

Metodología para la predicción de las vibraciones del terreno inducidas por voladuras y sus efectos en las estructuras. Aplicación en un caso real

Methodology to prediction of blast-induced terrain vibrations and its effects on structures. Application in a real case

PhD. Aldo Onel Oliva González¹, MSc. Roberto Fort Villavicencio²

¹ Grupo ITEICO. Universidad de las Californias Internacional, México, ORCID: 0000-0001-6119-8602, Email: aldo.oliva@udc.edu.mx

² Empresa Constructora Makro, México, ORCID: 0000-0001-7880-7523, Email: robertofort@hotmail.com

Como citar: A. O. Oliva y R. Fort, "Metodología para la predicción de las vibraciones del terreno inducidas por voladuras y sus efectos en las estructuras. Aplicación en un caso real", *Revista Ingenio*, vol. 16, n°1, pp. 1-9, 2019, doi: <https://doi.org/10.22463/2011642x.2381>.

Fecha de recibido: 03 de julio de 2018
Fecha de aprobado: 26 de octubre de 2018

RESUMEN

Palabras claves:

Daños estructurales,
metodología de predicción,
vibraciones en el terreno,
voladuras.

En este artículo se describen aspectos básicos relacionados con las vibraciones del terreno inducidas por voladuras y se presenta una metodología para la predicción de este fenómeno, así como los resultados de su aplicación en un caso real. Se describen los parámetros y variables que intervienen en los procesos de voladuras, métodos para predecir las vibraciones, así como sus efectos en las estructuras y criterios para evaluarlos. La metodología propone realizar voladuras de prueba con el propósito de obtener registros de velocidades o aceleraciones de partículas contra tiempo y utilizar la modelación numérica para cuantificar la respuesta dinámica del terreno, predecir los niveles de vibraciones que se podrían generar, y evaluar sus efectos en las estructuras, comparándolos con valores límites admisibles establecidos en las normativas para evitar daños. Se presentan los resultados obtenidos al aplicar la metodología en un caso real, así como las conclusiones y recomendaciones emitidas a partir de ellos.

ABSTRACT

Keywords:

Structural damage,
prediction methodology,
vibrations in the terrain,
blasting.

This article describes basic aspects related to blast-induced ground vibrations and presents a methodology for predicting this phenomenon, as well as the results of its application in a real case. The parameters and variables involved in blasting processes, methods to predict vibrations, as well as their effects on structures and criteria to evaluate them are described. The methodology proposes to carry out test blasting in order to obtain registers of velocities or accelerations of particles vs time and to use numerical modeling to quantify the dynamic response of the terrain, predict the levels of vibrations that could be generated and evaluate its effects on structures through comparative analysis with admissible limits values established in the regulations to avoid damage. The results obtained by applying the methodology in a real case are presented, as well as the conclusions and recommendations issued based on them.

1. Introducción

Las vibraciones en el terreno producidas por voladuras son consecuencia de la detonación de cargas explosivas, y pueden definirse como oscilaciones mecánicas o movimientos cíclicos en el terreno debido al paso de fases alternativas de compresión y tensión. La intensidad de las vibraciones es el resultado de la propagación en todas las direcciones de ondas volumétricas y superficiales producidas por la liberación súbita de energía debido a la explosión. Las ondas internas que viajan por el terreno van acompañadas de ondas superficiales que parten del punto donde ocurre la detonación de la carga explosiva y se van diferenciando en la medida que los frentes de onda se alejan de la fuente. Durante su viaje, las ondas mueven las partículas del terreno que recorren produciendo sobre estas velocidades, desplazamientos

y aceleraciones. La influencia de las vibraciones en aspectos relativos al trabajo y vida diaria de las personas, es considerada una de las principales problemáticas ambientales de las sociedades avanzadas [1-2].

Las vibraciones del terreno pueden tener efectos negativos en las obras civiles y ocasionar daños que incluyen desde la generación de micro fisuras y pequeños asentamientos diferenciales, hasta la ocurrencia de grandes grietas y hundimientos que desencadenan fallas geotécnicas y estructurales.

Como criterio para evaluar el efecto de las vibraciones sobre las estructuras se utiliza, principalmente, la velocidad de partículas del terreno pues, como en muchos fenómenos ondulatorios, la velocidad es el parámetro que mejor correlación ha mostrado con los daños que se pueden presentar y el más importante a

Autor para correspondencia

Correo electrónico: aldo.oliva@udc.edu.mx (Aldo Onel Oliva González)



La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña
Artículo bajo la licencia CC BY-NC (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es>)

relacionar con las características de las voladuras. Las principales variables involucradas en la estimación de las velocidades de partícula son: la distancia desde la explosión hasta el punto de medición, la máxima carga de explosivo detonado, la velocidad de propagación de ondas y densidad del medio transmisor, y el tiempo [3].

