

VIBRACIONES CAUSADAS POR ACTIVIDAD HUMANA:
caracterización, efectos y manejo en la Ingeniería Civil

JUAN MANUEL BENJUMEA CADAVID

Universidad del Valle
Facultad de Ingenierías
Escuela de Ingeniería Civil y Geomática
Santiago de Cali
2003

VIBRACIONES CAUSADAS POR ACTIVIDAD HUMANA

Caracterización, efectos y manejo en la Ingeniería Civil

JUAN MANUEL BENJUMEA CADAVID

Trabajo de grado presentado como requisito parcial
para optar al título de Ingeniero Civil

Director: Prof. HANSJÜRGEN MEYER
M.Sc. en Geofísica

Universidad del Valle
Facultad de Ingenierías
Escuela de Ingeniería Civil y Geomática
Santiago de Cali
2003

Nota de Aceptación:

Prof. HANSJÜRGEN MEYER M.Sc. en Geofísica
Director

Prof. PETER THOMSON Ph.D. en Ingeniería Aeroespacial
Jurado

Prof. HAROLD CÁRDENAS M.Sc. en Ingeniería Estructural
Jurado

Santiago de Cali, 3 de diciembre de 2003

AGRADECIMIENTOS

Al Prof. Hansjürgen Meyer, director de este proyecto, y a PhD. Jorge Mejía (Observatorio Sismológico del SurOccidente), quienes apoyaron y aportaron tiempo para discusiones y correcciones de este proyecto.

A Cementos del Valle, por medio del Ing. Carlos Aramburo (Intendente Cementos del Valle) quien proporciono recursos para la adquisición de los equipos utilizados en este trabajo. A Ing. Juan Carlos Pinzón, Ing. Martin Monsalve, Ing. Omar Giraldo, Téc. Beatriz Valencia y otros más de la Mina La Calera, quienes proveyeron información para la elaboración de este proyecto.

Y a todas aquellas personas que en una u otra forma colaboraron en la realización de este proyecto.

RESUMEN

Las vibraciones causadas por actividad humana han venido cobrando importancia a medida que las fuentes generadoras de tales vibraciones aumentan en cantidad, magnitud y cercanía a zonas pobladas. Cementos del Valle en la mina La Calera, dedicada a la extracción de caliza para la fabricación de cemento, realiza alrededor de dos voladuras diarias con este fin. Para evaluar los efectos de las vibraciones producidas por estas voladuras se instalaron estaciones de monitoreo en las poblaciones de San Marcos y Mulaló, de las cuales se obtuvieron 504 registros de vibraciones durante el periodo comprendido entre mayo 1999 y agosto 2002.

Los resultados obtenidos debían tener un punto de comparación, el cual no existe en Colombia. Por tanto, se hizo necesario adquirir algunas normas internacionales (alemana, escocesa, americana, española, sueca, suiza, y la internacional -ISO-), las cuales son ampliamente descritas en este proyecto. De esta manera, los resultados de las vibraciones producidas por estas voladuras se compararon con normatividad internacional, aplicándolas al caso específico de la iglesia de Mulaló. Los datos obtenidos demuestran que las vibraciones producidas por Cementos del Valle para ese período cumplieron con las normas.

Dada la ineficiencia de asociar la máxima velocidad resultante con la frecuencia estimada mediante los métodos tradicionales (cruce por ceros, análisis de Fourier y espectro de respuesta), se aplicó el método de frecuencia instantánea –desarrollado a partir de las relaciones tiempo-frecuencia–, el cual ha sido desarrollado en procesamiento de señales, sin haber sido usado antes para este fin. Se pudo determinar la similitud de ésta con cruce por ceros y la divergencia de éstas respecto al análisis de Fourier.

