



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Identificación del impacto de
vibraciones artificiales ocasionadas
por el ruido ambiental y los factores
que influyen en este fenómeno**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Josué Emmanuel Maldonado Bautista

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Luis Antonio García Villanueva



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023

“Si quieres encontrar los secretos del universo, piensa en términos de energía, frecuencia y vibración.”

Nikola Tesla.

DEDICATORIA

A Dios, por la dicha de seguir adelante e iluminarme con la realización de este trabajo.

A mis padres, Ricardo y Luzma, así como mi hermana Evelyn, por todo el apoyo y amor incondicional que me han brindado en toda mi etapa estudiantil, motivándome a ser mejor persona cada día. Este logro es de ustedes.

A mis abuelos, especialmente a Aurelio y Tere, quienes son mis ángeles protectores y sé que están orgullosos de mi dónde quiera que estén.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería por dar me la oportunidad de poder ejercer como Ingeniero Civil.

A mi director de Tesis, el Dr. Luis Antonio García Villanueva, quien me brindó una oportunidad y confiar en mi para la realización de este trabajo de investigación.

A mis sinodales, por el tiempo dedicado a la revisión de este trabajo, su retroalimentación que, sin lugar a duda, contribuyeron al enriquecimiento de este trabajo.

A mis profesores de licenciatura por su dedicación y motivación para formar ingenieros de calidad y con una gran ética profesional.

A Jocelyn, gracias por tu amor y apoyo incondicional.

A mis compañeros de licenciatura, por sus consejos, risas y apoyo brindado para poder ser un ingeniero, es un honor seguir contando con ustedes, gracias por estar conmigo en todo momento.



INDICE

INDICE DE FIGURAS	II
INDICE DE TABLAS	III
RESUMEN	IV
ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN	V
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. JUSTIFICACIÓN.....	1
1.2. OBJETIVOS	1
Generales.....	1
Específicos	1
1.3. ALCANCES.....	2
1.4. METAS	2
1.5. METODOLOGÍA	2
2. ANTECEDENTES	4
3. MARCO TEÓRICO	10
3.1. Vibraciones artificiales.....	10
3.2. Consecuencias ocasionadas por las vibraciones artificiales	14
3.3. Equipos de grabación	18
3.4. Maquinaria	18
3.5. Normativas internacionales vigentes que regulan las vibraciones	22
3.6. Ecuaciones de movimiento.....	48
3.7. Acelerogramas.....	50
3.8. Espectro de respuesta	50
4. MARCO METODOLÓGICO	52



4.1. Instrumento para medir la velocidad pico de partícula	52
4.2. Programas para determinar la velocidad pico de partícula.....	55
5. PROPUESTA PARA MITIGAR EL IMPACTO DE VIBRACIONES ARTIFICIALES	57
6. RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES	62
REFERENCIAS BIBLIOHEMEROGRÁFICAS	66

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Metodología recomendada para reducir el impacto de vibraciones artificiales	3
Figura 3.1 Vibración por maquinaria	11
Figura 3.2 Vibración por Maquinaria. Tren Maya Tramo 4, México.	11
Figura 3.3 Vibración por Transporte público.....	12
Figura 3.4 Vibración por transporte público. Tren Maya Tramo 4, México	12
Figura 3.5 Vibración por actividad constructiva.	13
Figura 3.6. Vibración por actividad constructiva. Proyecto Macrolibramiento Mexiquense Tramo 4.1, Edomex. México	13
Figura 3.7 Consecuencias ocasionadas por las vibraciones artificiales	14
Figura 3.8 Afectación en una estructura histórica (Jordan, Sutcliffe, & Mullard, 2009).....	15
Figura 3.9 Reacción de una edificación a los efectos directos (izquierda) y asentamiento indirecto (derecha) (Sharkey Bowers & Lovenstein, 2023).....	16
Figura 3.10 Respuestas humanas a las vibraciones (Goldman, 1948).	17
Figura 3.11 Percepción humana ocasionadas por las vibraciones, en términos de desplazamiento, en mm (Pinto Morales, Fuentes Fuentes, & Hernández Julián, 2013).....	18
Figura 3.12 Representación gráfica de la Tabla 3.1. Efectos de vibración en las estructuras. DIN 4150-3 2016	33
Figura 3.13 Velocidad de la partícula USBM RI 8507 1980.....	34
Figura 3.14 Orientación de los sensores (Norma Española, 1993).....	35
Figura 3.15 Criterio de prevención de daños, Norma UNE 22-381-1993.....	36
Figura 3.16 Valores guía de vibraciones transitorias para daños estéticos BS 7385-2-1993	42
Figura 3.17 Resumen gráfico de las Normas Internacionales listadas en la Tabla 3.7.....	44



Figura 3.18 Propuesta por parte del Instituto de Geofísica, UNAM 2017	45
Figura 3.19 Normativa Escocesa PAN 50 2000.....	46
Figura 3.20 Normativa Suiza 640 312a 1992	47
Figura 3.21 Normativa Portuguesa NP 2074 2015.....	48
Figura 3.22 Ejemplo de acelerograma.....	50
Figura 3.23 Ejemplo de espectro de respuesta.....	51
Figura 4.1 Instrumentación en un inmueble (Universidad de Costa Rica, 2023).	53
Figura 4.2 Acelerógrafo Kinematics ETNA 2. (Kinematics Inc, 2017).....	54
Figura 4.3 Registro de velocidades. Software ViewWave (Kashima, 2021).....	56
Figura 5.1 Límites recomendados para controlar el impacto de vibraciones artificiales	59
Figura 5.2 Comparación de los códigos internacionales destinada a Estructuras de Vivienda y Oficinas	60
Figura 5.3 Comparativa Internacional empleada en el trabajo de investigación	61
Figura 5.4 Comparativa entre las normativas estrictas, la propuesta por el I. Geofísica y la Propuesta por el autor	61
Figura 6.1 Instrumentación en Zonas aledañas a construcciones y vialidades principales	62

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Investigación sobre las vibraciones artificiales.....	5
Tabla 3.1 Maquinarias que emiten frecuencias. (Junta de Extremadura, 2023).	21
Tabla 3.2 Frecuencias de vibración y características del vehículo (Barneich, 1985).....	22
Tabla 3.3 Valores orientativos para evaluar los efectos de vibración. DIN 4150-3 2016	32
Tabla 3.4 USBM RI 8507 – 1980.....	34
Tabla 3.5 Criterio de prevención de daños Norma UNE 22 381 1993	36
Tabla 3.6 Valores guía de vibraciones transitorias para daños estéticos BS 7385-2-1993.....	42
Tabla 3.7 Normas Utilizadas empleadas (I. Geofísica, 2017).	43
Tabla 3.8 Propuesta por parte del Instituto de Geofísica, UNAM 2017	45
Tabla 5.1 Comparativa de normativas que regulan las Vibraciones Artificiales.....	57
Tabla 5.2 Límites recomendados para controlar el impacto de vibraciones artificiales	59



RESUMEN

En este trabajo de investigación, se estudia el problema de vibraciones ocasionadas por las actividades humanas, en la cual, se recaba información a nivel mundial sobre los estudios realizados para la detección de las vibraciones artificiales, o también denominado, ruido ambiental.

Posteriormente, se hace una investigación de los códigos internacionales vigentes destinados a limitar las vibraciones ocasionadas por las actividades humanas, ya sea por medio del uso de explosivos, trabajos de obra civil y el tráfico terrestre.

Dentro de esta investigación, se realiza un análisis del cómo puede aplicarse esta metodología en la República Mexicana, la cual, por el momento descarta las vibraciones ocasionadas por explosión de minas y canteras, únicamente enfocada a los trabajos de obra civil y tráfico terrestre. Además, se realiza una investigación sobre el uso de los equipos para monitorear estas vibraciones, así como las herramientas de cómputo para registrar y observar su comportamiento del ruido ambiental.

Posteriormente, se realiza una comparación entre estas normativas. A partir de esta información obtenida se establecen los límites recomendados para controlar el impacto de vibraciones, culminando con las conclusiones y recomendaciones correspondientes a este trabajo de investigación.



ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

En el capítulo I se presentan los objetivos, alcances y metas de la investigación, así como la metodología empleada para el logro de los objetivos. De igual forma,

En el capítulo II. se habla sobre los antecedentes enfocados al estudio de vibraciones artificiales y cómo estas vibraciones ocasionadas por la actividad humana han sido restringidas aplicando los estatutos internacionales que restringen estas anomalías.

En el capítulo III, Se presentan los conceptos fundamentales al fenómeno de vibraciones artificiales, las afectaciones que ocasionan y los cambios generados en el comportamiento del suelo, así como los equipos de registro de vibraciones. Se presentan el tema de maquinaria y las diferentes frecuencias de vibraciones que producen estos equipos. Asimismo, se hablan sobre los códigos internacionales vigentes, por último, se incluyen las ecuaciones de movimiento y los términos de acelerograma y el espectro de respuesta.

El capítulo IV está centrado a los equipos para realizar los monitoreos de vibraciones artificiales y los softwares empleados para la lectura de los registros de vibraciones.

En el capítulo V, se realiza la comparativa entre los códigos internacionales vigentes estudiados para dar hincapié a los límites recomendados para mitigar el impacto de vibraciones propuesta por el autor.

Finalmente, se encuentran las recomendaciones y conclusiones.



1. INTRODUCCIÓN

1.1. JUSTIFICACIÓN

Debido al crecimiento demográfico exponencial en la República Mexicana se han implementado nuevos sistemas de transporte público (ampliación de sistemas de transporte o creación de nuevas rutas de transporte), para facilitar la movilidad de las personas reduciendo tiempos de traslado. Asimismo, la demanda poblacional ha ocasionado que los conjuntos habitacionales, al igual que las áreas de recreación y de oficinas sean escasas.

Por ello, las construcciones de obras civiles en ciudades estratégicas (como la Ciudad de México), son aceleradas causando modificaciones en el subsuelo comprometiendo la integridad estructural en los edificios aledaños, además de generar molestia e inconformidad por los vecinos locales debido a que los procedimientos constructivos de estas obras además del tráfico vehicular en estas zonas y los embotellamientos en vialidades principales ocasionen ruido ambiental.

No obstante, México no cuenta con un límite permisible que pueda mitigar el impacto de este fenómeno, por ende, se realiza un trabajo de investigación, dando una iniciativa para promover y hacer un estudio para reducir estas vibraciones artificiales.

1.2. OBJETIVOS

Generales

Identificar el impacto de las vibraciones artificiales para los factores que influyen en este fenómeno, considerando los códigos internacionales vigentes.

Específicos

Llevar a cabo una investigación bibliográfica sobre el impacto de vibraciones artificiales, las causas que influyen en este fenómeno y cómo esta manifestación se restringe a través del uso y aplicación de los códigos internacionales vigentes como lo son: la Normativa Alemana DIN-4150-2016; el Reporte de Investigación del Departamento de



Minas de los Estados Unidos, USBM RI 8507 1983; la Normativa Española UNE 22 381 1993; la Normativa Británica BS 7385; entre otras.

1.3. ALCANCES

Los alcances de este trabajo de investigación serán enfocados únicamente en las vibraciones artificiales ocasionadas por trabajos de construcción y por tráfico terrestre, el apartado de vibraciones ocasionadas por explosivos en canteras o minas, será descartada por el momento.

1.4. METAS

La meta es dar una iniciativa y propuesta para que se implementen de manera práctica este trabajo de investigación colocando estaciones acelerométricas en zonas aledañas a los proyectos constructivos y zonas afluentes de transporte público y de carga para determinar las vibraciones artificiales y cómo estas tienen relación con las normativas internacionales y propuesta.

1.5. METODOLOGÍA

El procedimiento general para recomendar los límites permisibles para mitigar el impacto de vibraciones artificiales se muestra en la Figura 1.1. Este enfoque pretende que, a partir de la determinación obtenida, se estime una nueva rama para minimizar los efectos de vibración artificial.

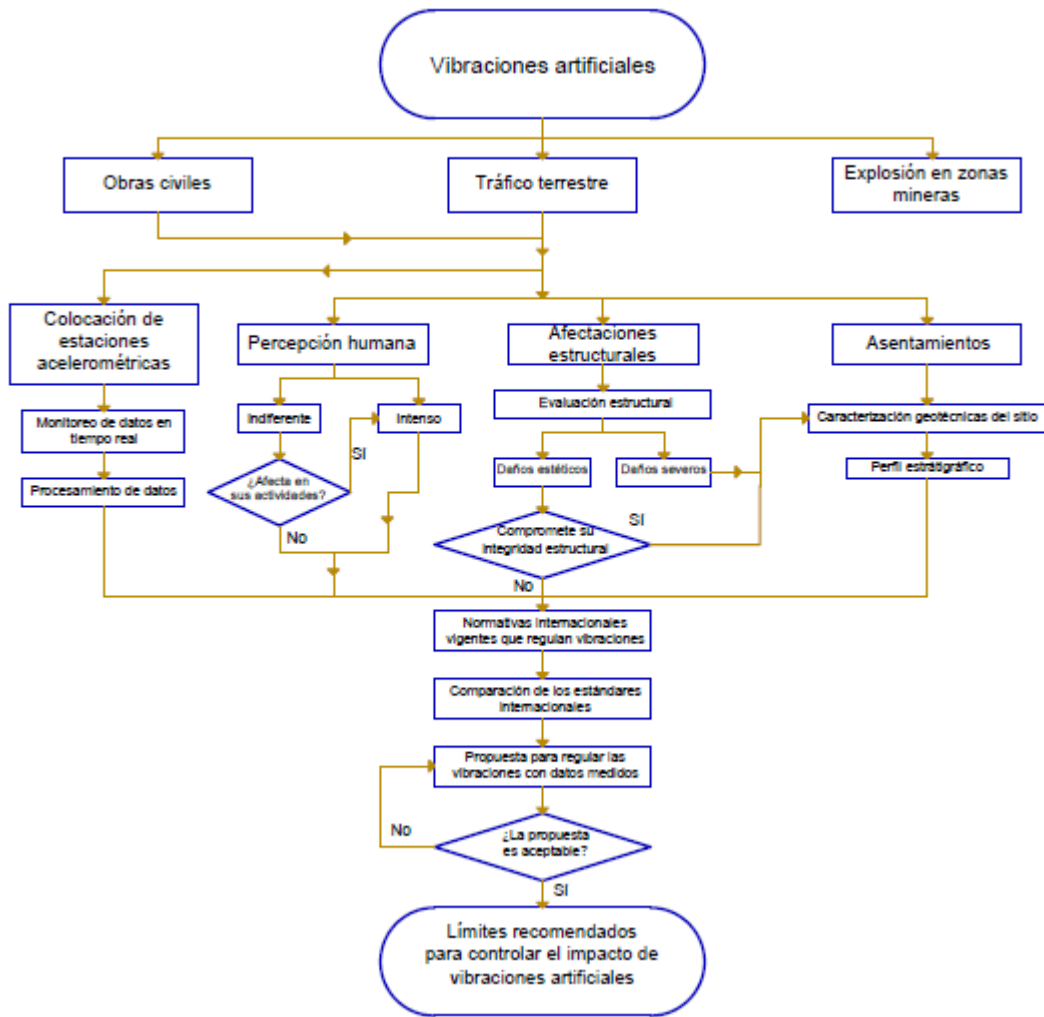


Figura 1.1 Metodología recomendada para reducir el impacto de vibraciones artificiales



2. ANTECEDENTES

Las actividades humanas como lo son las explosiones en minas y canteras para la extracción de material, las construcciones de obras civiles y el tráfico terrestre pueden causar cargas dinámicas que afectan a las estructuras, al suelo y a la incomodidad de las personas.

Estos disturbios denominados como ruido ambiental, ha traído gran interés por el área de ingeniería, especialmente Geotécnica, Ambiental y de Estructuras para estudiar este fenómeno.

Derivado a estas anomalías, se empezaron a realizar estudios a partir de mediados del Siglo XX por medio de reportes de investigación en casos reales, y con ello han dado pauta a la creación de estatutos internacionales que regulen las vibraciones artificiales.

Entre estos códigos podemos encontrar en primera instancia el Reporte de Investigación 85 del Departamento de Minas de los Estados Unidos USBM RI 8507 1980 (Siskind, Stagg, Kopp, & Dowding, 1980); la Normativa Alemana DIN 4150-3-2016 (Deutsches Institut für Normung, 2016); la Normativa Española UNE 22381 1993 (Norma Española, 1993); el Estándar Británico BS 7385 -2 1993 (Institution B. S., 1993); entre otras (Suecia), (Suiza), (Escocia, 1993), (Instituto Portugués de Calidad, 2015)), las cuales proponen sus límites permisibles para controlar el impacto de vibraciones artificiales.

En la Tabla 2.1 se muestra una serie de investigaciones y casos reales ocasionadas por la actividad humana, empleando los estándares internacionales.