1.1 Medición de vibraciones

La medición de las vibraciones producidas por voladuras en el terreno se realiza mediante instrumentos que miden la velocidad de las partículas. Estos instrumentos se conocen comúnmente como sismógrafos de voladura y se diseñan para medir las tres componentes principales del movimiento de las partículas. Ellas son, la componente longitudinal (x), transversal (y) y vertical (z). Los sismógrafos de voladura consisten en un transductor (generalmente un geófono, aunque se puede usar un acelerómetro) conectado a un procesador para recolectar y analizar las señales y, en muchos casos, almacenarlas. Generalmente, se almacenan los registros de comportamiento en el tiempo de la velocidad, aceleración y desplazamiento de las partículas, así como de la frecuencia.

1.2 Predicción de vibraciones inducidas por voladuras

1.2.1 Fórmulas analíticas. Varios investigadores han estudiado el problema de la predicción de vibraciones en el terreno y propusieron fórmulas que, con ciertas diferencias en sus enfoques, permiten calcular los niveles de vibraciones a partir de la correlación entre la velocidad máxima de partícula, la distancia desde la explosión hasta el punto de medición y la máxima carga de explosivo detonado (Tabla 1) [4-5-6-7-8-9-10-11].

Tabla 1. Fórmulas para estimar niveles de vibración.

Fórmula	Variables y parámetros
$V = K \sqrt{\frac{Q}{D^{1.5}}}$	V = vibración pico (mm/s)
	K = factor de transmisión de roca
$V = K \left[\frac{D}{\sqrt[3]{Q}} \right]^{-e}$	Q = máxima carga de explosivo detonado (kg)
	D = distancia desde la explosión hasta el punto de medición (m)

Observaciones:

- Conocida como fórmula Langefors
- Se obtuvo a partir de investigaciones sobre voladuras en granito duro, pero el factor de transmisión K permite considerar diferentes tipos de rocas y condiciones de confinamiento.

Observaciones:

- Conocida como fórmula de distancia escalada de raíz cuadrada

- Considera que la carga explosiva se distribuye en un cilindro largo, donde el diámetro del agujero es proporcional a la raíz cuadrada del peso de la carga.

$$V = K \left[\frac{D}{\sqrt[3]{Q}} \right]^{-e} \quad \frac{D}{\sqrt[3]{Q}} = \text{distancia escalada (raíz cúbica)}$$

Observaciones:

- Conocida como fórmula de distancia escalada de raíz cúbica
- Considera que la longitud del cilindro donde se aloja la carga explosiva es pequeña en relación con el diámetro, que la masa de carga se aproxima a una forma esférica y que, por tanto, el diámetro es proporcional a la raíz cúbica del peso de carga.

A partir de aplicar la fórmula de distancia escalada de raíz cuadrada, utilizando datos de muchas explosiones y mediante análisis estadísticos, se pueden determinar la constante “k” y el exponente “e” de un sitio, así como obtener la fórmula predictiva expresada mediante la ecuación (1) y su correspondiente gráfico (Figura 1) [11].

$$V = 1140 \left[\frac{D}{\sqrt{Q}} \right]^{-1.6} \quad (1)$$

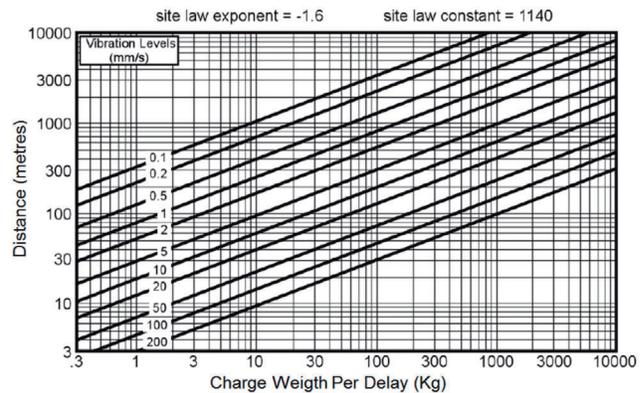


Figura 1. Gráfico predictivo. Fuente. [11].

En la ecuación (1), se pueden considerar diferentes condiciones de confinamiento, modificando la constante “k” del sitio (Tabla 2).

Tabla 2. Valores de constante del sitio.

Sitio donde se realiza la voladura	Constante k
Minas o canteras	500
Una cara libre en condiciones medias	1140
Voladuras muy confinadas, campo cercano	5000

Fuente: [11].

