

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **MONITOREO, ESTUDIO Y ANALISIS DE VIBRACIONES ASOCIADAS A EL USO DE VOLADURAS CON EXPLOSIVOS EN LOS TRABAJOS DE EJECUCIÓN DEL TUNEL CARRIZALITO DE LA LINEA DEL METRO LOS TEQUES**

TUTOR ACADÉMICO: Msc. Rommel Whilchy

TUTOR INDUSTRIAL: Msc. Aldo Cataldi

COTUTOR ACADÉMICO: Dr. Michael Schmitz

Presentado ante la Ilustre

Universidad Central de

Venezuela para optar el Título

de Ingeniero Geofísico

Por el Br. Borges Viralta, José Enrique

Caracas, Noviembre 2004

Dedicada a mi madre y padre.

## AGRADECIMIENTOS

A mi madre y al brother porque son lo más grande en mi vida y han dado todo cuanto pueden por mí, por ser mis guías, por su apoyo y por formar al ser humano que soy.

A mi yaya, por acogerme y darme su apoyo en mis últimos años de carrera, te lo agradezco con todo el corazón.

A mis tutores Rommel Whilchy, Aldo Cataldi y Michael Schmitz, por sus enseñanzas, su disposición y colaboración siempre que la necesite.

A TRX Consulting, por brindarme la oportunidad de realizar éste trabajo especial de grado y ponerme a disposición el equipo necesario para su desarrollo.

A ASTALDI S.P.A. de Venezuela, por permitir realizar el estudio de sus actividades, por brindar la colaboración necesaria en el momento oportuno y por el apoyo brindado de la sala técnica.

A mis hermanos Jesús y Mónica, por ser parte esencial de mi vida y por su apoyo prestado en todo momento.

A Roberto y Ricardo, mis amigos de la universidad, por estar siempre en los momentos en que los necesitaba.

A mi abuela y familia, gracias por su apoyo y por estar siempre pendiente de mí.

A todas las personas que de una u otra forma contribuyeron a la realización de éste trabajo.

América, fuente de inspiración en mi vida.

**Borges V., José E.**

**MONITOREO, ESTUDIO Y ANALISIS DE VIBRACIONES ASOCIADAS A  
EL USO DE VOLADURAS CON EXPLOSIVOS EN LOS TRABAJOS DE  
EJECUCIÓN DEL TUNEL CARRIZALITO DE LA LINEA DEL METRO  
LOS TEQUES**

**Tutor académico: Msc. Rommel Whilchy. Tutor industrial: Msc. Aldo Cataldi.  
Cotutor: Dr. Michael Schmitz. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela  
de Geología, Minas y Geofísica. Año 2004, 136p.**

**Palabras claves:** frecuencia dominante, velocidad pico, vibración, voladura.

**Resumen.**

La utilización de voladuras con explosivos dentro de los trabajos de construcción del túnel Carrizalito del metro Los Teques, generan ondas y vibraciones que se propagan hacia todas las direcciones pudiendo ser perjudiciales para las estructuras y edificaciones colindantes a la detonación y para los seres humanos que residen o realizan alguna actividad en las áreas adyacentes. Por este motivo nace la necesidad de monitorear las actividades donde esté implicado el uso de explosivos en los trabajos de ejecución del túnel Carrizalito con el fin de evaluar su el impacto.

Este trabajo se basa principalmente en evaluar una metodología sobre control de vibraciones producidas por las actividades de voladura en el túnel Carrizalito, contemplando el monitoreo y estudio de las vibraciones producidas. De esta manera se pretende realizar un aporte en cuanto a generar una metodología sobre el control de vibraciones, la cual no está contemplada en la legislación venezolana.

A partir de los monitoreos de vibraciones, y posteriores análisis y estudios realizados se obtuvo que:

- La distancia de seguridad para edificaciones históricas es de 29,04 metros y para edificaciones residenciales 49,54 metros.
- La norma internacional DIN 415073, presenta una buena referencia para conocer los límites de velocidad y frecuencia que pueden tolerar las estructuras frente a las vibraciones producidas por voladuras con explosivos.
- El 85% de las actividades de voladura monitoreadas no presentaron ningún tipo de perjuicio en contra de las estructuras y los seres humanos.
- El sector afectado por las actividades de voladura dentro del túnel Carrizalito corresponde al barrio Bertorelli Cisneros, tanto para el riesgo estructural de las edificaciones como los parámetros de tolerancia a vibraciones de los seres humanos.
- Los registros obtenidos de las voladuras no presentan una frecuencia nítidamente definida, varía entre 10 y 120 Hertz con una media de 61,95Hz.
- Las vibraciones de fondo en algunos casos supera los registros obtenidos por las voladuras. La media obtenida fue de 0,23mm/s.

## ÍNDICE

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN	iv
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABLAS	x
LISTA DE MAPAS	x
	<b>pág.</b>
CAPITULO I	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.3 OBJETIVOS	4
1.3.1 Objetivo General	4
1.3.2 Objetivos Específico	4
1.4 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	5
CAPITULO II	8
2 MARCO GEOLÓGICO	8
2.1 GEOLOGÍA REGIONAL	8
2.1.1 Cordillera del Caribe	8
2.1.2 Faja de la Cordillera de la Costa	9
2.1.3 Formación la Brisas	9
2.1.4 Formación las Mercedes	11
2.1.5 Geología estructural regional	12
2.2 GEOLOGÍA LOCAL	13
2.2.1 Aspectos geomorfológicos	13
2.2.2 Aspectos geológicos	13
2.2.3 Características geotécnicas de los materiales encontrados	15

CAPITULO III	17
3 MARCO TEÓRICO	17
3.1 ANTECEDENTES Y TRABAJOS PREVIOS EN VENEZUELA	17
3.2 ASPECTOS TEÓRICOS Y CONCEPTUALES	18
3.3 IMPORTANCIA DE LA FRECUENCIA	21
3.4 NORMAS Y RECOMENDACIONES PARA EL CONTROL DE VIBRACIONES PROVOCADAS POR EL USO DE EXPLOSIVOS EN ÁREAS URBANAS	22
3.4.1 Normal Alemana (DIN 4150)	23
3.4.2 Norma Suiza (SN 640312)	25
3.4.3 Norma Española (UNE 22-381-93)	26
3.4.4 Norma Sueca (SS 4604866)	30
3.4.5 Norma Italiana (UNI 9916)	32
3.4.6 Norma Inglesa (BS 5228, BS 6472, BS 7385)	33
3.4.7 Norma Portuguesa (NP 2074)	34
3.4.8 Recomendación Francesa (RT 23.7.1986)	35
3.4.9 U.S. Bureau of Mines (U.S.B.M. RI 8507)	39
3.4.10 Norma Brasileira (NBR 9653)	42
3.5 AFECTACIÓN DE VIBRACIONES A HUMANOS	43
3.6 CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE VOLADURAS	47
3.6.1 Voladura instantánea	47
3.6.2 Voladura con retardadores	47
3.7 DAÑOS CAUSADOS POR LA VOLADURA	48
CAPITULO IV	49
4 METODOLOGÍA	49
4.1 INSTRUMENTO DE MEDICIÓN	
4.1.1 Unidad de adquisición MR2002	50
4.1.2 Sensor MS2003	51
4.1.3 Especificaciones Técnicas	52

4.2 METODOLOGÍA DE ADQUISICIÓN	53
4.3 METODOLOGÍA DE PROCESAMIENTO Y TRATAMIENTO DE DATOS	56
CAPITULO V	63
5 RESULTADOS Y ANÁLISIS	63
5.1 ANALISIS ESTADISTICO	69
5.2 ANALISIS SOBRE ALGUNAS NORMAS INTERNACIONALES SOBRE CONTROL DE VIBRACIONES	75
5.3 ANALISIS DE DISTANCIAS DE SEGURIDAD	84
5.4 ANALISIS DE LAS VIBRACIONES DE FONDO	91
5.5 ANALISIS DE AFECTACION POR VIBRACION A HUMANOS	95
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	99
REFERENCIA BIBLIOGRAFICA	103
Apéndice A. Tablas	109
Apéndice B. Mapa del túnel Carrizalito con la ubicación de los puntos de medición	116
Apéndice C. Estadística (Tablas, histogramas, diagramas de caja y gráficos Q-Q)	118
Apéndice D Límite para valores de velocidad pico y frecuencia dominante por componentes de la norma alemana (DIN 4150/3)	124
Apéndice E Gráficas de afectación por vibración a humanos por componentes	127
Apéndice F Transformada de Fourier y transformada rápida de Fourier	131
Apéndice G Patrón de Voladura	134

## LISTA DE FIGURAS

	<b>pag.</b>
3.4.1 Gráfica de picos de velocidad versus frecuencia con los límites para los tres tipos de edificaciones contemplados en la Norma Din 4150/3	25
3.4.3.a Gráfica de frecuencia versus velocidad pico de la norma española (UNE 22-381-93) con los respectivos límites para los tres grupos de estructuras	28
3.4.3.b Gráfico de la norma UNE 22-381-93, que permite conocer el tipo de estudio requerido	29
3.4.8.a Límites sugeridos de velocidad y frecuencia	36
3.4.8.b Recomendación Francesa (RT 23.7.1986)	38
3.4.9.a Criterio de daños en edificios	39
3.4.9.b Niveles de seguridad para vibraciones de estructuras residenciales según el U. S. Bureau of Mines	42
3.5.1 Guía simplificada para predecir la respuesta humana a las vibraciones	44
4.1.1 Seismograph Syscom MR2002-CE	50
4.1.3.a Principio del sensor y curva de respuesta	51
4.1.4.a Tipos de filtros disponibles en el equipo de medición para la adquisición	52
4.2.1 Disposición del equipo de medición Syscom MR2002-CE durante la adquisición	55
4.3.1 Señal de ruido ambiental pre-evento registrada el 23 de Abril de 2004	58
4.3.2 Señal producida por la voladura registrada el 23 de Abril de 2004	59
4.3.3 Tabla de valores de velocidad y frecuencia obtenidos durante la adquisición del día 23 de Abril de 2004	60
4.3.4 Valores de frecuencia obtenidos para la voladura del día 23 de Abril de 2004	61
5.1 Sismograma correspondiente al punto 43 de medición marcando los valores máximos de velocidad de cada componente	64
5.2 Espectro de frecuencia obtenido del punto 43	66
5.1.1 Histograma de frecuencia para la frecuencia dominante	69
5.1.2 Diagrama de caja para la frecuencia dominante	69
5.1.3 Histograma de frecuencia para la velocidad pico	70

5.1.4	Diagrama de caja para la velocidad pico	70
5.1.5	Histograma de frecuencia para la distancia	71
5.1.6	Diagrama de caja para la distancia	71
5.1.7	Histograma de frecuencia para la carga	72
5.1.8	Diagrama de caja para la carga	72
5.2.1	Límite para valores de velocidad pico y frecuencia dominante de la norma alemana (DIN 4150/3)	76
5.2.2	Identificación de puntos respecto a la velocidad pico y frecuencia dominante con el fondo de la norma DIN 4150/3	77
5.2.3	Valores de velocidad y frecuencia sugeridos por la norma suiza (SN 640312)	78
5.2.4	Límites de velocidad de vibración de partícula $V_p$ sugeridos por la circular del Ministerio de Ambiente francés para la norma francesa (23.7.1986)	79
5.2.5	Criterio de prevención de daños por el uso de voladuras con explosivos de la norma española (UNE 22-381-93)	79
5.2.6	Límites de vibración de partícula de la norma portuguesa (NP 2074)	80
5.3.1	Intersección de frecuencia media con los límites de la norma DIN 4150/3	85
5.3.2	Relación velocidad pico – distancia ajustada a una curva potencial	86
5.3.3	Identificación de puntos respecto a la velocidad pico y distancia	87
5.3.4	Relación carga-distancia y carga-velocidad	90
5.4.1	Vibraciones de fondo (Ruido ambiental)	91
5.4.2	Vibraciones de fondo después de las 6pm	92
5.4.3	Vibraciones de fondo entre las 7am y 6pm (Ruido ambiental)	92
5.4.4	Histogramas de velocidad y frecuencia para el ruido de fondo	93
5.4.5	Gráfico Q-Q de velocidad y frecuencia para el ruido de fondo	93
5.5.1	Respuesta humana a vibraciones en régimen transitorio	95
5.5.2	Relación entre valores $K_b$ y la percepción humana de vibraciones	96
5.5.3	Niveles sugeridos de vibración aceptable en zonas residenciales para valores de $K_b$	97

## LISTA DE TABLAS

	<b>pág.</b>
3.4.1 Tipo de estructuras, picos de velocidad y frecuencia de la norma alemana (Din 4150)	24
3.4.2 Valores sugeridos por la norma suiza. Los valores de Vp fueron medidos para fuentes de vibración de tipo ocasional	26
3.4.3 Velocidad, frecuencia y tipo de estructura (UNE 22-381-93)	27
3.4.4 Valores límites (en mm/s) para Vp en la componente vertical para daños en estructuras civiles	31
3.4.7 Límites de los valores de vibración de partícula en mm/s	35
3.4.8.a Valores de velocidad de vibración de la partícula, según la AFTES, 1974	37
3.4.8.b Límites de velocidad de vibración de partícula Vp sugeridos por la circular del Ministerio de Ambiente francés	37
3.4.9.a Daños Causados por vibraciones en edificios	40
3.4.9.b Valor máximo de velocidad de partícula según propuesta del U. S. Bureau of Mines en 1980	41
3.5.1 Relación entre valores Kb y la percepción humana de vibración	46
3.5.2 Niveles sugeridos de vibraciones aceptables por diferentes tipos de edificios. Intensidades aceptables en Kb	46
5.1 Velocidad de cada componente y velocidad pico calculada	63
5.2 Frecuencia asociada a cada componente y frecuencia dominante	66
5.3 Valores de velocidad pico, frecuencia dominante, distancia y carga correspondiente a cada punto de medición	68
5.3.1 Distancia entre voladura y viviendas	89

## LISTA DE MAPAS

	<b>pág.</b>
1.4.1 Ubicación de la zona de estudio	6
1.4.2 Túnel Carrizalito	7
2.1.1 Faja tectónica de los macizos centrales de la Cordillera del Caribe	9
2.1.2 Mapa de afloramientos de las formaciones Peña de Mora, Las Brisas, Antemano y las Mercedes	12
2.2 Túnel Carrizalito, Geología	16

# CAPITULO I

## 1.1 INTRODUCCIÓN

Una explosión es una repentina liberación de energía térmica, química, mecánica y sónica, que provocan la generación de ondas y vibraciones que se propagan en forma radial hacia todas las direcciones. La utilización de voladuras con explosivos son imprescindibles para los trabajos de minería en la extracción de materiales y en trabajos ingenieriles de obras públicas (Túneles, Acueductos, Represas, etc.), pero a su vez pueden ser perjudiciales para las estructuras históricas, residenciales e industriales colindantes a la detonación y para los seres humanos que residen o realizan alguna actividad en las áreas adyacentes, debido a las vibraciones que se generan por las explosiones. En consecuencia se hace necesario evaluar una metodología sobre control de vibraciones producidas por las actividades que estén relacionadas con el uso de voladuras con explosivos en zonas urbanas y hacer un análisis de los efectos que producen estas actividades sobre las estructuras cercanas y las personas que habitan el área.

Actualmente existe la necesidad de establecer normas que regulen las actividades que generen vibraciones en zonas urbanas, que puedan producir afectación a las estructuras y los seres humanos que se encuentran cercanos a la actividad, tanto para actividades en donde este implicado el uso de voladuras con explosivos, como en otras actividades donde se utilice maquinaria pesada para la excavación de túneles como pueden ser por ejemplo el martillo hidráulico y excavadoras. En éste caso se tuvo la oportunidad de hacer monitoreos de vibraciones por voladuras.