Buscando relacionar parámetros del diseño de las voladuras con la vibración producida por cada una de ellas, se utilizó la relación empírica $\dot{u} = K(R/\sqrt[3]{W})^\alpha$, frecuentemente utilizada para predecir la velocidad resultante (\dot{u}) a partir de la distancia escalada ($R/\sqrt[3]{W}$). A partir de un análisis de regresión por mínimos cuadrados se obtuvo para Mulaló $K = 104$, $\alpha = -1.40$ y con R^2 de 0.26 y para San Marcos $K = 20$, $\alpha = -0.97$ y con R^2 de 0.04. Dada la baja correlación, se plantearon dos rectas con la tendencia aparente de los datos, obteniéndose para Mulaló $K = 251190$ y $\alpha = -3.06$ y para San Marcos $K = 1000000$ y $\alpha = -3.06$; la diferencia en el valor K podría deberse a cambios en la impedancia del suelo en San Marcos y Mulaló, pudiendo ser la una impedancia superior en el primero. La dispersión de los datos, causante de un mal ajuste por el método de mínimos cuadrados, puede deberse a la falta de cobertura en ordenes de magnitud de la velocidad resultante y la distancia escalada o también al uso de la carga total en lugar de la carga por intervalo de tiempo.

Palabras clave: señales de vibraciones, voladuras, normas internacionales en vibraciones, procesamiento de señales de vibraciones,.

CONTENIDO

	pág.
Introducción	1
1. Generalidades	3
1.1. Definición del Problema	3
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo general	3
1.2.2. Objetivos específicos	4
1.3. Antecedentes	4
1.3.1. Ubicación geográfica	4
1.3.2. Antecedentes geológicos	4
2. Medición, instrumentación y sitios de medición	6
2.1. Introducción	6
2.2. Mediciones	6
2.2.1. Propósito de las mediciones	6
2.2.2. Variables medidas en vibraciones	7
2.2.3. Rango de magnitud en variables de vibraciones por voladuras	7
2.3. Instrumentación	8
2.3.1. Sensibilidad del sensor	8
2.3.2. Tipos de transductores	9

2.4.	Sitios de medición	9
2.5.	Equipos, sitios de medición y periodos de funcionamiento del proyecto . . .	10
2.5.1.	Equipos utilizados	10
2.5.1.1.	Equipo de adquisición GSR18	10
2.5.1.2.	Equipo de adquisición GCR16	13
2.5.1.3.	Sensor SSA-320	14
2.5.2.	Sitios de medición y periodos de funcionamiento	14
2.5.2.1.	Sitios en Mulaló	15
2.5.2.2.	Sitios en San Marcos	16
2.5.2.3.	Periodos de funcionamiento	17
3.	Reglamentación en manejo de vibraciones	19
3.1.	Introducción	19
3.2.	Aspectos básicos	19
3.3.	Reglamentación Internacional	21
3.3.1.	Alemania - DIN 4150	22
3.3.2.	Escocia - PAN50	23
3.3.3.	EEUU - OSM 817.67	25
3.3.4.	EEUU - USBM RI8507	25
3.3.5.	España - UNE 22-381-93	26
3.3.6.	Internacional ISO 4866	29
3.3.7.	Norma Suiza SN 640 315a de 1992	31

3.3.8.	Norma Sueca SS 460 48 66 1991	32
3.4.	Implementación de valores representativos	32
3.4.1.	Valores representativos DIN 4150 de 1999	33
3.4.2.	Valores representativos PAN50	35
3.4.3.	Valores representativos del OSM 817.16	35
3.4.4.	Valores representativos del USBM RI8507	35
3.4.5.	Valores representativos del UNE 22-381-93	36
3.4.6.	Valores representativos ISO 4866	37
3.4.7.	Valores representativos de SS 460 48 46	37
3.4.8.	Valores representativos de SN 640 312a	38
3.5.	Reglamentación Nacionales	38
4.	Análisis y caracterización de señales	40
4.1.	Introducción	40
4.2.	Tipos de análisis	41
4.3.	Selección del tipo de análisis	43
4.4.	Generalidades del procesamiento digital de señales utilizado	44
4.4.1.	Estimación Velocidad	45
4.4.2.	Estimación de las frecuencias	47
4.5.	Análisis de señal compleja	49
4.5.1.	Señal compleja	50
4.5.2.	Frecuencia instantánea	51