Tabla 2.1. Investigación sobre las vibraciones artificiales

AUTOR	AÑO	NORMATIVA INTERNACIONAL EMPLEADA	PARÁMETROS DE ANÁLISIS	RESULTADOS	OPORTUNIDADES
(Athanasopoulos & Pelekis, 2000)	2000	DIN 4150-3 1983; USBM RI 8507 1980	Monitoreo de vibraciones del suelo por hincado de pilotes en zonas urbanas	La intensidad de vibración no rebasó a lo que establecen los códigos internacionales. Las arenas sueltas no proporcionan seguridad adecuada	La intensidad de vibración puede ser distintas, con los diferentes tipos de suelo. También, se amplifican significativamente a lo largo de la altura de los edificios.
(Dong-Soo & Jin-Sun, 2000)	2000	NO APLICA	Características de propagación y atenuación de diversas vibraciones del suelo	Investigaron las propagaciones de vibración generadas por tren, voladuras, hincado de pilotes mediante Geófonos. Los datos de atenuación coinciden con los datos pronosticados.	Es necesario caracterizar los tipos de fuente de vibración y las ondas inducidas.
(M. Crispino, 2001)	2001	DIN 4150-3 1986; UNI 9916 (Italia)	Medición y predicción de vibraciones producidas por tráfico en edificios patrimoniales	Todos los datos superaron el umbral definido por la norma ISO 2631 (0.14 mm/s), se concluye que las vibraciones inducidas por tráfico impactan significativamente la calidad de vida en los centros urbanos	Las vibraciones se correlacionan con el tipo de vehículo y velocidad.
(Svinkin, 2004)	2004	DIN 4150-3 1986; USBM RI 8507 1980	Minimizar los efectos de vibración en las construcciones	Las obras de construcción generan molestias a las personas y posibles daños estructurales, estas afectaciones estructurales pueden ser de tres maneras: vibraciones de la estructura sin el efecto de las respuestas de la estructura de resonancia, la condición de resonancia en el edificio, y los asentamientos dinámicos para la cuenta de la densificación del suelo y la licuación.	Los habitantes deben ser conscientes de las posibles influencias de las vibraciones, por lo tanto, los contratistas deben informar sobre los posibles efectos negativos de las construcciones, asimismo, la supervisión y el control de vibraciones del suelo y estructurales deben tomar medidas de prevención para mitigar estas anomalías y evitar riesgos de asentamientos y daños estructurales



AUTOR	AÑO	NORMATIVA INTERNACIONAL EMPLEADA	PARÁMETROS DE ANÁLISIS	RESULTADOS	OPORTUNIDADES
(Gupta, Liu, Degrande, Lombaert, & Liu, 2008)	2008	NO APLICA	Predicción de vibraciones inducidas por tráfico ferroviario subterráneo	Las vibraciones inducidas por el tráfico se identifican entre 10 y 30 Hz. El metro contribuye a una gama de frecuencias de 10 a 100 Hz.	Hacer un estudio de vibraciones ocasionadas por vehículos ferroviarios y cómo estas afectan a las estructuras y a suelos blandos.
(Nateghi, 2011)	2011	NO APLICA	Predicción del nivel de vibración del suelo inducido por voladuras en diferentes unidades de roca	La medición de la vibración del suelo inducida por las voladuras es muy importante para controlar y eliminar los daños causados por las explosiones a las estructuras	Es indispensable evaluar el efecto dinámico antes, durante y después de las actividades de construcción para brindar seguridad y capacidad de servicio a las estructuras aledañas y que estén expuestas a vulnerabilidades
(Nateghi, 2012)	2012	USBM RI 8507; ISI Bulletin No. 15-6922 1993	Evaluación de la vibración del suelo inducida por explosiones para minimizar los efectos negativos en las estructuras circundantes.	Las velocidades de las ondas producidas por explosiones superficiales y subterráneas, muestra que la vibración del suelo inducida por explosiones subterráneas es mayor que las ondas de voladuras de manera superficial.	Las vibraciones ocasionadas por voladura, sean subterráneas o superficiales, deben realizarse bajo consideraciones especiales.
(Kosnik & Dowding, 2015)	2014	NO APLICA	Monitoreo autónomo de la respuesta dinámica de estructuras en servicio para la toma de decisiones	Los registros de datos se utilizaron para disipar las discrepancias de daños relacionados con las vibraciones de construcción en edificios históricos que estaban sujetas a excitación dinámica por voladuras, actividades constructivas y tráfico terrestre	El monitoreo de vibraciones artificiales es adecuado para medir la respuesta a las estructuras a estos eventos artificiales.
(Soltys, Twardosz, & Winzer, 2017)	2017	NO APLICA	Estudios de control y documentación del impacto de voladuras en edificaciones en el entorno de minas a cielo abierto	El monitoreo de vibraciones ocasionadas por extracción de minas a cielo abierto de manera constante permite registrar eventos ajenos a los trabajos de voladura.	Con la monitorización es posible controlar la intensidad de vibraciones inducidas y actuar de manera oportuna si se superan los límites de seguridad



AUTOR	AÑO	NORMATIVA INTERNACIONAL EMPLEADA	PARÁMETROS DE ANÁLISIS	RESULTADOS	OPORTUNIDADES
(Navarro torres, Silveira, Lopes, & de Lima, 2018)	2018	DIN 4150-3 1986; UNE 22381 1993; USBM RI 8507; NBR 9653; NP 2074 2015	Evaluación y control de vibraciones inducidas por voladuras de banco para minimizar los impactos de comunidades aledañas	Es indispensable monitorear las vibraciones de voladura y registrar los niveles de vibración	Se deben realizar investigaciones exhaustivas para monitorear las vibraciones inducidas por voladuras. Elegir el estándar más adecuado. La metodología utilizada en este caso de estudio se puede aplicar a cualquier mina a cielo abierto cerca de edificaciones
(Hong, y otros, 2020).	2020	NO APLICA	Análisis empírico de los contaminantes en las obras de construcción para determinar los índices de seguimiento en tiempo real	Las metodologías en el caso de estudio se pueden utilizar para desarrollar el monitoreo ambiental en cualquier tipo de proyectos de obra civil	Estudio preliminar para desarrollar un sistema de monitoreo en tiempo real en sitios de construcción para reducir el impacto ambiental
(Weng, Yohannes , & Chong, 2020)	2020	DIN 4150-3 2016; BS 7385 1993;	Análisis de datos y predicción de vibración, técnicas de vibraciones profundas	Se recopilaban aproximadamente 1000 puntos de datos de diferentes tipos de trabajo (vibroemplazo y vibro compactación)	Es importante estudiar las vibraciones que generan las maquinarias y observar los efectos en ellas.
(Rodriguez & Bascompta, 2020)	2020	DIN 4150-3 1999; BS 7385 1993; SN640-312a; une 22381-1993	Análisis de vibraciones y definición de leyes empíricas para diferentes equipos en una construcción civil	Hicieron estudios por medio de excavadoras, martillos rompedores, equipos de relleno y rodillos vibratorios. Los resultados muestran velocidades máximas de 0.1 mm/s. Proponen un umbral similar a los estándares internacionales que oscilen hasta 30 veces la velocidad que registraron	Se deberá analizar este caso de estudio y relacionarlo con la estratigrafía que se presenta de manera local en el caso de extracción de macizos rocosos empleando maquinaria pesada y observar su comportamiento



AUTOR	AÑO	NORMATIVA INTERNACIONAL EMPLEADA	PARÁMETROS DE ANÁLISIS	RESULTADOS	OPORTUNIDADES
(Wang & Zhu, 2021)	2021	DIN 4150-3 1999;	Localización de fuentes de impacto y predicción de la intensidad de las vibraciones en obras de construcción	Estimaron las vibraciones ocasionadas por construcciones a través de datos reales y compararon por medio de un modelo de elementos finitos.	. La estratificación del suelo y la irregularidad geométrica pueden contribuir a la complejidad de la propagación de las ondas y, por lo tanto, los estudios futuros deberían considerar dicha complejidad.
(Costanzo, y otros, 2022)	2022	DIN 4150-3 1999; SN640312 2013	Monitoreo laser y geofísico para caracterizar el estado actual de estructuras históricas y la amenaza por vibraciones por tráfico terrestre	Las vibraciones inducidas por tráfico generan daños estéticos a los inmuebles históricos cerca de áreas urbanas	Investigación mediante escaneo láser para detectar agrietamientos y deterioros en elementos más expuestos a vibraciones.
(Wang & Zhu, 2022)	2022	DIN 4150-3 1999;	Vibraciones ocasionadas en construcciones aplicados a Tablaestacas	Se monitorearon las vibraciones en distintas ubicaciones. Las intensidades de vibración se pueden predecir utilizando la relación empírica derivada y las ubicaciones estimadas del trabajo de hincas de tablaestacas	Se pueden encontrar propagaciones de vibraciones complejas en otros sitios, debido a las condiciones estratigráficas del suelo y las irregularidades de las geometrías del inmueble.
(Colaco, Ferreira, & Costa, 2022)	2022	DIN 4150-3; SS 25211 (Suecia); SN 640 312; BS 7385-2; NP 2704	Predicción empírica, experimental y numérica de vibraciones terrestres inducidas por la conducción de pilotes de impacto	El fenómeno de vibraciones inducidas por la hincas de pilotes tiene el potencial de causar daños estéticos y estructurales a edificios circundantes	Es indispensable ser consciente de los niveles de vibración para evitar molestias excesivas a los residentes y daños a edificios cercanos



AUTOR	AÑO	NORMATIVA INTERNACIONAL EMPLEADA	PARÁMETROS DE ANÁLISIS	RESULTADOS	OPORTUNIDADES
(Zarei, Javad, & Alireza, 2022)	2022	NO APLICA	Evaluación de vibraciones inducidas por vehículos pesados al circular sobre pavimentos asfálticos	Las vibraciones inducidas en carretera se producen en un rango de frecuencias de 10 a 20 Hz. Si un edificio sensible se encuentra ubicado a menos de 5 m de una avenida principal, la instalación de un badén provoca vibraciones que exceden el nivel permitido.	Es importante considerar las ubicaciones de la colocación de los badenes (topes) en suelos blandos para disminuir las vibraciones y evitar afectaciones a las estructuras sensibles a vibración.
(Kang, Baek, & Park, 2023)	2023	NO APLICA	Evaluación de la detección de vibraciones mediante teléfonos inteligentes en un edificio con estructura RC relleno de mampostería de dos pisos	Se realiza una comparación del monitoreo de vibraciones a partir de datos de aceleración utilizando teléfonos inteligentes y acelerómetros, la relación es mayor del 90%	Se puede considerar un monitoreo en tiempo real por medio de teléfonos inteligentes en caso de que los acelerómetros lleguen a tener fallas.
(Khajehdezfuly, Alizadeh Shiraz, & Sadeghi, 2023)	2023	NO APLICA	Evaluación de vibraciones provocadas por el paso simultáneo de vehículos de carretera y ferroviarios	Desarrollaron un modelo a través de dos etapas (obtención de los historiales de fuerza tiempo de los vehículos, y un Modelo de elementos finitos). El paso simultáneo de autobuses y trenes provoca considerablemente vibraciones de mayor amplitud y duración.	Comparación del monitoreo de registros en campo y los obtenidos de manera teórica (Modelo de elementos finitos).



3. MARCO TEÓRICO

3.1. Vibraciones artificiales

Las vibraciones pueden ser generadas por fenómenos naturales o por actividades humanas (Pinto Morales, Fuentes Fuentes, & Hernández Julián, 2013). Entre los fenómenos naturales se tienen a los terremotos, siendo estos de mayor interés por la intensidad de la sacudida del suelo, provocando daños estructurales como el colapso y la pérdida humana. Mientras que las vibraciones del suelo generadas por la actividad humana, conocidas como vibraciones artificiales (Athanasopoulos & Pelekis, 2000), varían mucho de la fuente particular de vibración. Estas vibraciones suelen ser generalmente menores a comparación de las vibraciones artificiales (Kramer, 1996).

De acuerdo con (Massarsch K. R., 1995), las actividades humanas que generan vibraciones en el suelo, tienen su origen principalmente por:

- operación por maquinaria;
- tráfico vehicular o ferroviario;
- actividades constructivas.

Las vibraciones causadas por la operación de maquinaria (Figura 3.1 y Figura 3.2) son en su mayoría continuas y periódicas. El enfoque de los estudios relevantes ha estado en desarrollo de métodos para estimar la magnitud de vibraciones esperadas de la base de la máquina. Otros estudios se han centrado en criterios de vibración para proteger la integridad de la máquina y evitar la molestia de las personas que trabajan o viven en zonas aledañas (Comunidad de Madrid, 2012)

Los efectos de vibración que son generados por el tráfico vehicular (Figura 3.3 y Figura 3.4), son en su mayoría movimientos aleatorios y han sido objeto de diversos estudios, donde involucran mediciones de campo para desarrollar nuevos métodos para la predicción empírica de la intensidad de las vibraciones del suelo generadas a una distancia del tráfico vehicular; modelos numéricos que abarcan la fuente de vibración y la ruta de transmisión para la predicción del nivel de vibración a diferentes distancias de la fuente y para el estudio de varios parámetros. (Vacca Gamez, Rodríguez, & Ruiz Valencia, 2011; Zarei, Javad, &

Alireza, 2022; Gupta, Liu, Degrande, Lombaert, & Liu, 2008; Khajehdezfuly, Alizadeh Shiraz, & Sadeghi, 2023; M. Crispino, 2001).



Figura 3.1 Vibración por maquinaria



Figura 3.2 Vibración por Maquinaria. Tren Maya Tramo 4, México.



Figura 3.3 Vibración por Transporte público



Figura 3.4 Vibración por transporte público. Tren Maya Tramo 4, México

Las sacudidas artificiales por la actividad constructiva (Dowding, Construction vibrations, 1996), (Gubbe, 1996), llegan a ser diversas, abarcando desde operaciones de voladura en sitios rocosos, demolición con explosivos, hincado de pilotes, compactación

vibratoria, excavaciones profundas o túneles en sitios rocosos o de suelo y actividades mecanizadas en general (Svinkin, 2004; Wang & Zhu, 2021; Sharkey Bowers & Lovenstein, 2023; Massarsch K. R., 1995; Costanzo, y otros, 2022). Las fuentes de vibración al suelo más comunes es la del hincado de tablaestacas (Athanasopoulos & Pelekis, 2000), ya que las inmersas construcciones utilizan como elementos de cimentación y las tablaestacas como los elementos de retención de tierra y humedad. (Figura 3.5). (Colaco, Ferreira, & Costa, 2022)



Figura 3.5 Vibración por actividad constructiva.



Figura 3.6. Vibración por actividad constructiva. Proyecto Macrolibramiento Mexiquense Tramo 4.1, Edomex. México

3.2. Consecuencias ocasionadas por las vibraciones artificiales

El nivel de vibración del suelo necesario para causar diversos tipos de daños a distintos tipos de estructuras puede establecerse mejor mediante estudios de casos en los que las vibraciones del suelo se miden cerca de una estructura y los daños resultantes se correlacionan con el nivel y la frecuencia de la vibración del suelo.

Estas vibraciones traen consecuencias, causando principalmente los siguientes efectos:

- daños estéticos (desprendimientos de aplanados, ruptura de sistemas hídricos y eléctricos);
- daños estructurales, como los agrietamientos en columnas y muros (Gubbe, 1996; Massarsch K. R., 1995; Dowding, Construction vibrations, 1996).
- daños en cimentaciones como lo son asentamientos producidos y provocados por las vibraciones más el aceleramiento del efecto del hundimiento regional, afectando la integridad estructural (Suárez, Yañez, Farraz, & Novelo Casanova, 2017);
- vibraciones perceptibles a humanos, generando distracciones y molestias en sus actividades rutinarias. (Goldman, 1948)



Figura 3.7 Consecuencias ocasionadas por las vibraciones artificiales



Figura 3.8 Afectación en una estructura histórica (Jordan, Sutcliffe, & Mullard, 2009)

3.2.1. Afectaciones estructurales

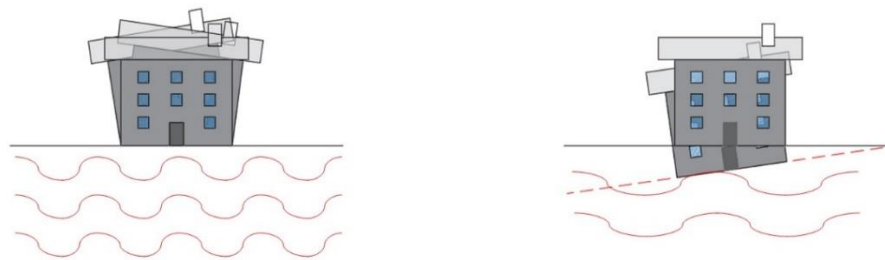
Las construcciones civiles suelen ocasionar severos problemas a las estructuras debido a las vibraciones, afectando su funcionalidad, e incluso causando incomodidad a las personas que se encuentran en el interior del inmueble. Estas afectaciones pueden llegar a ocasionar afectaciones estéticas de los inmuebles, así como desprendimientos de aplanado o de piso, hasta consecuencias severas, como lo son los agrietamientos en muros y asentamientos, comprometiendo la integridad estructural, dependiendo en gran medida de los procedimientos constructivos que se llevaron a cabo en la elaboración de la estructura, como del tipo de material que fueron diseñadas sin dejar atrás las mediciones de aceleración del terreno en el que se encuentran (Suárez, Yañez, Farraz, & Novelo Casanova, 2017).

(Barneich, 1985) establece que el límite de amplitud de velocidad de vibración es 0.25 cm/s como nivel sobre el cual pueden causar molestias a las personas. El límite para las construcciones es 7.6 cm/s. Estas velocidades son peligrosas para las construcciones.

3.2.2. Asentamientos

Dado a que las vibraciones artificiales son menores que las vibraciones por sismo, estas vibraciones, en la mayoría de los casos y mencionado en los puntos anteriores, no causan daños estructurales, sus efectos comúnmente se limitan al desarrollo de agrietamientos en acabados. Sin embargo, estas vibraciones pueden inducir deformaciones permanentes (densificación), en suelos arenosos que son seguidas por el asentamiento de los cimientos. Estos asentamientos tienen un potencial de inducir un daño estructural más severo que el daño en acabados, debido a que pueden presentarse de manera diferencial. (Suárez, Yañez, Farraz, & Novelo Casanova, 2017; Colaco, Ferreira, & Costa, 2022; Dowding, Construction vibrations, 1996; Sharkey Bowers & Lovenstein, 2023).

Los asentamientos del suelo y de los cimientos como resultado de vibraciones relativamente pequeñas del suelo en arenas sueltas pueden ocurrir a diferentes distancias de la fuente. Se esperan que las arenas se densifiquen a distancias cortas de las fuentes dinámicas pero los asentamientos superficiales se extienden más allá de la zona de densificación. Según (Woods, 1997), es posible que sea necesario inspeccionar de hasta 400 metros para identificar el peligro de daños por asentamientos.



*Figura 3.9 Reacción de una edificación a los efectos directos (izquierda) y asentamiento indirecto (derecha)
(Sharkey Bowers & Lovenstein, 2023)*

Para determinar el nivel de vibración que podría haber ocurrido en una propiedad, deben identificarse los equipos que inducen la vibración y debe determinarse la distancia entre el origen de la vibración y la edificación.



3.2.3. Percepción Humana

Los niveles de vibración que son seguros para las estructuras residenciales, llegan a ser molestos e incómodos cuando lo experimentan personas. Estas quejas llegan a ser tan molestas como las reclamaciones públicas por daño. Traducido de (Department of the Army, 1972).

La Figura 3.10 muestra que en la frecuencia de entre 10 a 100 Hz, los niveles de vibración entre 0.1 y 0.3 ips (pulgadas por segundo, que son aproximadamente 2.54 y 7.62 mm) son considerados desagradables por la mayoría de las personas. El caso del límite de seguridad de las estructuras, compete a un valor fijo de 50.8 mm (2 pulgadas).

Para el caso de términos de amplitud de desplazamientos, se muestra la Figura 3.11.