La creciente necesidad de medios de transporte público entre la Ciudad de Caracas y Los Teques debido al progresivo desarrollo y aumento de densidad poblacional entre ambas ciudades, ha obligado el desarrollo de una línea de metro que las comunique a ambas, por lo cual se ha venido trabajando en el desarrollo de varios túneles que comunican a Los Teques con la ciudad de Caracas, como lo es el túnel

Carrizalito que es el objeto de estudio, en el cual se utilizan voladuras con explosivos para su ejecución.

De esta manera el estudio que aquí se expone presenta un aporte en cuanto a generar una metodología de monitoreo y análisis de vibraciones en trabajos en donde este implicado el uso de voladuras subterráneas con explosivos, tanto en minería como en desarrollo de obras publicas como lo es en este caso la construcción del túnel Carrizalito del metro Los Teques.

El trabajo especial de grado que aquí se desarrolla contempla una serie de capítulos ordenados de una manera secuencial con el fin de facilitar la apropiada comprensión de lo que se explica; comenzando con la exposición del planteamiento del problema y los objetivos que se quieren alcanzar dentro del trabajo, en donde se vislumbra la importancia de éste y las implicaciones que pudiera tener para una investigación. En segundo lugar se desarrolla un marco referencial en donde se describen algunos aspectos teóricos y conceptuales relacionados estrechamente con la tesis de grado, empezando con el marco geológico regional y local en donde fueron realizados los estudios, posteriormente se exponen varios conceptos básicos que forman parte de la base teórica en la cual se desarrolla el trabajo especial de grado, además de contemplar una descripción y análisis de las normativas internacionales vigentes actualmente sobre el control de vibraciones producidas por voladuras con explosivos en áreas urbanas por actividades de minería, demolición y trabajos de construcción de obras publicas.

Consecutivamente se desarrollan los capítulos más importantes del trabajo que están comprendidos en primer lugar por la metodología, la cual engloba los métodos y técnicas desarrollados dentro de la investigación para cubrir los objetivos planteados, esbozando una metodología de adquisición y una metodología de procesamiento en las cuales se describen las actividades realizadas paso a paso, incluyendo la descripción técnica del instrumental utilizado para la adquisición de los datos. En segundo lugar se hace la exposición de los resultados obtenidos, análisis de los resultados, limitaciones y procedimientos realizados durante el desarrollo del trabajo especial de grado. Por ultimo se presenta las conclusiones basadas sobre los

resultados y análisis realizados, en donde se presentan los aportes más significativos y las recomendaciones.

## **1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El problema que se plantea dentro del trabajo especial de grado se basa en la necesidad de llevar un control de las vibraciones sobre las actividades de construcción del túnel Carrizalito del metro Los Teques, debido a que actualmente no existen normativas en Venezuela que reglamenten y controlen las operaciones que implican el uso de explosivos en zonas urbanas, ni los aspectos relativos a los daños que pueden sufrir las estructuras (casas, edificios, industrias, puentes, etc.) y a las personas que se encuentren cerca del área de la voladura por las ondas y vibraciones que estas generan.

Específicamente nos encontramos con el caso de los trabajos de excavación que se están llevando a cabo para la construcción del metro de Los Teques, en donde se están utilizando voladuras con explosivos para la ejecución del túnel Carrizalito, que unirá la estación de Las Adjuntas en Caracas con la futura estación del Tambor en Los Teques, por ello es comprensible y justificable la necesidad de monitorear las vibraciones generadas por dicha actividad, con el fin de medir el impacto que estas tienen sobre las estructuras y los habitantes de las zonas populares colindantes al túnel Carrizalito.

El Consorcio Metro Los Teques está constituido por la asociación de varias empresas, una de ellas es la compañía ASTALDI S.P.A. encargada de la ejecución del túnel Carrizalito, tanto en avance por excavación como por detonación con explosivos. Esta compañía conciente de que las actividades con voladura generan ondas y vibraciones que pueden afectar y perjudicar las estructuras, viviendas y habitantes que se encuentran próximos al eje del túnel Carrizalito, dentro del ámbito aplicado a las normativas internacionales de monitoreo de vibraciones y control, realizo el monitoreo de las vibraciones producidas por dicha actividad, para asegurarse que están dentro de los límites que establecen las normas internacionales

para el control de vibraciones, para ello contacto con la compañía TRX Consulting, la cual apporto los equipos de medición y el asesoramiento técnico para realizar el monitoreo de las vibraciones y hacer los análisis correspondientes.

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. Objetivo General**

Evaluar una metodología de estudio y monitoreo de vibraciones producidas por voladuras con explosivos en las áreas adyacentes a los trabajos de ejecución del túnel Carrizalito del metro de Los Teques, que une la Estación de Las Adjuntas en Caracas con la futura estación El Tambor en los Teques y las zonas vecinas a la carretera Las Adjuntas – Los Teques.

#### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- a) Monitorear las vibraciones producidas por las voladuras realizadas para la construcción del túnel Carrizalito.
- b) Monitorear las vibraciones de fondo debido al ruido ambiental y establecer una comparación con las producidas en las voladuras.
- c) Estimar una distancia de seguridad en las condiciones geológicas específicas de la zona, entre la voladura y las estructuras correspondientes a zonas populares en las áreas adyacentes a los trabajos de ejecución del túnel Carrizalito del metro de Los Teques.
- d) Estudiar el contenido en frecuencia de las vibraciones debido al ruido ambiental en las áreas adyacentes a los trabajos de construcción del Metro Los Teques o por la voladura implicada en los trabajos de ejecución del mismo.
- e) Estimar los valores por grado de perturbación a humanos ( $K_b$ ) derivados de las detonaciones de explosivos dentro de los trabajos de ejecución del túnel Carrizalito del metro de Los Teques.

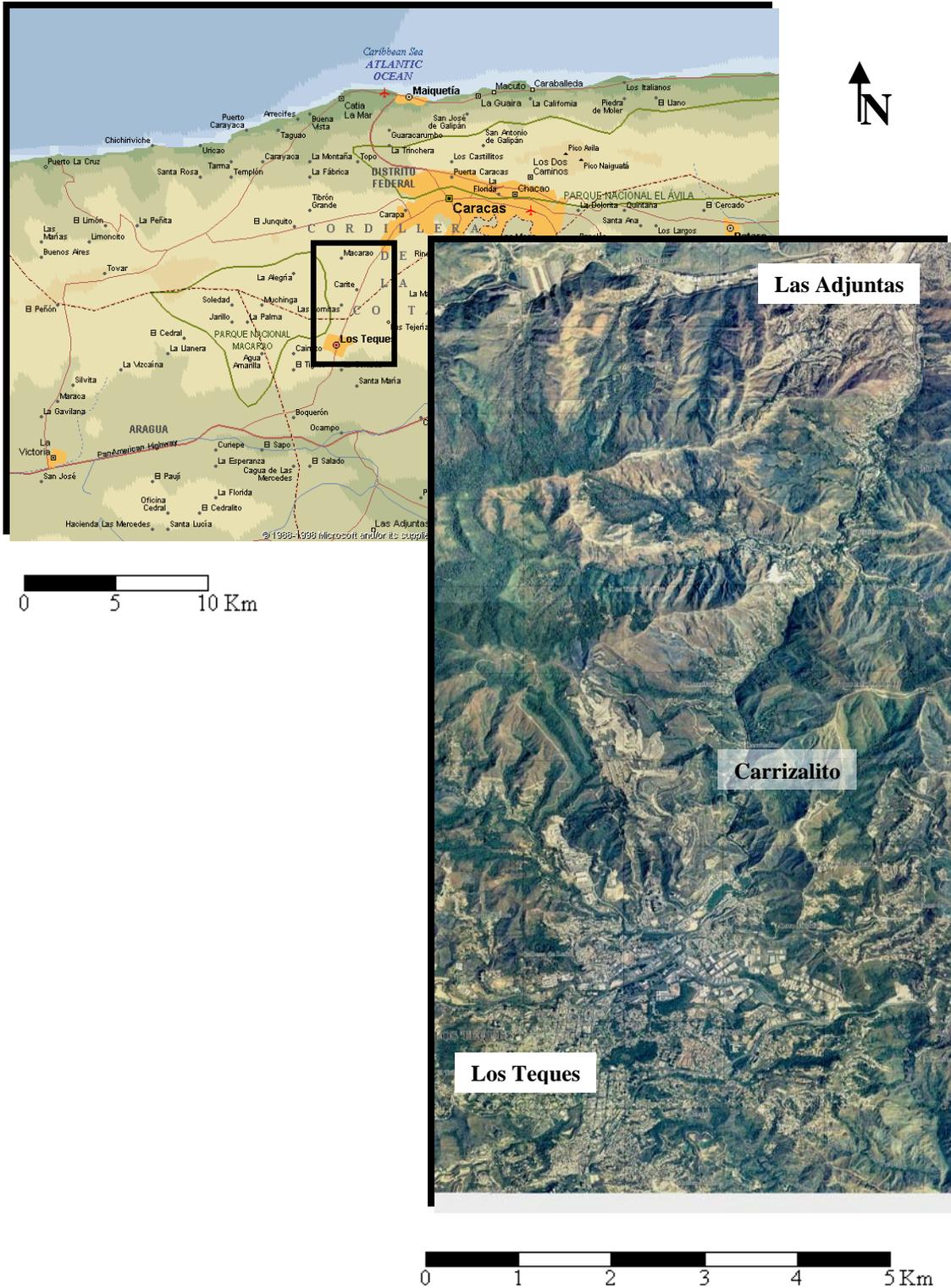
#### **1.4. UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO**

El proyecto de construcción de la Línea Metro Los Teques, se encuentra ubicada entre el Estado Miranda y el Distrito Capital (Figura 1.4), la cual unirá a través de este transporte público a Los Teques en los Altos Mirandinos con la Línea 2 del Metro de Caracas en la Estación de las Adjuntas.

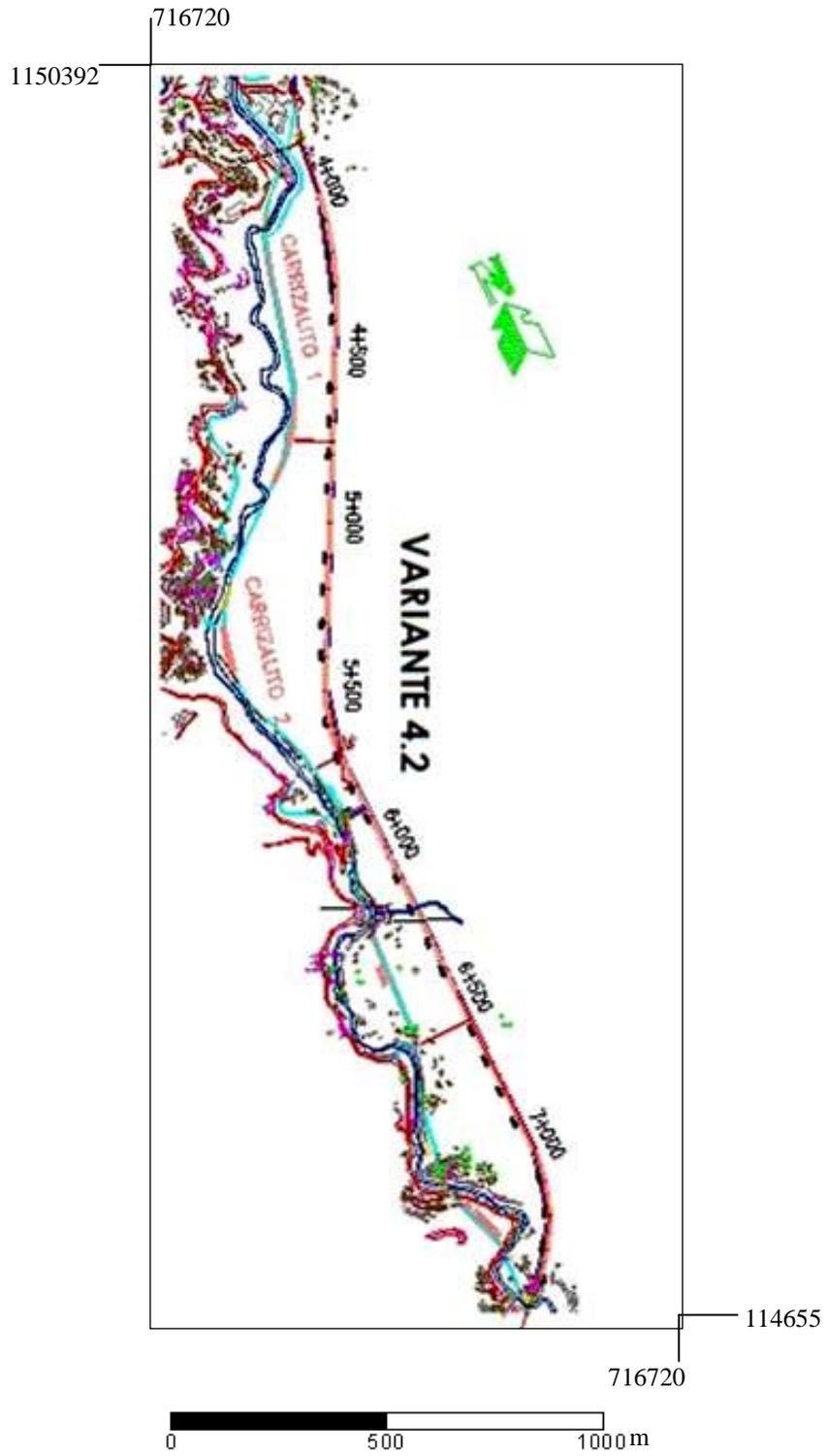
El desarrollo del túnel Carrizalito, que es uno de los varios túneles que unirán la estación Las Adjuntas con la futura estación El Tambor en Los Teques tienen aproximadamente una longitud de 2.545 metros, el cual atraviesa parte de las montañas que conforman la Cordillera de la Costa y separan a los Teques de la ciudad de Caracas.

Los monitoreos de vibraciones se realizaron en las zonas residenciales y populares que se encuentran adyacentes al eje principal del túnel Carrizalito de la línea del Metro de los Teques. Dichas zonas populares y áreas residenciales se encuentran a lo largo de la carretera que une Las Adjuntas con Los Teques, la cual es paralela al rumbo del túnel Carrizalito y del Río San Pedro que desciende desde los Altos Mirandinos. Las mediciones serán realizadas mayormente al Este del Río San Pedro con el fin de ubicarse en las zonas populares próximas a la voladura.

Las zonas populares en las cuales se realizaron las mediciones son: Barrio Nuevo, Sector la Chivera, Barrio Bertorelli Cisneros, Sector Aguas Arriba, Sector La Esperanza y en el Campamento Minibruno del Consorcio Metro Los Teques.



**Mapa 1.4.1 Ubicación de la zona de estudio (Foto aérea: Cartografía Nacional, Mapa del Distrito Capital, Estado Vargas y Parte del Estado Miranda: Enciclopedia Encarta 2003)**



**Mapa 1.4.2 Túnel Carrizalito.**

## **CAPITULO II**

### **2. MARCO GEOLÓGICO**

#### **2.1 GEOLOGÍA REGIONAL**

##### **2.1.1 Cordillera del Caribe**

La cordillera del Caribe es una unidad geotectónica mayor de dominio geosinclinal (Dott, 1974) que ocupa una posición alóctona sobre una provincia epicontinental. Esta unidad se extiende desde la península de la Goajira al oeste hasta Trinidad y Tobago al este. En la actualidad esta constituida por macizos montañosos soportado por rocas metafóricas, rocas sedimentarias tectonizadas y un conjunto de unidades fisiográficas con depósitos sedimentarios neo-autóctonos, así como áreas marinas e insulares (González, 1980).