1.2.2 Modelación numérica. El desarrollo alcanzado por la informática permite utilizar potentes técnicas basadas en la modelación numérica para simular y estudiar, con precisión aceptable, los procesos relacionados con la interacción dinámica terreno – estructura ante el efecto de las voladuras. Estas técnicas son utilizadas en diversos programas informáticos para modelar, simular y calcular la respuesta del terreno a los efectos dinámicos de terremotos, impactos o explosiones. Los programas informáticos que utilizan la técnica o método de los elementos finitos, se basan en la discretización o mallado de un medio continuo (por ejemplo, el terreno), subdividiéndolo en piezas pequeñas (elementos finitos) conectadas por líneas y nodos. Inicialmente, analizan y describen el comportamiento individual de los elementos finitos, para posteriormente representar el comportamiento del continuo como un todo, reconectando todas las piezas. En estos programas, las fuerzas dinámicas se pueden aplicar en nodos específicos para simular los efectos de una carga de impulso muy repentina, similar a la producida por las explosiones en los procesos de voladuras. Más adelante, se describe un procedimiento que utiliza el método de los elementos finitos para predecir vibraciones en el terreno inducidas por voladuras.

1.3 Límites para evitar daños

En las normas y literatura disponible, los límites admisibles para evitar daños en las estructuras son establecidos utilizando, principalmente, los criterios de velocidades y aceleraciones máximas de partícula, aunque también existen límites asociados con desplazamientos y deformaciones máximas impuestos a los sistemas estructurales.

En el año 1980, las oficinas de minas y de reclamación y aplicación de minería superficial de los Estados Unidos (USBM y OSMRE, por sus siglas en inglés) publicaron la norma RI-8507 para la respuesta estructural y daños producidos por las vibraciones inducidas por voladuras en minería superficial (Figura 2).

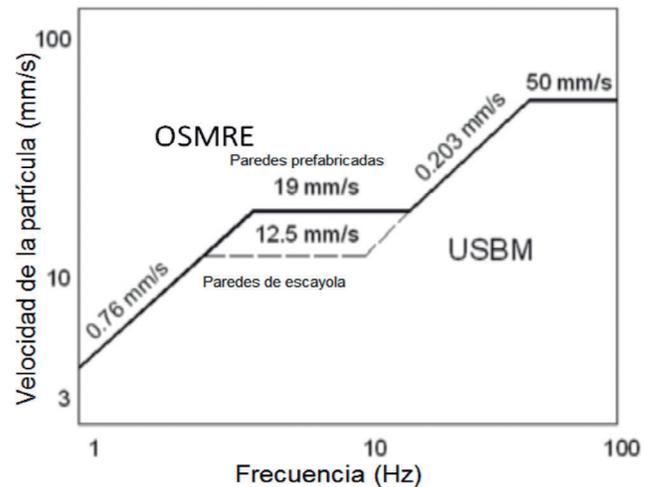


Figura 2. Criterio para evitar daños. Fuente. [11].

Esta norma recomienda una velocidad máxima de partícula de 0,75 in/s (19 mm/s) en el intervalo de frecuencias de 4 a 12 Hz, para edificios con paredes interiores prefabricadas; y 0,5 in/s (12,5 mm/s) para edificios con recubrimiento de escayola. Por otro lado, para frecuencias mayores a 40 Hz, el límite máximo admisible es 2 in/s (50 mm/s).

La norma española UNE (1993) clasifica las estructuras en tres grupos y establece valores límites de velocidades y desplazamientos en función de la frecuencia (Tabla 3) [12].

Tabla 3. Valores límites del criterio de prevención de daños según la norma española.

Valores límite del criterio	Frecuencia (Hz)		
	2 - 15	15 - 75	> 75
	Vel. (mm/s)	Desp. (m)	Vel. (mm/s)
Grupo I. Edificios y naves industriales ligeras con estructuras de hormigón armado o metálicas	20	0.212	100
Grupo II. Edificios de viviendas, oficinas, centros comerciales y de recreo. Estructuras de valor arqueológico o histórico que por su naturaleza no presenten especial sensibilidad a las vibraciones	9	0.095	45
Grupo III. Estructuras de valor arqueológico o histórico que por su naturaleza presenten especial sensibilidad a las vibraciones.	3	0.042	20

Fuente: UNE 22.381-93.

La norma australiana de explosivos AS 2187 y los estándares ingleses BS 7385-2, propusieron en 1993 los límites que se muestran en las Tablas 4 y 5 [3].

Tabla 4. Límites de velocidades según la norma australiana.

Tipo de edificación	Velocidad máxima (mm/s)
Edificios comerciales e industriales de concreto reforzado o acero	25
Edificios residenciales	10
Hospitales, presas y edificios históricos	5

Fuente: [10].

Tabla 5. Velocidades límites según estándares ingleses.