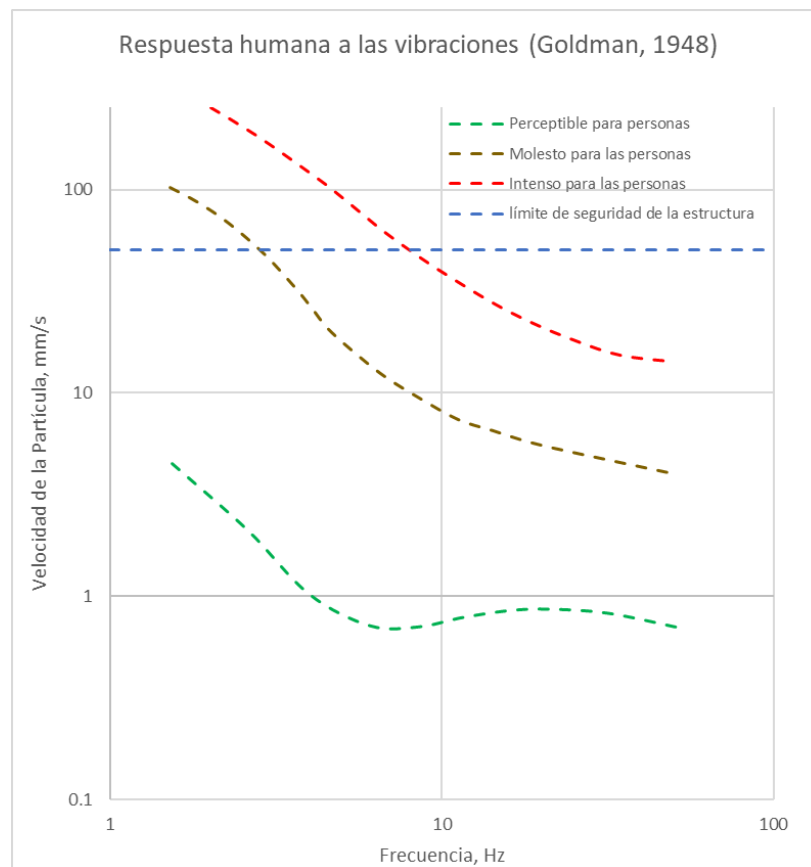


Figura 3.10 Respuestas humanas a las vibraciones (Goldman, 1948).

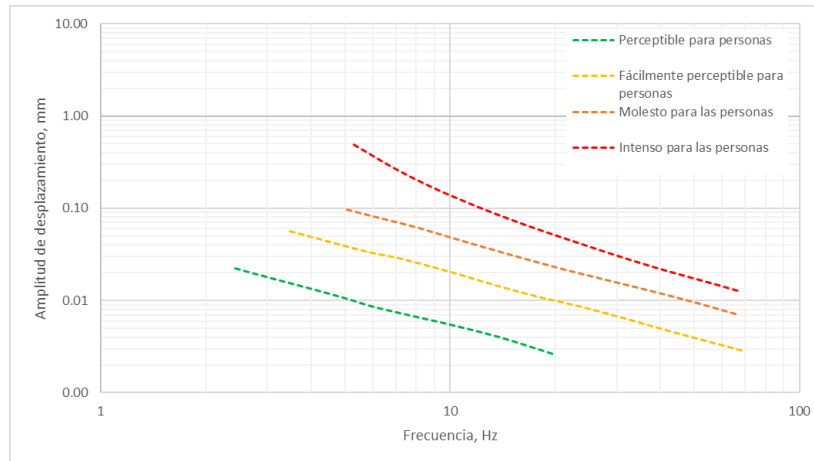


Figura 3.11 Percepción humana ocasionadas por las vibraciones, en términos de desplazamiento, en mm (Pinto Morales, Fuentes Fuentes, & Hernández Julián, 2013)

3.3. Equipos de grabación

Las ondulaciones del suelo suelen medirse con un sismógrafo de desplazamiento o de velocidad, estos instrumentos suelen ser de registro automático y pueden adquirirse como unidad completa, también, es posible utilizar medidores de desplazamiento, medidores de velocidad o acelerómetros con amplificadores y registradores adecuados. Traducido de (Department of the Army, 1972)

De igual modo, para medir la intensidad de vibración puede utilizarse un equipo transductor denominado acelerómetro, este aparato es conectado a una unidad de medida y a un integrador de la señal. Las vibraciones, como se mencionó en el apartado 3.2, se producen en las tres direcciones, sin embargo, algunos acelerómetros solo permiten medir en una dirección espacial cada vez, por lo que será necesario medir en cada una de dichas direcciones o mejor, utilizar tres acelerómetros de forma simultánea orientado a cada una de las tres direcciones espaciales (Norma Española, 1993).

3.4. Maquinaria

Los trabajos constructivos, tanto de edificación como de obra civil, se realizan con distintos tipos de maquinaria, desde camiones para movimiento de tierras, así como



compactadoras, vibradores, martillos hidráulicos, hasta la maquinaria ligera (Comunidad de Madrid, 2012).

Actualmente, se han modernizado y optimizado las maquinarias, de modo que facilitan las tareas, aunque se introducen nuevos riesgos, para ello, este progreso debe verse influenciado por los principios de acción preventiva considerándose desde el diseño para minimizar los riesgos desde el origen (Barneich, 1985; Hong, y otros, 2020; Zarei, Javad, & Alireza, 2022).

Todas las maquinarias, sin excepción, generan ruido y vibraciones en mayor o menor medida, siendo algo intrínseco al funcionamiento de estas. El ruido y las vibraciones tienen un origen común en la maquinaria, produciendo, cuando se generan niveles elevados, una sensación de disconformidad trayendo como consecuencia reducción de seguridad y la posibilidad de ocasionar enfermedades profesionales (Soltys, Twardosz, & Winzer, 2017).

De acuerdo con el Libro “Ruido y Vibraciones en la Maquinaria de obra (Comunidad de Madrid, 2012), las vibraciones ocasionadas por maquinaria y herramienta, se pueden clasificar de acuerdo con los siguientes aspectos:

1. Según la parte del cuerpo en la que afectan

- a. Vibraciones globales: Cuando afectan a todo el cuerpo en su totalidad, estas dependen de la postura y sensibilidad de la persona.
- b. Vibraciones parciales: Cuando afectan a subsistemas de cuerpo. Las más características son la denominada “mano-brazo” por ser la zona de contacto con la fuente de vibración.

2. Según las características físicas

- a. Vibraciones libres, periódicas o sinusoidales: Cuando existen fuerzas externas que modifican la amplitud de las ondas que se producen a tiempos iguales.
- b. Vibraciones no periódicas: Cuando se produce un movimiento oscilatorio transitorio (i.e. golpes o choques), en el que se produce una liberación de energía en un corto periodo de tiempo.



- c. Vibraciones aleatorias: produciéndose de forma irregular, no pudiendo preverse su amplitud en un momento concreto.

3. Según la frecuencia de vibraciones

- a. Muy bajas frecuencias (menores a 1 Hz): Vibraciones de aceleración que suelen transmitirse en los medios de transporte, causando alteraciones auditivas y en el sentido del equilibrio.
- b. Bajas y medias frecuencias (de 1 Hz a 20 Hz): Estas vibraciones afectan a la columna vertebral, aparato digestivo, visión y función cardiovascular.
- c. Altas frecuencias (de 20 Hz en adelante): Producen problemas circulatorios, en articulaciones, musculares incluso quemaduras por rozamiento.

4. Según el origen de vibraciones

- a. Vibraciones generadas en procesos de transformación: Suelen ser vibraciones no periódicas, como las que se originan por martillos neumáticos, entre otras.
- b. Vibraciones propias del funcionamiento de las máquinas o de los propios materiales: Son producidas por los motores que provienen de la circulación de la maquinaria por terrenos irregulares de las obras.
- c. Vibraciones por fallos en el funcionamiento de las máquinas: Suelen deberse a un incorrecto mantenimiento de estas, generado por desgaste, falta de lubricación, etcétera.

5. Según el tiempo de exposición y su distribución

- a. Con exposición breve: Puede afectar al sistema nervioso
- b. Con exposición prolongada o de larga duración: Afectan a la región lumbar de la columna.

En la Tabla 3.1 se muestran los equipos que emiten vibraciones y su frecuencia estipulada.



Tabla 3.1 Maquinarias que emiten frecuencias. (Junta de Extremadura, 2023).

De muy baja frecuencia $< 1 \text{ Hz}$	Movimientos oscilatorios, lentos o balanceo en: <ul style="list-style-type: none">• Trenes• Barcos• Plataformas flotantes• Aviones
De baja frecuencia $1 \leq X \leq 20 \text{ Hz}$	Vibraciones producidas por: <ul style="list-style-type: none">• Carretillas elevadoras• Excavadoras• Maquinaria y vehículos de obras civiles• Tractores• Cosechadoras y máquinas agrícolas
De alta frecuencia $20 \leq X \leq 1000 \text{ Hz}$	Maquinas neumáticas y rotatorias <ul style="list-style-type: none">• Martillos picadores neumáticos• Moledoras• Pulidoras• Lijadoras• Motosierras• Cortadoras• Bailarinas

Las vibraciones del tráfico debidas a los vehículos pesados o trenes son particularmente representativas de las molestias causadas a elementos estructurales situados cerca de carreteras o vías férreas. De hecho, las vibraciones transitorias producen vibraciones muy perceptibles (Tabla 3.2).



Tabla 3.2 Frecuencias de vibración y características del vehículo (Barneich, 1985)

Vehículo	Frecuencia
Auto	3-30
Autobús	9-27
Camión	10-35
Tren	10-40

3.5. Normativas internacionales vigentes que regulan las vibraciones

Se empleó parte de la normatividad internacional actualizada comúnmente utilizada a nivel mundial enfocadas en las vibraciones artificiales.

3.5.1. Norma Alemana DIN 4150

La normativa DIN son estándares técnicos utilizados en Alemania para llevar a cabo el aseguramiento de la Calidad de los productos industriales y Científicos.

DIN, es una abreviatura que proviene de: Deutsches Institut für Normung (traducido al español, significa Instituto Alemán de Normalización). La cual, ejerce funciones similares a las de otros organismos internacionales, como las normas ISO, las ANFOR, entre otras.

La Norma DIN-4150, es uno de los estándares técnicos más utilizados a nivel mundial, siendo uno de los criterios más exigentes en lo que respecta a normativas para el control de vibraciones estructurales y humanas ocasionados por movimientos de tránsito vial, maquinaria pesada, por voladura, entre otros.

Esta normativa cuenta con tres apartados que están vigentes actualmente:

1. DIN 4150-1:2001-06. Predicción de los Parámetros de Vibración.
2. DIN 4150-2:1999-06. Exposición humana a las vibraciones en edificios.
3. DIN 4150-3:2016-12. Efectos en las estructuras



3.5.1.1. DIN 4150-1: 2001-06 Predicción de los parámetros de vibración

Este apartado de la Normativa DIN, describe los métodos de estimación de los efectos de las vibraciones, en una fuente conocida en una estructura planificada o de una fuente vecina existente. Sus parámetros de vibración están influenciados por la fuente de vibración, las propiedades del suelo a lo largo de la trayectoria de propagación, las condiciones de la estructura o sitio que recibe la vibración, así como el subsuelo sobre el que se construye dicha estructura. Los diferentes tipos de fuente de vibración se caracterizan según su:

- fuente de la geometría
- tipo de vibración
- frecuencia con la que se producen las vibraciones
- distribución de frecuencias
- área de exposición
- presencia de la fuente, si es permanente o temporal
- duración de los efectos.

También, este apartado hace mención sobre la propagación de la onda libre (campo lejano) y la región cercana a la fuente de vibración. De igual modo, comenta sobre el factor de amortiguamiento, que depende de la estructura del suelo, su compacidad y la amplitud de deformación. La definición del coeficiente de atenuación implica que las vibraciones de alta frecuencia se amortiguan en mayor medida que las de baja frecuencia. Traducido de (Deutsches Institut für Normung, 2001).

Cuando las vibraciones se transmiten a través del suelo a los cimientos de un edificio, cambian debido a la elasticidad del subsuelo y en función de la longitud de onda correspondiente, y también se ven afectadas por la masa y la disposición del edificio. Traducido de (Deutsches Institut für Normung, 2001).

A título orientativo, pueden suponerse las siguientes frecuencias propias para una rigidez media del suelo, y caracterizadas por velocidades de ondas de corte de 150 m/s a 200 m/s. Traducido de (Deutsches Institut für Normung, 2001).



- a) edificios de 1 a 2 plantas: ~ 15 Hz;
- b) edificios de 2 a 6 plantas: = 8 a 12 Hz;
- c) edificios de más de 6 plantas: < 8 Hz.

Para las vibraciones a frecuencias superiores a la frecuencia propia del sistema mencionado, estas condiciones sencillas ya no se aplican, ya que las propiedades elásticas de los cimientos y del edificio tienen entonces una mayor influencia. Los valores de transferencia inferiores deben verificarse caso por caso. Cuando el edificio se encuentra en un suelo rocoso no hay amortiguación de las vibraciones transmitidas a los cimientos. Traducido de (Deutsches Institut für Normung, 2001).

Fuentes de vibración

Por voladura

Para el caso de las fuentes de vibración por voladura, solo duran apenas unos segundos, aunque indican que las explosiones deben considerarse como fuentes puntuales impulsivas. Sus propagaciones de onda están influenciadas por las condiciones geológicas locales y muy rara vez se utilizan en zonas urbanas. Traducido de (Deutsches Institut für Normung, 2001).

Por obras de construcción

Las vibraciones por métodos constructivos producen vibraciones considerables, estas se caracterizan generalmente como fuentes puntuales impulsivas o estacionarias. Traducido de (Deutsches Institut für Normung, 2001).

Fuentes impulsivas

Incluyen pilotes, cortes de roca y piedra, masas que caen, etcétera. En este caso, la magnitud de la vibración es aproximadamente proporcional a la roca cuadrada de la energía transmitida al suelo. La gama de frecuencias se caracteriza por un amplio espectro de frecuencias de hasta 80 Hz. Traducido de (Deutsches Institut für Normung, 2001).



Fuentes fijas

Incluyen la hinca de pilotes, equipos de compactación, como las planchas y rodillos vibratorios, los vibradores profundos. Traducido de (Deutsches Institut für Normung, 2001).

En cuanto a las vibraciones, las frecuencias de funcionamiento altas suelen ser más favorables que las bajas cuando se trabaja con los equipos mencionados anteriormente, ya que así se evita el rango de frecuencias en el que los suelos de los edificios entran en resonancia. el arranque y la parada de las máquinas con un momento estático constante pueden dar lugar a una resonancia a corto plazo a medida que se aproxima la frecuencia propia del suelo. Los martillos vibratorios con frecuencias de funcionamiento más bajas pueden inducir fuertes vibraciones incluso a grandes distancias, especialmente cuando golpean obstáculos en el suelo; en este caso, la frecuencia de funcionamiento cae a un valor en el que el suelo está en resonancia, y hay una mayor transmisión de energía. Traducido de (Deutsches Institut für Normung, 2001).

Un factor importante que influye en la magnitud de la vibración inducida por los martillos de pilotes es la proporción entre la energía dinámica producida en el trabajo de deformación del suelo (hinca de pilotes) y la energía elástica producida (propagación de la vibración). Esta proporción depende de las propiedades de la fuente de vibración, de su frecuencia de funcionamiento y de las características del suelo y del objeto que se hinca. Traducido de (Deutsches Institut für Normung, 2001).

En el caso de los equipos de compactación, la magnitud de las vibraciones depende principalmente de la fuerza centrífuga utilizada y de las características del suelo. La magnitud de la vibración aumenta en proporción directa al grado de compactación. Traducido de (Deutsches Institut für Normung, 2001).

La experiencia ha demostrado que las vibraciones de las placas pequeñas que funcionan en condiciones normales no inducen vibraciones que puedan causar daños, incluso cuando los vibradores funcionan cerca de una estructura. Traducido de (Deutsches Institut für Normung, 2001).



Por tráfico

Son percibidas por los usuarios como parte del entorno inmediato cotidiano y, por tanto, se considera aceptable hasta cierto punto, suele ir acompañado de otros tipos, por lo que la aceptación del efecto total de todos los tipos de vibración tiene mayor importancia para las evaluaciones, y la predicción de la vibración inducida por el tráfico no puede utilizarse como único factor determinante. Traducido de (Deutsches Institut für Normung, 2001).

Tráfico ferroviario

Las frecuencias de excitación que se producen como resultado de las frecuencias propias de los componentes del vehículo ferroviario no dependen de la velocidad. Dichas frecuencias se sitúan normalmente entre 1 Hz y 3 Hz para las carrocerías de los vagones cargados con muelles, que se consideran cuerpos rígidos, y entre 6 Hz y 10 Hz para los bogies. Traducido de (Deutsches Institut für Normung, 2001).

Dichas frecuencias suelen oscilar entre 40 Hz y 80 Hz en los lechos de balasto, 15 Hz y 40 Hz en los túneles en los que se utilizan esteras de balasto, y 5 Hz y 20 Hz en los que hay un sistema de losa de vía flotante. Traducido de (Deutsches Institut für Normung, 2001).

La experiencia ha demostrado que la zona de exposición para el tipo de vibración inducida por el tráfico ferroviario que se trata aquí no puede estar a más de 80 m de la fuente. Traducido de (Deutsches Institut für Normung, 2001).

Por carretera

Las vibraciones pueden ser generadas por la interacción mecánica entre los vehículos y la superficie irregular de la carretera, aunque esto sólo tiene una importancia considerable en el caso de los vehículos pesados, como los camiones o los autobuses. Existen dos mecanismos principales de vibración inducida por el tráfico rodado: cuando los vehículos circulan por zonas muy irregulares de la carretera, o en zonas dañadas:

- la vibración impulsiva se transmite al suelo;



- las frecuencias propias son excitadas por el vehículo o partes de este, que tienen un efecto en la carretera y, por tanto, en el suelo. Traducido de (Deutsches Institut für Normung, 2001).

En general, la magnitud de la vibración aumenta con el incremento de la masa y la velocidad del vehículo. Los vehículos sin carga y los remolques suelen generar vibraciones más fuertes que los cargados, en función del diseño del sistema de muelles. Traducido de (Deutsches Institut für Normung, 2001).

Por maquinaria

Por regla general, lo siguiente se aplica a las vibraciones inducidas por las máquinas:

- a) Las máquinas pueden instalarse en un emplazamiento industrial por separado o en grupo.
- b) El soporte de la máquina tiene un fuerte efecto en el comportamiento de las vibraciones, las máquinas pueden instalarse directamente en la losa de cimentación, en una cimentación separada, en el suelo o en un sistema de aislamiento de las vibraciones.
- c) Las características de las vibraciones dependen de la función y el diseño de la maquinaria. Las vibraciones inducidas por las máquinas van desde un fuerte choque hasta una mínima excitación periódica.
- d) El tiempo y la duración de la operación se determinan principalmente en función de consideraciones económicas y relacionadas con la producción, por lo que sólo se puede influir ligeramente. Traducido de (Deutsches Institut für Normung, 2001).