La Cordillera del Caribe comprende las rocas ígneas y metamórficas que afloran en el macizo central, la península de Araya-Paria, la isla de Margarita y su plataforma continental, la cadena de islas La Blanquilla-Aruba y península de la Goajira y Paraguaná (González, 1980); todo este conjunto forma la unidad alóctona mencionada.

La parte central de las Montañas Occidentales del Caribe o Macizo Central fue subdividida en cuatro fajas tectónicas por Menéndez (1966). De norte a sur y con rumbo aproximadamente este-oeste, las cuatro son: La de la Cordillera de la Costa, la de Caucagua-El Tinaco, la de Paracotos y la Faja de Villa de Cura.

La Faja de la Cordillera de la Costa se ubica en la parte septentrional del Macizo Central de la Cordillera, limitada al norte por el Caribe mientras que al sur coincide en gran extensión con la zona de fallas de La Victoria y en parte se extiende al sur de ellas. Dentro de esta unidad están representadas rocas del basamento pre-mesozoico, metasedimentos plataformales de edad Jurásico-Cretácico y lentes concordantes de eclogitas, anfibolitas y serpentinitas, así como intrusitas de carácter calco-alcalino (González 1980).



de la Cordillera de la Costa, desde cabo codera hasta el graben del río Yaracuy (Urbani, 1989).

La Formación las Brisas descansa sobre el Complejo Basal de Sebastopol El contacto, ya sea por la foliación discordante, sea por el hiatus de tiempo que separa ambas formaciones, es discordante, según la opinión generalizada de varios autores. La relación con las formaciones suprayacentes Antímano y Las Mercedes, es generalmente transicional, aunque a veces, el contacto es estructural (Urbani, 1989).

En la región de Caracas, la Formación las Brisas consiste principalmente en esquistos y gneises cuarzo-feldespático-micáceos, esquistos cuarzo-sericítico-grafitoso con lentes, bloques y bandas de mármoles oscuros (Gonzáles, 1980).

Según Dengo (1951) la mayor parte de la formación, está constituida por esquistos cuarzomicáceo, en el que se incluye gneis microclínico, esquistos granatíferos, cuarcitas y calizas.

Wehrmann (1972) afirma que la Formación Las Brisas, está constituida en un 90% de esquistos cuarzo-feldespático-moscovíticos; el 10% restante lo constituyen en orden de abundancia, esquistos cuarzo-feldespáticos, epidóticos o cloríticos, calizas, cuarcitas y metaconglomerados. Menciona igualmente, mineralizaciones pobres de cobre en algunas calizas, en forma de sulfuros y sulfatos.

Hacia el este, en la región de Cabo Codera y Guatire, la litología distintiva consiste en esquistos cuarzo-feldespático-micáceos, esquistos y gneises grafitosos, desarrollados ocasionalmente de mármoles dolomíticos, esquistos verdes y cuerpos dispersos de anfibolitas. Hacia el oeste de la región de Caracas se mantiene la misma litología hasta la región del Estado Yaracuy (Gonzáles, op. cit.).

En General, en toda la sección de afloramientos de la Formación Las Brisas desde Cabo Codera al este hasta el estado Yaracuy al oeste, las rocas más abundantes son los esquistos cuarzo-feldespático-micáceos. Presentan textura esquistosa, que se hace gneísica a medida que aumenta el contenido de feldespatos. El color varia de gris claro a tonos verdosos y meteorizan a marrón claro. La composición mineralógica promedio es: cuarzo, 25%; plagioclasa de tipo oligoclasa sódica, 25%; moscovita, 15%; biotita, 5%; feldespato potásico, 5%; calcita, 5%; clorita 4%;

epidoto, 2% y cantidades menores de opacos, grafito, circón, anfíbol, apatito, turmalina, granate, titanita y pirita. Debido a lo extenso del área de afloramiento existe una gran variedad de composición dentro de los esquistos, de acuerdo a la abundancia relativa de los minerales constituyentes (González, op cit.).

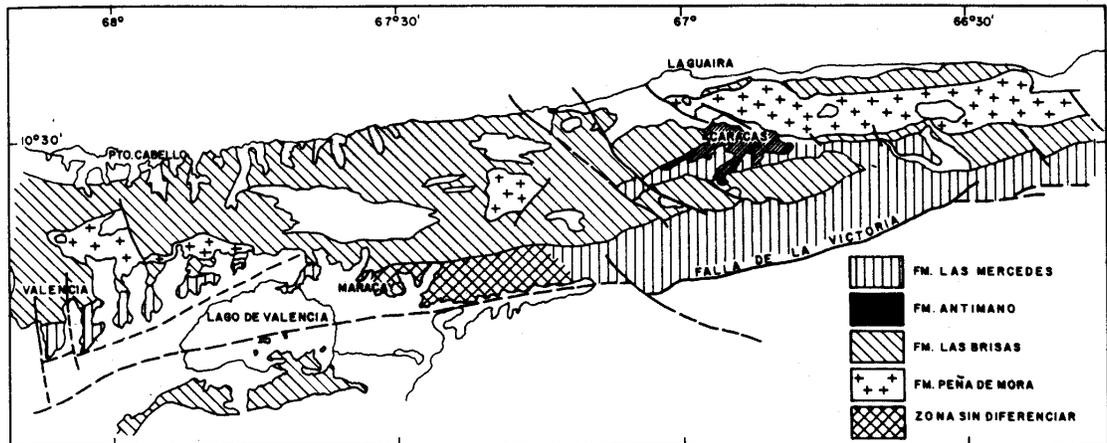
#### **2.1.4 Formación Las Mercedes**

La localidad de la formación fue establecida en la hacienda Las Mercedes, en el este de Caracas (donde actualmente esta la urbanización Las Mercedes) por Aguerrevere y Zuloaga en 1937.

Según Wehrmann (1972) sacado de (González, op. cit.) la litología predominante consiste en esquistos cuarzo - muscovítico - calcítico - grafitoso con intercalaciones de mármol grafitoso en forma de lentes, que cuando alcanza gruesos espesores se ha denominado "Caliza de Los Colorados".

Las rocas presentan textura esquistosa, buena foliación y grano de fino a medio, el color característico es el gris pardusco. La mineralogía promedio consiste en cuarzo (40%) en cristales dispuestos en bandas con la mica, muscovita (20%) en bandas lepidoblásticas a veces con clivaje crenulado, calcita (23%) en cristales con maclas polisintéticas, grafito (5%), y cantidades menores de clorita, óxidos de hierro, epidoto y ocasionalmente plagioclasa sódica. El mármol intercalado con esquistos se presenta en capas delgadas usualmente centimétricas a decimétricas, son de color gris azulado, cuya mineralogía es casi en su totalidad calcita, escasa dolomita y cantidades accesorias de cuarzo, muscovita, grafito, pirita y óxidos de hierro (González, op. cit.).

Se ha considerado el contacto entre las formaciones Las Mercedes y Las Brisas de tipo tectónico conservando paralelismo en la foliación en ambas unidades (González, op. cit.). Con respecto a la edad de la formación, las asociaciones de fósiles poco diagnósticas solo permiten sugerir una edad Mesozoica, sin diferenciar.



**Mapa 2.1.2 Mapa de afloramientos de las formaciones Peña de Mora, Las Brisas, Antemano y las Mercedes. Simplificado de Mapa Geológico, 1:500.000 (González,1980)**

### 2.1.5 Geología Estructural Regional

En la región de Caracas, diferentes autores describen la presencia de tres estructuras plegadas mayores, las cuales son el anticlinal de El Junquito, el sinclinal de El Cementerio y el anticlinal de Baruta, señalando que son estructuras simétricas amplias, cuyos ejes tienen dirección general N60 a N70E. (Feliciano, 1988).

Por otra parte se menciona también tres tipos de fallas producto de diferentes procesos orogénicos a lo largo del tiempo, es decir, fallas oblicuas, las más antiguas y con rumbo aproximado N50° - 80°, las cuales se consideran como fallas de gravedad (normales) y de corrimiento (inversas) que siguen el de las estructuras principales; fallas longitudinales que conforman el sistema de fallas de El Ávila y definidas como fallas de gravedad con un movimiento posterior a lo largo de un rumbo aproximado E-W y por último las fallas transversales con rumbo aproximado N60W, definida como falla de rasgadura con movimientos paralelos entre si. (Feliciano, op. cit.).

Además se reconoce una gran estructura anticlinal en donde el Gneis de Sebastopol y el Granito de Guamaral, constituye el núcleo de la estructura y el anticlinorio de El Ávila el cual se extiende con rumbo E-W a lo largo del macizo con el mismo nombre y se menciona la presencia de pliegues menores de diferentes

orígenes y formas (pliegues de flujo, por escurrimiento entre capas, etc.) típico en rocas esquistosas. (Feliciano, op. cit.)

## **2.2 GEOLOGÍA LOCAL**

### **2.2.1 Aspectos Geomorfológicos**

El área estudiada está conformada por una serie de vertientes a lo largo del cauce del río San Pedro, el cual fluye en dirección N30° E, en un cauce que presenta cambios fuertes en su curso, debido a la influencia de accidentes geo-estructurales. Estos accidentes también se encuentran altamente interrelacionados con diversas cuencas, cuyos cauces principales drenan a lo largo del curso del río San Pedro y que tienen repercusión en la dinámica de las múltiples laderas que conforman la cuenca del área.

Mediante el análisis de misiones aerofotográficas, se detectaron una serie de movimientos de masa, predominantemente aquellos de tipo flujo rápido (altamente influenciados por los diferentes accidentes geo-estructurales) y movimientos de mecanismos complejos. Igualmente se cartografiaron múltiples lineamientos que presentan accidentes estructurales, (fallas, sistemas de diaclasas, otros) que contribuyen a generar focos de inestabilidad. A lo anterior debe resaltarse la actividad humana que da una manera u otra, favorecer el crecimiento de la inestabilidad de las laderas en general. (Feliciano, op. cit.).

### **2.2.2 Aspectos Geológicos**

Hacia el portal Norte (portal de entrada del túnel Carrizalito), entre las progresivas 4+000 y 5+200, se observa material duro, constituido por un gneis-cuarzo-feldespatico-micáceos con intercalaciones muy esporádicas de filitas y esquistos, constituida con tamaños de grano de medio a fino. Los buzamientos obtenidos en superficie oscilan entre 25 y 30 grados de buzamiento Sur.

Entre la progresiva 5+200 y 5+700, se observa intercalaciones de gneis cuarzo-feldespatico-micáceos, esquistos de grano grueso a medio cuarzo-

feldespático-grafitosas, con posibles sectores de fallas y tres patrones de diaclasa. En la parte alta de la montaña se detectaron afloramientos de filitas cuarzosas, esquistos y en la vieja ruta del ferrocarril, esquistos de grano grueso a medio.

Entre las progresivas 5+700 y 6+153, se observan intercalaciones de filitas y esquistos en porcentajes variables. Debido a un sector de fallas existe una permeabilidad secundaria de importancia. En la parte alta de la montaña se detectan afloramientos de filitas cuarzosas y esquistos y en la vieja ruta del ferrocarril, esquistos de grano grueso a medio.

Desde la progresiva 6+200 hasta la 7+500, existe una alternancia de esquistos de grano grueso a medio y filitas con porcentajes variables, con varios sectores de fallas. El porcentaje aproximado del litotipo es de 75% esquistos y 25% filita a partir de la progresiva 6+200 y cambiando a 25% de esquisto y 75% de filita en el portal de salida en el sector el Chorrillo en la progresiva 7+500. Los esquistos encontrados corresponden a esquistos cuarzo-micáceos-grafitosos-sericítico, y filitas de grano fino.

En el sector de estudio se encuentra una secuencia casi continua de esquistos cuarzo-feldespático-micáceos de grano medio y grueso (metaesnisca) y filitas sericítico-grafitosas de grano fino perteneciente a la formación las brisas. Las filitas por lo general pueden presentar capas decimétricas más competentes, debido a un mayor contenido de cuarzo, intercaladas por capas milimétricas con mayor contenido de sericita y como accesorio el grafito (Feliciano, op. cit.).

Estructuralmente se presentan pliegues locales, fallas locales, diaclasas maestras (abiertas y cerradas) generando bloques en cuña y fallas regionales.

El macizo rocoso presenta diaclasas cerradas y/o rellenas de cuarzo o feldespato y algunas otras abiertas. Hacia la parte superior del macizo los afloramientos, con nivel de meteorización superior de color amarillo claro a consecuencia de cambios mineralógicos locales.

Los niveles de meteorización para las unidades descritas pueden variar entre los 50 y 100 metros de profundidad, con desarrollo variable de suelos residuales dependiendo de la composición mineralógica presente.

### 2.2.3 Características geotécnicas de los materiales encontrados

**Unidad esquistosa:** La dinámica de vertientes de esta unidad presenta un potencial morfológico de medio a bajo, permeabilidad moderada con tendencia también moderada a la socavación sub-superficial. Puede presentar una capacidad de retención de humedad de media a baja con desarrollo de un retículo hidrográfico general de tipo angular dendrítico típico de estos materiales y en ocasiones un drenaje superficial difuso. Con respecto a la circulación de agua, pueden presentarse escapes de agua de tipo reumático por la presencia del sistema diaclasado persistente, especialmente en los horizontes de roca meteorizada y fresca (Feliciano, op. cit.).

**Unidad filítica:** Este tipo de litología tiene un comportamiento más complejo, por la frecuente intercalación con niveles esquistosos, más competentes. Presenta una permeabilidad baja con retención de agua en superficie y desarrollo de un sistema de drenaje difuso. La dinámica de vertientes puede presentar un potencial morfogénico bajo. Los movimientos de masa más comunes detectados son complejo y de flujo y frecuentemente están asociados al desarrollo de drenaje.

Mapa 2.2 Túnel Carrizalito, Geología (Siguiete hoja)



### **CAPITULO III**

#### **3. MARCO TEORICO**

##### **3.1 ANTECEDENTES Y TRABAJOS PREVIOS EN VENEZUELA**

Los trabajos referentes al estudio y el control de vibraciones producidos por voladura se dieron inicio con la publicación del trabajo “Vibrations caused by quarry blasting and their effect on structures”, publicado por Rockwell en 1927. Posteriormente Investigadores de el U.S. Bureau of Mines como Langeforts con sus publicaciones: “The modern technique of rock blasting” (1978) y “Ground Vibrations in Blasting” (1958); y Crandell “Ground vibrations due to blasting and its effect upon structures” (1949), han aportado grandes avances junto a otros investigadores sobre las técnicas de voladuras con el fin de minimizar los riesgos de daños a las estructuras colindantes.

En Venezuela pocos trabajos se han realizado sobre el control de vibraciones producidas por voladuras tanto para trabajos de minería a cielo abierto como en galería, y en trabajos de excavaciones de túneles y obras públicas. Esta ausencia de trabajos y control sobre las vibraciones producidas por las actividades mencionadas anteriormente es debida principalmente a la falta de una legislación clara, que regule dichas actividades y proponga una norma que establezca unos criterios de seguridad y control sobre las estructuras colindantes a la zona de voladura y la afectación sobre los seres humanos que realizan actividades en las zonas adyacentes.