4.5.3.	Ancho de banda instantáneo	56
4.5.4.	Implementación del análisis de señal compleja	57
4.5.5.	Limitaciones del análisis de la señal compleja	61
4.6.	Secuencia de procesamiento	62
5.	Niveles y efectos de las vibraciones	64
5.1.	Introducción	64
5.2.	Información disponible	64
5.2.1.	Eventos Registrados	65
5.2.2.	Información de las voladuras de Cementos del Valle	65
5.3.	Comparación de frecuencias	66
5.4.	Conformidad con las normas internacionales	68
5.5.	Relaciones entre vibraciones y parámetros de voladuras	70
5.5.1.	Relaciones empíricas	70
5.5.2.	Aplicación de la ley de escalamiento cubico a los datos de la mina La Calera – Cementos del Valle	72
5.5.3.	Dispersión en la distancia escalada	75
5.6.	Reducción de niveles de vibraciones en el suelo causados por las voladuras .	76
5.6.1.	A partir de las relaciones empíricas	76
5.6.2.	Recomendaciones generales para la reducción de vibraciones	78
6.	Conclusiones	80
A.	Tablas y Figuras	87

B. Conceptos básicos sobre voladuras	98
B.1. Introducción	98
B.2. Explosivos y sus propiedades	98
B.2.1. Reseña histórica	98
B.2.2. Propiedades de los explosivos	99
B.2.2.1. Fuerza	99
B.2.2.2. Velocidad de detonación	100
B.2.2.3. Densidad y gravedad específica	101
B.2.2.4. Presión de detonación	101
B.2.2.5. Sensibilidad	102
B.2.2.6. Resistencia al agua	102
B.2.2.7. Emanaciones	103
B.2.3. Tipos de explosivos	103
B.2.3.1. Geles	104
B.2.3.1.1. Gel explosivo	104
B.2.3.1.2. straight gel	104
B.2.3.1.3. Gel amoniacal	104
B.2.3.1.4. Semigeles	104
B.2.3.2. Agentes explosivos	105
B.2.3.2.1. Agentes explosivos secos	105
B.2.3.2.2. Lechadas explosivas	105
B.3. Técnicas básicas utilizadas en voladuras	106

B.3.1.	Patrones de voladuras	106
B.3.1.1.	Distribución de barrenos - Plantillas - Mallas	106
B.3.1.2.	Voladuras de una sola carga	106
B.3.2.	Patrones de retardo	107
B.4.	Explosivos y técnicas y su relación con las vibraciones	108
B.4.1.	Reducción de niveles de vibración	111
B.4.1.1.	Reducir la carga por retardo	111
B.4.1.2.	Intervalos de retardo	112
B.4.1.3.	Reducción del borde	112
C.	Normas internacionales	115
C.1.	Norma Suiza SN 640 312 a (1992) para efectos de sacudidas sobre edificaciones	115
C.1.1.	Generalidades	115
C.1.1.1.	Dominio de aplicación	115
C.1.1.2.	Objeto	115
C.1.1.3.	Propósito	116
C.1.1.4.	Criterio de valoración	116
C.1.1.5.	Valoración subjetiva	116
C.1.1.6.	Efecto de sacudidas	116
C.1.2.	Valores indicativos	117
C.1.2.1.	Gradación de valores indicativos	117
C.1.2.2.	Clases de susceptibilidad de las edificaciones	117

C.1.2.3.	Frecuencia de las solicitudes	117
C.1.2.4.	Rangos de frecuencia	118
C.1.2.5.	Aplicación de los valores indicativos	120
C.1.3.	Realización de las mediciones de sacudidas	120
C.1.3.1.	Principios	120
C.1.3.2.	Sitio de medición y fijación de los sensores	120
C.1.3.3.	Requisitos para el equipo de medición	122
C.1.3.4.	Interpretación	123
C.1.3.5.	Presentación de resultados (protocolos)	123
C.1.4.	Fisuras y protocolos de fisuras	123
C.1.4.1.	Descripción de fisuras	123
C.1.4.2.	Desarrollo de fisuras	124
C.1.4.3.	Aumento de fisuras por sacudidas	125
C.1.4.4.	Protocolos de fisuras	125
C.2.	Norma sueca SS 460 48 66 (1991), para vibraciones inducidas por voladuras en edificaciones	125
C.3.	Norma Escocesa PAN 50: Control de efectos ambientales de trabajos en minería superficial. Anexo D: Control de voladuras en minería superficial	127
C.3.1.	Vibraciones	128
C.3.1.1.	Mediciones	128
C.3.1.2.	Niveles de amplificación	129
C.3.1.3.	Efectos de la frecuencia	129
C.3.1.4.	Respuesta humana	130