La frecuencia fundamental del amplio espectro de frecuencias de excitación suele estar en función de la velocidad del accionamiento de la máquina o del número de ciclos de las piezas móviles. Las máquinas que tienen movimientos suaves y regulares casi armónicos producen un espectro de excitación con una frecuencia fundamental claramente identificable y armónicos individuales. Cuanto más armónico sea el movimiento, más estrecha será la banda del espectro. Los espectros de las máquinas con movimientos bruscos y de choque son más densos y con líneas espectrales menos definidas. Cuanto más corto sea el choque, más



amplia será la banda de frecuencias (*ver apartado 3.4 Maquinaria*). Traducido de (Deutsches Institut für Normung, 2001).

3.5.1.2. *DIN 4150-2: 1999-06 Exposición humana a las vibraciones en edificios*

Normalmente, las personas que se encuentran en los edificios, especialmente en las viviendas, deberían estar expuestas a la menor cantidad de vibraciones perceptibles posibles. Sin embargo, no es posible eliminar todas las vibraciones con la tecnología actual. Traducido de (Deutsches Institut für Normung, 1999).

La medida en que los efectos de la vibración son molestos, depende de la naturaleza de vibración y de las características individuales de la persona, así como otros factores físicos. Los parámetros de vibración que deben tenerse en cuenta son:

- magnitud de vibración
- frecuencia de vibración
- duración de la exposición.
- la frecuencia y la hora del día de la exposición y su naturaleza
- tipo y modo de funcionamiento de la fuente de vibración.

Los factores humanos incluyen:

- el estado de salud de la persona (psicológico, físico);
- actividades que realizan en ese momento;
- el grado en que la persona se ha acostumbrado a la vibración;
- la relación de la persona con la fuente de vibración;
- expectativas sobre las condiciones de vida, depende del tipo de material en el que se encuentre la vivienda.

En el caso de las vibraciones generadas por las obras de construcción, es importante tener en cuenta que la exposición a las vibraciones está limitada temporalmente. A menudo



es necesario utilizar un método de construcción que dirija las vibraciones hacia el suelo. Traducido de (Deutsches Institut für Normung, 1999).

Medición

Para la medición, es necesario realizarlo en las tres direcciones ortogonales habituales. Estas mediciones deben seleccionar un periodo que se incluyan los efectos característicos de las vibraciones. La duración de este periodo depende de la regularidad del historial temporal de las vibraciones y puede ser más corta que la de los periodos de exposición. Traducido de (Deutsches Institut für Normung, 1999).

Vibraciones generadas por las obras

La exposición a las vibraciones que se produzcan durante un período limitado debe clasificarse en los tres niveles siguientes. Al realizar las evaluaciones durante la fase de planificación, esta clasificación se basará en los valores obtenidos por el pronóstico o por la experiencia. Traducido de (Deutsches Institut für Normung, 1999).

Nivel I: Con la vibración por debajo de este nivel, se puede suponer -incluso sin ningún conocimiento previo- que no habrá molestias considerables. Traducido de (Deutsches Institut für Normung, 1999).

Nivel II: Tampoco es probable que las vibraciones por debajo de este nivel produzcan molestias considerables, siempre y cuando se tomen las medidas requeridas. A medida que se supera este nivel, aumenta la probabilidad de que se produzcan molestias considerables. Si se prevé que se supere el nivel II, se intentará utilizar métodos de construcción que produzcan menos vibraciones. Traducido de (Deutsches Institut für Normung, 1999).

Nivel III: Los efectos producidos por las vibraciones por encima de este nivel son inaceptables. En este caso, se acordarán medidas especiales que vayan más allá de las especificadas. Traducido de (Deutsches Institut für Normung, 1999).



Medidas para reducir las molestias

Los efectos psicológicos de las vibraciones pueden reducirse con las siguientes medidas:

- a. informar a todas las personas que puedan estar expuestas sobre los trabajos de construcción, su duración y las vibraciones previstas que puedan generarse.
- b. explicando la inevitabilidad de las vibraciones producidas por la construcción y las molestias asociadas.
- c. introducir medidas adicionales para reducir y limitar las molestias (hacer pausas, seleccionar métodos adecuados de actuación en la fuente de vibración, etc.).
- d. nombrar un interlocutor al que los expuestos a las vibraciones puedan dirigirse cuando surjan problemas especiales.
- e. informar a las personas expuestas a las vibraciones sobre sus efectos en el edificio.
- f. medir la vibración real y evaluar sus efectos en las personas y las estructuras.

También, hacen mención de que es necesario hacer un informe de la prueba, que incluya lo siguiente información:

- a. laboratorio que realiza mediciones de vibraciones;
- b. persona responsable de la medición;
- c. tiempo (fecha, períodos de medición);
- d. fuente de vibración;
- e. condiciones de funcionamiento;
- f. plano del sitio;
- g. condiciones de propagación de las vibraciones;
- h. puntos de medición, ubicación del receptor de vibraciones;
- i. medios de montaje de los captadores;
- j. equipo de medición de vibraciones utilizado (marca, tipo, número de serie o de inventario);
- k. ajustes del equipo;
- l. resultados;
- m. otros equipos de medición utilizados;



- n. cualquier observación realizada durante la medición. Se incluirá otra información cuando sea necesario. Traducido de (Deutsches Institut für Normung, 1999).

3.5.1.3. DIN 4150-3: 2016-12 Efectos en las estructuras

Las vibraciones que se producen en una estructura pueden detectarse directamente mediante un acelerómetro, un transductor de desplazamiento o un transductor de velocidad. Esta evaluación se realiza sobre la base de los valores absolutos de la velocidad máxima de vibración. La experiencia demuestra que no se producen daños por vibraciones que afecten negativamente a la capacidad de servicio si se respetan los valores orientativos. Si se llegan a presentar daños, hay que suponer que la causa es otra. Traducido de (Deutsches Institut für Normung, 2016).

Al medir el desplazamiento, la velocidad o la aceleración de las vibraciones, se puede determinar la amplitud y la frecuencia de estos parámetros de vibración y utilizarlos en los cálculos de tensión/deformación. Traducido de (Deutsches Institut für Normung, 2016).

Las tensiones en vigas o losas que vibran cerca de la resonancia pueden aproximarse a partir de la amplitud de la velocidad de vibración, siempre que la medición se realice en el punto de mayor amplitud. Las mediciones locales de la deformación en componentes individuales del edificio (por ejemplo, los cimientos) son inadecuadas para evaluar adecuadamente los efectos en la estructura en su conjunto. Traducido de (Deutsches Institut für Normung, 2016).

Capacidad de resistencia

Esta se lleva a cabo utilizando los factores de seguridad especificados en las normas y códigos prácticos pertinentes para la carga dinámica adicional, teniendo en cuenta el tipo y la duración de las cargas dinámicas, el método de medición, las propiedades de los materiales de construcción y el tipo de construcción. Traducido de (Deutsches Institut für Normung, 2016).



Cuando sea necesario, la capacidad de carga también se verificará teniendo en cuenta la resistencia a la fatiga. Si se dispone de diagramas de resistencia a la fatiga, éstos pueden utilizarse para establecer, en función del número de inversiones de tensión previstas, los límites de tensión, las amplitudes de desplazamiento, las deformaciones y otros parámetros similares para los materiales de construcción, los componentes del edificio y las juntas. Traducido de (Deutsches Institut für Normung, 2016).

Efecto de las vibraciones del suelo

Las fuertes vibraciones pueden provocar el hundimiento del suelo, principalmente en el caso de los suelos sueltos o de densidad media, no cohesivos, como la arena y la grava; esto puede provocar el asentamiento de los cimientos. Este es el caso, en particular, de las vibraciones de larga duración, de la arena uniformemente graduada o del suelo situado por debajo del nivel de las aguas subterráneas. Traducido de (Deutsches Institut für Normung, 2016).

Se presentan la Tabla 3.3 y la Figura 3.12 con los valores orientativos de la velocidad de partícula para evaluar los efectos de las vibraciones en las estructuras.

Tabla 3.3 Valores orientativos para evaluar los efectos de vibración. DIN 4150-3 2016

Tipo de estructuras	Velocidad de la partícula (mm/s)		
	Frecuencia <10 Hz	Frecuencia 10-50 Hz	Frecuencia 50-100 Hz
Edificios con fines comerciales, industriales	20	20 a 40	40 a 50
Casas y edificios	5	5 a 15	15 a 20
Estructuras sensibles a vibración	3	3 a 8	8 a 10

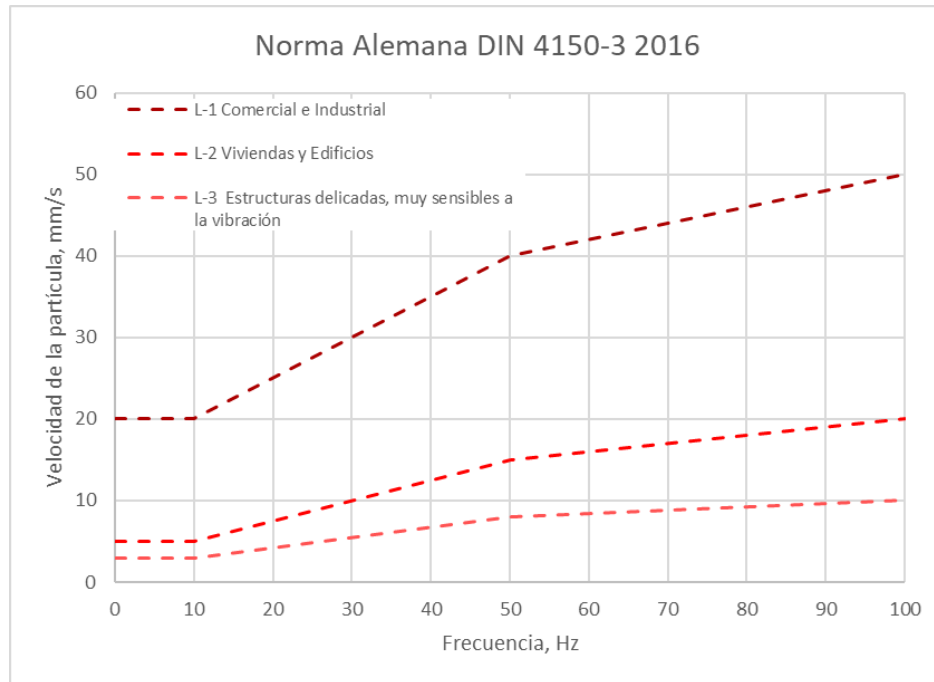


Figura 3.12 Representación gráfica de la Tabla 3.1. Efectos de vibración en las estructuras. DIN 4150-3 2016

3.5.2. Reporte de Investigación del Departamento de Minas de los Estados Unidos USBM RI 8507

USBM RI 8507, más allá de ser una norma, es un reporte de investigación que realizó el Departamento de Minas de los Estados Unidos de América (USBM – Bureau of Mines Report of Investigation 8507 /1980: Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration From Surface Mine Blasting) por su nomenclatura en inglés, de los efectos de las vibraciones que son producidas por la mina de carbón Ayshire en Evansville, Indiana, sobre viviendas cercanas. (Siskind, Stagg, Kopp, & Dowding, 1980).

Esta investigación es una de las pioneras en temas de vibraciones ocasionadas por voladuras, sus valores han sido aceptados en todo el mundo para estimar el daño ocasionado por estos trabajos empleadas en este campo de aplicación, son utilizadas únicamente para viviendas. La USBM, establece como su medición la velocidad pico de partícula VPP [mm/s], con la frecuencia asociada a la máxima velocidad pico [Hz].



Consideran una velocidad de partícula máxima de 2in/sec. (50.8 mm/s), a partir de una frecuencia de 40 Hz en adelante, debido a que en estas velocidades ya empiezan a observarse daños, afectando la integridad estructural. Ver (Tabla 3.4 y Figura 3.13).

Tabla 3.4 USBM RI 8507 – 1980

Frecuencia, Hz	Velocidad de la partícula (mm/s)
1	5.08
3	12.7
10	12.7
40	50.8
100	50.8

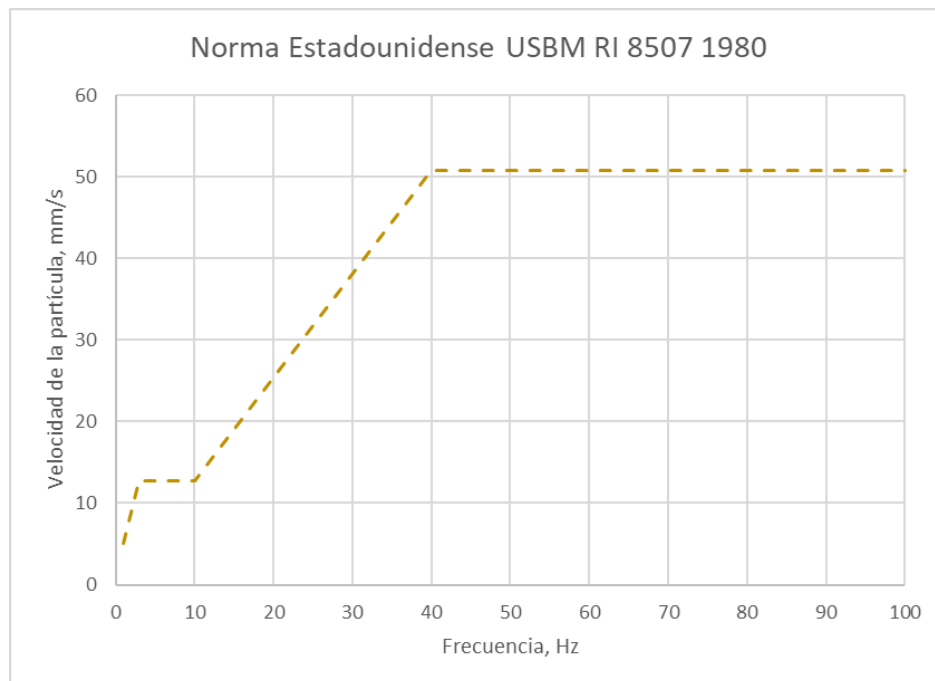


Figura 3.13 Velocidad de la partícula USBM RI 8507 1980

3.5.3. Norma Española UNE 22-381-1993

El objetivo de esta norma es establecer un procedimiento de estudio y control de vibraciones producidas por voladuras con explosivos y transmitidas por el terreno. Su campo de aplicación se puede clasificar en:

- trabajos de explotación en minas y canteras;
- trabajos de construcción en obras públicas,
- trabajos de demolición y especiales,

Su clasificación de las estructuras a efectos de la aplicación del criterio de prevención de daños es el siguiente:

1. Grupo I: Edificios y naves industriales ligeras con estructuras de hormigón armado o metálicas.
2. Grupo II: Edificios de viviendas, oficinas, centros comerciales y de recreo, cumpliendo la normativa legal vigente. Edificios y estructuras de valor arqueológico, arquitectónico o histórico que por su fortaleza no presenten especial sensibilidad a las vibraciones.
3. Grupo III: Estructuras de valor arqueológico, arquitectónico o histórico que presenten una especial sensibilidad a las vibraciones por ellas mismas o por elementos que pudieran contener.



Figura 3.14 Orientación de los sensores (Norma Española, 1993)

En la Tabla 3.5 y Figura 3.15 se indican los niveles seguros para el valor pico de la mayor componente de la velocidad de vibración medido en el terreno.



Tabla 3.5 Criterio de prevención de daños Norma UNE 22 381 1993

Frecuencia, Hz	T-I Edificios y naves industriales	T-II casas y oficinas	T- III Estructuras históricas
2	20	9	4
15	20	9	4
75	100	45	20
100	100	45	20

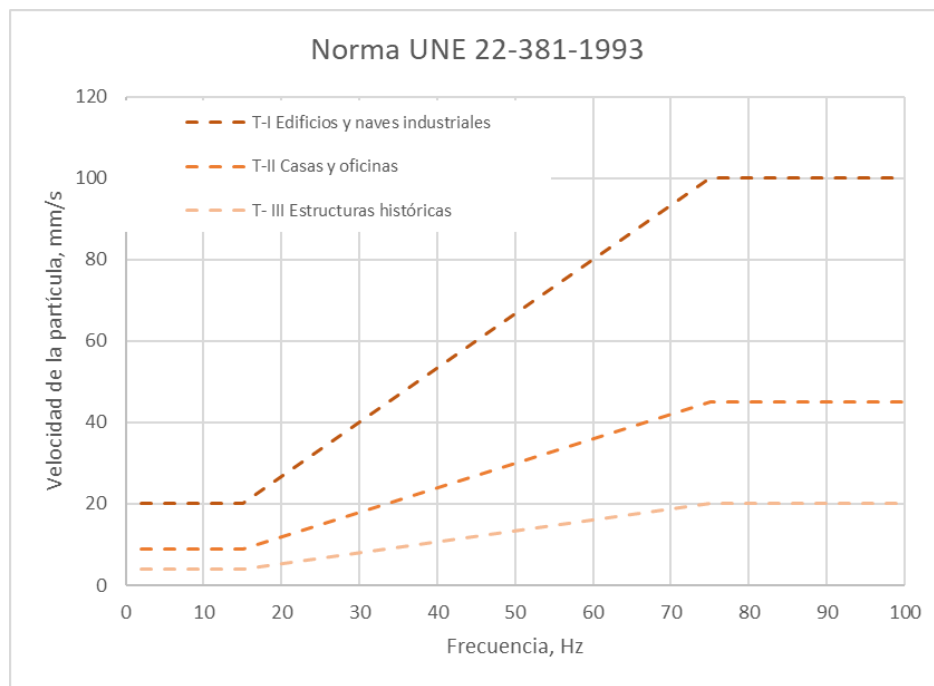


Figura 3.15 Criterio de prevención de daños, Norma UNE 22-381-1993

3.5.4. Norma Británica BS 7385

El objetivo de esta norma es establecer un procedimiento de estudio y control de vibraciones producidas por voladuras

3.5.4.1. BS-7385-1:1990 Evaluación y medición de vibraciones en edificios

Parte 1: Guía para la medición de las vibraciones y la evaluación de sus efectos en los edificios.



Se reconoce cada vez más que los edificios deben soportar vibraciones, y este reconocimiento es necesario tanto en el diseño para la integridad estructural, la facilidad de servicio y la aceptabilidad ambiental como la preservación de los edificios históricos.

Relata que las mediciones de vibración en un edificio deben llevarse a cabo para diversos fines:

- reconocimiento del problema
- vigilancia de control
- documentación
- diagnóstico.

Cuando se ha establecido que los niveles requieren de una investigación más profunda, se realizan mediciones para tener bastante información para los procedimientos de mitigación. Traducido de (Institution B. S., 1990).

La evaluación de los efectos de las vibraciones en los edificios está dirigida principalmente a la respuesta estructural, e incluye métodos analíticos apropiados en los que se puede definir la frecuencia, la duración y la amplitud. Esta norma internacional sólo trata de la medición de las vibraciones estructurales y excluye la medición de la presión sonora en el aire y otras fluctuaciones de presión, aunque se tenga en cuenta la respuesta a las excitaciones suyas. Traducido de (Institution B. S., 1990).