A pesar de ello varios profesionales e instituciones han realizado trabajos sobre el tema dentro de un marco de investigación. Es el caso del Ingeniero Roberto Ucar Navarro (1981), el cual ha realizado varios trabajos enfocados en los tipos de vibraciones producidas por voladuras, su control y criterio de daño. En dichos trabajos realiza comparaciones entre los tipos de voladuras (instantánea y con retardadores) comparando los impactos de cada una y determinando los parámetros de carga máxima y criterio de daños en las estructuras. También el Doctor Luis Aguilera (1967) ha realizado trabajos de investigación sobre el tema, enfocándose

sobre las vibraciones y los daños producidos por voladuras, determinando las características de vibración y los criterios para la apreciación de daños producidos por dichas vibraciones.

Más recientemente La Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) a mano del departamento de Ingeniería Sísmica, Realizo un trabajo de medición de vibraciones en el metro de Los Teques, en los frentes del Chorrillo y la Ventana Sur, Coordinado por el Ingeniero Jorge González (et.al., 2003). Los objetivos de dicho trabajo fue, el análisis de los niveles de vibración, obtención de los valores máximos de velocidad en el terreno y en las estructuras colindantes y comparación de los resultados obtenidos con los parámetros admisibles.

### **3.2 ASPECTOS TEÓRICOS Y CONCEPTUALES**

Cuando es detonada una carga explosiva en el interior de un macizo rocoso, su energía potencial es liberada en un intervalo muy corto de tiempo. La detonación de la carga explosiva crea una elevada presión en la zona de la reacción química. Esta presión provoca una onda de choque que se utiliza para el trabajo de fragmentación de la roca y para la formación, sobre el frente de explosión, de fragmentos de forma adecuada para su carga. Otra parte de esa energía es liberada en el ambiente, propagándose a través del macizo rocoso, de la napa freática y del aire.

La propagación de una onda lleva consigo un flujo o transporte de energía del foco emisor al medio a lo largo de la dirección en la que la onda avanza, en donde se propaga una perturbación que consiste en un movimiento vibratorio. La onda de choque es amortiguada a medida que su frente se aleja del origen. Además del fenómeno puramente geométrico de dispersión de energía en un espacio tridimensional, el carácter no completamente elástico de las rocas y la presencia de agua llenando vacíos son también factores de amortiguamiento del temblor. La amplitud, la velocidad y la aceleración del movimiento oscilatorio disminuyen con la distancia, sucediendo lo mismo con la frecuencia de oscilación (Sánchez, 1995).

Partiendo de lo dicho anteriormente y sabiendo que gran parte de los conceptos básicos de física general, específicamente propagación de ondas mecánicas, son utilizados en el análisis de vibraciones, es importante entender una serie de conceptos que paseen por toda o gran parte de la física referida a la propagación de ondas mecánicas.

Empezando por el concepto de movimiento ondulatorio, según Serway (1997), es el proceso por el cual se propaga energía de un lugar a otro sin transferencia de materia, mediante ondas. Cuando estas ondas necesitan un medio material, se llaman ondas mecánicas. Si se produce una vibración en un punto de un medio elástico, esta se transmite a todos los puntos de éste. Las ondas mecánicas son las perturbaciones que se transmiten por este medio. Cuando una partícula se mueve desde un punto extremo, hasta el otro y vuelve (pasando dos veces por la posición de equilibrio), decimos que ha hecho una oscilación completa. Si no aplicamos ninguna fuerza exterior, la amplitud de este movimiento va decreciendo progresivamente, pero a veces es posible compensar esta pérdida de amplitud con impulsos de forma que cada vibración sea idéntica a la precedente. En este caso decimos que el movimiento es periódico y se llama período (T), al tiempo que tarda en tener lugar una oscilación completa. Se llama frecuencia (f) al número de oscilaciones por unidad de tiempo, el número de ciclos por segundo se llama hercio (Hz), y es la unidad con la cual se mide la frecuencia. Por la propia definición, el período es el inverso de la frecuencia:  $T = 1/f$ .

La frecuencia, juntamente con la velocidad de propagación (v) está relacionada con la longitud de onda ( $\lambda$ ), que es el espacio que recorre una onda del inicio al final de una oscilación completa. La longitud de onda se obtiene a partir de la fórmula: longitud = velocidad \* tiempo. Cuando hablamos de una oscilación armónica, longitud de onda = velocidad de propagación \* período, es decir, la ecuación que relaciona v,  $\lambda$ , y f es:  $v = \lambda \cdot f$ . La velocidad de propagación depende del tipo de onda, de la elasticidad del medio y de su rigidez. Si el medio es homogéneo e isótropo, la velocidad de propagación es la misma en todas las direcciones. Cuando ha transcurrido un tiempo T, los puntos situados a distancia l del punto inicial,

comienzan a iniciar el movimiento vibratorio, eso también pasa con el punto perturbador, que había vuelto a su posición de equilibrio. Decimos que estos dos puntos están en concordancia de fase (ob.cit.).

Según la dirección de propagación, clasificamos las ondas en dos tipos. Ondas longitudinales o primarias (P): Donde la vibración de la onda es paralela a la dirección de propagación de la propia onda. Estas ondas se deben a los sucesivos esfuerzos compresionales que actúan en el y enrarecimientos del medio y Ondas transversales o Secundarias (S): Donde la vibración es perpendicular a la dirección de la onda. Ambas ondas se le denominan Ondas de cuerpo.

En las interfaces aire/superficie del terreno las ondas de cuerpo dan lugar a las ondas llamadas superficiales, que se propagan en ese límite. Las ondas de superficie se caracterizan por frecuencias más bajas que las de cuerpo. Las ondas Raleigh (R) son las ondas de superficie más comúnmente encontradas y transportan la mayor parte de la energía propagada en superficie (Tritsch, 1983) y por ende presentan mayor potencial de riesgo a las estructuras.

En las ondas Raleigh las partículas desarrollan un movimiento elíptico retrógrado principalmente en las direcciones vertical y longitudinal, mientras que en las ondas Love (Q) las partículas se mueven predominantemente en la horizontal en una dirección transversal a aquella de propagación del frente de onda. Cada tipo de onda se propaga con una velocidad que es característica del medio en que se propaga. La onda más rápida es siempre la onda P, seguida por la onda S y por las ondas de superficie.

Al igual que las ondas, la frecuencia también es dependiente de la geología o medio en el que se propagan y es uno de los factores más importantes a controlar por la respuesta de las estructuras. La importancia de la frecuencia se basa en que una estructura responde de diferentes maneras dependiendo de la frecuencia dominante de la señal que la excita, es por ello que este factor debe tomarse en cuenta dentro de los parámetros que implican a la voladura.

### 3.3 IMPORTANCIA DE LA FRECUENCIA

El espectro de frecuencias del movimiento vibratorio es tan importante como la velocidad de vibración en la evaluación del potencial de daños en estructuras.

Investigaciones en dinámica estructural han mostrado que las estructuras responden en modo diferente a diferentes vibraciones. Una estructura residencial responderá menos a un movimiento de terreno de 12mm/s a una frecuencia principal de 80Hz que a una frecuencia principal de 10Hz. Entonces, el movimiento a 80Hz tiene menos probabilidad de producir una fisura en la estructura que el movimiento a 10Hz (Dowding, 1985).

El problema con las bajas frecuencias es que la frecuencia principal del movimiento vibratorio puede ser de igual orden que la frecuencia natural (de resonancia) de la estructura, caso en el que el movimiento se amplificará y las deformaciones serán más importantes. Entendiendo por resonancia, según Serway (1997), como la situación en la que un sistema mecánico, estructural o acústico vibra en respuesta a una fuerza aplicada con la frecuencia natural del sistema o con una frecuencia próxima.

Se dice que la vibración de una estructura residencial presenta respuesta libre. Esto significa que la estructura continúa vibrando luego del pasaje del tren de ondas que causa la vibración del terreno. Las deformaciones en el caso de respuesta libre están asociadas al movimiento relativo entre la estructura y el terreno y, dependiendo de la relación de fase entre estos dos movimientos, el movimiento relativo puede ser mayor o menor que el movimiento del terreno (Dowding y Corser, 1981).

Como las deformaciones son, en un último análisis, el factor responsable por la aparición de fracturas, la frecuencia (tanto del movimiento del terreno como del movimiento de la estructura) surge como parámetro esencial.

### **3.4 NORMAS Y RECOMENDACIONES PARA EL CONTROL DE VIBRACIONES PROVOCADAS POR EL USO DE EXPLOSIVOS EN AREAS URBANAS**

Las actividades que envuelven el uso de explosivos deben ser controladas, no únicamente sobre su afectación sobre el lecho rocoso y otros materiales, sino también sobre la afectación que producen las vibraciones generadas por la voladura sobre las estructuras colindantes (casas, edificios, edificaciones históricas, etc.) y sobre los seres humanos que viven o realizan alguna actividad en las áreas adyacentes. También hay que tener en cuenta otros factores para su control como el impacto ambiental, la propagación de ruido y la sobrepresión atmosférica (onda de choque).

Los valores límites del nivel de vibración del terreno no dependen tan solo de los daños que la velocidad de vibración de la partícula puede causar en las construcciones civiles, sino también del tipo de construcción en si, habiéndose probado que, con frecuencia, la vibración generada por explosivos es apenas un detonador de un proceso de inestabilidad atribuido a otras causas, dilatación térmica, insuficiencia de material, error de cálculo de proyecto, etc. (Fornaro, 1980)

También es importante considerar las características propias de las vibraciones, o sea, la frecuencia, la repetitividad y la duración del fenómeno. Se puede decir que un edificio sufre daños, si los impulsos dinámicos provocados por las vibraciones se superponen a los impulsos estáticos, llevando a una superación de las condiciones de resistencia de la estructura.

Cuando no es posible, partiendo solo de las medidas de velocidad, obtener los valores de desplazamiento y los impulsos, es necesario recurrir a tablas empíricas de daños, correlacionando, de varios modos, las características más evidentes del fenómeno. Ese es el camino sugerido por la mayor parte de las normas (ob.cit.).

Partiendo de que en Venezuela no existen normas específicas sobre el tema, serán presentadas, algunas normas europeas y norteamericanas relacionadas con los niveles permisibles de vibración derivada del uso de explosivos en minería y actividades industriales en áreas urbanas.

### **3.4.1 Normal Alemana (DIN 4150)**

Antes de los años 80, regían dos normas distintas en Alemania, hasta entonces dividida. En la Alemania Oriental, la recomendación vigente consideraba dos parámetros: la tipología estructural del edificio sometido a los efectos de la vibración, subdividido en cuatro clases distintas, y la frecuencia característica del fenómeno vibratorio, en cuanto que, en la Alemania Occidental, se admitían diferentes frecuencias en función de la tipología estructural del edificio, tomando como referencia solo la componente vertical de la velocidad de vibración de la partícula ( $V_p$ ).

Con el correr de los años, y después de la unificación de Alemania en 1989, la Norma DIN 4150 (1986) fue adoptada como norma patrón, y ha sido actualizada desde entonces. Ella establece los valores límites de velocidad de vibración de la partícula en mm/s, considerando el tipo de estructura civil y el intervalo de frecuencia en Hz, en los cuales demuestran estar fuera de riesgo de daños los edificios. Las tres clases de edificios definidas por la norma son:

- Edificios estructurales o industriales
- Edificios residenciales
- Edificios históricos y construcciones sensibles (madera, barro, etc.)

Las frecuencias son analizadas en tres intervalos, o sea, valores menores de 10Hz, valores entre 10-50Hz y valores entre 50-100Hz. La norma prevé que para frecuencias encima de 100Hz, a estructura soporta niveles altos de vibración.

Los valores de velocidad de vibración de partícula definidos varían de 3mm/s, en el caso de monumentos y construcciones delicadas con frecuencia inferior a 10Hz, hasta 50mm/s en el caso de estructuras industriales con frecuencia entre 50-100Hz. En la evaluación de danos estructurales causados por las vibraciones del terreno, los valores límites de  $V_p$  admitidos para diversos tipos de construcciones, en función de la frecuencia, son presentados en la Tabla 3.4.1.

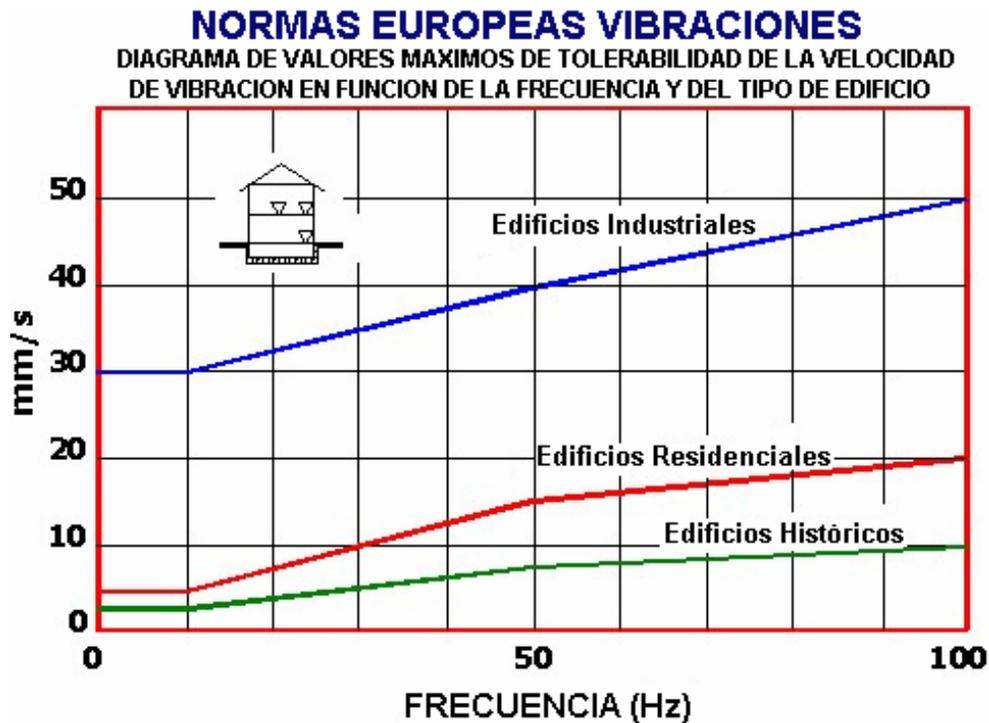
Tabla 3.4.1 Tipo de estructuras, picos de velocidad y frecuencia de la norma alemana (Din 4150)

TIPO ESTRUCTURA	Nivel de Fundacion Frecuencia Hz			Piso mas alto Cualquier Frec.
	0 - 10	10-50	50-100	
Industrial	20mm/s	20-40mm/s	40-50 mm/s	40 mm/s
Habitaciones	5 mm/s	5-15 mm/s	15-20 mm/s	15 mm/s
Edificios Delicados	3 mm/s	3-8 mm/s	8-10 mm/s	8 mm/s

Valores de frecuencia por encima de 100Hz pueden ser aceptados en la parte más alta de los edificios. Otros valores, medidos por debajo de los límites especificados anteriormente son considerados como no perjudiciales a la estructura civil.

Esta norma es aceptada en toda la Comunidad Europea como norma patrón. Muchos países europeos desarrollaron sus propias normas, basándolas en la DIN 4150 o relacionándola a ella.

La Figura 3.4.1 representa grafica ente los valores de  $V_p$  vs frecuencia dados por la norma alemana DIN 4150/3.



**Figura 3.4.1 Grafica de picos de velocidad versus frecuencia con los limites para los tres tipos de edificaciones contemplados en la Norma Din 4150/3 (Din 4150/3)**

### 3.4.2 Norma Suiza (SN 640312)

Antes de 1992, Suiza adoptaba una norma referente a los valores para salvaguardar la integridad de los edificios, ella se refería a la componente vertical de la velocidad, medida en la fundación de los edificios.

