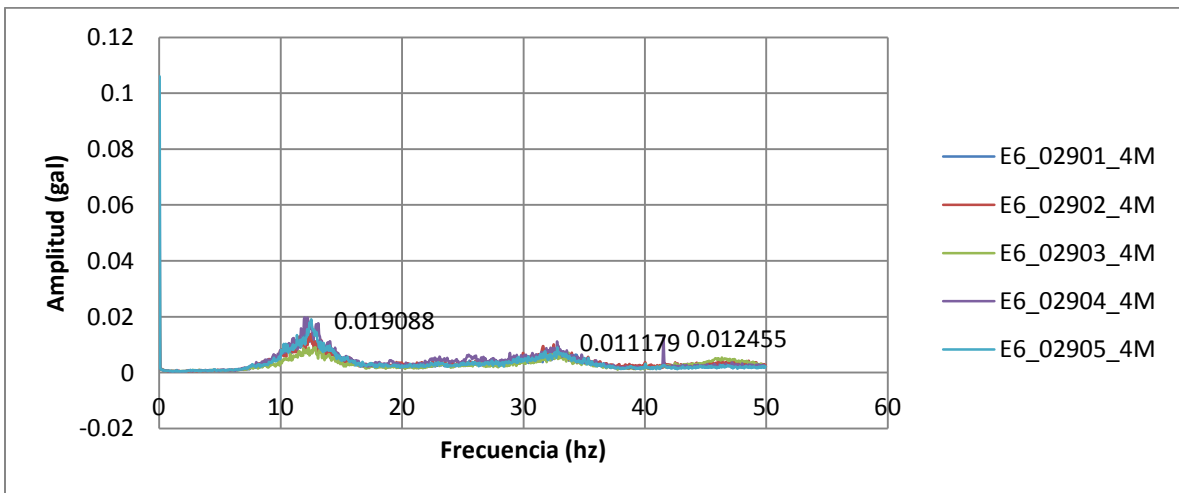


Figura 6.65 Espectro de Fourier Dirección Transversal (3).

6.4.2 Frecuencias de Vibrar de la Vivienda Tipo

Para poder obtener la frecuencia de la vivienda se hicieron las correlaciones necesarias entre los registros obtenidos de su monitoreo, y dada la falta de datos para algunos disparos, solo se pudieron correlacionar los equipos 4 y 6 en su dirección 3 (Graficas 6.67 y 6.68), también porque eran los únicos registros en los cuales resaltaba el mismo valor de frecuencia fundamental en el espectro de respuesta. De ello se obtuvieron los siguientes resultados.

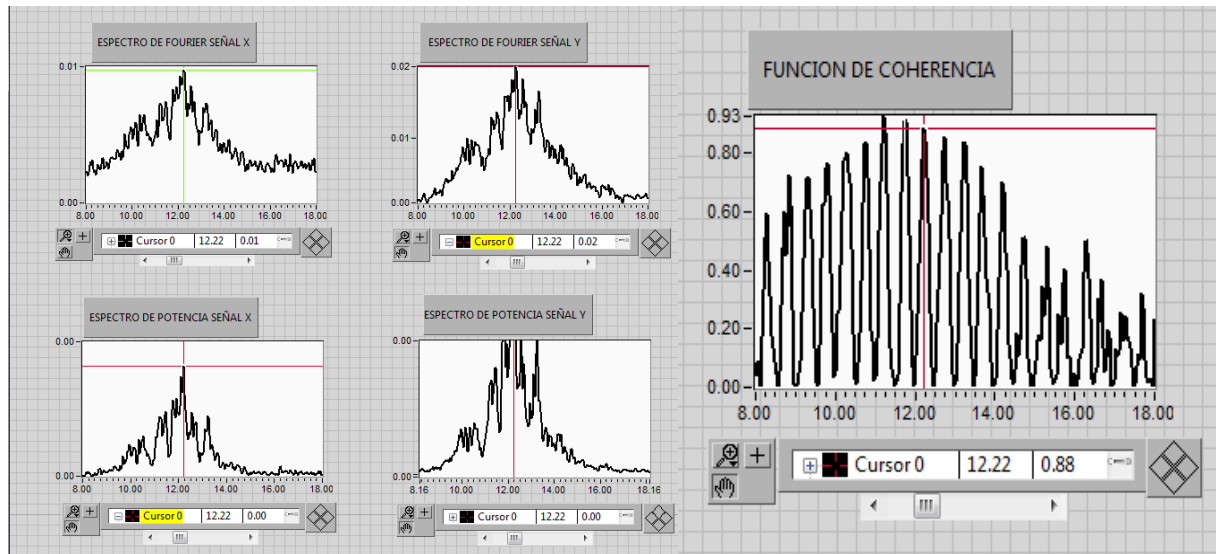


Fig. 6.66 Resultados de correlación de la edificación monitoreada, obtenidas del instrumento virtual.

Dado que la función de coherencia entre la señal de entrada y de salida tiene un valor bastante aceptable de 0.88, es decir muy cercano a uno, se podría decir que se trata de la frecuencia de la estructura y su valor corresponde a 12.22 Hz, lo cual nos conllevaría a un periodo de 0.08 s. que finalmente viene a ser un periodo adecuado para una estructura de concreto reforzado y de un solo nivel.

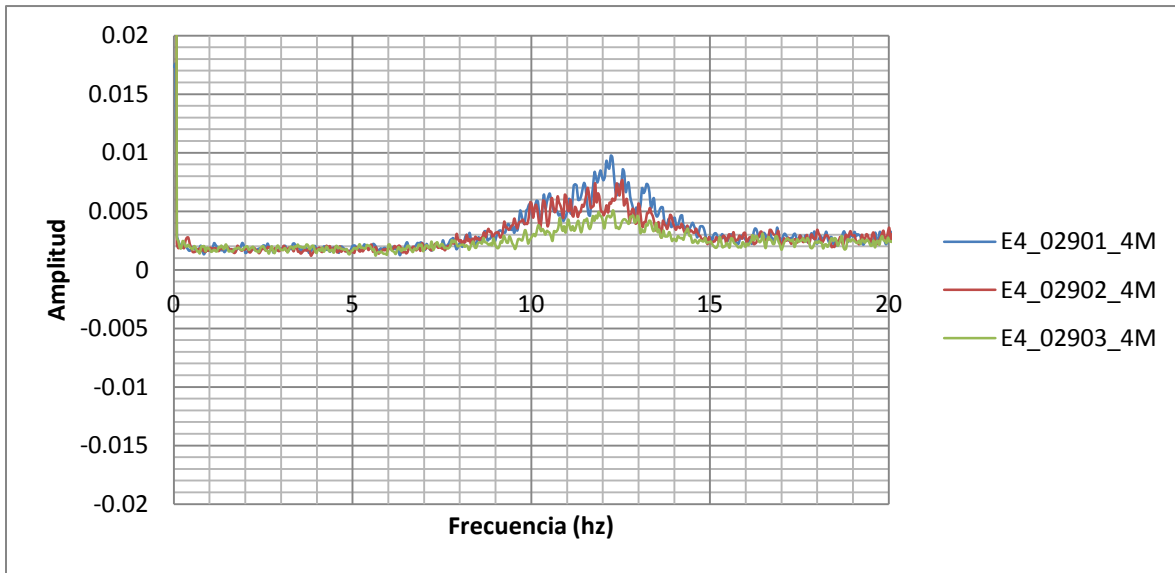


Figura 6.67 Espectro de Fourier Dirección transversal (3), Equipo 4.