Tipo de edificación	Velocidad máxima (mm/s)
Estructuras aporricadas de industrias y edificios comerciales con frecuencia de vibración superior a 4 Hz	50
Edificaciones sin refuerzo, residenciales y con frecuencias entre 4 Hz y 15 Hz.	15 - 20

Fuente: Norma BS 7385-2 (1993).

La norma alemana DIN 4150 establece valores máximos permisibles de velocidad de partícula para evitar daños en edificaciones, en función de la frecuencia (Tabla 6) [13].

Tabla 6. Valores máximos de velocidad de partícula (en mm/s) para evitar daños según la norma alemana.

Tipo de edificación	Frecuencia		
	< 10 Hz	10-50Hz	50-100Hz
Estructuras delicadas, muy sensibles a la vibración	3	3 - 8	8 - 10
Viviendas y edificios	5	5 - 15	15 - 20
Comercial e Industrial	20	20 - 40	40 - 50

Fuente: [13].

En la Figura 3 se presenta la propuesta de Regulación Colombiana de Vibración por Voladuras (RCOLVV.09), para evaluar vibraciones producidas en canteras y que, eventualmente, se puede aplicar a demoliciones, maquinarias, tráfico de canteras y ferroviario, teniendo en

cuenta las frecuencias principales (en Hz) asociadas a la máxima velocidad pico de partícula (en mm/s), y las diferentes categorías de construcciones (Tabla 7) [14].

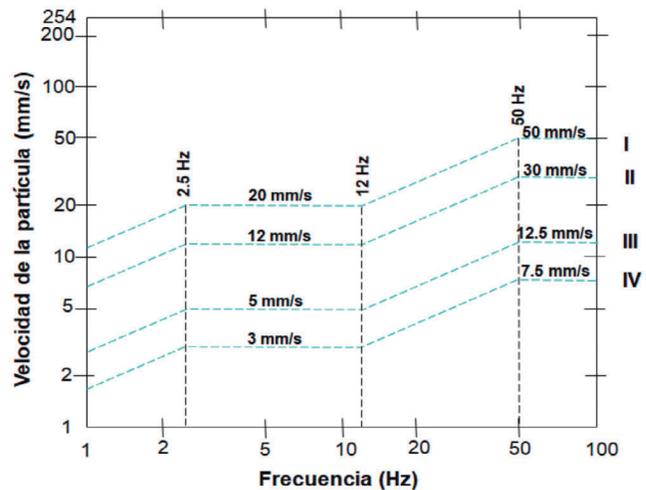


Figura 3. Espectro de umbral de daños según la propuesta colombiana. Fuente. [14].

Tabla 7. Velocidades admisibles según la categoría de las construcciones (en mm/s).

Nº	Categoría de las construcciones	Frecuencias principales (Hz)		
		2.5-12	12 -50	50-100
I	Edificaciones pesadas, naves industriales con estructura de hormigón armado o metálicas	20	20-50	50
II	Edificios de viviendas y oficinas, edificios de comercio o centros comerciales	12	12-30	30
III	Viviendas estándar de uno y dos pisos con refuerzo estructural	5	5-12.5	12.5
IV	Estructuras particularmente delicadas, edificaciones históricas en condición débil, viviendas de uno y dos pisos sin ningún tipo de refuerzo estructural susceptibles a vibraciones	3	3-7.5	7.5

Fuente: [13].

2. Metodología

En este artículo se propone una metodología que aprovecha las ventajas de la modelación numérica y la medición in-situ mediante sismógrafos, para predecir las vibraciones en el terreno inducidas por voladuras y sus efectos en las estructuras.

2.1 Descripción de la metodología propuesta

La metodología consta de las siguientes etapas:

- a. Definición de los límites permisibles para evitar daño en estructuras, de acuerdo con las normativas y referentes internacionales.

En esta etapa se definen los umbrales de vibración que pueden causar daños en las estructuras, que no solo dependen del proceso de voladura sino de otros factores que pueden influir en el comportamiento del sistema terreno-estructura. Por esta razón, se recomienda realizar un estudio específico de daños que incluirá desde la caracterización del terreno y los materiales usados en la construcción, hasta la evaluación de los tipos de estructuras y las cargas actuantes sobre ellas. Como se explicó en la sección anterior, la mayoría de las normas y literatura disponible establecen valores límites de velocidad y aceleración de partículas en el terreno para evitar daños en los sistemas estructurales.

- b. Realización de voladuras de prueba para obtener parámetros y registros de velocidades y aceleraciones.