Los límites de intensidad de velocidad de vibración de partícula variaban de 25mm/s para museos hasta 100mm/s para construcciones en concreto armado.

Estudios posteriores introdujeron una frecuencia como parámetro a ser evaluado, resultando en la elaboración de la Tabla 3.4.2 en la cual el tipo de estructura y el tipo de fuente de vibración son actualmente considerados.

Tabla 3.4.2 Valores sugeridos por la norma suiza. Los valores de Vp fueron medidos para fuentes de vibración de tipo ocasional. (Fuente Bacci, 2000, adaptado de Borla, 1993).

Tipo de Estructura	Frecuencia (Hz)	Vp maxima (mm/s)
I. Edificios de Concreto armado	10-60	30
	60-90	40
II. Construcciones normales de Edificios	10-60	18
	60-90	18-25
III. Habitaciones	10 - 60	12-18
IV. Edificios Delicados	10-60	8
	60-90	8-12

La norma, introducida en abril de 1992, incluye los efectos en los edificios, acrecentando criterios de evaluación de los danos materiales, manteniendo, sin embargo, los valores de Vp mostrados en la Tabla 3.4.2.

Esa norma, utilizada mas para excavaciones en subterráneo, en periodo diurno, diferencia las clases de edificios, las clases de repetitividad del fenómeno (ocasional, frecuente, permanente) y los campos de frecuencia de velocidad de la partícula. Acrecienta la distinción de los efectos de las vibraciones, en las personas, en el terreno y en los aparatos que se encuentran en los edificios y propone, además, una actualización de la metodología de recolección de datos e de los criterios de determinación y evaluación de los danos materiales.

### 3.4.3 Norma Española (UNE 22-381-93)

La Norma Española para el control de vibraciones (UNE 22-381-93) es creada en 1993 con el fin de de establecer un procedimiento de estudio y control sobre vibraciones producidas por voladuras con explosivos.

Dicha norma es aplicable a diferentes tipos de trabajos que impliquen la utilización de voladuras para realizar sus actividades, dentro de estos tipos de trabajos tenemos: Trabajos de explotación en minas y canteras, tanto para las labores de

extracción como para labores complementarias; trabajos de construcción de en obras públicas y para trabajos de demolición.

Dentro de la norma se clasifican tres tipos de estructuras que son las siguientes:

- Grupo I: Edificios y naves industriales (Estructuras de hormigón armado o metálicas).
- Grupo II: Edificios de viviendas, oficinas, centros comerciales y de recreación.
- Grupo III: Estructuras de valor arqueológico, arquitectónico o histórico.

Al igual que en la normal alemana DIM 4150 y la mayoría de las normas europeas, la norma española analiza la frecuencia en tres intervalos; entre 2 y 15 Hertz, entre 15 y 75 Hertz y mayores a 75 Hertz.

Para la velocidad de la partícula producida por la vibración, existen varios márgenes en la UNE 22-381-93 en donde varían de los 4mm/s como velocidad mas baja, relacionada con las estructuras arqueológicas asociadas a frecuencias entre 2 y 15 Hert; y velocidades hasta los 100mm/s correspondiente a edificios industriales asociadas a frecuencias mayores a 75Hz.

En la Tabla 3.4.3 y la Figura 3.4.3.a, se indican los niveles seguros para el valor pico de la mayor componente de velocidad.

Tabla 3.4.3 Velocidad, frecuencia y tipo de estructura (UNE 22-381-93)

		Frecuencia principal (Hz)		
		2 - 15	15 - 75 <sup>1)</sup>	> 75
		Velocidad mm/s	Desplazamiento mm	Velocidad mm/s
Tipo de estructura	I	20	0,212	100
	II	9	0,095	45
	III	4	0,042	20

Es de notar en la Tabla 3.4.3 los tramos de frecuencias comprendidas entre 15Hz a 75Hz, los niveles están dados a partir del factor desplazamiento para cada una de las estructuras. Se podrá entonces calcular la velocidad correspondiente conociendo la frecuencia principal (natural) a través de la siguiente ecuación:

$$V = 2 * \pi * f * d.$$

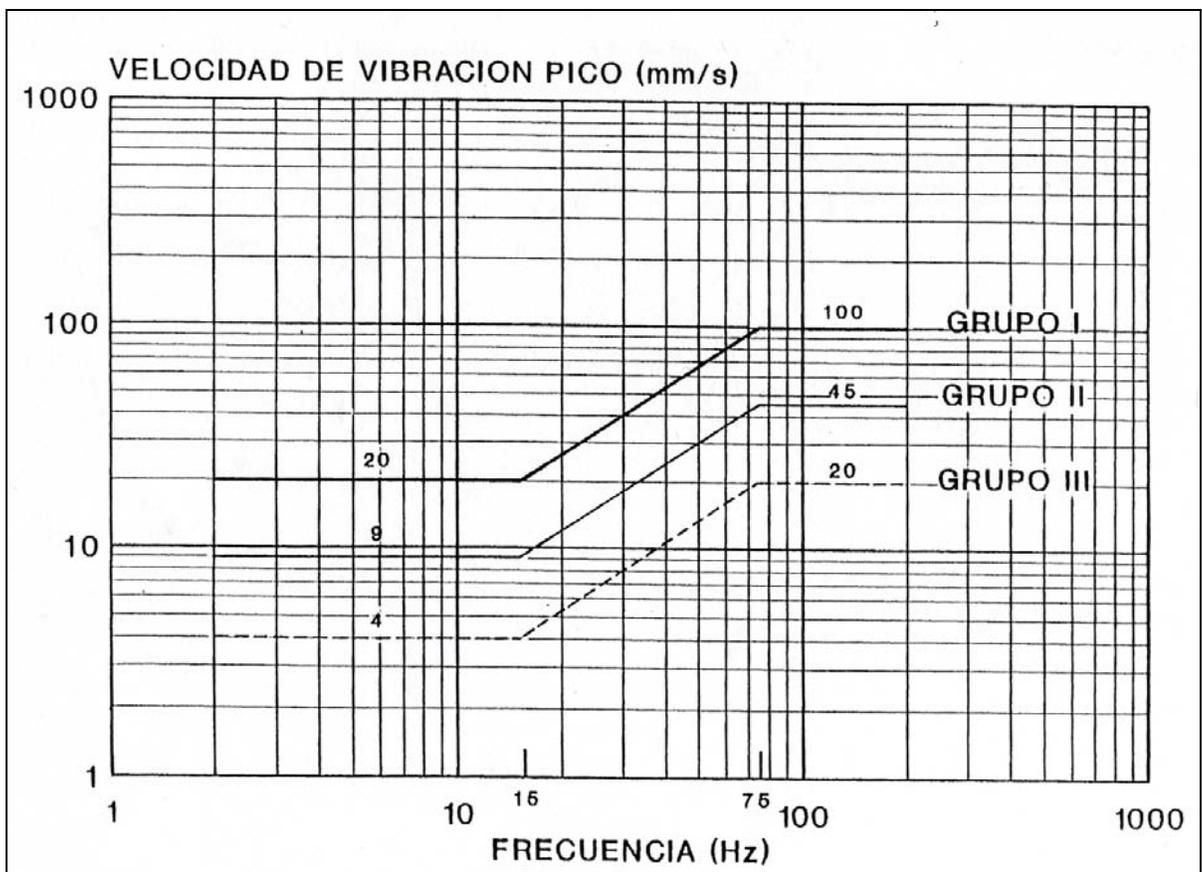
Donde:

V = velocidad equivalente en mm/s.

$\pi = 3,1416$ .

f = frecuencia principal en Hz.

d = desplazamiento admisible en mm indicado en la tabla.



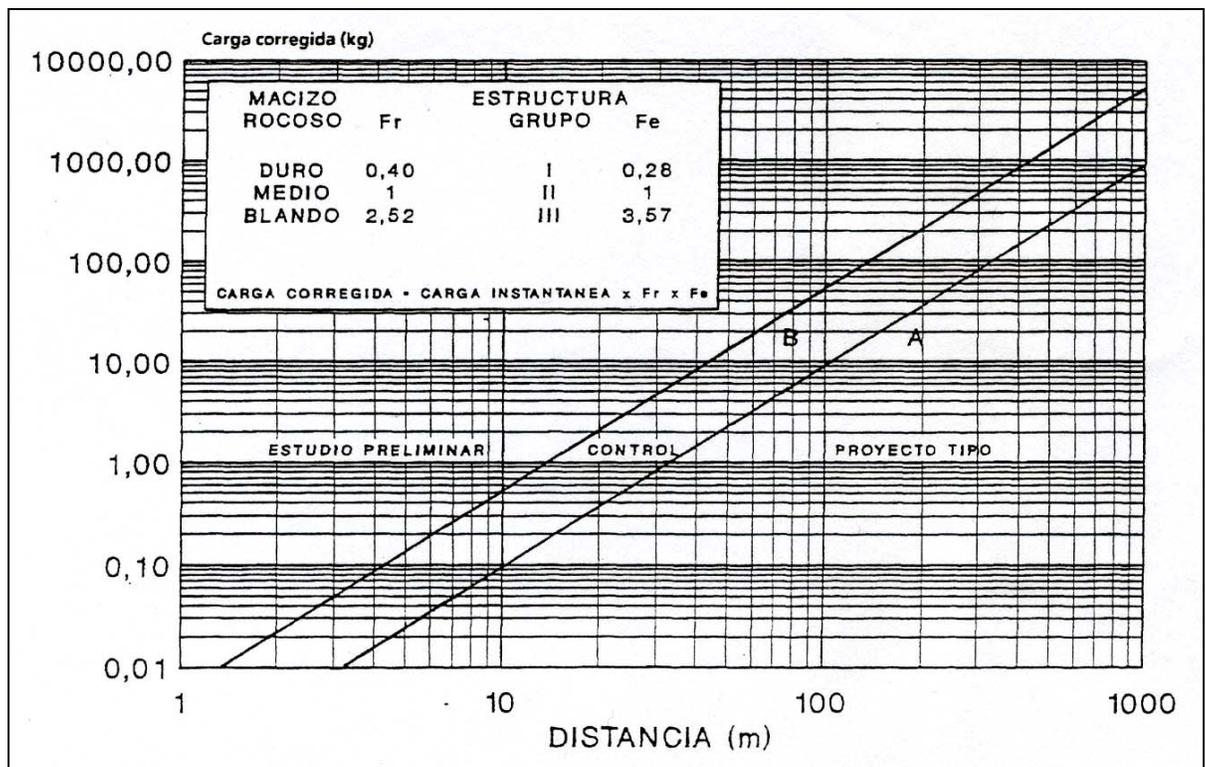
**Figura 3.4.3.a Grafica de frecuencia versus velocidad pico de la norma española (UNE 22-381-93) con los respectivos límites para los tres grupos de estructuras. (UNE 22-381-93)**

También la normal española (UNE 22-381-93), contempla el tipo de estudio de vibración requerido, el cual esta en función del tipo de trabajo a desarrollar con los explosivos, del tipo de terreno, de la estructura que va hacer objeto de monitoreo para su preservación, la distancia que existe entre la estructura y la voladura y la carga máxima del explosivo de forma instantánea o de forma secuencial.

El tipo de estudio de vibraciones se divide en tres:

- Proyecto de vibración: la carga instantánea de explosivo es tan baja para la distancia que se descarga cualquier vibración.
- Medición de control de vibraciones: implica la medición del nivel de vibración de una voladura en el punto definido.
- Estudio preliminar de vibraciones: es necesario en circunstancias de trabajo tales que se desee conocer el comportamiento sísmico del terreno.

Utilizando la Figura 3.4.3.b es posible conocer el tipo de estudio que podría ser requerido.



**Figura 3.4.3.b Grafico de la norma UNE 22-381-93, que permite conocer el tipo de estudio requerido. (UNE 22-381-93)**

Para la utilización de la Figura 3.4.3.b, se debe determinar el tipo de macizo rocoso sobre el cual se están realizando las mediciones, en donde se tiene en cuenta la velocidad de propagación de la onda y se dividen en 3: roca dura (superior a 4000m/s), roca media (entre 2000m/s y 4000m/s) y roca blanda (menores a 2000m/s). También se deben determinar otros parámetros como el tipo de estructura, distancia de la voladura al punto de medición y la carga instantánea máxima utilizada para la detonación.

#### **3.4.4 Norma Sueca (SS 4604866)**

La norma sueca fue aprobada en 1989 y revisada en 1991. Esa norma prevé la medida de componente vertical del vector de velocidad de vibración de la partícula como parámetro de control de las vibraciones en los edificios.

Los niveles estipulados no consideran, entretanto, la perturbación en los seres humanos o posibles daños en aparatos sensibles.

En particular, el valor de velocidad medido debe resultar menor que la velocidad  $V$  calculada como sigue:

$$V = V_o * F_k * F_d * F_t$$

Donde:

$V_o$  = Velocidad en mm/s, extraída de una tabla de valores de velocidad ya conocidos, variando entre 18 y 70 mm/s.

$F_k$  = Tipo de construcción (por ejemplo: edificio industrial, residenciales, edificio histórico, etc.) y del material usado en la construcción.

$F_d$  = Distancia entre el punto de detonación y el punto de medición.

$F_t$  = Ambiente de trabajo (Galería, Cantera, Excavación de túnel, etc.).

Todos los coeficientes nombrados anteriormente son extraídos de tablas, las cuales fueron elaboradas a partir de trabajos prácticos y de laboratorio.

No están previstos coeficientes específicos que tomen en cuenta la frecuencia de vibración o que consideren el tipo de fuente de vibración (irregular o continua). Sin embargo, los parámetros  $F_d$  y  $F_t$  tienen esas cuestiones en consideración, toda vez

que la frecuencia principal es función de la distancia y de la naturaleza del terreno, y la duración y repetitividad de los eventos dependen del tipo de explosivo utilizado, o sea, la fuente de energía.

La Tabla 3.4.4 muestra una compilación de los límites recomendados, usados en Suecia para derrumbes en rocas en áreas residenciales normales, definidas como aquellas que son ocupadas por casas con fundación y vigas de concreto, paredes externas de ladrillos con mortero o concreto leve.

Tabla 3.4.4 Valores límites (en mm/s) para  $V_p$  en la componente vertical para daños en estructuras civiles. (Fuente: Bacci, 2000, adaptado desde Langefors y Kihlstrom, 1963; y Persson et al., 1994).

<b>Arena Grava Arcilla</b>	<b>Ardesia Calizas</b>	<b>Granito Gneiss Calizas Duras Cuarцитов Arenosos Diabasas</b>	<b>Possibles Danos Observados en Residencias</b>
18	35	70	Ningun tipo de fisura
30	55	110	Fisuras finas
40	80	160	Fisuras mayores
60	115	230	Fisuras serias

Para casas antiguas, con fundaciones de baja calidad, el valor de  $V_p$  permitido es reducido de 70mm/s para 50mm/s y, en el caso de edificios de concreto leve, el límite llega a 35mm/s. Muchos valores que sobrepasan 110mm/s fueron registrados en los estudios de definición de esa norma, sin causar ningún tipo de daño en construcciones con fundaciones sólidas, construcciones de concreto armado excavadas directamente sobre la roca, pudieran soportar valores de  $V_p$  por encima de 150mm/s. El valor-limite recomendado para áreas residenciales normales es de 50mm/s para frecuencias encima de 40Hz.

### 3.4.5 Norma Italiana (UNI 9916)

Se trata de una norma creada en 1991, referente a metodología de investigación a emplear en el estudio de vibraciones y, por tanto, no establece valores límites.