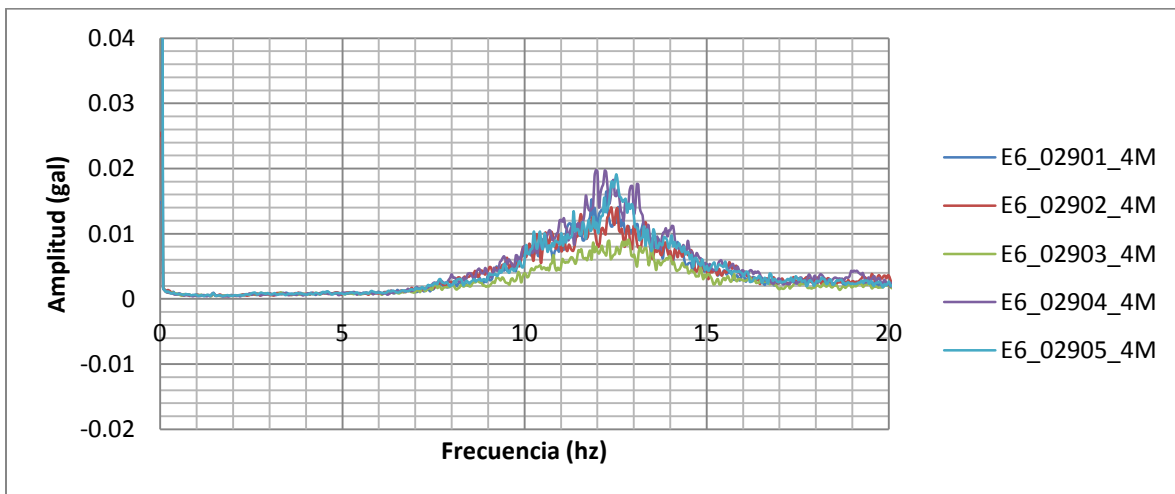


Figura 6.68 Espectro de Fourier Dirección transversal (3), Equipo 6.



7. EVALUACIÓN DE VIBRACIONES CONFORME A LA NORMATIVIDAD EXISTENTE

En la normatividad del ámbito internacional, las vibraciones producidas por tráfico con posibilidad de daños en edificaciones y también al confort humano, se han realizado en acuerdo con ciertos niveles de vibraciones máximos. Los valores máximos en el caso de la valoración a edificios se han encontrado por medio de mediciones y reconocimiento de daños en ellos. Esos valores máximos incluyen cierto margen de seguridad y son, en muchos casos, parte de una legislación o normatividad técnica. El fin de este capítulo es revisar y aplicar la normatividad internacional en un contexto local, en una zona de estudio de la Autopista de Circuito Mexiquense como se presentó en el capítulo 5. Para lo anterior aquí se muestra la implementación de algunas normas internacionales ya detalladas en el capítulo 3, los valores representativos para el caso particular en estudio.

Como ya se dijo todas las normas y recomendaciones relativas al potencial de daños por efecto de las vibraciones de causa humana, utilizan la velocidad de la vibración como variable básica.

Por otro lado, es importante evaluar las vibraciones en 3 direcciones ortogonales (como algunas normas lo exigen), con el fin de observar las propiedades de los diferentes tipos de onda generadas, así como observar particularidades de la transmisión de ondas elásticas en el suelo. En muchos casos, los sensores más utilizados son aquellos que miden cantidades cinemáticas como la aceleración (acelerómetros) y velocidad (geófonos). Dependiendo de la variable que se necesite y del tipo de sensor utilizado, se pueden encontrar valores de la variable considerada a partir de los valores obtenidos en la medición por medio de integración o diferenciación. En nuestro caso, los valores de velocidades fueron obtenidos a partir de la integración de señales, ya que los registros realizados eran de aceleración.

7.1 VALORES LÍMITE DE VIBRACIONES PRODUCIDAS POR TRÁFICO VEHICULAR PARA EVITAR DAÑO ESTRUCTURAL

Durante la última década se ha incrementado el número de estructuras sometidas a sollicitaciones por vibraciones, esto influenciado por migraciones de poblaciones a sitios con fuentes generadoras de vibraciones. Pero también ha aumentado la cantidad y magnitud de las vibraciones, principalmente debido factores sociales y económicos que han impulsado el desarrollo, entendido como producción a gran escala de las obras civiles y minería (fuentes generadoras de vibraciones).

Con el aumento en los niveles de vibraciones, la cantidad de edificaciones y de fuentes generadoras de vibración, es necesario entonces poner cotas máximas a los niveles de vibraciones con el fin de evitar daños en las edificaciones.

Las normas internacionales han establecido, en su mayoría, valores de velocidad límite de las partículas del suelo (asociadas con vibraciones) por encima de los cuales es probable que se generen daños visibles en los elementos de una edificación.

También es importante anotar que las condiciones socioeconómicas y las normativas de cada país están directamente asociadas con los límites que se especifican en cada caso, ya que una edificación de vivienda tipo residencial construida en Australia, Estados Unidos o en Europa tendrá en general un comportamiento mecánico diferente al de las construidas en países como México, donde es muy común que un gran porcentaje de viviendas se edifican mediante autoconstrucción y sin asesoría técnica de un Ingeniero, lo cual las hace más vulnerables a sufrir daños.

Con el fin de evaluar los efectos de las vibraciones sobre la vivienda tomada como muestra en este trabajo, en la tabla 7.1 se presentan los valores máximos de aceleración y velocidad para realizar las debidas evaluaciones con las normas que conciernen al tema.

TABLA 7.1 EVALUACIÓN SOBRE EL CRITERIO ESTRUCTURAL

CAMPAÑA 6							NORMATIVA PARA EL CRITERIO ESTRUCTURAL					
4º CERRADA LA MARQUESA							DIN 4150 PARTE 3	SN 640312	CALTRANS	DIRECTRIZ KDT 046/72	BS 7385: PARTE 2	ISO 4866
	VELOCIDAD (mm/s)	EQ.	DISP.	ACELERACIÓN (m/s ²)	EQ.	DISP.						
DIR 1	1.733	1	5	0.040	6	3	SI CUMPLE	SI CUMPLE	SI CUMPLE	SI CUMPLE	SI CUMPLE	SI CUMPLE
DIR 2	2.689	1	2	0.057	1	2	SI CUMPLE	SI CUMPLE	SI CUMPLE	SI CUMPLE	SI CUMPLE	SI CUMPLE
DIR 3	2.326	1	2	0.057	1	2	SI CUMPLE	SI CUMPLE	SI CUMPLE	SI CUMPLE	SI CUMPLE	SI CUMPLE

7.2 VALORES LÍMITE DE VIBRACIONES PRODUCIDAS POR TRÁFICO VEHICULAR PARA EVITAR AFECTACIONES AL CONFORT HUMANO

Vibraciones de construcción causados por el tráfico no son una preocupación de la salud y la seguridad de manera directa, más bien los efectos secundarios que trae consigo. Las vibraciones pueden ser inaceptables para los ocupantes debido a sensaciones molestas físicas producidas en el cuerpo humano, la interferencia con actividades como el sueño y la conversación, ruido de cristales y objetos sueltos, y el temor a daños en el edificio y su contenido. La experiencia ha demostrado que las personas que viven en casas son propensos a quejarse si los niveles de vibración son sólo ligeramente por encima del umbral de percepción. La Organización Internacional de Normalización y otros países han publicado normas que guían la evaluación de la respuesta humana ante las vibraciones. Las normas tienen que ver principalmente con la vibración continua e intermitente, como la inducida por la maquinaria, tráfico y la vibración impulsiva como la inducida por la voladura.

Las normas no son claras sobre cómo evaluar las vibraciones de autobuses y camiones, que tienen relativamente corta duración y características de amplitud complejas. Las vibraciones debidas por tráfico tienen una evaluación cualitativa como se muestra (en la tabla 7.2) según las normas que ya se detallaron en el capítulo 3.

En la tabla 7.2 se presentan los valores de aceleraciones y velocidades máximas registradas en la zona de estudio durante las mediciones.