C.3.1.5.	Efectos sobre las estructuras	131
C.3.1.6.	Predicción	131
C.3.1.7.	Efectos de la geología	132
C.3.2.	Condiciones	132
C.3.2.1.	Niveles de vibración permitidos	132
C.3.2.2.	Limitación en el número de voladuras	134
C.3.2.3.	Edificaciones susceptibles a vibraciones	134
C.3.2.4.	Esquema de monitores de vibraciones	134
C.4.	Norma Española UNE 22-381-93	136
C.4.1.	Objeto	136
C.4.2.	Campo de aplicación	136
C.4.3.	Clasificación de estructuras a efectos de la aplicación del criterio de prevención de daños	136
C.4.4.	Determinación de los parámetros característicos de la vibración	137
C.4.5.	Criterio de prevención de daños	139
C.4.6.	Tipo de estudios de vibraciones requerido	140
C.4.7.	Definición de los diferentes tipos de estudio de vibraciones	143
C.4.7.1.	Proyecto tipo de vibraciones	143
C.4.7.2.	Medición de control de vibraciones	144
C.4.7.3.	Estudio preliminar de vibraciones	144
C.4.8.	Instrumentación a emplear	145
C.4.8.1.	Requerimientos de los equipos	145

C.4.8.2. Fijación de los sensores al terreno	146
D. Transformada de Hilbert	147
E. Información voladuras en mina La Calera Cementos del Valle	149
F. Resultados procesamiento de señales	157

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Equipo de medición de vibraciones OSSOdas	11
2.2. Equipo de medición de vibraciones Minimate – Instantel	12
2.3. Equipo de adquisición GSR18	13
2.4. Sensor SSA-320 instalado en los equipos de adquisición GSR18 y GCR16 .	14
2.5. Respuesta en frecuencias del los sensores SSA-320	15
2.6. Foto frontal de la iglesia de Mulaló y de la caseta ubicada en ese sitio . . .	16
2.7. Fotos de la estación de monitoreo de vibraciones en San Marcos	17
3.1. Compendio de daños por vibraciones del USBM RI8507	27
3.2. Resumen de velocidades máximas indicativas de las diferentes normas aplicados al caso del mina La Calera	34
3.3. Velocidades de vibración permisibles por la USBM RI8507	36
4.1. Análisis de señales armónicas y transitorias	42
4.2. Señal sinusoidal y parámetros que describen el movimiento en este tipo de ondas	44
4.3. Movimiento de partícula, descomposición y sumas vectoriales de la voladura de la fecha 2000/06/20	46
4.4. Señal armónica (coseno) y la magnitud de su espectro en el caso continuo y discreto	50
4.5. Diagrama de una señal y su hipotético espectro en un instante de tiempo .	52
4.6. Señal compleja y representación en magnitud y fase de la señal de la componente vertical de la voladura de la fecha 2000/06/20	53
4.7. Señal chirp y el fenómeno de repetición cíclica de la frecuencia instantánea	59

4.8. Señal chirp remuestreada y la carencia del fenómeno de repetición cíclica en frecuencia instantánea	60
4.9. Frecuencias instantáneas usando el método de Claerbout (1992) para dos señales chirp con frecuencias de muestreo de 100 y 1000 Hz	61
4.10. Señal de voladura de la fecha 2000/06/20 y frecuencias instantáneas utilizando FIR de dos y tres puntos.	62
5.1. Comparación entre la frecuencia de Fourier, cruce por ceros y frecuencia instantánea para señales transitorias de voladuras	67
5.2. Comparación entre las frecuencias instantáneas máximas y mínimas	69
5.4. Ley de escalamiento cubico para los datos de la mina La Calera.	73
5.5. Comparación de las relaciones de atenuación de la USMB (Persson et al., 1994, pág. 362) y los datos de las voladuras registradas en San Marcos y Mulaló	76
5.3. Conformidad con las normas	79
A.1. Mapa de la ubicación geografica del proyecto	90
A.2. Localización de las estaciones sismológicas para la observación de vibraciones producidas por voladuras en la mina La Calera Cementos del Valle	91
A.3. Mapa de las voladuras realizadas en el periodo junio 1999 a agosto 2002	92
A.4. Mapa de voladuras del periodo junio 1999 a agosto 2002, correlacionadas con información de vibraciones y distribución según sitio de registro.	93
A.5. Foto aérea panorámica de la mina La Calera tomada en dirección noroeste y la ubicación de las estaciones de monitoreo de vibraciones: San Marcos y Sieber (fecha: 199?)	94
A.6. Foto aérea panorámica de la mina La Calera tomada en dirección oeste y la ubicación de las estaciones de monitoreo de vibraciones: Mulaló y Sieber (fecha: 1996)	94
A.7. Señal seno y su frecuencia instantánea	95
A.8. Suma de dos señales seno y su frecuencia instantánea	95