Las voladuras de prueba deberán realizarse en condiciones iguales o muy similares a las que existirán en la voladura real, y serán monitoreadas mediante sismógrafos. Para diseñar y ejecutar estas voladuras se deben considerar, entre otros, los siguientes aspectos:

- Características geológicas y geotécnicas del terreno en el sitio donde se realizarán las pruebas
- Cantidad y ubicación de cargas explosivas
- Distancia entre los puntos de voladura y la estructura objeto de análisis
- Cantidad y ubicación de los sismógrafos a utilizar

Con las voladuras de prueba se deberán obtener los registros de velocidades y/o aceleraciones de partículas en el terreno, así como otros parámetros y variables de interés.

- c. Modelación dinámica de la respuesta del terreno mediante técnicas numéricas.

Se propone un procedimiento basado en el método de los elementos finitos, que consiste en uti-

lizar un programa informático de análisis dinámico, en el cual se aplicarán las cargas explosivas correspondientes al proceso de voladura que se pretende realizar, y se introducirá el registro de velocidad o aceleración vs tiempo obtenido (mediante sismógrafo) en las voladuras de prueba. El programa crea un registro equivalente de desplazamiento vs tiempo, que se aplica como condición límite nodal y es utilizada en el análisis de elementos finitos para obtener las velocidades, aceleraciones y desplazamientos de las partículas en el terreno (Figura 4) [15]. Como resultados, se obtendrán: velocidades, aceleraciones, desplazamientos, esfuerzos y otros parámetros en cada uno de los nodos que conforman la malla utilizada para discretizar el terreno. Por lo antes expuesto, y como parte del procedimiento propuesto, se recomienda identificar y seleccionar puntos en el terreno donde se supone que ciertos niveles de vibración pudieran afectar a las estructuras. Estos puntos de interés se denominan puntos de control, y suelen ubicarse debajo de cimentaciones, pisos y pavimentos.

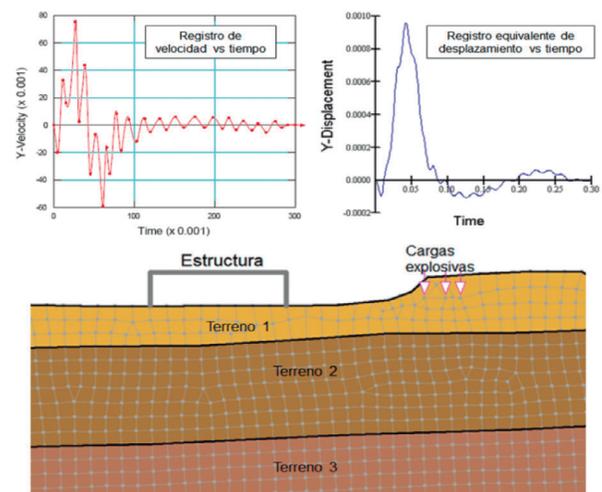


Figura 4. Ilustración del procedimiento de modelación dinámica.

Fuente. [15].

- d. Análisis comparativo entre los parámetros calculados mediante la modelación dinámica y los valores límites permisibles establecidos en las normas y referencias internacionales.

En esta etapa, se comparan los valores de los parámetros obtenidos mediante modelación dinámica en los puntos de control previamente seleccionados, con los valores permisibles que se establecen en las normas y literatura internacional. Como se explicó en la sección 1.3, la mayoría de las normas internacionales establecen valores

de velocidad límite de las partículas del terreno, por encima de los cuales es probable que se generen daños visibles en las estructuras. Cuando los parámetros obtenidos mediante modelación dinámica superan los límites permisibles para evitar daños, será necesario evaluar y proponer medidas para eliminar o mitigar el efecto negativo de las vibraciones.

2.2 Aplicación en un caso real

La metodología propuesta se utilizó para predecir las vibraciones en el proyecto de ampliación de una planta industrial en Baja California, México. Las obras de ampliación, incluyen la construcción de plataformas y terraplenes en sitios donde será necesario realizar voladuras en rocas.

Con el propósito de diseñar las cargas explosivas y su ubicación en el terreno, la empresa constructora solicitó analizar los efectos de las vibraciones inducidas por las voladuras sobre una estructura cercana, destinada a oficinas y almacenes (Figura 5).



Figura 5. Zona de voladuras y estructura objeto de análisis.
Fuente. Google Earth.

3. Resultados

A continuación, se describen los resultados obtenidos en cada una de las etapas de la metodología.

3.1 Definición de los límites permisibles para evitar daños en la estructura

Para definir los límites de vibraciones permisibles, se utilizaron las velocidades límites establecidas en las normas y regulaciones descritas en la sección 1.3. Dichas velocidades, fueron obtenidas a partir de un estudio de daños potenciales, en el que se consideraron no solo los parámetros relacionados con las voladuras que se planean realizar, sino las características del terreno y de la estructura a proteger (Tabla 8).

Tabla 8. Valores máximos permisibles de velocidad de partícula para evitar daños estructurales.