TABLA 7.2 VALORES DE ACELERACIONES Y VELOCIDADES MÁXIMAS REGISTRADAS EN LA ZONA DE ESTUDIO.

CAMPAÑA 1						
2ª C. LA MARQUESA						
	VELOCIDAD (mm/s)	EQUIPO	DISPARO	ACELERACIÓN (m/s^2)	EQUIPO	DISPARO
DIR 1	3.54	1	1	0.66	1	2
DIR 2	1.59	1	2	0.28	1	2
DIR 3	32.06	2	1	1.62	2	2
4ª C. LA MARQUESA						
	VELOCIDAD (mm/s)	EQUIPO	DISPARO	ACELERACIÓN (m/s^2)	EQUIPO	DISPARO
DIR 1	3.69	1	5	0.39	1	5
DIR 2	2.60	1	5	0.20	3	5
DIR 3	38.92	2	5	1.88	2	5

CAMPAÑA 2						
2ª C. LOS VOLCANES						
	VELOCIDAD (mm/s)	EQUIPO	DISPARO	ACELERACIÓN (m/s ²)	EQUIPO	DISPARO
DIR 1	2.58	1	3	0.18	4	4
DIR 2	3.33	4	1	0.34	3	4
DIR 3	43.35	2	1	1.85	2	2
3ª C. LA MARQUESA						
	VELOCIDAD (mm/s)	EQUIPO	DISPARO	ACELERACIÓN (m/s ²)	EQUIPO	DISPARO
DIR 1	1.37	1	4	0.06	2	6
DIR 2	3.82	3	1	0.47	3	1
DIR 3	42.57	2	2	1.90	2	6
CAMPAÑA 3						
1ª C. LOS VOLCANES						
	VELOCIDAD (mm/s)	EQUIPO	DISPARO	ACELERACIÓN (m/s ²)	EQUIPO	DISPARO
DIR 1	4.89	1	5	0.91	2	5
DIR 2	9.67	5	5	1.30	5	5
DIR 3	43.29	2	4	2.63	5	3
3ª C. LOS VOLCANES						
	VELOCIDAD (mm/s)	EQUIPO	DISPARO	ACELERACIÓN (m/s ²)	EQUIPO	DISPARO
DIR 1	3.88	2	2	0.95	2	2
DIR 2	3.09	2	2	0.69	2	2
DIR 3	42.82	2	2	1.87	2	3
CAMPAÑA 4						
2ª C. LOS VOLCANES						
	VELOCIDAD (mm/s)	EQUIPO	DISPARO	ACELERACIÓN (m/s ²)	EQUIPO	DISPARO
DIR 1	2.29	1	4	0.07	1	3
DIR 2	2.69	1	2	0.10	1	3
DIR 3	3.09	1	2	0.095	1	3
4ª C. LA MARQUESA						
	VELOCIDAD (mm/s)	EQUIPO	DISPARO	ACELERACIÓN (m/s ²)	EQUIPO	DISPARO
DIR 1	1.42	1	1	0.28	1	1
DIR 2	2.97	1	2	0.14	1	1
DIR 3	2.36	1	3	0.20	1	1
CAMPAÑA 5						
3ª C. LA MARQUESA						
	VELOCIDAD (mm/s)	EQUIPO	DISPARO	ACELERACIÓN (m/s ²)	EQUIPO	DISPARO
DIR 1	2.80	4	1	0.44	4	1
DIR 2	1.34	1	1	0.20	1	1
DIR 3	4.44	4	1	0.71	4	1

En la tabla 7.3 se muestran las evaluaciones de los registros obtenidos de aceleraciones y velocidades máximas de acuerdo a la normativa presentada para el cuidado del confort humano.



TABLA 7.3 EVALUACIÓN SOBRE EL CRITERIO DEL CUIDADO DEL CONFORT HUMANO

CAMPAÑA 1			NORMATIVA PARA EL CONFORT HUMANO				
2º C. LA MARQUESA			ISO 4866 (1990)	ISO 2631-1 (1997)	DIN 4150 PARTE 2	BS 6472 – 1992	BS 5228-2
	VELOCIDAD (mm/s)	ACELERACIÓN (m/s ²)					
DIR 1	3.54	0.66	MOLESTO	BASTANTE INCONFORABLE	FUERTEMENTE NOTABLE	SI CUMPLE	PUEDE CAUSAR QUEJA
DIR 2	1.59	0.28	CLARAMENTE PERCEPTIBLE	CONFORTABLE	FACILMENTE NOTABLE	SI CUMPLE	PUEDE CAUSAR QUEJA
DIR 3	32.06	1.62	PERJUDICIAL	MUY INCONFORABLE	MUY FUERTEMENTE NOTABLE	NO CUMPLE	INTOLERABLE
4º C. LA MARQUESA							
	VELOCIDAD (mm/s)	ACELERACIÓN (m/s ²)					
DIR 1	3.69	0.39	MOLESTO	UN POCO INCONFORABLE	FUERTEMENTE NOTABLE	SI CUMPLE	PUEDE CAUSAR QUEJA
DIR 2	2.60	0.20	MOLESTO	CONFORTABLE	FUERTEMENTE NOTABLE	SI CUMPLE	PUEDE CAUSAR QUEJA
DIR 3	38.92	1.88	PERJUDICIAL	MUY INCONFORABLE	MUY FUERTEMENTE NOTABLE	NO CUMPLE	INTOLERABLE
CAMPAÑA 2							
2º C. LOS VOLCANES							
	VELOCIDAD (mm/s)	ACELERACIÓN (m/s ²)					
DIR 1	2.58	0.18	MOLESTO	CONFORTABLE	FUERTEMENTE NOTABLE	SI CUMPLE	PUEDE CAUSAR QUEJA
DIR 2	3.33	0.34	MOLESTO	UN POCO INCONFORABLE	FUERTEMENTE NOTABLE	SI CUMPLE	PUEDE CAUSAR QUEJA
DIR 3	43.35	1.85	DESAGRADABLE, DOLOROSO SI DURA	MUY INCONFORABLE	MUY FUERTEMENTE NOTABLE	NO CUMPLE	INTOLERABLE
3º C. LA MARQUESA							
	VELOCIDAD (mm/s)	ACELERACIÓN (m/s ²)					
DIR 1	1.37	0.06	CLARAMENTE PERCEPTIBLE	CONFORTABLE	FACILMENTE NOTABLE	SI CUMPLE	PUEDE CAUSAR QUEJA
DIR 2	3.82	0.47	MOLESTO	UN POCO INCONFORABLE	FUERTEMENTE NOTABLE	SI CUMPLE	PUEDE CAUSAR QUEJA
DIR 3	42.57	1.90	PERJUDICIAL	MUY INCONFORABLE	MUY FUERTEMENTE NOTABLE	NO CUMPLE	INTOLERABLE
CAMPAÑA 3							
1º C. LOS VOLCANES							
	VELOCIDAD (mm/s)	ACELERACIÓN (m/s ²)					
DIR 1	4.89	0.91	MOLESTO	BASTANTE INCONFORABLE	FUERTEMENTE NOTABLE	SI CUMPLE	PUEDE CAUSAR QUEJA
DIR 2	9.67	1.30	DESAGRADABLE, DOLOROSO SI DURA	INCONFORABLE	MUY FUERTEMENTE NOTABLE	SI CUMPLE	PUEDE CAUSAR QUEJA
DIR 3	43.29	2.63	PERJUDICIAL	EXTREMEDAMENTE INCONFORABLE	MUY FUERTEMENTE NOTABLE	NO CUMPLE	INTOLERABLE
3º C. LOS VOLCANES							
	VELOCIDAD (mm/s)	ACELERACIÓN (m/s ²)					
DIR 1	3.88	0.95	MOLESTO	BASTANTE INCONFORABLE	FUERTEMENTE NOTABLE	SI CUMPLE	PUEDE CAUSAR QUEJA
DIR 2	3.09	0.69	MOLESTO	BASTANTE INCONFORABLE	FUERTEMENTE NOTABLE	SI CUMPLE	PUEDE CAUSAR QUEJA
DIR 3	42.82	1.87	PERJUDICIAL	MUY INCONFORABLE	MUY FUERTEMENTE NOTABLE	NO CUMPLE	INTOLERABLE
CAMPAÑA 4							
2º C. LOS VOLCANES							
	VELOCIDAD (mm/s)	ACELERACIÓN (m/s ²)					
DIR 1	2.29	0.07	MOLESTO	CONFORTABLE	FUERTEMENTE NOTABLE	SI CUMPLE	PUEDE CAUSAR QUEJA
DIR 2	2.69	0.10	MOLESTO	CONFORTABLE	FUERTEMENTE NOTABLE	SI CUMPLE	PUEDE CAUSAR QUEJA
DIR 3	3.09	0.095	MOLESTO	CONFORTABLE	FUERTEMENTE NOTABLE	SI CUMPLE	PUEDE CAUSAR QUEJA
4º C. LA MARQUESA							
	VELOCIDAD (mm/s)	ACELERACIÓN (m/s ²)					
DIR 1	1.42	0.28	CLARAMENTE PERCEPTIBLE	CONFORTABLE	FACILMENTE NOTABLE	SI CUMPLE	PUEDE CAUSAR QUEJA
DIR 2	2.97	0.14	MOLESTO	CONFORTABLE	FUERTEMENTE NOTABLE	SI CUMPLE	PUEDE CAUSAR QUEJA
DIR 3	2.36	0.20	MOLESTO	CONFORTABLE	FUERTEMENTE NOTABLE	SI CUMPLE	PUEDE CAUSAR QUEJA
CAMPAÑA 5							
3º C. LA MARQUESA							
	VELOCIDAD (mm/s)	ACELERACIÓN (m/s ²)					
DIR 1	2.80	0.44	MOLESTO	UN POCO INCONFORABLE	FUERTEMENTE NOTABLE	SI CUMPLE	PUEDE CAUSAR QUEJA
DIR 2	1.34	0.20	CLARAMENTE PERCEPTIBLE	CONFORTABLE	FACILMENTE NOTABLE	SI CUMPLE	PUEDE CAUSAR QUEJA
DIR 3	4.44	0.71	MOLESTO	BASTANTE INCONFORABLE	FUERTEMENTE NOTABLE	SI CUMPLE	PUEDE CAUSAR QUEJA
CAMPAÑA 6							
4º CERRADA LA MARQUESA							
	VELOCIDAD (mm/s)	ACELERACIÓN (m/s ²)					
DIR 1	1.73	0.04	CLARAMENTE PERCEPTIBLE	MUY INCONFORABLE	NOTABLE	SI CUMPLE	PUEDE CAUSAR QUEJA
DIR 2	2.69	0.06	CLARAMENTE PERCEPTIBLE	EXTREMEDAMENTE INCONFORABLE	FACILMENTE NOTABLE	SI CUMPLE	PUEDE CAUSAR QUEJA
DIR 3	2.32	0.06	CLARAMENTE PERCEPTIBLE	MUY INCONFORABLE	FACILMENTE NOTABLE	SI CUMPLE	PUEDE CAUSAR QUEJA



8. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se hace una interpretación de los resultados de la evaluación de las vibraciones registradas que pudiesen estar asociadas a la ocurrencia de daño en las edificaciones de la zona de estudio, con base en las normas existentes descritas en capítulo 3.

8.1 DAÑO ESTRUCTURAL

Las viviendas de la zona en su mayoría están hechas con elementos de concreto reforzado (precolados), lo mismo que la vivienda tomada como ejemplo. De la evaluación de resultados presentados en el capítulo 7 relacionados con la verificación del daño en las estructuras según las normas revisadas. Podemos decir, de manera general, que se tiene una baja probabilidad de afectar a la estructura de las viviendas. Por otro lado de las tablas 6.2 a la 6.6 del resumen de frecuencias características que se encontraron en el suelo, así como del análisis de las frecuencias de la vivienda, puede decirse que el suelo no va entrar en resonancia con la estructura, ya que ninguna de las frecuencias encontradas del suelo es igual a la frecuencia fundamental encontrada de la estructura. Además el fenómeno de resonancia depende de muchos otros factores como lo son: el tipo de estructura, detalles de diseño y estado de conservación, esos son los factores y medidas importantes en el interior del edificio que están obligadas a proporcionar una razonable imagen de lo que está sucediendo.

De los resultados obtenidos, la únicas frecuencias de vibración del suelo cercanas a la frecuencia de vibración de la estructura (12.22 hz) fueron las que se encontraron en la estación 1 de la campaña 5, las cuales son de 12.56 y 12.70 Hz, ver figs. 8.1 y 8.2. Dado que las frecuencias son sensiblemente iguales se puede decir que teóricamente es probable que pueda darse en la estructura una amplificación dinámica de deformación, aunque en la realidad es poco probable dada la duración tan corta de la excitación.



Fig. 8.1 Vibraciones en la campaña 5



Fig. 8.2 Ubicación de la vivienda en estudio (4ª cerrada la marquesa)

Cabe mencionar que la duración de la vibración es un patrón importante a tomar en cuenta, ya que puede tener un marcado efecto sobre la respuesta estructural. Una vibración continua puede producir una respuesta significativamente más alta debido a la ampliación dinámica si la frecuencia de excitación está cerca de una frecuencia de resonancia de un elemento estructural. Esta posibilidad de ampliación dinámica es la razón por la cual diferentes límites se sugieren para vibraciones continuas y transitorias. Cabe aclarar que las normas establecidas consideran que las vibraciones debidas al tráfico son continuas, lo cual podría ser crítico para nuestro caso de estudio, si se toma de esa manera, ya que se presentan frecuencias similares que pueden traer efectos de amplificación.

De las mediciones realizadas en la vivienda, además de poder encontrar la frecuencia fundamental en la dirección 3, se realizó la correlación de señales para determinar el espectro de fase (Figura 8.3) que permite ver el modo de vibrar que tendría la casa en su frecuencia fundamental.

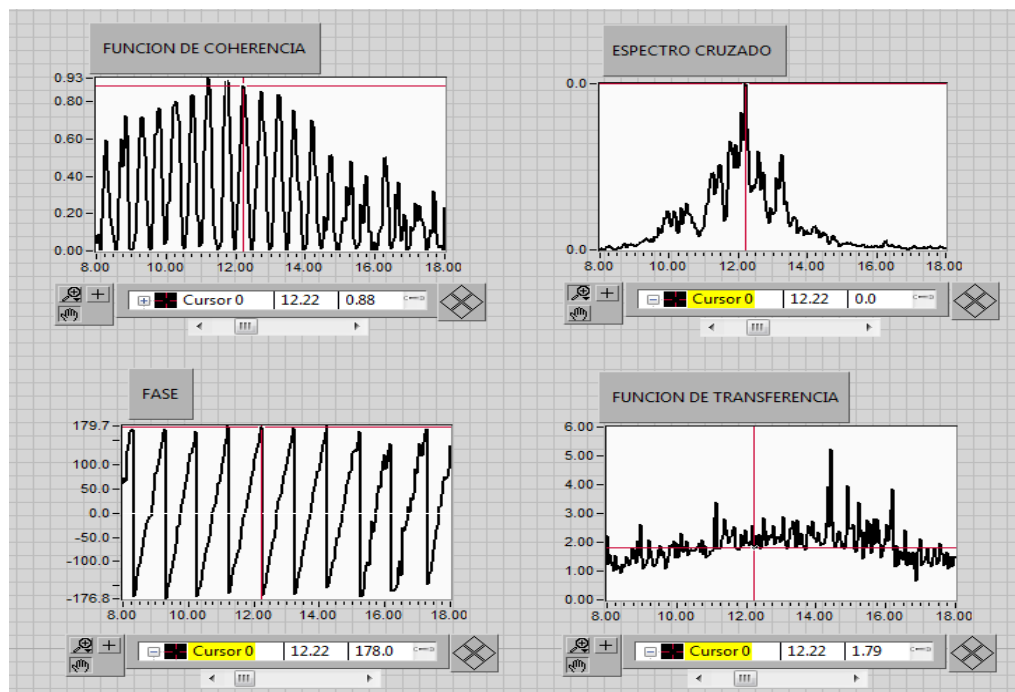


Fig. 8.3 Funciones de Correlación

Cómo se ve, el espectro de fase tiene un valor muy cercano a 180° , que para el caso de una sola masa, también estaría asociada a la primer forma de vibrar de la estructura, figura 8.4.