La respuesta estructural de los edificios depende de la excitación; para ello, esta norma internacional examina los métodos de medición en función de la fuente, es decir, la frecuencia, la duración y las amplitudes inducidas por cualquier fuente, como los terremotos, las explosiones, los efectos del viento, los estampidos sónicos, la maquinaria interna, el tráfico, las actividades de construcción y otras. Traducido de (Institution B. S., 1990).

Indican que los tipos de vibración se clasifican en:

- deterministas
- aleatorias.



La gama de frecuencias de las vibraciones depende de la distribución del contenido espectral en la gama de frecuencias de la excitación y de la respuesta mecánica del edificio. Para simplificar, esta norma internacional trata de las frecuencias que van de 0,1 Hz a 500 Hz; cubre la respuesta de los edificios de una amplia variedad y de los elementos de construcción a la excitación por causas naturales (viento y terremoto) y por causas antropogénicas (construcción, voladuras, tráfico). La maquinaria interna puede requerir el registro de frecuencias más altas. Traducido de (Institution B. S., 1990).

La mayoría de los daños en los edificios por causas antropogénicas se producen en el rango de frecuencias de 1 Hz a 150 Hz. Las fuentes naturales, como los terremotos, suelen contener energía a frecuencias más bajas en el rango de 0.1 Hz a 30 Hz con intensidades perjudiciales. El viento La excitación del viento tiende a tener una energía significativa en el rango de frecuencias de 0.1 Hz a 2 Hz. Los niveles de vibración de interés van desde unos pocos hasta varios cientos de milímetros por segundo, dependiendo de la frecuencia. Traducido de (Institution B. S., 1990).

Influencia del suelo

La evaluación de estos efectos de interacción se justifica a veces en el caso de las vibraciones provocadas por el hombre; dicha evaluación exige que se determine la velocidad de la onda de cizallamiento o el módulo de rigidez dinámica en un volumen apropiado de material del suelo. Traducido de (Institution B. S., 1990).

Los cimientos sobre suelos y rellenos pobres pueden sufrir asentamientos o pérdidas de capacidad portante debido a las vibraciones del terreno. El riesgo de que se produzcan estos efectos está en función de la granulometría del suelo, su uniformidad, la compactación, el grado de saturación, el estado de tensión interna, así como la aceleración multiaxial máxima y la duración de la vibración del suelo. Las arenas sueltas, sin cohesión y saturadas son especialmente vulnerables y, en circunstancias extremas, pueden circunstancias extremas pueden sufrir licuefacción. Este fenómeno debe tenerse en cuenta a la hora de evaluar las vibraciones y explicar sus efectos. Traducido de (Institution B. S., 1990).



Método de evaluación de datos

Un análisis de respuesta completo con fines predictivos requiere información sobre detalles estructurales y condiciones que normalmente no se pueden obtener fácilmente. Por lo tanto, un investigador puede necesitar tener un método apropiado para evaluar la severidad de la vibración de una estructura o componente con respecto a la probabilidad de daño. En tal evaluación, se deben tener en cuenta los siguientes factores:

- a. frecuencias resonantes de estructura básica y almohadillas de componentes (paredes, pisos, ventanas);
- b. características de amortiguamiento de la estructura básica y las almohadillas de los componentes;
- c. tipo de construcción, su estado y propiedades de los materiales;
- d. características estructurales espectrales;
- e. características de excitación;
- f. forma desviada;
- g. no linealidad en la respuesta de amplitud.

Análisis de ingeniería

Cuando estructuras complejas de vital importancia se ven sometidas a una excitación vibratoria de una magnitud que requiere una consideración seria de las consecuencias, es necesario evaluar el comportamiento estructural de forma más detallada. La instrumentación que monitoriza el historial temporal debe montarse en varios lugares para garantizar que no se superan los valores específicos para esa estructura. Traducido de (Institution B. S., 1990).

Si la función de transferencia entre el suelo y la cimentación es motivo de preocupación, debe realizarse un registro simultáneo en el exterior y en la cimentación. La posición de registro en la cimentación se sitúa en un punto de la pared principal a nivel de la planta baja o del sótano. El número de puntos de medición y su ubicación deben definirse y modificarse en función de las características del edificio y de las observaciones realizadas durante el control. Si es posible, deben determinarse las frecuencias naturales de los edificios. Traducido de (Institution B. S., 1990).



En el caso de las vibraciones que pueden reproducirse durante un tiempo suficiente, pueden utilizarse los mismos transductores para los distintos puntos, manteniendo un punto de referencia en el nivel de incidencia cerca de la fuente. Para las estructuras de vital importancia, debe realizarse un análisis de la respuesta y una estimación de la carga de la estructura. Un análisis de ingeniería completo requiere un sistema que permita estimar la frecuencia a $\pm 1\%$ y la amortiguación a $\pm 10\%$. Traducido de (Institution B. S., 1990).

Categorías de estructuras

Grupo 1. Edificios antiguos y viejos o estructuras construidas tradicionalmente

Los tipos de edificios considerados en este grupo pueden dividirse en los dos subgrupos siguientes

- a) edificios antiguos o viejos;
- b) todos los edificios modernos construidos en estilo antiguo y tradicional utilizando tipos de materiales, métodos y mano de obra tradicionales.

Este grupo, por lo general, es de construcción más pesada y tiene un coeficiente de amortiguación muy alto, por ejemplo, debido al mortero o al yeso blando. Este grupo también incluye las estructuras tradicionalmente resistentes en zonas sísmicas. Los edificios de este grupo rara vez tienen más de seis plantas. Traducido de (Institution B. S., 1990).

Grupo 2. Edificios y estructuras modernas

Los tipos de edificios considerados en este grupo son todos de estructura moderna que utilizan materiales relativamente duros unidos en todas las direcciones, generalmente de peso ligero en general, y con poco coeficiente de amortiguación. Traducido de (Institution B. S., 1990).

En este grupo se incluyen los edificios con armazón, así como los tipos de muros de carga calculados. Los edificios pueden ser de una o varias plantas. También incluye algunos tipos de edificios más antiguos que se construyen con materiales, ataduras y amortiguación modernos. Traducido de (Institution B. S., 1990).



3.5.4.2. *BS-7385-2: 1993 Evaluación y medición de vibraciones en edificios*

Parte 1: Guía de niveles de daños por vibraciones en el suelo

Esta parte de la norma BS 7385 establece valores orientativos para las vibraciones en los edificios basados en los niveles de vibración más bajos por encima de los cuales se ha demostrado de forma creíble la existencia de daños. Su objetivo es proporcionar un procedimiento estándar para la medición, el registro y el análisis de las vibraciones en los edificios, junto con un registro preciso de cualquier daño que se produzca.

Se consideran las vibraciones de carácter transitorio y continuo. Se ofrece un método de evaluación que tiene en cuenta las características de la vibración, el edificio y los datos medidos. Traducido de (Institution B. S., 1993).

Sólo se considera el efecto directo de las vibraciones en los edificios. Los efectos indirectos sobre la estructura del edificio debidos al movimiento del suelo, el movimiento de objetos sueltos dentro de los edificios, la posibilidad de dañar equipos sensibles y el efecto de las vibraciones sobre las personas quedan fuera del ámbito de esta parte de la norma BS 7385. Traducido de (Institution B. S., 1993).

Las fuentes de vibración que se tienen en cuenta son las voladuras (realizadas durante la extracción de minerales o la excavación de la construcción), la demolición, el pilotaje, los tratamientos del suelo (por ejemplo, la compactación), los equipos de construcción, la construcción de túneles, el tráfico rodado y ferroviario y la maquinaria industrial. Traducido de (Institution B. S., 1993).

Los valores orientativos de la

Tabla 3.6 se refieren principalmente a las vibraciones transitorias que no dan lugar a respuestas resonantes en las estructuras y a los edificios de poca altura. Cuando la carga dinámica causada por las vibraciones continuas es tal que da lugar a un aumento dinámico debido a la resonancia, especialmente en las frecuencias más bajas en las que se aplican valores orientativos más bajos, puede ser necesario reducir los valores orientativos de la



Tabla 3.6 hasta en un 50 %. Traducido de (Institution B. S., 1993).

Tabla 3.6 Valores guía de vibraciones transitorias para daños estéticos BS 7385-2-1993

Línea	Tipo de edificio	Pico de velocidad de las partículas del componente en el rango de frecuencia del pulso predominante	
		4 Hz - 15 Hz	Más de 16 Hz
1	Estructuras reforzadas o enmarcadas Edificios industriales y comerciales pesados	50 mm/s a partir de 4 Hz	
2	Estructuras no reforzadas o de entramado ligero Edificios de tipo residencial o comercial ligero	15 mm/s a 4 Hz que aumentan a 20 mm/s a 15 Hz	20 mm/s a 15 Hz, aumentando a 50 mm/s a 40 Hz y más

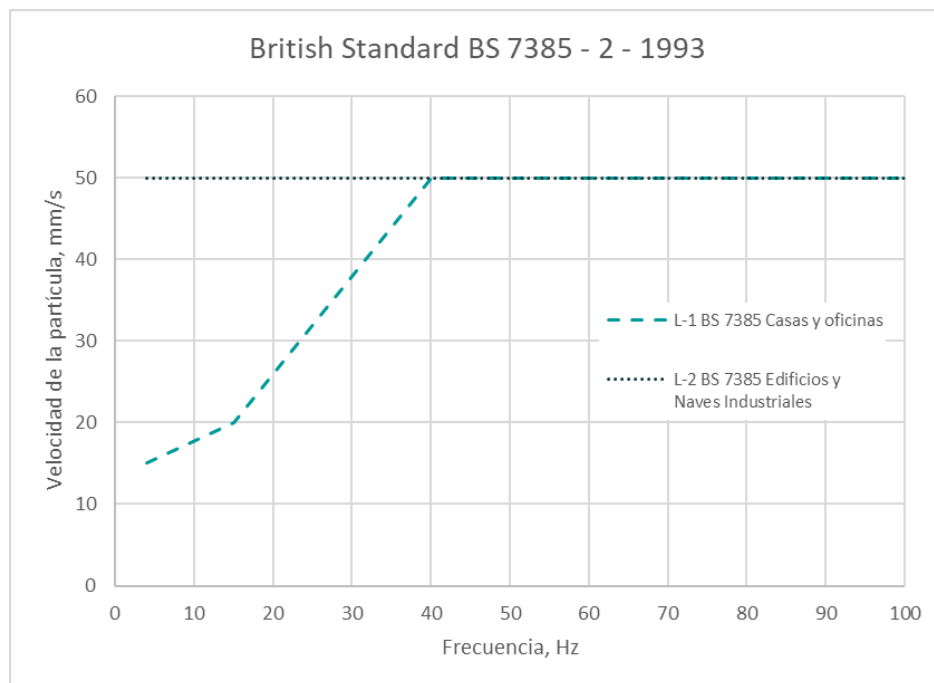


Figura 3.16 Valores guía de vibraciones transitorias para daños estéticos BS 7385-2-1993

3.5.5. Otras normas

El objetivo de esta norma es establecer un procedimiento de estudio y control de vibraciones producidas por voladuras



3.5.5.1. Propuesta de una Norma por parte del Instituto de Geofísica, UNAM 2017

Este artículo técnico, hace mención sobre la medición de vibraciones sísmicas ambientales del suelo, definidas como ruido sísmico, las cuales son ocasionadas por la operación de maquinaria y el paso continuo de vehículos pesados en zonas aledañas a obras relacionadas con la construcción de la Línea 12 del Sistema de Transporte Colectivo, STC – Metro, así como la Autopista Urbana Sur de la Ciudad de México.

Realizando las mediciones de vibración, y aplicándolas a normas nacionales e internacionales, se hicieron mediciones llevando a cabo investigaciones bibliográficas para hacer una comparación de estas mediciones con los estándares técnicos. Emplearon las siguientes normas para su caso de estudio (Tabla 3.7). (Suárez, Yañez, Farraz, & Novelo Casanova, 2017).

Tabla 3.7 Normas Utilizadas empleadas (I. Geofísica, 2017).

País	Nombre de la norma	Año de última revisión
Alemania	DIN 4150	2011
Escocia	PAN 50	2000
EUA	USBM RI 8507	1980
EUA	OSM 817.67	1983
España	UNE 22.381.93	1993
Reino Unido	BS 7385	1993
Suecia	SS 460 48 46	1991
Suiza	SN 640 312a	1992

NOTA: La norma alemana DIN 4150-2011 y DIN 4150-2016 (vigente), no cuenta con algún cambio en los estándares técnicos. Las normas que están sombreadas de color gris, son las utilizadas en este trabajo de investigación.

Debido al incremento de número de obras civiles en zonas urbanas, ha aumentado el número de estructuras que están sometidas a solicitudes de vibraciones, por esta razón, la exposición de estructuras y de la población para este tipo de vibraciones producidas por el ser humano, se ha incrementado considerablemente.



Señalan que las normas y recomendaciones emitidas por autoridades mexicanas contrastan con lo prescrito en la mayoría de las normas internacionales vigentes, donde se definen niveles de velocidad máxima de partícula del suelo que son aceptables en un rango de frecuencias de 1 a 100 Hz. Por lo que, al realizar su investigación correspondiente, y a las normas existentes en el mundo, seleccionan las más relevantes y pertinentes para su posible aplicación en la República Mexicana además de proponer un estándar para la Ciudad de México, con el cual se comparen las mediciones realizadas en su proyecto y en futuras obras que permita normar la velocidad máxima del terreno que es permisible en obras civiles y voladuras.

Elaboraron un resumen gráfico de las normas internacionales mencionadas en la (Tabla 3.7), y haciendo observación a la Figura 3.17 podemos observar la norma propuesta transmitida en la línea segmentada de color morado.

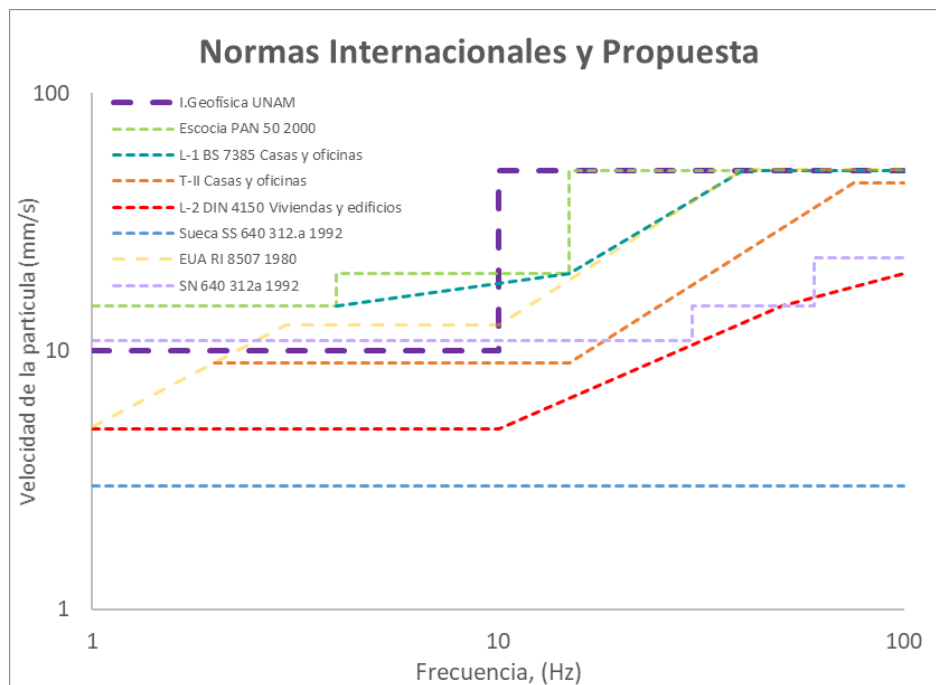


Figura 3.17 Resumen gráfico de las Normas Internacionales listadas en la Tabla 3.7.

De acuerdo con las normas internacionales, y haciendo énfasis en sus resultados y recomendaciones de su investigación, se observa que la propuesta establece un valor promedio de velocidad pico aceptable de aproximadamente 10 mm/s entre 1 y 10 Hz. Entre los 10 y 100 Hz el valor máximo de velocidad de partícula aceptable es de 50 mm/s en



promedio; mencionando que arriba de estos valores pueda existir o existe el peligro de provocar daños estructurales en edificaciones vecinas. En la Tabla 3.8 y Figura 3.18, se puede apreciar la recomendación técnica como norma para ser empleada en el país.

Tabla 3.8 Propuesta por parte del Instituto de Geofísica, UNAM 2017

Instituto de Geofísica UNAM, 2017	
Frecuencia, Hz	Velocidad de la partícula. mm/s
1	10
10	10
10	50
100	50

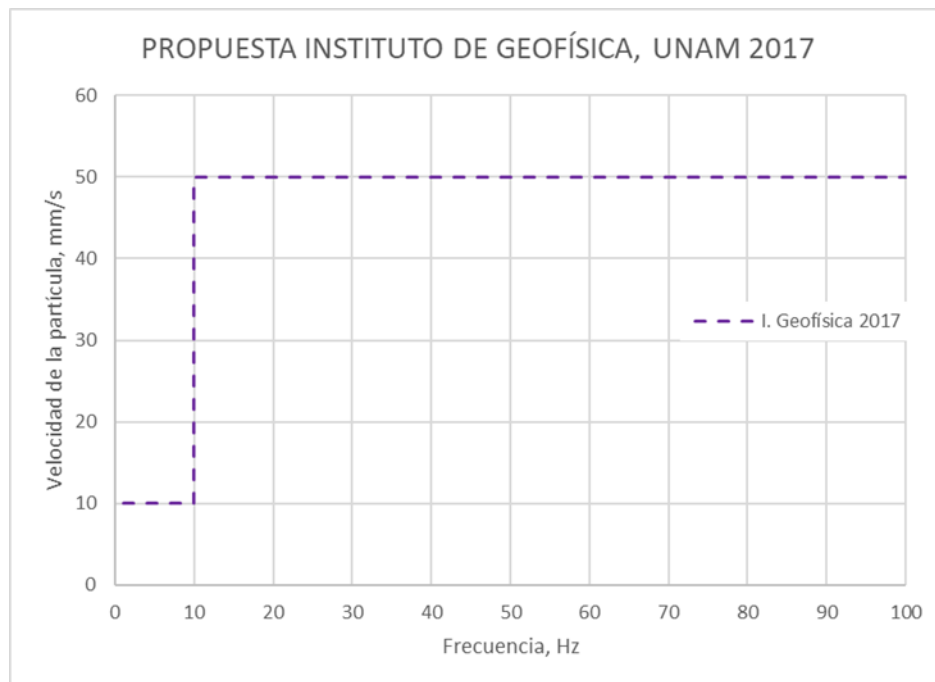


Figura 3.18 Propuesta por parte del Instituto de Geofísica, UNAM 2017

3.5.5.2. Escocia: Normativa PAN50

Se basa en los estándares británicos (BS) enfocado a vibraciones, provee sugerencias para las autoridades encargadas de planificación, así como la industria minera de los efectos



de voladura y límites aceptables en este tipo de trabajos, las áreas en las que actúa esta norma implican sobre los impactos sobre el medio ambiente, construcciones y personas.