Norma o regulación	Velocidad máxima (mm/s)
USBM-OSMRE (Estados Unidos)	50
UNE (España)	13
AS 2187 (Australia)	25
BS 7385-2 (Inglaterra)	50
DIN 4150 (Alemania)	40
RCOLVV.09 (Colombia)	30

Además, se definieron valores permisibles de velocidades de partícula para evitar afectaciones en las personas que trabajan en las oficinas y almacenes ubicados en la estructura objeto de análisis (Tabla 9) [16].

Tabla 9. Valores indicativos del efecto de las vibraciones en las personas.

Efecto de las vibraciones en personas	Velocidad máxima (mm/s)
Imperceptible	0.16
Apenas perceptible	0.64
Claramente perceptible	2.0
Molesto	6.40
Muy desagradable	16.0
Perjudicial	> 16.0

3.2 Voladuras de prueba

Se realizaron cuatro voladuras de prueba en un terreno cercano a la planta industrial, constituido por rocas similares a las que se encuentran en el sitio donde se construirán las plataformas y terraplenes del proyecto. En cada una de las voladuras se variaron las cantidades de cargas explosivas y sus profundidades de ubicación en el terreno; y en todas las pruebas el sismógrafo se ubicó a 15.00 metros del patrón de voladura.

Como resultado, se obtuvieron los siguientes parámetros en las tres componentes principales (x,y,z) del movimiento de partículas en el terreno:

- Velocidad pico de partícula
- Aceleración pico de partícula
- Desplazamiento pico de partícula
- Frecuencias
- Tiempo (relativo a la activación)

3.3 Modelación dinámica de la respuesta del terreno

Como parte del proyecto de ampliación de la planta industrial, se realizaron estudios ingeniero-geológicos que permitieron obtener los modelos geológico-geotécnicos y perfiles estratigráficos del terreno, así como los parámetros físicos, geomecánicos y dinámicos de las rocas que se encuentran en la zona donde se realizarán

las voladuras. Con esta información y con los resultados de las pruebas de voladuras, se elaboró el modelo para el análisis dinámico de la respuesta del terreno (Figura 6).

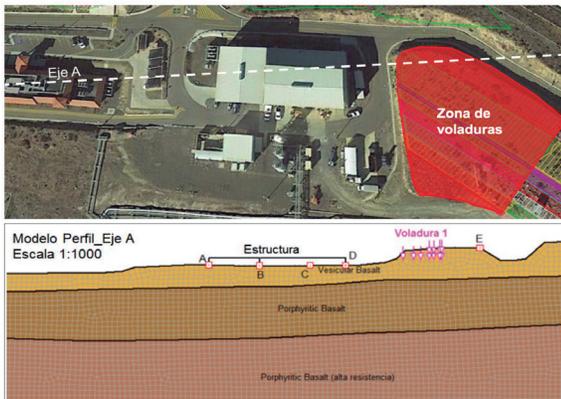


Figura 6. Modelo utilizado para el análisis dinámico.

En el modelo de la Figura 6 se muestran las cargas explosivas correspondientes a la primera fase del proceso de voladura (voladura 1) y los puntos de control (A, B, C, D, E) ubicados en sitios donde se supone que ciertos niveles de vibración pudieran afectar a la estructura existente y a las personas que se encuentren dentro de ella. En la Tabla 10 se presentan las velocidades máximas de partículas del terreno, generadas por la voladura 1 en los puntos de control, que fueron obtenidas como resultado del análisis dinámico mediante el programa informático QUAKE/W [15].

Tabla 10. Velocidades máximas de partículas.

Punto de control	Velocidad en "x" (mm/s)	Velocidad en "y" (mm/s)
A	7.00	6.50
B	10.00	10.00
C	10.00	20.00
D	12.00	30.00
E	35.00	50.00

3.4 Análisis comparativo

En la Tabla 11 se presentan las velocidades máximas de partículas obtenidas mediante la modelación dinámica y los valores límites permisibles para evitar daños, que fueron definidos según diferentes normas y regulaciones internacionales (Tabla 8).

En la Tabla 12 se presentan los valores de velocidades máximas de partículas obtenidas mediante la modelación dinámica y los efectos que las mismas podrían producir en las personas.

Tabla 11. Análisis comparativo de velocidades máximas de partículas.

Punto de control	Veloc. "x" (mm/s)	Veloc. "y" (mm/s)	Vel. máx. permisible (mm/s)
A	7.00	6.50	50 (USBM-OSMRE, USA)
B	10.00	10.00	13 (UNE, España)
C	10.00	20.00	25 (AS 2187, Australia)
D	12.00	30.00	50 (BS 7385-2, Inglaterra)
E	35.00	50.00	40 (DIN 4150, Alemania)
			30 (RCOLVV.09, Colom.)