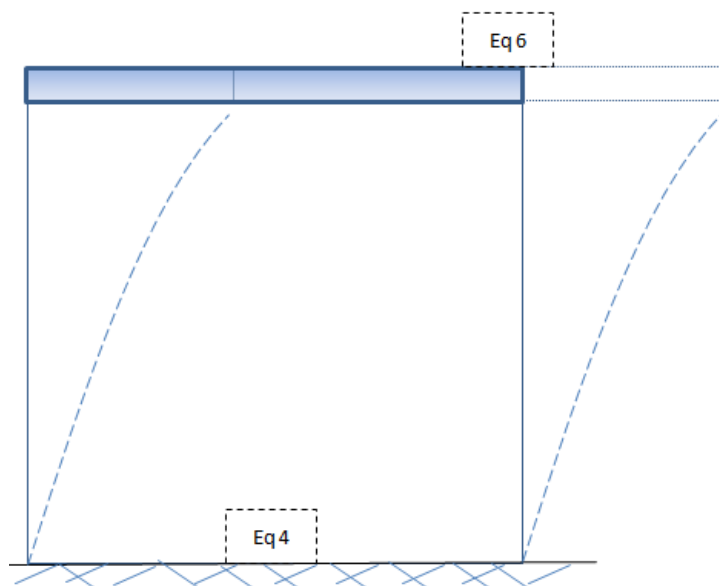


Fig. 8.4 Modo de vibrar de la vivienda

8.2 AFECTACIONES AL CONFORT HUMANO

De la información derivada de la evaluación realizada en el capítulo 7, puede hacerse mención que en la dirección de norte a sur (dirección 3), se presentan las mayores afectaciones en la 2ª, 3ª y 4ª cerrada la marquesa, así como en la 1ª, 2ª y 3ª cerrada los volcanes. De acuerdo con las normas, estas afectaciones se catalogan como extremadamente notables e incómodas, hasta perjudiciales, siendo la norma BS 6472 la menos rigurosa y, las normas ISO 4866 y la BS 5228-2 las más estrictas.

Las vibraciones causadas por el tráfico, en general, se relacionan más con un problema de molestia. Para la zona en estudio, el nivel más alto de vibraciones se registró en el horario de las 11 a las 17 hrs, sin embargo, las quejas expuestas por la gente del lugar hacen referencia principalmente al horario nocturno, lo cual puede estar asociado a la posición del cuerpo, ya que en las noches está en reposo y es más sensible. Por otro lado, en el horario nocturno, el nivel de ruido ambiental sonoro es más reducido y puede ser más notorio el ruido de camiones, acentuando las molestias.

Los efectos secundarios que las vibraciones podrían llegar a causar son las molestias físicas en el cuerpo humano, un claro ejemplo es la interferencia que se tiene con actividades como el sueño u otras que requieran concentración debido al ruido de cristales y objetos sueltos.

De los resultados de la evaluación, se concluyó que las personas están siendo afectadas por el tráfico vehicular de la autopista. Para identificar los sitios de mayor afectación en el interior de las viviendas se tendrían que hacer mediciones en lugares de descanso y esparcimiento (recamara, comedor, sala de estudio, etc.), considerando algunos de los siguientes parámetros:

- Propósito de la habitación en la vivienda,
- El tiempo de aparición de la vibración (duración),
- La naturaleza de las vibraciones y su repetitividad, dirección de la vibración y la posición del cuerpo humano en relación con esta dirección de la vibración,
- Frecuencia de vibración.

Con objeto de tener un panorama más claro de las afectaciones en la zona, en las figs. 8.5 a 8.9 se presentan las velocidades máximas que se registraron durante las 5 campañas de medición en la autopista, las cuales fueron resumidas en la tabla 6.1 del capítulo 6.



Fig. 8.5 Velocidades máximas de la campaña 1



Fig. 8.6 Velocidades máximas de la campaña 2

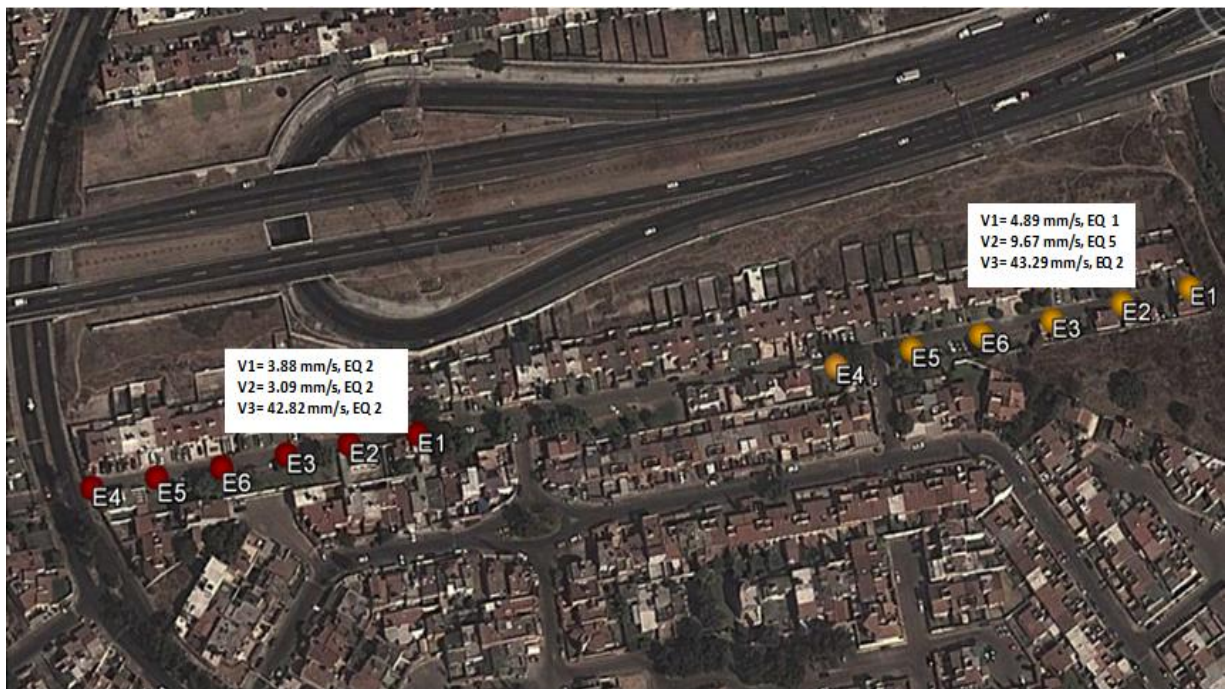


Fig. 8.7 Velocidades máximas de la campaña 3



Fig. 8.8 Velocidades máximas de la campaña 4



Fig. 8.9 Velocidades máximas de la campaña 5

De las velocidades máximas obtenidas se observa que, el sitio donde se ubicó el equipo 2 de la campaña 1, es el que tiene mayores afectaciones debido a que es una zona donde los autos tienen un frenado rápido. De la ubicación del equipo 2 en la campaña 3 se denota que también se encuentra en un punto en el cual los automóviles tienden a realizar un acelerado rápido, generando un nivel importante de vibraciones. Con estos resultados se comprueba que las zonas de aceleración y frenado rápido, son las que tienen mayor generación de vibraciones.