Esta normativa Escocesa sólo toma en cuenta las estructuras residenciales, sus valores representativos se basan en criterios de daños estéticos, menores o estructurales. Su objetivo es poder evaluar el cumplimiento con normas internacionales utilizando la situación más crítica, ya que esta norma no contempla los tipos de estructuras.

A pesar de considerar un límite permisible de 15 mm/s a <4 Hz, de 20 mm/s entre 4-15 Hz y de 50 mm/s >15 Hz, esta norma recomienda limitar el nivel de vibraciones mínimas a 6 mm/s para optimizar el número de vibraciones.

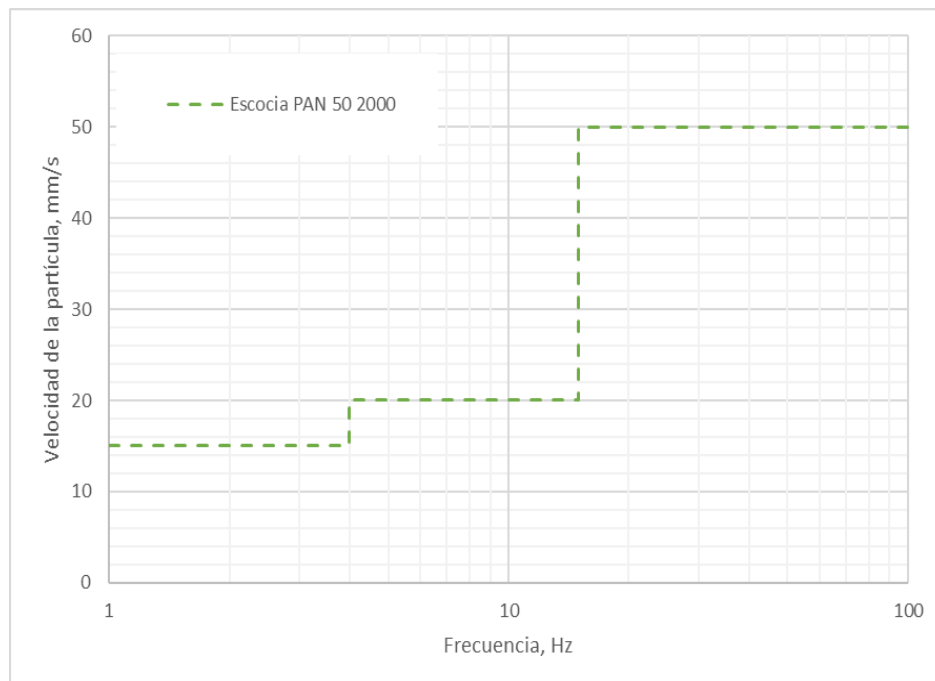


Figura 3.19 Normativa Escocesa PAN 50 2000

3.5.5.3. Suiza: Normativa SN-640-312a

Esta normativa fue elaborada para ser aplicada a las vibraciones causadas por voladuras, maquinaria y tráfico que causan daños estéticos a la edificación. No toma en



cuenta la percepción humana, los daños en equipo médico y los efectos en suelos blandos. Contempla frecuencias desde 8 hasta 150 Hz. Los valores máximos establecidos en esta norma dependen de varios parámetros como la cantidad de solicitaciones y la susceptibilidad de la edificación.

Los valores pico de partícula son de 11.2 mm/s en frecuencias entre 8 a 30 Hz, de 15 mm/s entre 30 – 60 Hz y de 22.5 mm/s mayores a 60 Hz (Ver Figura 3.20).

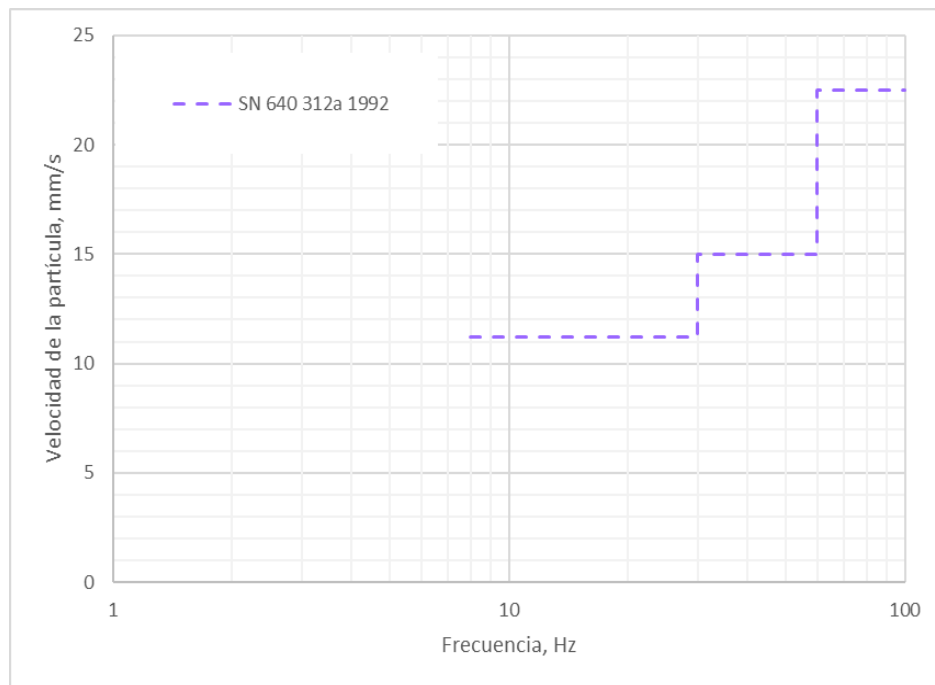


Figura 3.20 Normativa Suiza 640 312a 1992

3.5.5.4. Portuguesa: Normativa NP 2074 2015

El objetivo de esta norma es establecer un criterio para limitar los valores de las magnitudes físicas características de las vibraciones impulsivas con un número limitado de ocurrencias con el fin de prevenir la aparición de cualquier daño en las estructuras. Indican que quedan excluidas la evaluación de la molestia por percepción humana y evaluación de la influencia de las vibraciones en equipos sensibles.



Sus valores límite recomendados por esta norma están definidos en función de las frecuencias dominantes y el tipo de estructura. Así como las normativas anteriores, cuentan con tres diferentes tipos de estructuras. I. Sensibles; II. Normales; III. Reforzadas. Haciendo similitud con las normas anteriores, damos por hecho que se relacionan con estructuras históricas, casas y edificios, así como estructuras comerciales. Para el caso de las Estructuras normales, cuentan con una velocidad de partícula de 3 mm/s en frecuencias de 0.001 a 10 Hz, de 6 mm/s entre 10 a 40 Hz y de 12 mm/s de 40 a 100 Hz. Ver (Figura 3.21).

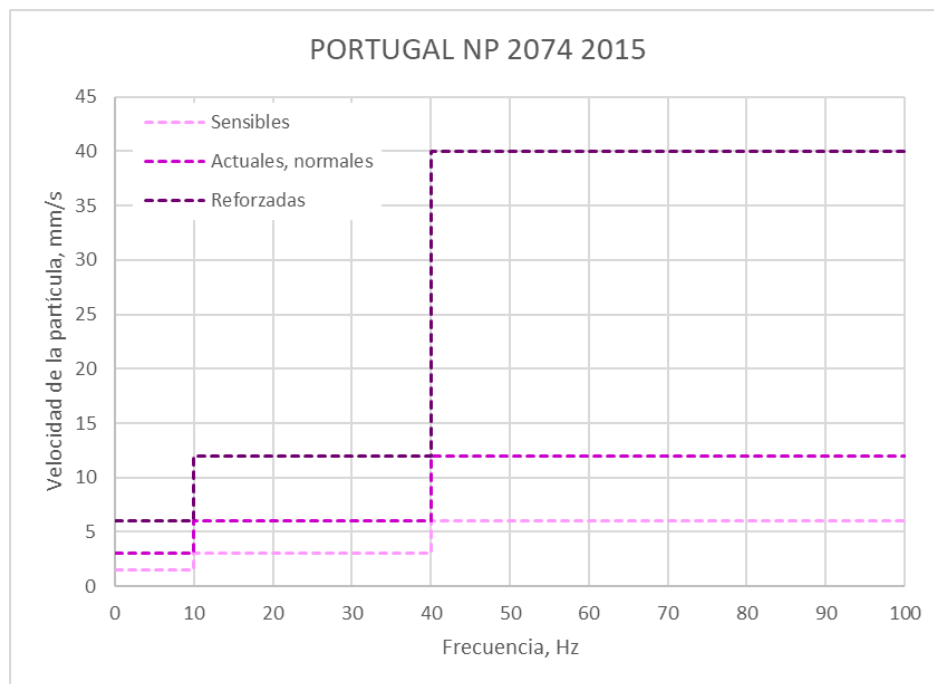


Figura 3.21 Normativa Portuguesa NP 2074 2015

3.6. Ecuaciones de movimiento

Los movimientos vibratorios pueden entenderse como la excitación dinámica de un sistema elástico, como el suelo o una estructura, dando como resultado un movimiento de partículas de las cuales, componen el sistema elástico.

La descripción de las vibraciones en el suelo y en las estructuras, el movimiento de una partícula, es decir, un punto sobre el suelo o estructura), se utilizan los conceptos de



desplazamiento de partículas, velocidad y aceleración las cuales, se emplean para describir la respuesta del suelo o la estructura debido a una excitación.

Aunque el desplazamiento es más fácil de entender que la velocidad o la aceleración, rara vez se usa para describir las vibraciones transmitidas por el suelo y la estructura, porque la mayoría de los transductores para medir la vibración miden directamente la velocidad o aceleración, no desplazamiento. El movimiento vibratorio es descrito comúnmente para identificar la Velocidad Pico de Partícula (PPV por sus siglas en inglés).

La Velocidad Pico de Partícula (Peak Particle Velocity) es generalmente aceptado como el descriptor más apropiado para evaluar el impacto de daños a las estructuras.

El desplazamiento generalmente es medido en (mm), la velocidad se mide en milímetros por segundo (mm/s) mientras que la aceleración se mide en milímetros por segundo al cuadrado (mm/s²).

Si la frecuencia y amplitud de desplazamiento, las amplitudes de velocidad o aceleración se conocen, las restantes pueden determinar mediante la integración.

La fórmula del desplazamiento es el producto de la velocidad con respecto al tiempo

$$d = vt$$

La velocidad (V) de la masa se determina tomando el tiempo derivado del desplazamiento, que es equivalente multiplicar el desplazamiento por $2\pi f$.

$$v = \frac{d}{t} \quad v = 2\pi f d$$

La aceleración (A) de la masa se puede determinar tomando la segunda derivada del desplazamiento con respecto al tiempo, o la derivada de la velocidad con respecto al tiempo:

$$a \left[\frac{mm}{s^2} \right] = 2\pi f v \quad a = 4\pi f d$$



3.7. Acelerogramas

Un acelerograma, es una representación temporal (en términos de aceleración, velocidad o desplazamiento) que experimenta el suelo en un determinado punto durante un movimiento sísmico.

Los valores de la aceleración se obtienen mediante la instrumentación acelerométrica, que registra las aceleraciones del suelo a través de tres direcciones perpendiculares: dos horizontales y una vertical. Debido a que la variación de la aceleración es muy irregular en el tiempo, se sugiere que la toma de datos se realice en intervalos muy pequeños de tiempo, generalmente a cada 0.01 segundo.

Estos acelerogramas se caracterizan por ser altamente irregulares y oscilatorios, con pequeñas amplitudes iniciales que crecen rápidamente hasta alcanzar los valores máximos y decrecer igualmente rápido hasta que se detiene el movimiento. La Figura 3.22 muestra un ejemplo de un acelerograma.

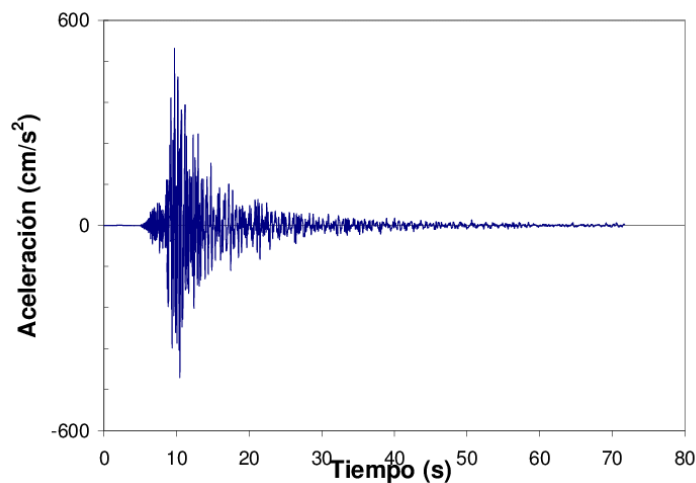


Figura 3.22 Ejemplo de acelerograma

3.8. Espectro de respuesta

El espectro de respuesta máxima (expresada en términos de desplazamiento, velocidad o aceleraciones) que produce una acción dinámica determinada en varios osciladores de 1 GL. Los espectros se utilizan fundamentalmente para estudiar las características del

terremoto, en este caso, el impacto de las vibraciones artificiales y su efecto sobre las estructuras. Las curvas de los espectros presentan variaciones, que resultan de la complejidad del registro de aceleraciones. (Chopra, 2014).

Para construir un espectro de respuesta, es necesario calcular la respuesta dinámica de varios osciladores de 1 GL con diferentes periodos de vibrar y con igual factor de amortiguamiento. Para todos y cada uno de ellos se exhibirá una respuesta diferente. Una vez calculada la respuesta de osciladores, se determina el máximo de cada uno de ellos y se coloca un gráfico en función del periodo de vibración, para obtener así un espectro de respuesta (Figura 3.23). (Chopra, 2014).

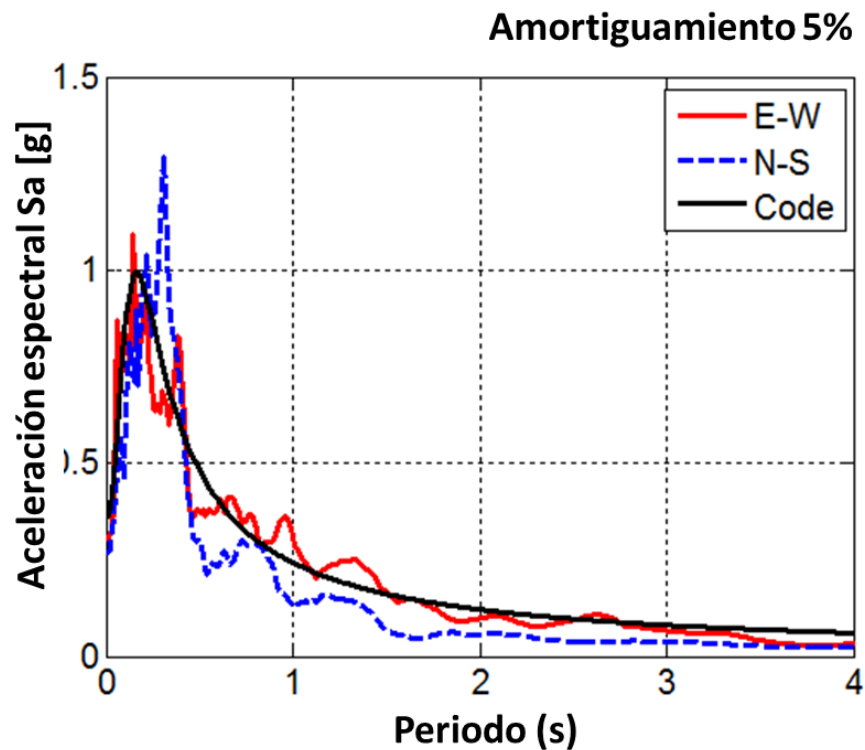


Figura 3.23 Ejemplo de espectro de respuesta



4. MARCO METODOLÓGICO

4.1. Instrumento para medir la velocidad pico de partícula

Debido a que las vibraciones artificiales, son similares a los sismos, pero de mucho menor intensidad, las vibraciones suelen presentarse de manera periódica debido a los trabajos de construcción o de tráfico terrestre.

Para ello, se debe instrumentar las zonas aledañas que estén expuestas a estas vibraciones, generalmente, cercanos a inmuebles, incluso instalarlos dentro de los edificios, esto para determinar su comportamiento y así garantizar la seguridad y confiabilidad de la estructura.

A estos efectos, el equipo necesario para la instrumentación de un edificio se utiliza un acelerógrafo que es un instrumento que posee tres sensores ortogonales y registran el movimiento del suelo en las componentes Norte-Sur, Este-Oeste y Vertical. Este equipo permite determinar la duración del movimiento sísmico en sitio y los valores de aceleración máxima a los que ha sido sometida la estructura. A partir de los acelerogramas es posible determinar los espectros de respuesta correspondientes a un lugar y a un sismo específico.

Los acelerogramas proporcionan información específica acerca de la forma en cada estructura responde ante sismos y es la forma más precisa que existe para conocer su respuesta, debido a que se parte de mediciones hechas por un instrumento.

4.1.1. Instrumentación en edificios

La forma apropiada para instrumentar un edificio, como se puede apreciar en la Figura 4.1 es la instalación de un acelerógrafo en la azotea, Roof Garden o piso superior (A), el sótano en caso de tener, o como ejemplo algún estacionamiento público (B), y C, fuera del inmueble. Los tres instrumentos deben estar interconectados que cuando cualquiera de este empiece a registrar los movimientos artificiales, los otros dos también lo hagan.