Tabla 12. Efectos de las vibraciones en las personas.

Punto de control	Vel. en "x" (mm/s)	Vel. en "y" (mm/s)	Efecto de las vibraciones en las personas
A	7.00	6.50	Molesto
B	10.00	10.00	Molesto
C	10.00	20.00	Muy desagradable
D	12.00	30.00	Perjudicial
E	35.00	50.00	Perjudicial

4. Discusión

La predicción de vibraciones en el terreno inducidas por voladuras, es un problema complejo en el que intervienen variables controlables como la cantidad de carga explosiva por retardo y su confinamiento, el tipo y distribución del explosivo y los tiempos de cada retardo; y variables no controlables como las características geológicas y geomorfológicas del terreno, las condiciones climáticas, el viento y la ubicación del sitio donde se realizará la voladura.

Las fórmulas analíticas de predicción que relacionan el parámetro D/\sqrt{Q} con la velocidad de partículas permiten ajustar la magnitud de las voladuras para evitar daños y son útiles en análisis preliminares, especialmente en el diseño de voladuras de prueba, pero fueron obtenidas para macizos rocosos y sus resultados pueden variar significativamente en medios constituidos por otros materiales. Además, no consideran la respuesta dinámica del terreno, ni sus movimientos en las proximidades de las estructuras. En consecuencia, utilizar estas fórmulas para predecir vibraciones en materiales que no se comporten de manera similar a las formaciones rocosas, puede conducir a errores en la evaluación de los daños potenciales y a voladuras ineficaces e ineficientes. La modelación numérica resuelve estas limitaciones porque permite considerar las propiedades físicas y geo-mecánicas de cualquier medio (suelos, rocas, rellenos artificiales, etc.) para modelar, simular y estimar

su respuesta ante los efectos dinámicos de las voladuras y calcular no solo velocidades y aceleraciones de partículas, sino los desplazamientos y esfuerzos que se producen en cualquier punto del terreno.

Aunque las normas que regulan los niveles de vibración permisibles utilizan principalmente el criterio de velocidad de partícula en el terreno para definir los valores límites que evitarían afectaciones en las estructuras, los umbrales de vibración también están sujetos a factores relacionados con las construcciones como la carga estructural, propiedades de los materiales, técnicas constructivas, características dinámicas, amplitud de excitación y frecuencia sensible. Por tanto, definir los valores límites de velocidad de partícula para evitar daños, requiere de estudios específicos que incluyen, entre otros aspectos, la caracterización del terreno y de las estructuras, así como la evaluación de las cargas actuantes además de las voladuras.

La metodología que se presenta propone un procedimiento en el que se integran la información obtenida en las voladuras de prueba y la modelación numérica, para simular el proceso de voladura, cuantificar la respuesta dinámica del terreno, predecir las vibraciones que se generan y evaluar sus efectos en las estructuras. La aplicación de la metodología en el caso de estudio presentado, no solo permitió validar el procedimiento propuesto y comprobar su factibilidad, sino que sirvió para reajustar el diseño inicial de las voladuras y proponer medidas para reducir el riesgo de daños en la estructura que se quiere proteger y en el personal que labora en ella.

5. Conclusiones

Las vibraciones inducidas por voladuras producen movimientos en las partículas del terreno que pueden ocasionar efectos negativos sobre las estructuras y personas que se encuentren en ellas, siendo la velocidad de estos movimientos el criterio más utilizado para establecer los límites admisibles que podrían evitar daños. Los primeros métodos para predecir vibraciones fueron fórmulas analíticas que obtienen los niveles de vibración en medios constituidos por rocas, a partir de la correlación entre la velocidad máxima de partícula, la máxima carga explosiva y distancia entre la explosión y el punto de medición, pero sin considerar la respuesta dinámica del terreno ni los movimientos de sus partículas. Posteriormente, con el surgimiento de los métodos de modelación numérica, no solo se puede predecir las vibraciones en un medio cualquiera, considerando su respuesta ante los efectos dinámicos de las voladuras, sino que permiten calcular las velocidades y aceleraciones de las partículas, así como los desplazamientos

y esfuerzos que se producen en cualquier punto del terreno. La metodología que se presenta en este trabajo se basa en realizar voladuras de prueba para obtener, mediante mediciones con sismógrafos, los registros de velocidad o aceleración contra tiempo, que son introducidos en un programa de análisis dinámico para calcular, entre otros parámetros, las velocidades, aceleraciones y desplazamientos de las partículas en el terreno. Con estos resultados, la metodología propone realizar un análisis comparativo entre la velocidad de partícula calculada y el valor límite para evitar daños, que establecen las normas.