8.3 CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS DEL SUELO

De los resultados obtenidos con la técnica de Nakamura relativos a la obtención de frecuencias propias de vibrar del suelo, se puede notar que para equipos de las diferentes campañas, pero de las mismas ubicaciones, los resultados son muy similares y, por lo tanto, se puede decir que son coherentes, ver tablas 8.1, 8.2 y 8.3. En la tabla 8.3 se observan que, tanto la zona de acelerado, como la de frenado rápido, se genera un contenido de frecuencias similares. Como ya se dijo anteriormente en el capítulo 6, no se pudo determinar la frecuencia dominante del suelo, pero algunas frecuencias que se obtuvieron del análisis tienen valores grandes, lo que indica periodos pequeños, por lo tanto se concluye que, a pesar de ser una zona aluvial, el suelo se comporta como un suelo firme.

Tabla 8.1. Comparación de valores de frecuencias entre campañas

TABLA COMPARATIVA 1			
Disparo	Campaña1, Eq 2, 2 ^a Cerrada la Marquesa	Disparo	Campaña2, Eq 2, 3 ^a Cerrada la Marquesa
1	9.57 Hz, 19.05 Hz	1	10.17 Hz, 20.35 Hz
2	9.51 Hz, 19.02 Hz	2	10.1 Hz, 20.24 Hz
		3	10.08 Hz, 20.16 Hz
		4	10.06 Hz, 20.03 Hz
		5	10.02 Hz, 19.97 Hz
		6	9.97 Hz, 19.97 Hz

Tabla 8.2. Comparación de valores de frecuencias entre campañas

TABLA COMPARATIVA 2			
Disparo	Campaña1, Eq 2, 4 ^a Cerrada la Marquesa	Disparo	Campaña2, Eq 4, 3 ^a Cerrada la Marquesa
1	9.76 Hz	1	10.31 Hz
2	9.82 Hz	2	10.23 Hz
3	9.84 Hz	3	9.51 Hz
4	9.82 Hz	4	9.64 Hz
5	9.80 Hz	5	9.71 Hz
		6	9.81 Hz

Tabla 8.3. Comparación de valores de frecuencias entre campañas

TABLA COMPARATIVA 3			
Disparo	Campaña1, Eq 2, 4 ^a Cerrada la Marquesa (Frenado)	Disparo	Campaña3, Eq 2, 3 ^a Cerrada los Volcanes (Acelerado)
1	9.76 Hz	1	9.87 Hz
2	9.82 Hz	2	9.87 Hz
3	9.84 Hz	3	9.88 Hz
4	9.82 Hz	4	9.86 Hz
5	9.80 Hz		

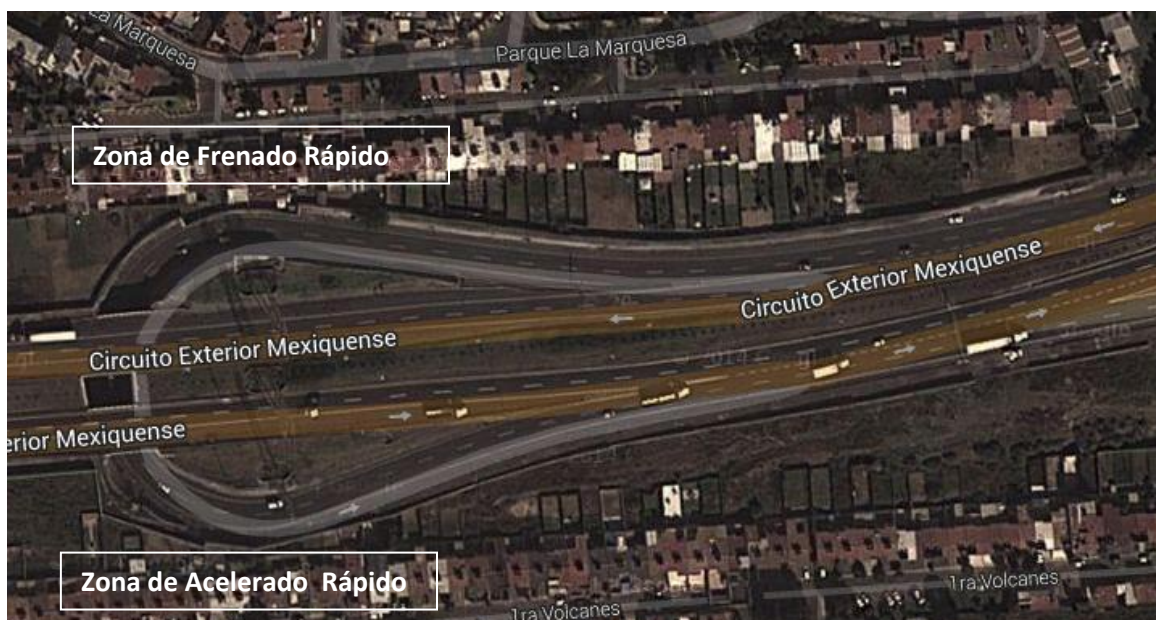


Fig. 8.10 Zonas de acelerado y frenado rápido en la autopista



Fig. 8.11 Frecuencias del suelo encontradas en la Campaña 1



Fig. 8.12 Frecuencias del suelo encontradas en la Campaña 2



Fig. 8.13 Frecuencias del suelo encontradas en la Campaña 3



Fig. 8.14 del suelo encontradas en la Campaña 4



Fig. 8.15 Frecuencias del suelo encontradas en la Campaña 5

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- **VALORES LÍMITES PARA EVITAR DAÑO ESTRUCTURAL**

Los primeros agrietamientos en las edificaciones ocurren inmediatamente después de su construcción, dependiendo de los métodos y la resistencia de los materiales usados. Posteriormente, durante un periodo de varios años, los agrietamientos dependen de las concentraciones de esfuerzos a los que está expuesta la estructura y que causan deformaciones en sus elementos por efecto de diversos agentes externos o acciones de naturaleza estática, variable y dinámica, tales como: las cargas de trabajo, cambios de temperatura, asentamientos y sismos, entre otros. Así, normalmente existen diversos grados de agrietamientos en edificaciones no sometidos a vibraciones que no son, por sí mismos, una indicación del daño provocado por la vibración, si no parte de un periodo de tiempo de agrietamiento debido al deterioro natural de las construcciones y que tiene que ser atendido como parte del mantenimiento.

Por las evidencias de daño encontradas en las viviendas de la zona, se puede deducir que éstos han sido generados, en su mayoría, por los procesos y/o agentes mencionados en el párrafo anterior.

Según inspecciones realizadas por el equipo técnico de la UNAM las viviendas presentaban las principalmente fisuras y/o agrietamientos en los siguientes elementos:

- Pisos interiores
- Muros interiores y ventanas
- Acabados en pisos y muros de baños (loseta cerámica)
- Escaleras
- Losas
- Muros exteriores (patios de servicio)
- Pisos exteriores (patios de servicio)
- Cisterna

Durante la inspección no se observaron daños que pongan en riesgo la seguridad estructural de las viviendas. Estas patologías fueron encontradas en las 2ª y 3ª cerradas de la zona de la marquesa y en la 2ª cerrada de los volcanes.