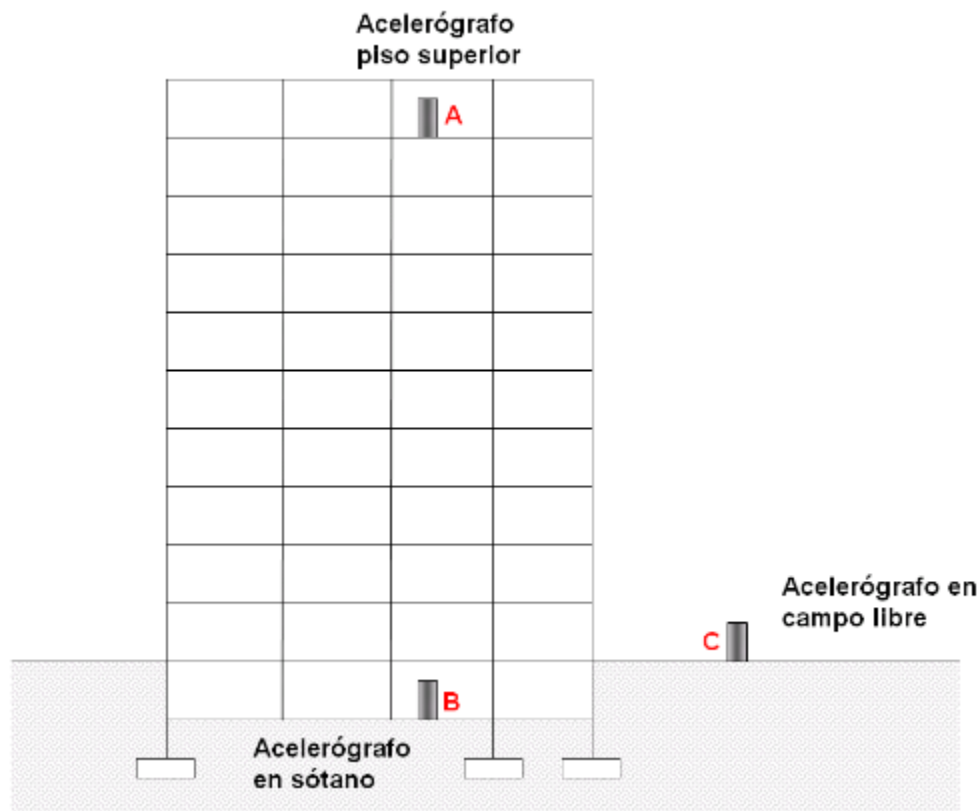


Figura 4.1 Instrumentación en un inmueble (Universidad de Costa Rica, 2023).

Los registros en A y B permiten estudiar el comportamiento del edificio, de manera que se analice la forma en que se mueven los pisos superiores con respecto a los inferiores. La importancia del acelerógrafo en C es que registra el movimiento del suelo sin interferencia de la estructura (denominado como campo libre) y es una referencia muy importante para complementar este análisis. Con esto se puede analizar el comportamiento del todo el edificio con respecto al suelo donde ha sido construido. (Universidad de Costa Rica, 2023)

4.1.2. Equipos de instrumentación

Hay una variedad de acelerógrafos que pueden ser empleados para monitorear las vibraciones. Entre ellos se encuentran los aparatos Kinematics ETNA 2, un acelerómetro Triaxial Ampere, Acelerómetro Ref Tek 130 – SMHR de la marca Isetek, A-cclerograph de

la A-MAQ, entre otros. Este tipo de aparatos deben arrojar archivos en formato .evt (Archivo de eventos).



Figura 4.2 Acelerógrafo Kinemetrics ETNA 2. (Kinemetrics Inc, 2017).

Comúnmente, el equipo acelerométrica más utilizado para el monitoreo de vibraciones, es el Kinemetrics ETNA 2. Que cuenta con las siguientes características:

- rango dinámico de 155 dB+;
- resolución 24 bits;
- componentes: acelerómetros de equilibrio de fuerzas triaxiales EpiSensor, orientados ortogonalmente;
- GPS Incorporado;
- banda ancha hasta 200 Hz;
- escala seleccionable hasta 4g;
- frecuencias de muestreo primeros hasta 500 sps.

El instrumento Kinemetrics es de los más modernos y de los mejores en su tipo, cuentan con el software requerido para transferir los datos en campo a un equipo de cómputo capaz de cuantificar los parámetros de desplazamiento, velocidad y aceleración de cada una de las tres



componentes, además del amortiguamiento, la velocidad pico de partícula y los espectros de respuesta. (Kinematics Inc, 2017).

Estos instrumentos deben ser calibrados para iniciar las lecturas a partir del momento de su activación. Es importante que la colocación sea en una superficie plana, o en su caso, nivelar el suelo de manera que quede a nivel. Además, es indispensable que esté orientado al norte para una mejor lectura.

También, es importante proteger el Acelerógrafo del clima, la luz solar directa y el robo o vandalismo. El diseñar una Caja de estación sísmica, es ideal para evitar estos inconvenientes. En sitios de suelo más blando, es recomendable que se utilice una estructura protectora más pesada debido a las interacciones suelo-estructura durante los sismos, ya que podría degradar la precisión de los datos.

4.2. Programas para determinar la velocidad pico de partícula

Los archivos .EVT es un archivo de registro de eventos, la cual, recopila información sobre los eventos que suceden en un sistema informático. Estos archivos contienen información como la fecha, hora, y detalles de los eventos que han sucedido en el sistema, como errores, advertencias o notificaciones.

Para la lectura de archivos .evt, podemos encontrar:

- Software Windows Event Viewer de Microsoft;
- Programa AcelSin;
- Visor de ondas View Wave;
- Degtra;
- Prism;
- Seismograms Analyzer-E.

Es importante que estos programas, puedan recopilar la información de los acelerogramas registrados. Cabe mencionar que, para tener una mejor lectura de datos, los

acelerógrafos sean ajustados a que registren las vibraciones cada hora, para tener un mejor control.

El programa recomendado para registrar estos eventos sísmicos, es el software ViewWave creado por el Japonés Toshihide Kashima, esta herramienta de cómputo es un visor simple para registrar los datos de aceleración velocidad o desplazamiento de los movimientos sísmicos artificiales o naturales. Lee los archivos de datos y muestra las formas de onda de aceleración, las de velocidad y desplazamiento, así como los espectros de Fourier y los espectros de respuesta se pueden calcular y mostrar. (Kashima, 2021).

Este programa interpreta los registros de manera sencilla, se pueden controlar los tamaños y las apariencias de los gráficos como se desee. (Kashima, 2021).

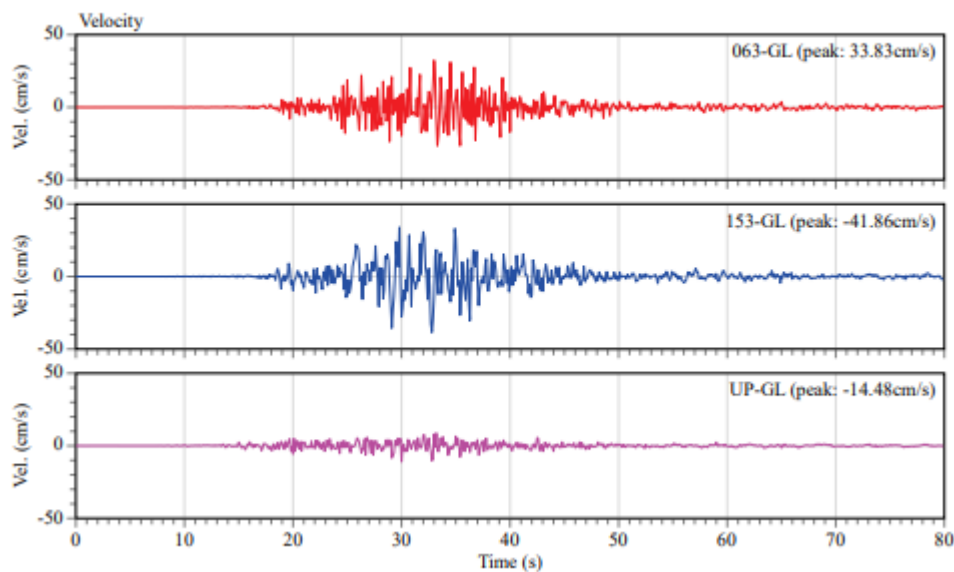


Figura 4.3 Registro de velocidades. Software ViewWave (Kashima, 2021).



5. PROPUESTA PARA MITIGAR EL IMPACTO DE VIBRACIONES ARTIFICIALES

Derivado del estudio realizado en el MARCO TEÓRICO (Apartado 2), se realiza una comparativa sobre las normativas internacionales vigentes, en la cual, se muestra en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Comparativa de normativas que regulan las Vibraciones Artificiales

ESTATUTO INTERNACIONAL	FUNDAMENTADO EN	MÉTODO	APLICADO EN	RETROALIMENTACIÓN
NORMA DIN 4150-3 2016	Pioneros en estudiar las vibraciones artificiales	Experimental	Voladuras, vibraciones por construcción	Estándar más estricto y comúnmente utilizado en México en términos de vibraciones artificiales
USBM RI 8507 1980	Pioneros en estudiar las vibraciones artificiales	Experimental	Explosión de minas, voladuras	Estándar comúnmente utilizado para los trabajos de voladura en zonas mineras
UNE 22381 1993	DIN-4150 1980	Experimental	Voladura con explosivos, Obras civiles, demoliciones	No considera molestias a humanos
BS 7385-2 1993	USBM RI 8507	Experimental	Medición de niveles de daño en edificio por vibraciones del suelo	No cubre chimeneas, puentes ni estructuras subterráneas como cámaras, túneles y tuberías
ESCOCIA PAN 50 2000	BS 7385 1993	Analítico y experimental	Trabajos por voladura	No considera molestias a humanos
SUIZA SN-640-312a 1992	Estudio	Analítico y Experimental	Voladuras, máquinas de construcción, tráfico terrestre	No considera molestias a humanos
PORTUGAL NP 2074 2015	Actualización a NP 2074 1983	Experimental	Trabajos por el uso de explosivos	No considera molestias a humanos
PROPUESTA I. GEOFÍSICA UNAM 2017	Recopilación de Normativas internacionales vigentes	Analítico y experimental	Trabajos por tráfico terrestre	Propone un Umbral para controlar las vibraciones artificiales y ruido ambiental



A partir de esto y con base en la experiencia recabada en todas las referencias utilizadas en esta investigación, se propone un límite permisible para controlar el impacto de vibraciones artificiales, la cual, cuenta con 2 umbrales:

1. Correspondiente a las estructuras comerciales e industriales.
2. Compete a las estructuras históricas, casas y edificios.

El motivo y la necesidad por realizar la creación de dos (2) ramales, a excepción de tres (3) donde comúnmente lo manejan las normativas internacionales, es por lo siguiente:

Para el caso de las estructuras históricas, casas y edificios es por el diseño que hay en la República Mexicana, la mayoría de los conjuntos habitacionales no todos cuentan con la posibilidad de contratar servicios de arquitectura e ingeniería (debido a los altos precios para realizar contratos a empresas constructoras, por ende, mucha población construye adquiriendo los servicios de maestros de obra), por lo que el diseño de la mayoría de las casas no está apegado al reglamento de construcción, aún, cumpliendo en el diseño, para el caso de las estructuras históricas, fueron diseñadas con los Reglamentos de Construcción vigentes en su época (el cual el Reglamento de Construcción de la Ciudad de México es completamente diferente), algunas otras, son Patrimonio Cultural de la Humanidad, incluso de México (Protegidos por el INAH), por lo que debemos proteger estas estructuras.

Las vibraciones por maquinaria, las frecuencias que pueden ocasionar las maquinarias pesadas, se encuentran alrededor de 20 Hz, y su velocidad de partícula puede variar dependiendo de los trabajos y la intensidad en que se realicen, además del tipo de suelo que hay en sitio.

Las percepciones por vibración humana son perceptibles a partir de una velocidad de 0.1 pulgadas por segundo (2.54 mm/s) y molestas con una velocidad de 0.3 pulgadas por segundo (7.62 mm/s). El límite de seguridad para las vibraciones en estructuras es de 2 pulgadas por segundo (50.8 mm/s).

Finalmente, se proponen los límites máximos permisibles en estructuras de casas y edificios utilizando un valor de velocidad de partícula de 3 mm/s entre 0.01 y 20 Hz, un



desplazamiento de 3 mm/s a 10 mm/s entre 20 y 50 Hz, y un crecimiento de 10 mm/s a 12 mm/s entre 50 y 100 Hz.

Para las estructuras comerciales e industriales, la propuesta cuenta con un valor de velocidad de partícula de 15 mm/s entre 0.01 y 20 Hz, un desplazamiento de 15 mm/s a 30 mm/s entre 20 y 50 Hz, y un crecimiento de 30 mm/s a 35 mm/s entre 50 y 100 Hz para cuidar la integridad estructural.

Tabla 5.2 Límites recomendados para controlar el impacto de vibraciones artificiales

PROPUESTA SUGERIDA POR EL AUTOR		
Frecuencia	I. Estructuras comerciales e industriales	II. Estructuras históricas, casas y edificios
0.01	15	3
20	15	3
50	30	10
100	35	12

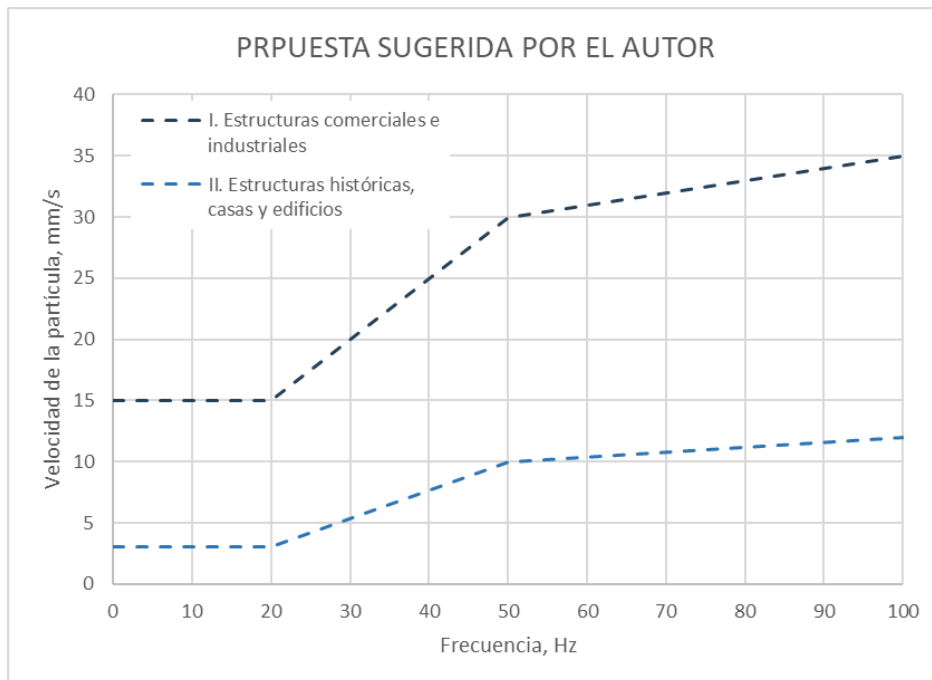


Figura 5.1 Límites recomendados para controlar el impacto de vibraciones artificiales

Realizando una comparación entre todas las normativas internacionales registradas en este trabajo de investigación, enfocadas únicamente para las estructuras de Vivienda y Oficinas.

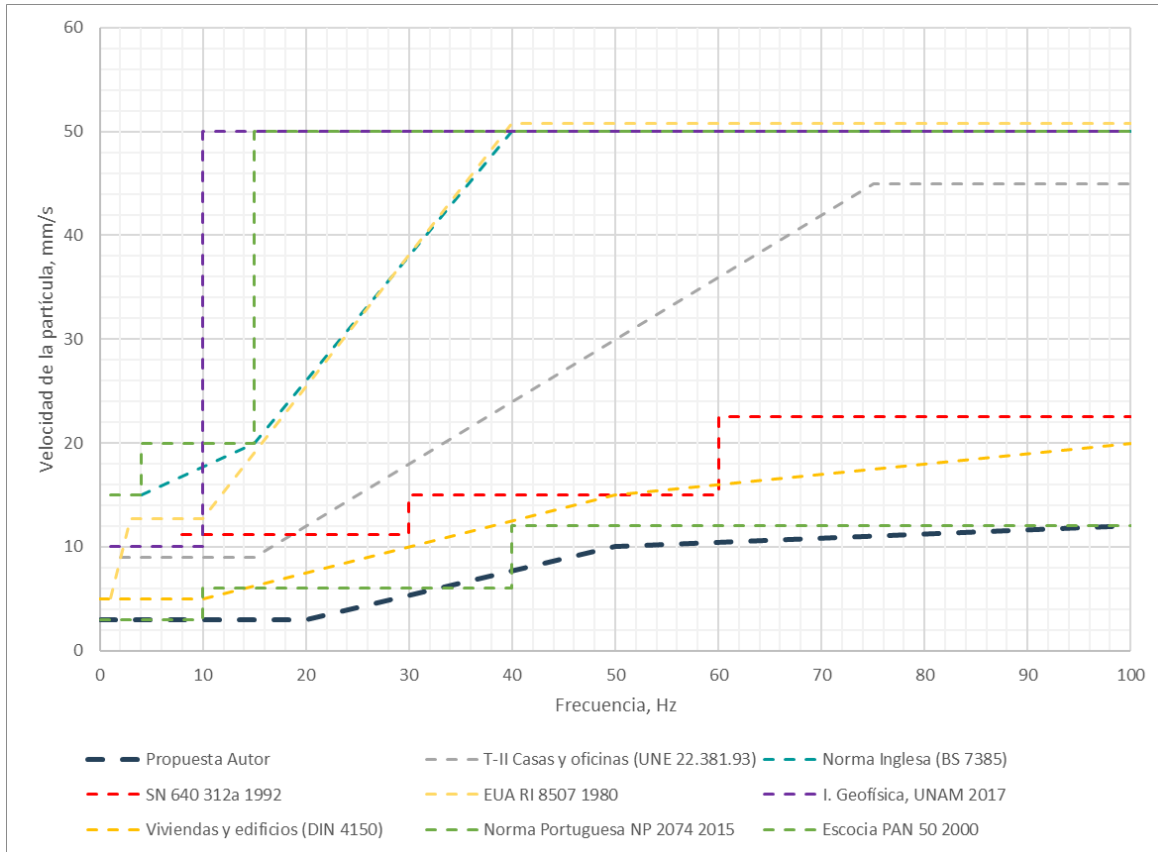


Figura 5.2 Comparación de los códigos internacionales destinada a Estructuras de Vivienda y Oficinas