La norma representa una guía para la escogencia del método apropiado de medida, de tratamiento de los datos y de evaluación de los fenómenos vibratorios producidos en los edificios, con los siguientes objetivos:

- Evaluar si el tipo de vibración puede afectar la estructura del edificio
- Verificar la presencia o no, de daños estructurales atribuidos a la superación de los límites de vibración
- Evaluar el comportamiento del edificio cuando es sometido a cargas dinámicas accidentales, como, por ejemplo, los terremotos.

La norma tiene un carácter general y no se refiere a los efectos de las vibraciones. Considera los fenómenos vibratorios no necesariamente producidos por derrumbes, con cargas explosivas caracterizadas por gamas de frecuencia comprendidas entre 0,1Hz y 150Hz, teniendo en cuenta que los fenómenos vibratorios, caracterizados por frecuencias superiores a 150Hz, no influyen significativamente la respuesta de un edificio cualquiera que sea a la vibración.

Los parámetros seguidos para la caracterización de las vibraciones son:

- Duración y amplitud de vibración
- Campo de frecuencia de interés
- Características dimensionales del elemento estructural del cual es evaluada la respuesta, en función del tipo de edificio, de la interacción suelo-roca, de las características del terreno y de las frecuencias naturales.

En relación con el posicionamiento del aparato de registro, la norma sugiere la verificación del nivel de vibración en la base de la estructura, la cual es escogida en función de la fundación o en la ausencia de esta, en la base del muro de sustentación. Es aconsejable, además de los registros de las tres componentes ortogonales entre si, el registro del vector resultante de velocidades de vibración.

Para edificios con menos de cuatro pisos, se sugiere disponer los geófonos próximos a la fundación y en el último piso, mientras que, para edificios con más de cuatro pisos, es aconsejable colocar los geófonos en pisos intermedios. Los geófonos deben estar fijados sobre la estructura, evitándose el uso de soportes, de otros que permita la reproducción fiel del fenómeno vibratorio, impidiendo alteraciones atribuidas al sistema geófono-superficie de medición.

La norma italiana no presenta novedades y sigue los conceptos básicos y límites de la DIN 4150.

#### **3.4.6 Norma Inglesa (BS 5228, BS 6472, BS 7385)**

Las normas británicas más relevantes son: BS 5228 (1997) – Control de ruido y vibración en construcciones y áreas a cielo abierto; BS 6472 (1992) – Guía para la evaluación de exposición humana a vibración en edificios; y BS 7385 (1990) – Evaluación y mediciones de vibración en edificios.

La norma BS 7385, parte 1 (1990), discute las mediciones de vibración en edificios en términos generales, con mayor atención para la investigación de daños, dada en la BS 7385, parte 2 (1993), y para la percepción humana en la BS 6472 (1992).

La norma BS 7385, define cuatro parámetros que pueden ser utilizados para definir la magnitud de la vibración en el terreno, siendo estos: Dislocamiento, velocidad de la partícula, aceleración de la partícula y frecuencia. El parámetro más utilizado en todas las normas es la velocidad máxima  $V_p$ , medida en tres direcciones, longitudinal, vertical y transversal. Según esa norma, los registros son hechos fuera de la propiedad en el terreno inmediatamente adyacente al local de detonación. Si existieran reclamos, puede ser necesario monitorear la vibración dentro de la propiedad en el local donde los reclamantes consideraren los efectos más notables.

El límite de variación de frecuencia es de 5Hz a 40Hz, con niveles predominantes de 20Hz a 30Hz en el caso de rocas más duras y de 5Hz a 15Hz en el caso de minería de rocas con menor competencia.

La norma BS 7385 (1993) define tres tipos de daños en residencias: Daños cosméticos, daños menores y daños mayores o estructurales. Esos valores están basados en términos de  $V_p$  y frecuencia. Para daños cosméticos, los valores guía son de 15mm/s a una frecuencia de 4Hz, aumentando para 20mm/s a 15Hz y 50mm/s para frecuencia mayor a 40Hz. Daños menores son posibles con magnitudes de vibración mayores que dos veces aquellas dadas para los daños cosméticos; daños mayores o daños a la estructura, son posibles cuando los valores son mayores que 4 veces los valores estipulados para daños cosméticos.

La norma BS 5228 parte 4 (1992) recomienda que estructuras libres y flexibles presentan límites (por encima de los cuales ocurren daños) de 20mm/s para vibraciones intermitentes y de 10mm/s para vibraciones continuas, mientras que las construcciones pesadas y rígidas presentan límites superiores a 30mm/s para vibraciones intermitentes y 15mm/s para vibraciones continuas. En bajas frecuencias (Por debajo de 10Hz), grandes desplazamientos y deformaciones elevadas necesitan de valores de  $V_p$  más bajos (50% menores), en cuanto que en alta frecuencia (encima de 50Hz) deformaciones mucho menores permiten que el límite de  $V_p$  aumente (100% mayor).

Esos niveles de vibración se refieren al valor máximo en un elemento de sustentación de estructura, en nivel de terreno o de las fundaciones que se propaguen en las direcciones vertical, longitudinal y transversal. Un valor de la componente vertical de  $V_p$  superior a 20mm/s, durante la colocación de estacas, por ejemplo, puede ser tolerado (Con mucho cuidado para muros antiguos) en pisos intermedios.

#### **3.4.7 Norma Portuguesa (NP 2074)**

Datada de 1983, la norma portuguesa sigue, en líneas generales, la norma alemana Din 4150, determinando, en particular, un criterio de control de parámetros característicos de las vibraciones producidas en minería y sus efectos en los edificios.

Los valores límites son establecidos de acuerdo con las características de las condiciones de fundación, del tipo de construcción y de las fuerzas dinámicas.

Esteves (1994) propone, además de consideraciones de las características anteriormente mencionadas, una consideración de frecuencia. El parámetro usado para evaluar el nivel de vibración es la suma vectorial de las tres componentes ortogonales de velocidad de la partícula, o simplemente se toma el valor máximo de cada eje, el resultado de este estudio es mostrado en la Tabla 3.4.7

Tabla 3.4.7 Limites de los valores de vibración de partícula en mm/s (Bacci (2000), adaptado por Esteves, 1994).

Tipo de Suelo			
	Suelos incoherentes (arenas no consolidadas)	Suelos de consistencia muy dura, dura a media; suelos compactos incoherentes	Suelos de alta coherencia y rocas
Velocidad de la onda	Cp < 1000 m/s	1000 < Cp < 2000 m/s	Cp > 2000 m/s
Tipo de construccion	Frecuencia		
	< 10	10 a 40	> 40
Construcciones que requieren cuidados especiales Monumentos historicos, museos, etc	3	5	10
Construcciones normales (habitaciones)	5	10	20
Construcciones reforzadas ( a prueba de terremotos)	15	30	60

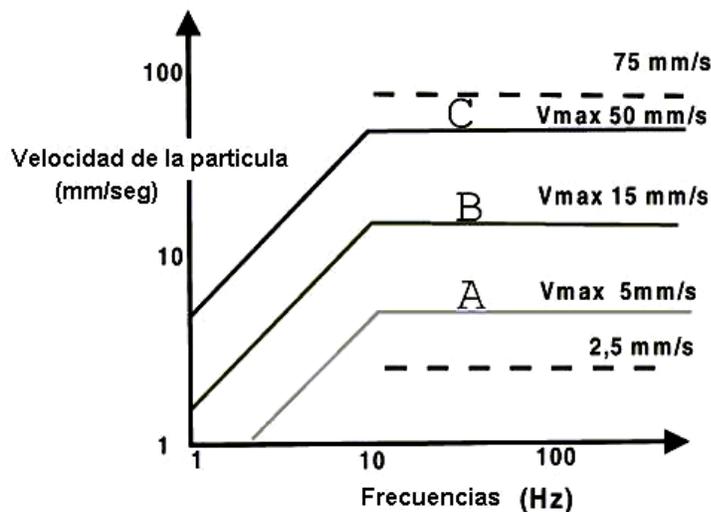
### 3.4.8. Recomendación Francesa (RT 23.7.1986)

Actualmente, están en vigor en Francia dos normas diferentes. La recomendación sugerida por la A.F.T.E.S. (Asociación francesa de trabajo en subterráneos), del año 1974, y la Circular, propuesta por el Ministerio de Ambiente, en julio de 1986, ampliada en septiembre de 1993.

La recomendación A.F.T.E.S. subdivide los edificios en tres clases:

- Tipo A: Edificio de baja calidad mecánica (muros deformados)
- Tipo B: Construcciones de media calidad mecánica (sin deformaciones aparentes)
- Tipo C: Construcciones de buena calidad mecánica (Fundaciones profundas)

Los límites sugeridos de velocidad son mostrados en la Figura 3.4.8.a



**Figura 3.4.8.a Límites sugeridos de velocidad y frecuencia (A.F.T.E.S. GROUPE DE TRAVAIL)**

Las tres curvas poseen un punto de inflexión en la abscisa, que es el valor discriminante de frecuencia, en  $N = 10\text{Hz}$ , para  $N$  menor que  $10\text{Hz}$  el criterio de daño es basado en la amplitud de oscilación. Para  $N$  mayor que  $10$ , tal criterio está basado en el valor de velocidad de la partícula.

El valor discriminante de frecuencia a  $10\text{Hz}$  es arbitrario, ignorando los fenómenos de resonancia que pueden surgir en las estructuras. Para cada tipo de construcción, se admite, conforme al tipo de terreno, la vibración de la partícula mostrada en la Tabla 3.4.8.a

Tabla 3.4.8.a Valores de velocidad de vibración de la partícula, según la AFTES, 1974. (Fuente: Bacci, 2000, adaptado de Weber et al. 1974; en Fornaro, 1980)

Tipo de terreno (VL- velocidad de propagacion de la onda en m/s)	Tipo de construccion y Vp (mm/s)		
	A	B	C
1500	2,5	7,5	25
3000	5	15	50
4500	7,5	22,5	75

- A.- Edificio de baja calidad mecanica  
 B.- Edificio de media calidad mecanica  
 C.- Edificio de alta calidad mecanica

La circular del Ministerio de Ambiente (de julio de 1986) divide las construcciones en tres clases: resistentes, sensibles y muy sensibles; para las cuales, por lo tanto, los limites máximos de velocidad son establecidos en función de tres bandas de frecuencia: de 4 – 8 Hertz; de 8 – 30 Hertz; y de 30 a 100 Hertz. En esa dirección el valor de Vp se define en función de la frecuencia (Tabla 3.4.8.b).

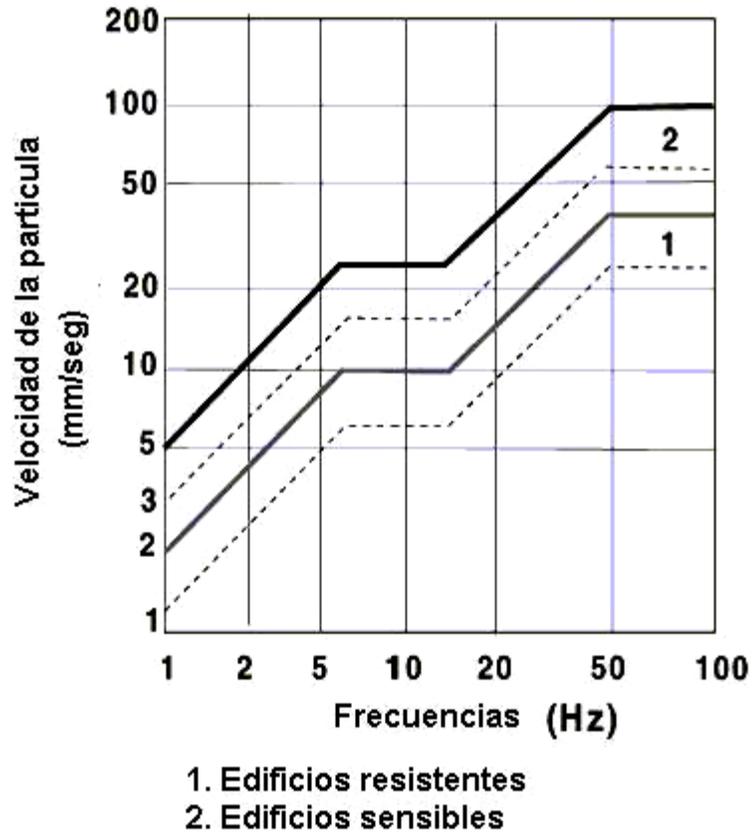
Tabla 3.4.8.b Limites de velocidad de vibración de partícula Vp sugeridos por la circular del Ministerio de Ambiente francés (Fuente Bacci, 2000, adaptado de Kiszlo, 1993, en Borla, 1993)

Tipos de Costrucciones	Frecuencia (Hz)		
	4-8	8-30	30-100
	Vp (mm/s)		
Edif. Resistentes	8	12	15
Edif Sensibles	6	9	12
Edif muy sensibles	4	6	9

La circular no es específica para los trabajos con explosivos en canteras. Así que una ley sucesiva (No 93-3 de 04/10/93) y una nueva circular (de septiembre de 93) extendieron la Circular anterior a las canteras, con los siguientes valores:

- Para f comprendida entre 2 y 8 Hertz; Vp = 5 mm/s
- Para f comprendida entre 8 y 30 Hertz; Vp = 9 mm/s
- Para f comprendida entre 30 y 159 Hertz; Vp = 12 mm/s

Existe todavía, otro proyecto de recomendación, datado de octubre de 1991, relativo a las vibraciones en minería, recomendando la limitación de las vibraciones inducidas en las estructuras, a fin de garantizar su integridad (Figura 3.4.8.b).



**Figura 3.4.8.b Recomendación Francesa (RT 23.7.1986) (Fuente Bacci, 2000, modificado de Anon, 1991; en Borla, 1993).**

En la Figura 3.4.8.b se muestra un El diagrama que representa los valores de velocidad de vibración admitidos, sugeridos por el proyecto de recomendación francés relativo a las vibraciones inducidas solo por las detonaciones en canteras. Las curvas punteadas representan el límite inferior para las dos categorías de edificios, que puede ser superado con una probabilidad de 10%.

Los límites propuestos, contrariamente a las normas precedentes, clasifican las estructuras en función de la sensibilidad de las vibraciones, en dos tipos: Sensibles y resistentes (excluyéndose los edificios de valor histórico construidos sin fundación).



El gráfico demuestra que la velocidad de la partícula en los alrededores de una edificación es el factor determinante de la magnitud de los daños de acuerdo con la tabla 3.4.9.a

Tabla 3.4.9.a Daños Causados por vibraciones en edificios (Jiménez, 1980)

Velocidad mm/seg	Daños	Quejas
Menor de 50	No hay en edificios bien construidos	Muy pocas
50 – 135	Daños ligeros en revestimientos. Se rompen algunos cristales	Numerosas
135 – 190	Daños reducidos pero generalizados. Se rompen muchos cristales	Totales
Mayor de 190	Daños estructurales	

Posteriormente una nueva publicación del U.S. Bureau of Mines realizada por Fogelson (1971), conteniendo el estudio y análisis de nuevos datos referidos al tema, en donde el mismo valor de 50mm/s se mantiene como límite por debajo del cual la probabilidad de daños es muy pequeña.