Así con estos datos se puede decir de manera general que las vibraciones ocasionadas por el tráfico vehicular probablemente no afectaran a la estructura de las viviendas, pero se puede decir que es muy posible que esas vibraciones hayan contribuido al proceso de deterioro ocasionado por otros agentes.



Por otro lado, hay que tomar en cuenta que también existen otros factores importantes como el tipo de estructura, detalles de diseño y el estado de conservación, ya que son factores y medidas importantes en el interior del edificio y analizando todo ello se podrá proporcionar una razonable imagen de lo que está sucediendo. Además hay otro factor importante que es la distancia que hay entre la fuente generadora de vibración y la estructura; los habitantes poco a poco han estado abarcando el espacio que anteriormente servía de amortiguamiento, en este punto habrá que dejar en claro a los habitantes el tema y advertirles de los posibles riesgos sino respetan los espacios libres.

Así mismo por el tipo de suelo en la zona (arena limosa y limo arenoso intercalados con capas de arcilla), es probable que las vibraciones contribuyan a la densificación de arenas, lo cual podría ocasionar pequeños asentamientos diferenciales, lo cual hace que se generen algunas grietas en las estructuras de las edificaciones.

En general se concluye que el nivel de vibraciones producto del tráfico vehicular en la zona de estudio se encuentra, en la mayoría de los casos y de acuerdo a la normatividad utilizada, dentro de los valores permisibles por las normas, por lo que es poco probable que pueda causar afectaciones o daño a las viviendas por sí solas.

- **VALORES LÍMITES PARA EVITAR AFECTACIONES AL CONFORT HUMANO**

Los niveles de vibración disminuyen con la distancia desde la carretera como resultado de la " propagación geométrica " de la energía de vibración y su disipación por la viscosidad del suelo y/o la fricción. La propagación geométrica es el efecto por el que ondas inducidas se vuelven más planas cuando se extienden lejos de su fuente, un ejemplo sencillo puede verse cuando se tira una piedra a un estanque. Los patrones de propagación pueden básicamente encontrarse entre los niveles de vibración y la distancia.

En el caso estudiado según las fotografías y lo reportado por el equipo técnico de la UNAM, los habitantes han ido invadiendo la zona libre entre las viviendas y la autopista, por lo tanto ya no hay un espacio que sirva de amortiguamiento de las vibraciones, el cual por el momento está normado por la Secretaría de Comunicaciones y transportes y se conoce como derecho de vía, este tiene una anchura variable dependiendo de la zona, así que no respetar el derecho de vía resulta una de las causas del porqué los habitantes sienten mayormente las vibraciones.

Ahora, de los datos estadísticos de los aforos vehiculares se sabe que la mayor influencia del tráfico se da entre las 11 de la mañana y las 5 de la tarde; según las evaluaciones realizadas con la normatividad el nivel de vibración, se concluye que sí resulta molesto en esos horarios, pero se tienen más quejas de los habitantes sobre los horarios nocturnos, lo cual está más asociado al ruido sonoro y se acentúa más la molestia porque se interfiere con su descanso. Se sabe que las personas que viven en casas son propensos a quejarse si los niveles de vibración son sólo ligeramente por encima del umbral de percepción, además de que el nivel de tolerancia varía mucho de persona a persona, de la posición física que se tenga y de una zona a otra.

- **PERIODO FUNDAMENTAL EN SUELO Y DE LA VIVIENDA TIPO**

De los resultados se denota que las amplitudes de vibración y las frecuencias predominantes son influenciadas significativamente por el tipo de suelo y la estratificación. Para las cargas de impacto, las vibraciones del suelo son más altas en las frecuencias naturales del sitio. A estas frecuencias, el suelo, al igual que cualquier sistema estructural, ofrece la menor resistencia y por lo tanto la mayor respuesta a las cargas. Para los suelos, las frecuencias naturales dependen de la rigidez y de la estratificación. Por lo general, las vibraciones del tráfico son peores en las zonas sustentadas por una capa de suelo de arcilla blanda con espesor de 7 a 15 m de profundidad. En estas áreas, las frecuencias naturales del suelo pueden coincidir con los de las casas, lo que lleva a la resonancia o vibración amplificada.

Según los datos obtenidos en la vivienda tomada como caso de estudio, se puede decir que, teóricamente pudiese existir amplificación dinámica o efecto de resonancia ya que la frecuencia del suelo es similar a la de la edificación, sin embargo, dada la corta duración de las vibraciones, es poco probable que se presente en la realidad, lo cual no necesariamente sucedería bajo acciones sísmicas.

Los fenómenos que contribuyen a la amplificación son los que están relacionados directamente con la velocidad de las ondas sísmicas de cizalla (secundarias, S) en el depósito. Para nuestro caso de estudio, las ondas tipo Rayleigh, son el principal portador de vibraciones de tráfico.



Las frecuencias que se detectaron en el suelo, a partir de los registros de señales de la zona de estudio, van desde 9.51 Hz hasta 22.47 Hz, es decir, se tienen periodos de 0.1 segundos hasta 0.02 segundos, lo cual indica que el suelo del lugar es estable.

La frecuencia fundamental detectada para la vivienda fue de 12.22 Hz, en la dirección 3 (transversal, N-S), la cual es muy similar al periodo del suelo, lo que puede ocasionar que sea más perceptible la vibración, aunque no necesariamente sea generadora de daño.

- **RECOMENDACIONES**

Vistos los resultados del trabajo se proponen las siguientes recomendaciones:

- En general si se requiere disminuir en cierta manera las vibraciones causadas por tráfico pueden tomarse algunas medidas para reducir los niveles de vibración en un receptor, por lo general es más barato y más fácil de modificar la entrada de energía o la frecuencia de la fuente. Para modificar la fuente se podrían investigar métodos más sofisticados, pero por el momento quizá una medida económica y adecuada serían los señalamientos donde se indiquen velocidades adecuadas de tráfico, ya que en el circuito se generan más vibraciones debido a las altas velocidades y frenados rápidos.
- El mantenimiento de la carpeta de rodamiento a manera de que no hayan irregularidades, ya que se ha identificado que el principal agente generador de vibraciones y, por tanto, de cargas dinámicas inducidas al suelo por el tráfico vehicular en una carretera, son las discontinuidades en la superficie de rodamiento.
- Realizar mediciones de vibraciones en lugares específicos para el ser humano en el interior de las viviendas, con la finalidad de hacer una evaluación adecuada y mas acercada a la realidad de las percepciones humanas.
- Los estudios muestran que la profundidad de una barrera de vibración enterrada tiene que ser al menos igual a una longitud de onda de Rayleigh para lograr una reducción significativa en los niveles de vibración, por lo cual sería bueno hacer los estudios necesarios con el fin de corroborar si es económicamente factible aplicar este método en la zona del Circuito Exterior Mexiquense.
- Es recomendable hacer una evaluación y revisión del pavimento existente de la zona para que se mejore el diseño de éste.



- Dado este caso de estudio, deberá tomarse como ejemplo para que en proyectos futuros se tome en cuenta que el aumento de la distancia entre las carreteras y las casas podría ser una estrategia práctica para desarrollos urbanos planificados, es decir, el proyecto debe considerar y hacer respetar el derecho de vía.

Debido a su naturaleza aleatoria, las vibraciones inducidas por tráfico pueden usualmente solo ser descritas cualitativamente. Cuando se diseña para minimizar las emisiones de vibraciones es importante encontrar una óptima relación entre costo-beneficio. Esto no debe ser olvidado como una regla cuando solo una cantidad limitada de análisis de ingeniería es posible. Así el método usado tiene que ser simple, seguro y eficiente. En lugar del cálculo es probablemente mejor encontrar mejoras para el vehículo y el pavimento o buscar otras soluciones en diseño.