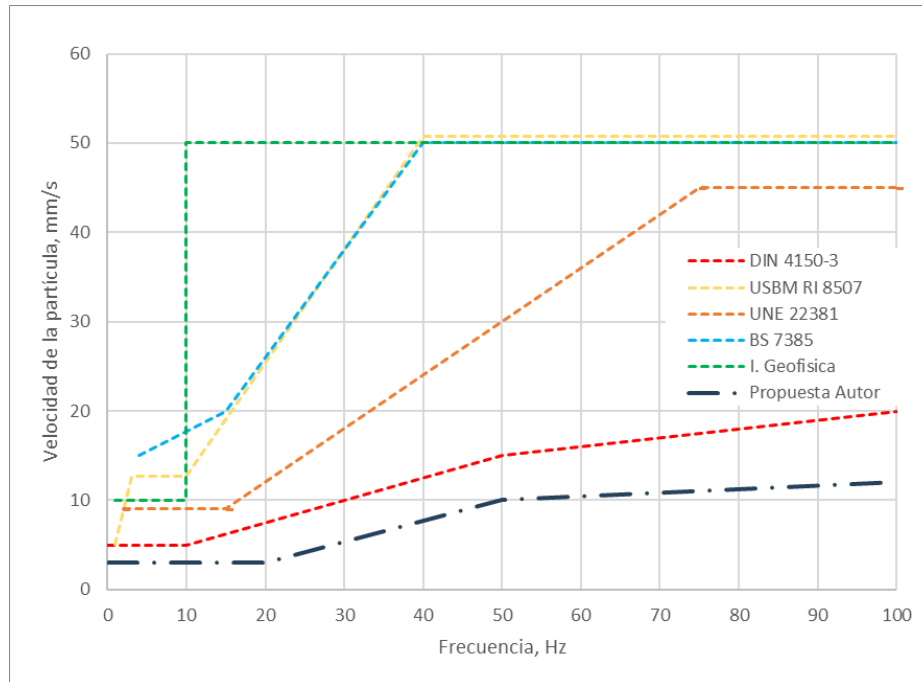


Figura 5.3 Comparativa Internacional empleada en el trabajo de investigación

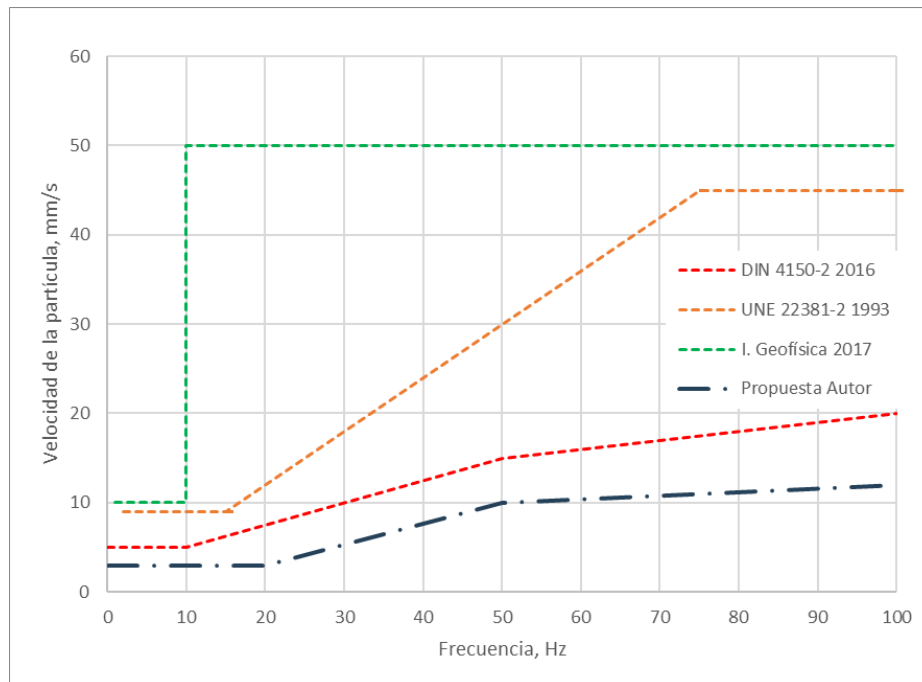


Figura 5.4 Comparativa entre las normativas estrictas, la propuesta por el I. Geofísica y la Propuesta por el autor

6. RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES

Recomendaciones

Este trabajo de investigación es una incentivo para dar hincapié hacia una nueva Norma Oficial Mexicana que regule las vibraciones ocasionadas por el tráfico terrestre y obras civiles.

Se recomienda emplear los estudios de vibraciones artificiales colocando acelerógrafos en zonas densamente pobladas, específicamente en vialidades principales donde se generen embotellamientos, transiten vehículos de carga pesada, así como la colocación de esta instrumentación en edificios aledaños a zonas de construcción pesada (Viaductos elevados, edificios que requieran cimentaciones profundas, ampliación de carreteras, autopistas, túneles, presas, o se amplíen los sistemas de transporte BRT, líneas del Metro, Ferrocarriles, entre otros), así como realizar estudios de este trabajo en una variedad de proyectos de construcción que se efectúen a lo largo de la República Mexicana para enriquecer este reporte de investigación (ver Figura 6.1).



Figura 6.1 Instrumentación en Zonas aledañas a construcciones y vialidades principales

Es importante que, para la creación de una nueva normativa, se deberá continuar con estos trabajos de investigación que deberán ser aplicados al Reglamento de Construcción y a las Normas Técnicas Complementarias actuales para la evaluación de los asentamientos y



deformaciones, así como los estados límite y de falla permisibles por los trabajos constructivos.

También, es indispensable realizar una evaluación a través de un Modelado Numérico de elementos finitos para comparar los datos obtenidos en campo con los que se obtengan de manera teórica y observar la relación que hay en estos.

Para finalizar, sería conveniente considerar la formación de un grupo técnico, integrado por expertos de la iniciativa privada, académicos, asociaciones, cámaras, dependencias gubernamentales, así como los expertos en el tema para proponer la Normativa Mexicana que regule las vibraciones artificiales.

Conclusiones

1. Se observa que todas las normativas internacionales cuentan con la misma similitud, aún sin saber las características geotécnicas y perfiles del suelo donde ellos realizaron sus estudios para establecer sus límites permisibles.
2. El tipo de suelo en el que se encuentra la Ciudad de México es muy complejo (desde construcciones construidas en la zona III. Lacustre hasta en la Zona I. Lomas (aunque en gran parte de esta zona, se encuentra un material de roca o suelo firme incluso depósitos arenosos en estado suelto, blandos y hay presencia de oquedades, cavernas o túneles utilizados para la extracción de material y rellenos no controlados), por lo que el aplicar este trabajo de investigación en Zona Metropolitana del Valle de México será de suma importancia, se deberá observar su comportamiento y estas como se apegan en la propuesta así como su relación con el reglamento de construcción.
3. Los niveles altos de vibración podrían estar relacionados con la implementación y el uso continuo de maquinaria pesada para realizar trabajos de obras civiles, no por tráfico terrestre.
4. Los asentamientos que se efectúen en los trabajos de obra civil se pueden presentar de manera diferencial, los cuales, ocasionan agrietamientos y fallas estructurales en las edificaciones aledañas.



5. Es recomendable que se verifiquen y se hagan estudios donde se va a colocar la instrumentación para determinar la velocidad de partícula por obra civil o tráfico terrestre, ya sea en campo libre o en estructura.
6. En dado caso de colocar la instrumentación en las estructuras, se deberá hacer un estudio del inmueble, desde la cimentación hasta la parte superior, si la construcción fue diseñada por servicios profesionales o de autoconstrucción y si la cimentación de las casas esta desplantada directamente sobre material de relleno, suelo blando, firme o en roca. Para que se pueda elaborar un plan de atención que garantice la estabilidad de las viviendas a largo plazo realizando un trabajo de mejoramiento de suelos para disminuir la vulnerabilidad ante eventos donde se registren vibraciones de esta magnitud.
7. Para la realización de cualquier obra civil, es necesario e indispensable contar con estudios previos complementarios del sitio, además de la realización de estudios de mecánica de suelos actualizado para la verificación de información y así mitigar estos impactos. Además, se recomienda que, en todas las etapas de construcción, se realice un estudio de vibraciones para observar el comportamiento del suelo en tiempo real para determinar su comportamiento y recabar la información dando pauta a una nueva Normativa Oficial Mexicana que regule el nivel de vibraciones ocasionadas por trabajos de esta magnitud.
8. La propuesta realizada para la medición de vibraciones en estructuras históricas, viviendas y oficinas, fue estipulada debido al alto grado de sismicidad en la que se encuentra el país además de que muchos conjuntos habitacionales, o, en su mayoría no fueron diseñados con los reglamentos de construcción o elaboradas por algún profesionista preparado para hacer este tipo de trabajos, como lo son los Responsables de Obra, Ingenieros Civiles, Arquitectos, Ingenieros Arquitectos o afines.
9. Es importante que las afectaciones estructurales por cualquier trabajo de obra civil, requiera una inspección de los edificios y estructuras en la zona de los posibles daños, donde incluya fotografías y mediciones antes y después de las vibraciones, sería útil para gestionar las reclamaciones por daño.
10. Gracias a varios estudios realizados por décadas, se ha encontrado que es conveniente describir la intensidad de la sacudida de vibración por el valor máximo de la velocidad de



partícula. El motivo de esta elección es la correlación entre la velocidad de las partículas y el agrietamiento estético que se explica de forma teórica por el hecho de que la deformación inducida en el suelo durante la vibración es proporcional a la velocidad de las partículas.

11. En zonas donde se presenten estas deformaciones consideradas, es de vital importancia hacer un estudio para una posible aplicación de mejoramiento de suelo en este sitio, para evitar asentamientos prolongados.



REFERENCIAS BIBLIOHEMEROGRÁFICAS

- Athanasopoulos, G., & Pelekis, P. (2000). Ground vibrations from sheetpile driving in urban environment: measurements, analysis and effects on buildings and occupants. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 19, 371-387.
- Barneich, J. (1985). Vehicle induced ground motion. *Vibration Problems in Geotechnical Engineering.*, 187-202.
- Chopra, A. (2014). *Dinámica de estructuras* (Cuarta ed.). México: Pearson.
- Colaco, A., Ferreira, M., & Costa, P. (2022). Empirical, Experimental and Numerical Prediction of Ground-Borne Vibrations Induced by Impact Pile Driving. *Vibration*, 5(1), 80-95.
- Comunidad de Madrid. (2012). *Ruido y vibraciones en la maquinaria de obra* (Primera ed.). Madrid: Biblioteca virtual.
- Costanzo, A., Falcone, S., La Piana, C., Lapenta, V., Musacchio, M., Sgamellotti, A., & Buongiorno, M. (2022). Laser Scanning Investigation and Geophysical Monitoring to Characterise Cultural Heritage Current State and Threat by Traffic-Induce Vibrations: The Villa Farnesina in Rome. *Remote Sensing Volume 14* (22).
- Department of the Army. (1972). *Engineer Manual 1110-2-3800: Engineering and Design. Systematic Drilling and Blasting for Surface Excavations*. Virginia.
- Deutsches Institut für Normung. (1999). *DIN 4150 Structural Vibration - Part 2: Human exposure to vibration in buildings*. Berlin.
- Deutsches Institut für Normung. (2001). *DIN 4150 Structural Vibration - Part 1: Predicting vibration parameters*. Berlin.
- Deutsches Institut für Normung. (2016). *DIN 4150 Structural Vibration - Part 3: Effects on structures*. Berlin.



- Dong-Soo, K., & Jin-Sun, L. (2000). Propagation and attenuation characteristics of various ground vibrations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering Volume 19, Issue 2*, 115-126.
- Dowding, C. (1996). *Construction vibrations*. Upper Saddle River, NJ 07458: Prentice Hall.
- Dowding, C. (2006). Blast and Construction Vibration Monitoring and Control: Thirty-Five-Year Perspective. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 11(1), 8-12.
- Escocia. (1993). *PAN Annex A, Planning Advice Note Controlling the Environmental Effects of Surface Mineral Workings*. ESCOCIA.
- García García, F. (2006). *Las vibraciones mecánicas en el ambiente laboral* (Segunda ed.). Murcia: Región de Murcia.
- Goldman. (Marzo de 1948). A Review of Subjective Responses to Vibrating Motion of the Human Body in Frequency Range 1 to 70 Cycles per Second. *Report No. 1. Project N.M. 004001*.
- Gubbe, L. (1996). Bad Vibrations. *Civil Engineering, ASCE*, 58-60.
- Gupta, S., Liu, W., Degrande, G., Lombaert, G., & Liu, W. (2008). Prediction of vibrations induced by underground railway traffic in Beijing. *Journal of Sound and Vibration Volume 310 Issue 3*, 608-630.
- Hong, J., Kang, H., Jung, S., Sung, S., Hong, T., Seon Park, H., & Lee, D.-E. (2020). An empirical analysis of environmental pollutants on building construction sites for determining the real-time monitoring indices. *Building and Environment Volume 170*.
- Institution, B. S. (1990). *BS 7385 Part 1: Guide for measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings*. London: BSI.
- Institution, B. S. (1993). *BS 7385 Part 2: Guide to damage levels from groundborne vibration*. London: BSI.



- Instituto Portugués de Calidad. (2015). *NP 2074: Evaluación de la influencia de las vibraciones impulsivas en las estructuras*. Caparica.
- Jordan, J., Sutcliffe, D., & Mullard, J. (2009). Blast Vibration Effects on Historical Buildings. *Australian Journal of Structural Engineering*, 10(1), 75-84.
- Junta de Extremadura. (20 de Septiembre de 2023). *FICHA DE PREVENCIÓN: VIBRACIONES MECÁNICAS*. Obtenido de Servicio de Salud y Riesgos Laborales de Centros Educativos: https://www.educarex.es/riesgos_laborales/maquinas-herramientas.html
- Kang, J., Baek, E., & Park, S. (2023). Evaluation of Vibration Detection Using Smartphones in a Two-Story Masonry-Infilled RC Frame Building. *Buildings*, 13(4).
- Kashima, T. (Enero de 2021). *ViewWave Manual*. Obtenido de International Institute of Seismology and Earthquake Engineering (IISEE): https://smo.kenken.go.jp/~kashima/sites/default/files/viewwave/vw_manual220.pdf
- Khajehdezfuly, A., Alizadeh Shiraz, A., & Sadeghi, J. (2023). Assessment of vibrations caused by simultaneous passage of road and railway vehicles. *Applied Acoustics Volume 211*.
- Kinematics Inc. (2017). *ETNA 2 Accelerograph User Manual*. Pasadena, CA.
- Kosnik, D., & Dowding, C. (2015). Autonomous Monitoring of Dynamic Response of In-Service Structures for Decision Support. *Journal of Structural Engineering*, 141(1), 10.
- Kosnik, D., & Dowding, C. (2015). Autonomous Monitoring of Dynamic Response of In-Service Structures for Decision Support. *Journal of Structural Engineering Volume 141, Issue 1*.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Upper Sadle River, New Jersey: Prentice Hall.



- M. Crispino, M. D. (2001). MEASUREMENT AND PREDICTION OF TRAFFIC-INDUCED VIBRATIONS IN A HERITAGE BUILDING. *Journal of Sound and Vibration Volume 246, Issue 2*, 319-335.
- Massarsch, K. (2004). Mitigation of Traffic - induced Ground Vibrations. *Keynote Lecture, 11th Intern. Conf. on Soil Dynamics and Earthquake Engineering and 3rd on Earthquake Geotechnical Engineering, Berleley, January 7-9, 10.*
- Massarsch, K. R. (1995). Engineering Vibrations and solutions. *Prakash S. Proceedings of the Third International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, 3*, 1349-53.
- Nateghi, R. (2011). Prediction of ground vibration level induced by blasting at different rock units. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Volume 48, Issue 6*, 899-908.
- Nateghi, R. (2012). Evaluation of blast induced ground vibration for minimizing negative effects on surrounding structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering Volume 43*, 133-138.
- Navarro torres, V., Silveira, L., Lopes, P., & de Lima, H. (2018). Assessing and controlling of bench blasting-induced vibrations to minimize impacts to a neighboring community. *Journal of Cleaner Production Volume 187*, 514-524.
- Norma Española. (1993). *UNE 22 381 1993: Control de vibraciones producidas por voladuras*. Madrid: AENOR.
- Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones*. (2017).
- Pinto Morales, L. H., Fuentes Fuentes, M. d., & Hernández Julián, A. (2013). Monitoreo y control de vibraciones por efecto de voladuras en el Túnel Sumapaz, Concesión Bogotá-Girardot. *Ingeniería, Investigación y Desarrollo, 13(2)*, 15-21.



- Rodriguez, R., & Bascompta, M. (2020). Vibration Analysis and Empirical Law Definition for Different Equipment in a Civil Construction. *Applied Sciences* 10(14).
- Sharkey Bowers, W., & Lovenstein, A. (11 de Octubre de 2023). *El impacto de las vibraciones durante la construcción en estructuras adyacentes*. Obtenido de J.S. Shield: <https://es.jsheld.com/perspectivas/art%C3%ADculos-7ih/el-impacto-de-las-vibraciones-durante-la-construcci%C3%B3n-en-estructuras-adyacentes>
- Siskind, D., Stagg, M., Kopp, J., & Dowding, C. (1980). *Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration From Surface Blasting*. Washington, DC.: Report of Investigations 8507, U. S. Bureau of Mines.
- Soltys, A., Twardosz, M., & Winzer, J. (2017). Control and documentation studies of the impact of blasting on buildings in the surroundings of open pit mines. *Journal of Sustainable Mining Volume 16, Issue 4*, 179-188.
- Suárez, G., Yañez, D., Farraz, I., & Novelo Casanova, D. A. (2017). Medición de vibraciones durante la construcción de obras civiles en la Ciudad de México: hacia una norma nacional. *Geotecnia*(244), 20-27.
- Suecia. (s.f.). *SS 60 4846, Effect of Mining Explosions on Structures*.
- Suiza. (s.f.). *640 312a, Les Ébranlements. Effet des Élabrenments sur les Constructions*.
- Svinkin, M. (2004). Minimizing Construction Vibration Effects. *Practice periodical on structural design and construction*, 9(2), 108-115.
- Universidad de Costa Rica. (11 de Octubre de 2023). *Instrumentar una estructura*. Obtenido de Laboratorio de Ingeniería Sísmica: <https://www.estructuras.lis.ucr.ac.cr/?id=Instrumentar>
- Vacca Gamez, H., Rodríguez, J., & Ruiz Valencia, D. (2011). Medición e Interpretación de vibraciones producidas por el tráfico en Bogotá, D.C. *Revista de Ingeniería en Construcción*, 26(1), 61-80.



- Wang, S., & Zhu, S. (2021). Impact source localization and vibration intensity prediction on construction sites. *Measurement Volume 175*, 109-148.
- Wang, S., & Zhu, S. (2022). Global Vibration Intensity Assessment Based on Vibration Source Localization on Construction Sites: Application to Vibratory Sheet Piling. *Applied Sciences*, 12(4).
- Weng, L., Yohannes , M., & Chong, W. (2020). Data analysis and prediction of ground vibrations due to deep vibro-techniques. *Geotechnical Research Volume 7, Issue 4*, 244-257.
- Woods, R. D. (1997). *Dynamic effects of pile installations on adjacent structures*. Washington, D.C.: NCHRP.
- Zarei, Z., Javad, S., & Alireza, S. (2022). Evaluation of heavy-vehicle-induced vibrations running on asphalt pavements. *Construction and Building Materials vOLUME 358*.