A.9. Registro de vibraciones de una voladura y frecuencia instantánea (fecha: abril 7 de 2000)	96
A.10. Ampliación entre 1 y 2.5 s y entre 0 y 25 Hz del registro de vibraciones de voladura de abril 7 de 2000	97
B.1. Propiedades de los explosivos comerciales	101
B.2. Vista en planta de arreglos básicos de barrenos.	107
B.3. Vista en perfil de un arreglo de barrenos.	108
B.4. Técnicas de voladuras con una sola carga.	109
B.5. Fotos de la secuencia una voladura en la mina La Calera	110
B.6. Secuenciación típica de mallas.	111
C.1. Relación entre la distancia y el factor F_d en norma de Suecia	127
C.2. Determinación de los parámetros característicos de la vibración norma española UNE-22-381-93	137
C.3. Orientación de los sensores según la norma española UNE-22-381-93	138
C.4. Cálculo de la frecuencia principal según la norma española UNE-22-381-93 .	139
C.5. Criterio de prevención de daños según la Norma española UNE 22-381-93 .	140
C.6. Tabla carga/distancia general, selección del tipo de estudio según UNE 22-381-93 (España)	141
C.7. Forma de fijación de los sensores al terreno según UNE 22-381-93 (España)	146

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Rangos típicos de los parámetros de vibraciones	8
2.2. Períodos de funcionamiento y ubicación de las estaciones de monitoreo sísmico de voladuras de Cementos del Valle	18
3.1. Normatividad internacional en el manejo de voladuras	22
3.2. Resumen de los valores indicativos de la norma DIN 4150	23
3.3. Resumen de los valores indicativos de la PAN50	24
3.4. Valores de velocidad de partícula pico asociados con diferentes tipos de daños en la norma PAN50 Anexo D - Escocia	24
3.5. Resumen de los valores indicativos de la norma OSM 817.67	25
3.6. Resumen de la USBM RI8507	26
3.7. Resumen de la norma UNE 22-381-93 (España)	28
3.8. Valores de velocidad máximos en mm/s y frecuencias para la prevención de daños según la norma española UNE 22-381-93	28
3.9. Aspectos importantes en la reglamentación ISO 4855 de 1990.	30
3.10. Aspectos importantes en la reglamentación Suiza SN 640 315a (1992)	31
3.11. Aspectos importantes de la SS 640 315a (Suecia)	33
4.1. Resumen de las ecuaciones utilizadas en el calculo de parámetros frecuencia y ancho de banda instantáneos.	58
5.1. Distribución de registros de voladuras por ubicación y equipo de adquisición. Todos los eventos registrados	65
5.2. Distribución de registros de voladuras por ubicación y equipo de adquisición. Eventos relacionados con información de Cementos del Valle	66

5.3. Variables consideradas en el análisis adimensional del fenómeno de explosiones	71
A.1. Valores guía máximos para velocidad de partícula DIN4150:1999	87
A.2. Velocidades pico recomendadas por la DIN 4150:1979.	87
A.3. Rangos típicos de respuesta estructural para varios tipos de fuentes de la ISO (1990)	88
A.4. Visión sinóptica de las normas analizadas	89
B.1. Propiedades de los geles explosivos	113
B.2. Velocidad de detonación y concentración de carga de ANFO con relación al diámetro del barreno	114
C.1. Clases de susceptibilidad (Norma Suiza)	118
C.2. Frecuencia de las solicitaciones y fuentes de sacudida	121
C.3. Valores indicativos de vibraciones (Norma Suiza)	122
C.4. Anchos de fisura admisibles dependiendo de la exposición (Norma Suiza)	124
C.5. Valores vertical pico máximos de partícula sin corrección (Norma Sueca)	126
C.6. Valor del factor F_b según el tipo de edificación (Norma Sueca)	126
C.7. Valor del factor F_m según el tipo de material (Norma Sueca)	126
C.8. Valor del factor F_t según el tipo de actividad (Norma Sueca)	127
C.9. Criterios de prevención de daños según Norma UNE 22-381-93	140
C.10. Valores del factor de tipo estructural F_e en UNE 22-318-93 (España)	142
C.11. Valores del factor de macizo rocoso F_r en UNE 22-318-93 (España)	142
E.1. Información de voladuras periodo 1999 → 2002	150
F.1. Parámetros de voladuras	159