En 1980 el U.S. Bureau of Mines hace un análisis a ese valor de 50mm/s (Siskind et al., 1980), considerándolo muy alto en otras partes del mundo y en muchos estados norteamericanos. En dicho reporte se introduce el parámetro de frecuencia como parámetro de gran importancia tanto como la velocidad de partícula, resultante de un análisis del comportamiento dinámico de las estructuras en función del espectro de frecuencias del movimiento vibratorio. Los valores propuestos son mostrados en la Tabla 3.4.9.b

Tabla 3.4.9.b Valor máximo de velocidad de partícula según propuesta del U. S. Bureau of Mines en 1980 (Siskind et al., 1980)

Tipo de estructura	Baja Frecuencia	Alta Frecuencia
Casas modernas con paredes revestidas de material diferente del revoque común (yeso, etc.)	19 mm/s	50 mm/s
Casas antiguas, con paredes revocadas	12,5 mm/s	50 mm/s

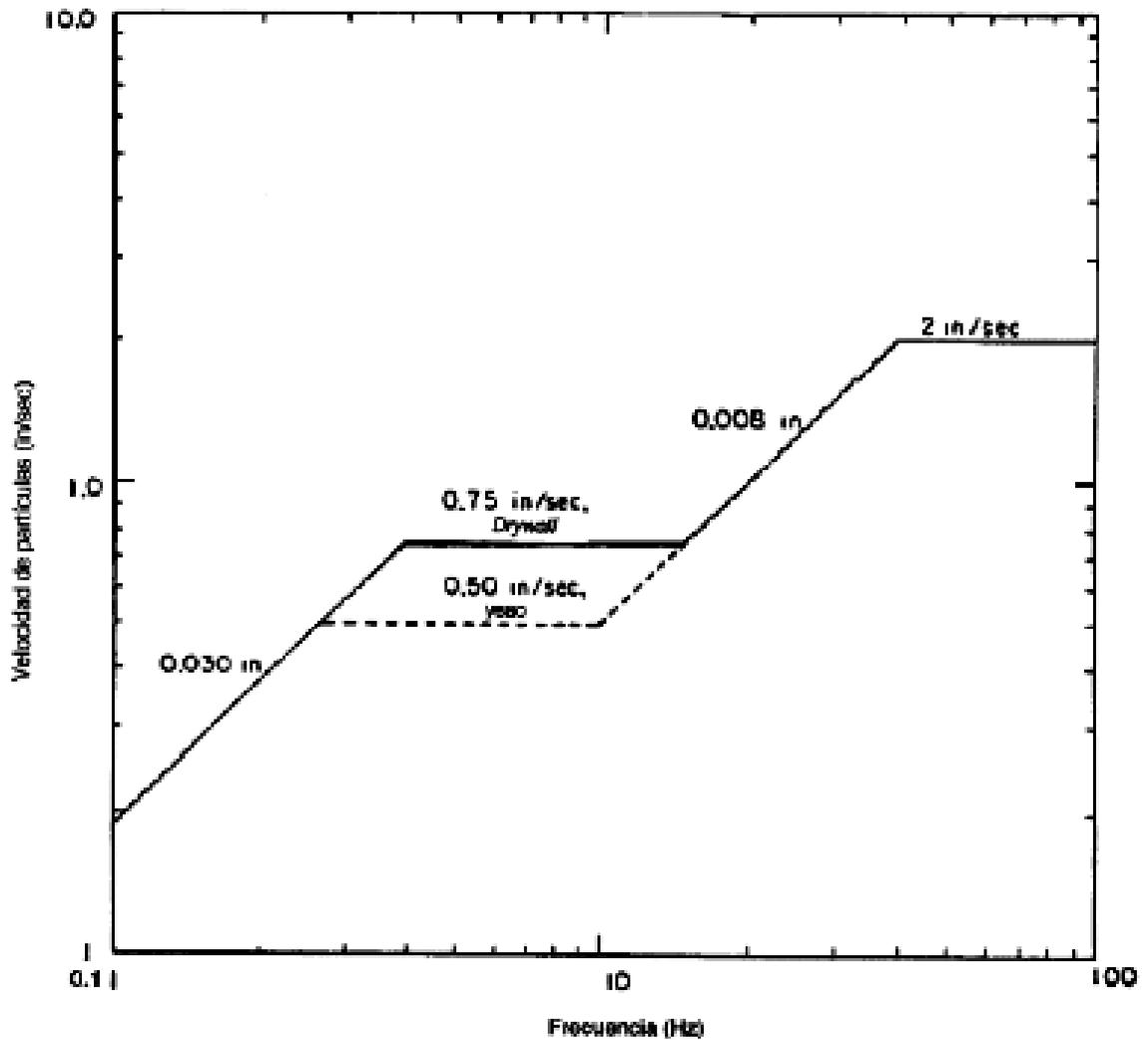
Baja frecuencia: < 40 Hz, todo pico espectral que se produzca por debajo de 40 Hz y dentro de una faja de 6 dB (o sea, 5% de la amplitud verificada a la frecuencia predominante) justifica el empleo del criterio de baja frecuencia.

Alta frecuencia: > 40 Hz

La Norma propuesta por el U.S. Bureau of Mines, divide las estructuras en dos tipos: Casas modernas y casas antiguas, colocando los límites de ocurrencia de daños a estas estructuras dentro de dos tipos de frecuencias, una baja frecuencia (inferior a los 40Hz) y una alta frecuencia (superior a los 40Hz), dentro un rango de velocidad dependiente del tipo de estructura.

Sin embargo, estos autores, proponen alternativamente otro criterio aplicable en el caso de un análisis más preciso (Figura 3.4.9.b.): frecuencias por debajo de 4 Hertz, la traslación máxima sería el criterio de daño (0,76mm), así como entre 12 y 40 Hertz (0,20mm), mientras que de 4 a 12 Hertz y por encima de 40 Hertz continuaría teniendo valor el criterio de velocidad máxima de partícula.

A pesar de ser una de las normativas pioneras sobre el control de vibraciones, actualmente es una norma antigua que ha tenido revisiones posteriores hasta 1980, y contempla el análisis de vibraciones sobre trabajos de minería a cielo abierto únicamente.



**Figura 3.4.9.b Niveles de seguridad para vibraciones de estructuras residenciales según el U. S. Bureau of Mines, 1980 (Siskind et al., 1980)**

#### **3.4.10. Norma Brasileira (NBR 9653)**

Creada en 1986, simplemente establece el valor máximo de velocidad que es de 15mm/s, independientemente del tipo de construcción y de la frecuencia. Solo especifica que el equipo de medición debe tener una respuesta de frecuencia por lo menos en un rango de 5 a 150 Hertz.

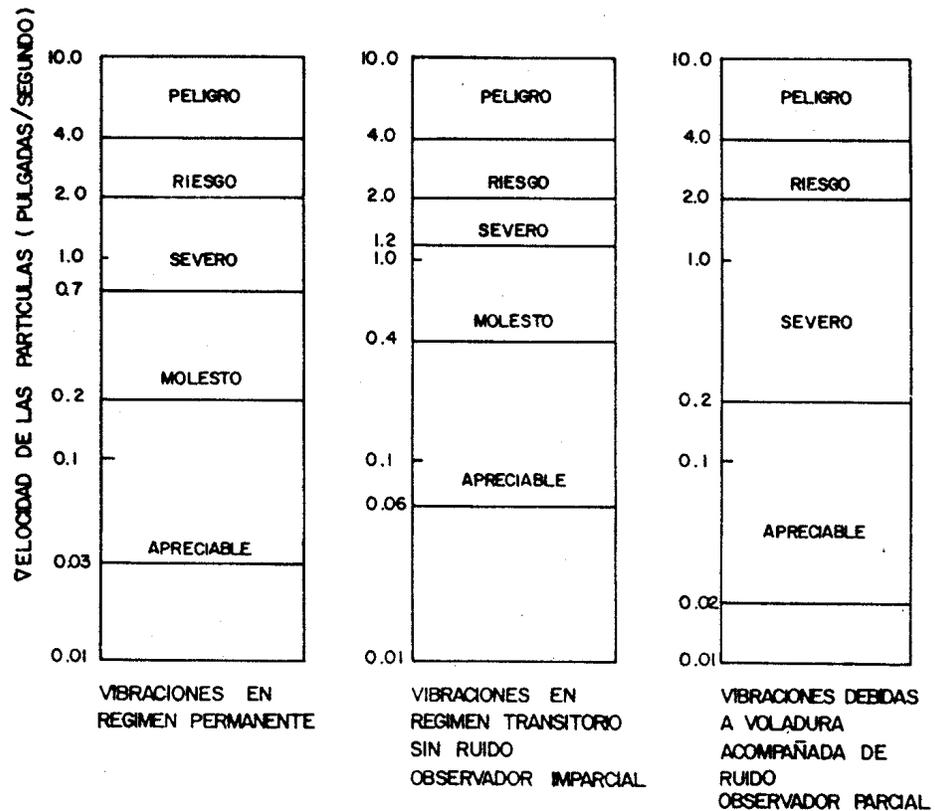
### 3.5 AFECTACIÓN DE VIBRACIONES A HUMANOS

En esta parte del trabajo se presenta una serie de observaciones sobre el tema de afectación de las vibraciones sobre los seres humanos, los diferentes estudios que se han realizado durante el siglo pasado sobre la sensibilidad del hombre a las vibraciones y se describe la norma más importante y representativa relacionada con el tema. Estos elementos conceptuales son las bases para la ejecución de medidas en áreas particularmente sensibles a las actividades relacionadas con las explosiones provocadas por voladuras.

Crandell (1949) resumió los datos disponibles para su época donde la amplitud de un movimiento con un efecto concreto sobre el cuerpo humano es casi inversamente proporcional a la frecuencia. Rathbone (1963) hizo una síntesis de la información disponible en donde adopto un criterio en función de la velocidad de la partícula. En realidad los datos presentados son abstractos y corresponden a estudios de laboratorio, en la realidad la reacción de los seres humanos es función de otros factores como la continuidad del movimiento y los ruidos simultáneos al movimiento.

El ser humano es dos veces más sensible a vibraciones permanentes que a las pulsátiles producidas por una explosión aislada. Por otra parte el ser humano percibe las vibraciones con el oído interno y con el oído externo los sonidos que las acompañan que son de dos clases: el de la propia explosión y el que se produce cuando vibran las construcciones. La experiencia demuestra que este último estímulo influye en forma decisiva en la apreciación subjetiva de la importancia de una vibración (Jiménez, 1980).

Oriard (1970) presento una guía simplificada para predecir la respuesta humana a las vibraciones en las que toma en cuenta la continuidad del movimiento y los ruidos producidos por este.



**Figura 3.5.1** Guía simplificada para predecir la respuesta humana a las vibraciones (Oriard, 1970)

Una percepción individual de que es normal o anormal puede depender en experiencia y expectativas previas. Por ejemplo, alguien que trabaja en los últimos pisos en un edificio alto puede ser menos afectado por la vibración del edificio que alguien que no trabaja en el edificio.

Bajo ciertas condiciones el cuerpo humano puede detectar amplitudes tan bajas como un micrón; amplitudes del orden de 0.5 micrón puede ser detectado con la puntas de los dedos (todos los desplazamientos son picos de amplitudes). El dato básico concerniente a la sensibilidad de todo el cuerpo a las vibraciones son descritas en la escala Reiher-Mesiter. En la investigación Reiher-Mesiter se noto que las vibraciones verticales son detectadas por humanos con mayor facilidad estando en pie, mientras las vibraciones horizontales son percibidas mayormente estando acostados. La sensación producida depende de frecuencia y amplitud. Una amplitud

de 100 micrón constituye una vibración molesta si la frecuencia excede 5Hz y una vibración dolorosa si la frecuencia excede 20Hz. Una amplitud de 10 micrón es solo perceptible a 5Hz, pero seria de molestia a 50Hz. En término de velocidad pico el límite de percepción corresponde a una velocidad de 0.3mm/s y una vibración es molesta si la velocidad excede 2.5mm/s.

El problema relacionado a la percepción humana del movimiento casual es cubierto en estándar DIN 4150/2 (ver Tabla 3.5.1). Los valores por el grado de percepción (valores Kb) son derivados de la relación:

$$K_b = 0.005 * A * f^2 / 100 + f^2$$

Donde:

A = Desplazamiento en micrones.

F = Frecuencia en Hertz.

Es probable que la mayoría de los problemas relacionados a las vibraciones sea en el área de la tolerancia humana a sus efectos. Las fuentes mayores de vibraciones originadas por actividad humana son asociadas a tráfico, ferrovial, sitio de construcción, actividad industrial, etc. La tolerancia humana es dictada no solamente por factores científicos sino también psicológicos y una definición muy rígida de lo que constituye una molestia puede ser no posible definirla como tal.

Tabla 3.5.1 Relación entre valores Kb y la percepción humana de vibraciones (DIN 4150/2)

<b>Valor Kb</b>	<b>Grado de Percepción</b>
< 0.1	No percibido
0.1	Limite de percepción
0.25	Escasamente perceptible
0.63	Apreciable
1.6	Fácilmente apreciable
4.0	Fuertemente detectable
10.0	Detectable muy fuertemente

También son considerados valores de Kb de 25 y 63, pero es claro que no es posible distinguir sus efectos en las personas. Los datos son aplicables tanto a las vibraciones en sentidos horizontal (X,Y) como en las vertical (Z). En la Tabla 3.5.2 se presentan los niveles de vibraciones aceptables por diferentes tipos de edificios.

Tabla 3.5.2 Niveles sugeridos de vibraciones aceptables por diferentes tipos de edificios. Intensidades aceptables en Kb. Valores en paréntesis se aplican en casos donde la frecuencia de vibraciones es por debajo de los 15Hz.

<b>Tipo de Edificio</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Vibraciones Continuas</b>	<b>Vibraciones Repetidas</b>	<b>Vibraciones Ocasionales</b>
Hospitales	Día	0.1	0.1	2.5
	Noche	0.1	0.1	0.1
Residencias	Día	0.1	0.2 (0.1)	4
	Noche		0.1	0.1
Residencias urbanas y oficinas	Día	0.3 (0.15)	0.63 (0.3)	8
	Noche	0.1	0.1	0.1
Industrias	Día	0.63 (0.3)	0.8 (0.4)	12
	Noche	0.63 (0.3)	0.8 (0.4)	12

### **3.6 CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE VOLADURAS**

Una voladura es una liberación de energía que produce, entre otros efectos la generación de ondas y vibraciones de forma radial en todas las direcciones (Aparicio, 1997). En algunos casos esta liberación puede producirse en un instante de tiempo en el que todo el explosivo es consumido junto denominándose voladura instantánea. En otros casos, el explosivo puede distribuirse en el tiempo mediante la utilización de un elemento llamado retardador. Este dispositivo provoca la formación de una secuencia continua de voladuras instantáneas desplazadas en el tiempo.

#### **3.6.1 Voladura instantánea**

El primer caso, en el que la liberación de energía se produce en un instante de tiempo, y que se denominan instantáneas, la ubicación o carga del material explosivo puede ser puntual (un solo barreno), o lineal (varios barrenos distribuidos en una línea). Se denominan voladuras de precorte. En el primer caso el tipo de onda vibracional puede describirse como una onda sinusoidal, compresional de gran magnitud en su primer impulso; y con oscilaciones posteriores de amplitudes exponencialmente decrecientes. Su atenuación dependerá de las características físicas del material (Aparicio 1997).

#### **3.6.2 Voladura con retardadores**

Se define como tales aquellas en las cuales el explosivo es detonado en forma secuencial y progresiva, utilizando para tal fin un elemento llamado retardador, que es distribuido convenientemente en la línea de tiro. Este tipo de voladura es el que mayormente se utiliza en los trabajos de explotación de canteras y excavación en los diferentes proyectos de ingeniería. Su diseño y diagramación varía en función de varios parámetros, entre los que se puede mencionar, entre otras: (a) el tipo de explosivo, (b) la roca presente, (c) las condiciones geológicas y litológicas del sitio, (d) los requerimientos y tipo de material a utilizar, (e) la presencia de centros poblados en las proximidades, (f) las estructuras propias del proyecto.