10. BIBLIOGRAFÍA

Asten, M., **“The use of microseisms in geophysical exploration”**, Ph. D. Thesis, Macquire University, Australia, 1976.

A2 Shore Road Greenisland Environmental Statement, **“Traffic Noise and Vibration”**, February 2007.

Bachman H., Ammann W., Deischl F., etal. **“Vibration Problems in Structures”**, 1997.

Bendat J; Piersol A. **“Engineering Applications Of Correlation And Spectral Analysis”**, John Wiley & Sons, EUA, 1993.

Bejumea J., **“Vibraciones Causadas por Actividad Humana: Caracterización, Efectos y Manejo en la Ingeniería Civil”**, Tesis para Obtener el Título de Ingeniero Civil, Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Santiago de Cali, 2003.

British Standard 7385, **“Evaluation and measurement for vibration in buildings, Part 1: Guide for measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings”**, 1990.

BS 6472, **“Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz)”**, 1992.

Castelan I. **“Deferminación Experimental de las Propiedades Dinámicas de un Edificio Reforzado con Disipadores de Energía”**, UNAM, México, 2001.

Construction Research Communications Ltd for the Building Research Establishment, **“Damage to structures from ground-Born Vibration”**, March 1995.

Cuadra P., **“Aplicación de Técnicas de Vibraciones Ambientales: Análisis de Microtremores Y Vibraciones Naturales, para la Caracterización del Sitio”**, Proyecto de Grado, Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Abril 2007.

Department of Environment and Conservation (NSW), **“Assessing Vibration: a technical guideline”**, February 2006.

Diario Oficial de la Federación, **“Norma Oficial Mexicana NOM-011-STPS-2001, Condiciones de Seguridad e Higiene en los Centros de Trabajo donde se Genere Ruido”**, D.f., 2001.



DIN 4150-2, “**Structural vibration Part 3: Human exposure to vibration in buildings**”, June 1999.

DIN 4150-3, “**Structural vibration Part 3: Effects of vibration on structures**”, February 1999.

DWTC Research Programme Sustainable Mobility, “**Study of Determining Factors for Traffic Induced Vibrations in Buildings**”, July 2001.

Errazuriz J., “**Microzonificaciones Sísmicas en Ciudades del Mundo y Discusión sobre la Aplicabilidad en la Ciudad de Santiago**”, Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Santiago de Chile, Septiembre 2012.

Gaceta Oficial del Distrito Federal, “**NADF-004-AMBT-2004, que establece las Condiciones de Medición y los Límites Máximos Permisibles para Vibraciones Mecánicas**”, D.f., 2004.

Gobierno del Distrito Federal, “**Normas Técnicas Complementarias para el diseño por Sismo**”, 2004.

González A; “**Cinemática del Movimiento de Edificios de la Ciudad de México**”, Tesis de maestría, UNAM, México, 1989.

Hancock Prospecting Pty Ltd, Alpha Coal Project (Rail), “**Noise and Vibration Assessment**” September 2010.

Hajek J., Blaney C., Hein D., “**Mitigation of Highway Traffic-Induced Vibration**”, Annual Conference of the Transportation Association of Canada Charlottetown, 2006.

Hunaidi O., “**Traffic Vibrations in Buildings**”, National Research Council of Canada, June 2000.

ISO 2631, “**Vibraciones de cuerpo completo**”, 1997.

ISO 4866, “**Mechanical vibration and shock - Vibration of buildings - Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings**”, 1990.

Kawasumi H. y Shima E. “**Some Applications of a Correlation Engineering Problems**”, III WCEE, Vol 2, II-298 a II- 320, Nueva Zelanda, 1965.



Kawecki J., Kowalska-Koczwara A., Stypula K., **“Consideration of Criteria of Vibration Comfort of People in Diagnosis and Design of Buildings”**, World Academy of Science, Engineering and Technology 59, 2011.

Martin D., **“Transport and Road Research Laboratory”**, Department of the environment TRRL, Department of transport TRRL, 1977.

Miller H. & Hanson Inc. **“Transit Noise and Vibration Impact Assessment”**, Federal Transit Administration Office of Planning and Environment Washington DC, May 2006.

Moreno L., Alfaro A., **“De los Microsismos a los Microtemblores”**, investigación del Instituto Geofísico, Universidad Javeriana, Santafé de Bogotá, Colombia, Año 2000.

Mooser F. **“Bosquejo Geológico del Extremo Sur de la Cuenca de México”**, Congreso Geológico Internacional, Libreto Guía de la Excursión C-9, México, D.f., 1956.

Nakamura Y. **“A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Surface Using Microtremor on the Ground Surface”**, Quarterly Report of Railway Tech Res. Inst. 1989.

Northern Express way Environmental Report, **“Chapter 15: Vibration”**.

Opus International Consultants Limited, Central Laboratories, **“Vibration Assessment:: Waikato Expressway – Cambridge Section”**, December 2010.

Orsolya K., **“Effect of the traffic caused vibrations on the earthquake resistance of masonry structures”**, CONSTRUCTI – 2009.

Pérez F., **“Calculo Vectorial, Series de Fourier, Variable Compleja”**, Departamento de Análisis Matemático, Universidad de Granada, España, Septiembre 2007.

Persson P; Lee J. **“Rock Blasting and Explosives Engineering”**, CRC Press, New York, 1994.

Proença J., Branco F., **“Case Studies of Vibrations in Structures”**, Instituto de Engenharia de Estruturas, Território e Construção do Instituto Superior Técnico Libón, Portugal.



Secretaría de Comunicaciones y transportes (SCT), **“NOM-012-SCT-2-2008 Sobre el Peso y Dimensiones Máximas con los que pueden circular los Vehículos de Autotransporte que Transitan en las Vías Generales de Comunicación de Jurisdicción Federal”**, 2008.

Secretaría de trabajo y previsión social, **“NORMA Oficial Mexicana NOM-024-STPS-2001, Vibraciones-Condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo”**, 2001.

Shea Baker Ranch Project, City of Lake Forest, **“Ground-borne Vibration Impact Analysis”**, California, 2011.

Silva E. **“Comparación de las Propiedades Dinámicas de Edificios de Características Similares ubicados en Zonas Geotécnicas Diferentes”**. Tesis de Maestría en Ingeniería (Estructuras), Posgrado en Ingeniería, UNAM, México, 2009.

Silva F. y Ruiz S. **“Comparación de la respuesta sísmica de marcos con dispositivos disipadores de energía y sin ellos”**, Revista Ingeniería Sísmica, SMIS, No. 48, pp 23-40, septiembre-diciembre 1994.

Sutherland A., Cenek P., **“Vibration Assessment: Christchurch Southern Motorway Project”**, Transit New Zealand, November 2007.

Torres J. **“Efectos de Vibración de Equipo en Plataforma Marina”**, Tesis de Maestría en Ingeniería (Estructuras), Posgrado en Ingeniería, UNAM, México, Octubre 2011.

Tucholka P., Kiełbasinski K., Mieszkowski R., **“Tracing seismic surface waves induced by road traffic in urban environment: example of st. Catherine’s church hill in Warsaw”**, 2008.

Vacca H., Rodríguez J., Ruiz D., **“Medición e interpretación de vibraciones producidas por el tráfico en Bogotá D.C.”**, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, 2010-2011.

Verdugo R., Pastén C., Campos J. y Bonilla F., **“Uso de la razón espectral H/V en superficie para la Caracterización sísmica de Santiago”**, Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica IX Jornadas, Concepción, Chile, 16-19 de Noviembre de 2005.



Vogiatzis K., **“Environmental Vibration Monitoring & Assessment at Sensitive Receptors During Metro Construction In Urban Centre Of Thessaloniki, Greece”**, Transportation Department, Faculty of Civil engineering, University of Thessaly, September 2011.