INTRODUCCIÓN

Las vibraciones que mayor atención han recibido en la Ingeniería Civil son las causadas por terremotos, por obvias razones: su enorme potencial de daño. Pero hay otro tipo de vibraciones, aquellas generadas por el ser humano - en el proceso mismo de la Ingeniería Civil (voladuras, máquinas vibradoras, tráfico, etc.) o en otras actividades - que son de gran importancia, porque también pueden incidir en la integridad de las estructuras y causar sensaciones molestas. Su conocimiento, evaluación y control es creciente, a medida que las fuentes de estas vibraciones aumentan presencia y potencia, aumentando de esa manera el potencial de daños, a medida que aumenta la percepción y el control de factores ambientales nocivos, y también porque estas vibraciones pueden ofrecer una posibilidad - consideradas como señales excitadoras - de resolver problemas de evaluación en la Ingeniería (dinámica de suelos y estructuras).

Estas vibraciones de causa humana requieren otro tipo de enfoque en su evaluación y control que las causadas por sismos, por varias razones:

- Por el mismo hecho de su causa - humana - estas vibraciones son controlables, si se entienden bien su generación, características y efectos.
- No pueden llegar a tener la intensidad de movimientos sísmicos, pero son mucho más frecuentes.
- El tipo de vibraciones generalmente es diferente a las sísmicas, en casi todas las características de forma de onda (contenido frecuencial, envolvente, duración, etc.)

La atención a estos fenómenos en Colombia es significativamente reciente y por tal motivo puede ser importante hacer una contribución a su conocimiento y promover su consideración sistemática en la Ingeniería Civil. En este proyecto se aborda el tema de vibraciones generadas por voladuras en minería, debido a que se dispone de una buena cantidad de información (datos y literatura técnica) sobre este tipo de vibraciones, y a la disponibilidad de Cementos del Valle (mina La Calera – Yumbo) para suministrar información sobre sus voladuras.

Para el desarrollo del tema es importante conocer una parte del proceso de experimentación, es por esto que la sección 2 se plantean las variables representativas del fenómeno y los equipos utilizados para medir estas variables. En esta sección también se presenta la instrumentación, sitios y periodos de medición utilizados para la elaboración de este proyecto.

Con el fin de evaluar los efectos de las vibraciones en las edificaciones se plantea el uso de normas internacionales (sección 3), las cuales se basan en principios físicos, así como en miles de observaciones de los efectos de las vibraciones sobre una gran cantidad de tipología

estructural. Adicionalmente en esta sección se encuentran los valores umbrales que son aplicables al área de estudio y al tipo de vibraciones (voladuras) generadas en la mina La Calera (Cementos del Valle).

La información obtenida en las estaciones de monitoreo de vibraciones debe ser procesada con el fin de ser comparada con la reglamentación internacional, con este fin se revisan en la sección 4 los diferentes tipos de análisis de señales sugeridos por las normas internacionales. Adicionalmente se plantea un método alternativo para calcular la frecuencia basado en las nuevas relaciones de tiempo-frecuencia y se muestra la secuencia de procesamiento. La comparación del procesamiento con los valores indicativos de las normas internacionales se tratan en la sección 5, también en esa sección se muestran las relaciones empíricas usualmente utilizadas en vibraciones producidas por voladuras.

El Anexo B presenta a manera de introducción al tema, y de forma general, los explosivos y sus propiedades, las clases de explosivos utilizados en minería superficial (como en la mina La Calera) y algunas técnicas de voladuras utilizadas en minas y canteras.