Los resultados de la aplicación de la metodología en el proyecto de ampliación de una planta industrial en Baja California, México, sustentan las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- Los valores máximos permisibles de velocidad de partícula definidos utilizando diferentes normas, son muy variables (Tabla 8). Esto ratifica la importancia de realizar estudios específicos de daños que incluyan evaluaciones detalladas del terreno y las estructuras, por parte de especialistas, para seleccionar el valor más adecuado a utilizar en cada proyecto.
- Las velocidades de partícula obtenidas mediante modelación dinámica en algunos puntos ubicados debajo de la estructura (C y D), superan o están muy cerca de los valores máximos admisibles para evitar daños.

Atendiendo a estos resultados, se recomendó rediseñar el proceso de voladura considerando reducir las cargas y el intervalo de tiempo o retardo que transcurre entre detonaciones sucesivas, así como diseñar e implementar un programa de instrumentación y monitoreo de las vibraciones que se producirán en la estructura durante el proceso de voladura.

6. Agradecimientos

Los autores manifiestan su agradecimiento a la Universidad de las Californias Internacional, México, y a la Empresa Constructora Makro, México, por la oportunidad de participar en el proyecto que sirvió de base para la realización de este trabajo.

7. Referencias bibliográficas

- [1] INCEJ, "The regional environmental vibrations", Tokyo, 2001.
- [2] M.G. Smith, I. Croy, M. Ögren y K. Persson Wayne, "On the influence of freight trains on humans: a laboratory investigation of the impact of nocturnal low frequency vibration and noise on sleep and heart rate", PLoS ONE 2013; vol. 8, no. 2: e55829. 2013. Recuperado de: <https://>

- www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23409055
- [3] D. Ruiz, C. Otálora, y J.A. Rodríguez, “Efecto de las vibraciones generadas por voladuras en minas sobre edificaciones residenciales de mampostería simple en Colombia”, *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, vol. 7 (2-3), pp. 259-272, noviembre 2007. Recuperado de: https://www.scipedia.com/wd/images/3/32/Draft_Content_789645157Ruiz-Valencia_et_al.pdf
- [4] A.S. Hendron and C. Oriard, “Specifications for controlled blasting in civil engineering projects”, in *Proceedings of the First American Rapid Excavation and Tunneling Conference*, Society of Mines Engineers, AIME, Littleton, Colorado, pp. 1585-1560. 1972.
- [5] U. Langefors and B. Kihlstrom, “The Modern Technique of Rock Blasting”, Ed. John Wiley & Sons. 1976.
- [6] D. Siskind, M. Stagg, J. Kopp y C. Dowding, “Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration from Surface Blasting”, U.S. Bureau of Mines Report of Investigations 8507 (USBM RI 8507), Washington, D.C. 1980.
- [7] J.P. Ahsby, “Production blasting and the development of pit slopes”, in *Proceedings of the 3rd. International Conference on Stability in Open Pit Mining*, Vancouver, B.C., Canada. 1981.
- [8] C.H. Dowding, “Blast Vibration Monitoring and Control”, Prentice Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey. 1985.
- [9] ICI Australia, “Environmental Effects of Blasting”, in *Handbook of Blasting Tables*, pp 33-35. 1990.
- [10] Standards Association of Australia, “Explosives - Storage Transport and Use. Part 2 - Use of Explosives”. AS.2187.2, Australia.1993.
- [11] A.B. Richards, A.J. Moore, “Blast vibration course: measurement - assessment - control”, Terrock Consulting Engineers, Eltham Victoria, Australia, A.B.N. 99 005 784 841, February 2005.
- [12] J. Bernaola, J. Castilla, J. Herrera, “Perforación y voladura de rocas en minería”. Departamento de explotación de recursos minerales y obras subterráneas, Laboratorio de tecnologías mineras, Universidad Politécnica de Madrid, España. 2013.
- [13] DIN 4150, “Part 3: Structural Vibration in Buildings. Effects of Vibration on Structures”, German Standard, Deutsches Institut Fur Normung E.V. 1999.
- [14] L.H. Pinto y M.C. Fuentes, “Propuesta de guía de regulación colombiana para el control de vibraciones por voladuras de rocas en áreas urbanas (RCOLVV.09)”, *Revista Uptc*, vol. 7, no. 2, 10p. Colombia, diciembre 2008. Recuperado de: https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria_sogamoso/article/view/882
- [15] QUAKE/W, “Dynamic Modeling. An Engineering Methodology”, Third Edition, GEO-SLOPE International Ltd., 247pp. Calgary, Alberta, Canadá, 2008.
- [16] M.A. Escamilla, A.G. Ayala, H. Méndez y O. García, “Efecto de las vibraciones ambientales y forzadas sobre las estructuras y los humanos”, in *XX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Mérida, Yucatán, México, 2016.