La distribución de explosivo y el diseño de la voladura es muy variable. Existen muchas técnicas y variaciones. Cada una tiene sus propias peculiaridades y características:

- Ubicación del punto de interés, (estructura en función del diseño de la voladura).
- Punto de encendido y secuencia de amarre de los barrenos.
- Tipo y distribución de los retardadores.
- Orientación del frente libre en función de la estructura.
- Duración total de la voladura en función del número de retardadores.
- Relación entre duración calculada y duración efectiva de registro.
- Velocidad de propagación de ondas corpóreas.
- Características geológicas y geotécnicas del área.

### **3.7 DAÑOS CAUSADOS POR LA VOLADURA**

El efecto de una explosión es triple; se siente una detonación, vibra el terreno y pueden caer proyectiles rocosos (Jiménez, 1980).

- La detonación es transmitida por el aire como una onda P de compresión que produce un incremento de la presión atmosférica (con riesgo de rotura de cristales, tabiques, etc.) y es percibido como un ruido por los seres vivos a los que puede dañar si es de gran intensidad.
- El terreno transmite vibraciones complejas que incluyen ondas P de compresión con origen en el foco, ondas S de corte que provienen de reflexiones y/o refracciones de las ondas P cuando encuentran discontinuidades del terreno y finalmente ondas L o R de superficie que se transmiten a través de la superficie y tienen componentes de compresión y de corte. Estas vibraciones pueden causar daño a las construcciones.
- Hay con frecuencia proyección aérea de las rocas en la zona de la explosión que al caer puedan originar daños importantes a las personas y a las cosas.

## **CAPITULO IV**

### **4. METODOLOGÍA**

La primera parte a desarrollar dentro del trabajo metodológico, y sin duda una de las principales actividades durante el desarrollo del trabajo especial de grado es la recopilación e investigación bibliografía, la cual abarca varios aspectos como son, la recopilación información relativa al tema de control de vibraciones producido por voladuras, análisis de los antecedentes y trabajos previos tanto nacionales como internacionales relacionados con dicho tema, y análisis y preselección de las normas que regulan los aspectos referentes al monitoreo y análisis de vibraciones asociadas a actividades mineras y obras publicas en donde intervengan el uso de explosivos y su factibilidad para la aplicación en el país.

Lo reseñado en el párrafo anterior es indispensable para el desarrollo del trabajo especial de grado, principalmente en lo referente a las normas internacionales que regulan todos los aspectos sobre el control de vibraciones en áreas urbanas, ya que es de conocimiento dentro del área que no existen normas en Venezuela que regulen dichas actividades.

Debido a que este trabajo especial de grado abarca una parte de adquisición de datos y otra parte de procesamiento, es conveniente dividir la metodología de trabajo en esos mismos términos. Una primera parte que enumere y haga una breve descripción de las actividades realizadas dentro de lo que es la adquisición de los datos, variables y factores que pueden influir sobre ellos. Una segunda parte que enumere y explique como será la manipulación de los datos para su procesamiento y posterior análisis.

El equipo empleado para la primera etapa es un sismógrafo SYSCOM MR2002-CE, propiedad de TRX Consulting (consultora de ingeniería contratada por ASTALDI S.P.A. de Venezuela para realizar el monitoreo de las vibraciones producidas por las voladuras en la excavación del túnel Carrizalito del metro Los Teques), compuesto por un geófono triaxial MS 2003+, equipo que permite monitorear la velocidad de propagación de la onda tanto en el eje vertical (eje Z)

como en el plano horizontal (ejes X e Y) y un computador portátil conectado al sismógrafo SYSCOM MR2002 que permita la observación previa de los registros adquiridos a través del programa MR 2002 communication. Antes de exponer las metodologías utilizadas para el desarrollo del trabajo se presentaran a continuación las especificaciones técnicas del equipo.

#### **4.1 INSTRUMENTO DE MEDICIÓN**

El MR2002-CE es un equipo compacto que se utiliza para registrar y grabar vibraciones en tres componentes (tri-axial), el cual se usa como sismógrafo principal o como unidad adicional cuando se requiere de un monitoreo múltiple. El instrumento consta de un sensor (MS2003) y una unidad de adquisición (MR2002) los cuales detectan la vibración y la registra en su memoria interna.



**Figura 4.1.1 Seismograph Syscom MR2002-CE (MR2002 manual del usuario)**

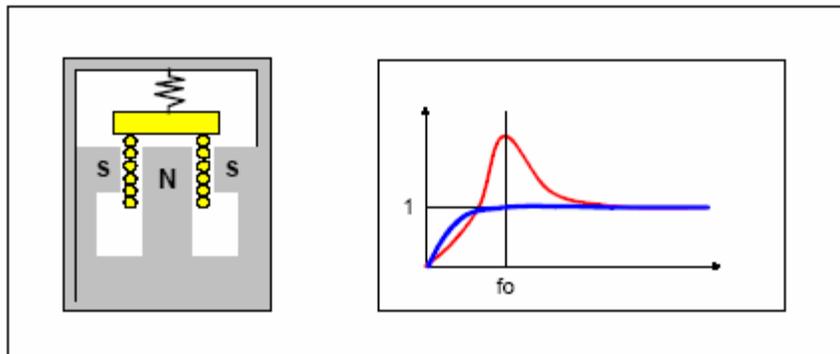
##### **4.1.2 Unidad de adquisición MR2002**

El MR2002 consiste en:

- Convertidor A/D (analógico a digital) y convertidos DSP (procesador de señal digital).
- Microprocesador para la comunicación, control y visualización.
- Modulo de poder y alimentación (filtro, transformador y batería recargable)

### 4.1.3 Sensor MS2003

El MS2003, contiene tres geofonos activos electrónicamente en combinación con algunos componentes electrónicos adicionales. Mide vibraciones verticales, transversales y longitudinales. Incluye tres tipos de puntas para la instalación en superficies delicadas. El transductor también puede ser acoplado a superficies duras como paredes, pisos e instalaciones en techos. El principio de este tipo de sensores se puede observar en la Figura 4.1.3.a. Una masa unida a un resorte mueve una bobina dentro de un campo magnético, ese movimiento produce una corriente que es proporcional a la velocidad. La masa suspendida actúa como un sistema con un solo grado de libertad y producirá una curva de respuesta según la línea roja de la Figura 4.1.3.a., los componentes electrónicos adicionales se utilizan para modificar esta curva de respuesta para obtener la línea azul de la misma grafica.



**Figura 4.1.3.a Principio del sensor y curva de respuesta (MR2002 User manual)**

Características:

- Principio de operación: Geófono activo compensado electrónicamente.
- 3 direcciones ortogonales de medida (tri-axial)
- Rango de medición: Desde 0.0035 hasta 115mm/s de autorange con opción de alta sensibilidad (deep red) para medidas de rangos de 0.00001 – 2.3mm/s.
- Rango de frecuencia: Desde 1 a 315Hz
- Eficacia: alrededor del 1%, calibrada a 15Hz

#### 4.1.4 Especificaciones Técnicas

- Tasa de muestreo de frecuencia: 1024 muestras por segundo en cada canal, todos los canales y todos los tiempos de registro.
- Respuesta: Todos los canales: de 1 a 300Hz (-3dB), independiente de los tiempos de registro.
- Tiempo fijo de Registro: 1 a 10 segundos con incrementos de 1 segundo.
- Tiempo de auto registro: 1 a 20 segundos.
- Almacenamiento Eventos: 40 - 100 eventos de un segundo de duración, incluyendo todos los parámetros de grabación.
- Modos de Registro: Manual, Disparo sencillo, continuo y Auto. Posibilidad de adquisición activada por trigger y background vibration determinados por intervalos de tiempo.
  - VM Vibration Mode: Vmax por selección de duración de periodos.
  - KB Mode; (Time Averaged Window) es análoga la grabación por VM pero contiene los valores KB como definido en la norma DIN 4150/2 que sirven para evaluar la molestia a los humanos.
  - Blasting Mode. De acuerdo a la norma DIN 4150/3

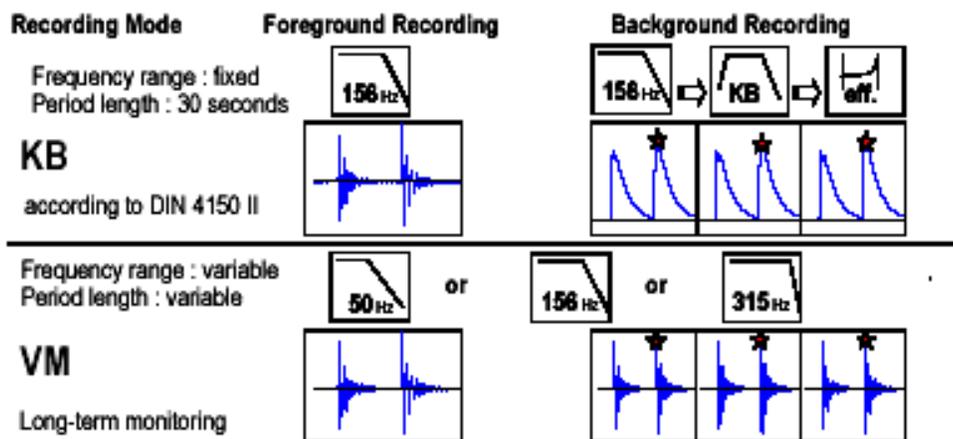


Figura 4.1.4.a Tipos de filtros disponibles en el equipo de medición para la adquisición. (MR2002 manual del usuario)

## 4.2 METODOLOGÍA DE ADQUISICIÓN

Dentro del trabajo de medición se siguieron las pautas y recomendaciones que propone la Internacional Society of Explosives Engineers, ISEE Field Practice Guidelines for Blasting Seismographs. Estas recomendaciones prácticas intentan ser útiles como una guía general y, por lo tanto, no comprenden todos los casos que se presentan en las diferentes condiciones de cada lugar. Es responsabilidad de cada operador evaluar tales condiciones y obtener buena correspondencia entre el instrumento de monitoreo y la superficie que se va a monitorear. En todos los casos, el operador debe describir las condiciones del lugar y los procedimientos de organización en el registro permanente de cada voladura (ISEE, 2002). El objetivo que se desea alcanzar con el seguimiento de las pautas propuestas por la ISEE en la guía practica, es la realización de las mediciones la forma más precisa y con menos errores posibles.

A continuación se enumeraran los pasos a seguir para el monitoreo de vibraciones (algunos de los puntos nombrados están relacionados y se contemplan en el ISEE Field Practice Guidelines for Blasting Seismographs):

- Selección del punto de medición. Este aspecto debe ser coordinado y seleccionado entre el operador del equipo y ASTALDI S.P.A. de Venezuela, en el cual confluyen muchos factores de importancia como son, en primer lugar la distancia entre el punto de medición y la voladura, la accesibilidad al punto de medición y la logística que debe emplear la empresa (en este caso ASTALDI S.P.A.) para la seguridad del operador y el equipo de medición.
- Ubicación del punto de medición. Con la ayuda de un GPS (Global Positioning System) se ubica el punto de medición referenciado en coordenadas UTM (Universal Transversa Mercator) y la altitud para su posterior ubicación en el mapa. Se debe tomar nota del número de la casa adyacente al punto de adquisición.

- Ubicación del punto de medición en el mapa. Sobre el mapa digitalizado en el computador portátil el punto de medición y el punto de la voladura (información suministrada por ASTALDI S.P.A.), con el fin de orientar correctamente los ejes del geófono con respecto a la fuente y determinar la distancia horizontal entre ambos puntos.
- Colocación del equipo en el punto de medición. Se dispone sobre la superficie del suelo el geófono triaxial MS 2003+ (debe colocarse lo más próximo a las fundaciones de la estructura, nunca sobre ella, pues lo que se intenta medir es la vibración del suelo o roca y no la respuesta de la estructura) orientando el eje X del sensor hacia la fuente (punto de la voladura) y se hace la nivelación correspondiente. Se conecta el geófono al sismógrafo MR2002-CE y este a su vez con la computadora portátil para manipular los parámetros de medición con el programa MR2002 communication.
- Programación de los parámetros de adquisición. Una vez encendido todos los componentes del equipo de medición es importante colocar a través del programa MR2002 communication, el cual conduce el sismógrafo SYSCOM MR2002-CE, todos las variables que conforman la parte de la medición como son: tasa de muestreo, muestreo pre-post evento, modo y nivel de trigger, sensibilidad y filtro utilizado.

En este trabajo especial de grado se utilizaron los siguientes parámetros:

- Tasa de muestreo: 800 muestras por segundo.
  - Muestreo pre-evento: 1 segundo.
  - Muestreo post-evento: 1 segundo.
  - Modo de trigger: X o Y o Z.
  - Sensibilidad del trigger: 0.091 mm/s
  - Filtro: 156 Hz paso bajo.
- Medición de la vibración producida por el ruido ambiental. Antes de realizar la medición de la vibración producida por la voladura, se realiza una medición del ruido ambiental, generado por las actividades cotidianas en la

zona, antes y después de la detonación aproximadamente durante diez minutos, esto para comparar los niveles de ruido con la vibración producto de la explosión.

- Medición de la vibración. Se deja el instrumento midiendo hasta que se produce la voladura, una vez registrada la voladura se anota la hora de la misma y el número del evento con el cual se grabo en el sismógrafo.
- Anotación de observaciones. Se toma nota de todas observaciones que se puedan realizar en el entorno del punto de medición como pueden ser: Características de la casa adyacente, materiales con la cual fue construida dicha casa, clima y temperatura, breve observación de la geología de la zona, fuentes de ruido secundarios y todo aquello que permita realizar posteriormente un buen análisis de los resultados.
- Obtención de datos post-registro. Es importante tener apuntado una serie de datos que permitan obtener varios parámetros imprescindibles para el posterior procesamiento y análisis de resultados, estos parámetros son facilitados por ASTALDI S.P.A., los cuales son: progresiva de la voladura (ubicación geográfica por coordenadas dentro del túnel Carrizalito durante la explosión), tipo y cantidad de carga utilizada para la detonación, patrón y tipo de voladura.



**Figura 4.2.1 Disposición del equipo de medición Syscom MR2002-CE durante la adquisición**

Estas actividades de adquisición se realizaron cada vez que la compañía ASTALDI S.P.A. lo requiera para el monitoreo de las vibraciones producidas por los trabajos de avance con el uso de explosivos dentro túnel Carrizalito que unirá la Estación de las Adjuntas en Caracas con la Estación el Tambor en Los Teques.

#### **4.3 METODOLOGÍA DE PROCESAMIENTO Y TRATAMIENTO DE DATOS**

Una vez concluida la primera etapa referente al trabajo de adquisición, que finalizara cuando se hayan terminado todos los trabajos de excavación dentro del túnel Carrizalito. Se procederá entonces a la siguiente fase correspondiente a la manipulación y utilización de los datos para el procesamiento y análisis. Para ello es imprescindible cargar los datos registrados por el sismógrafo a la computadora, generalmente eso se hará finalizada cada una de las jornada durante el período de adquisición con el programa MR2002 communication, generando una base de datos con todos los eventos registrados durante la grabación del equipo. En principio los datos obtenidos durante el registro y cargados en la base de datos son: fecha y hora de cada uno de los eventos grabados, duración de cada uno de ellos y los picos de velocidad registrado en cada una de las componentes (X, Y y Z). También son grabados los registros de los eventos asociados a la vibración producidas por la voladura y a la actividad humana en la zona, los cuales pueden ser observados con el programa VIEW2002 o Waveform Análisis de Syscom, proporcionados por el proveedor del equipo.

A continuación se nombraran una serie de pasos concerniente a la utilización de los registros y datos obtenidos durante la adquisición, para su correspondiente procesamiento y posterior análisis:

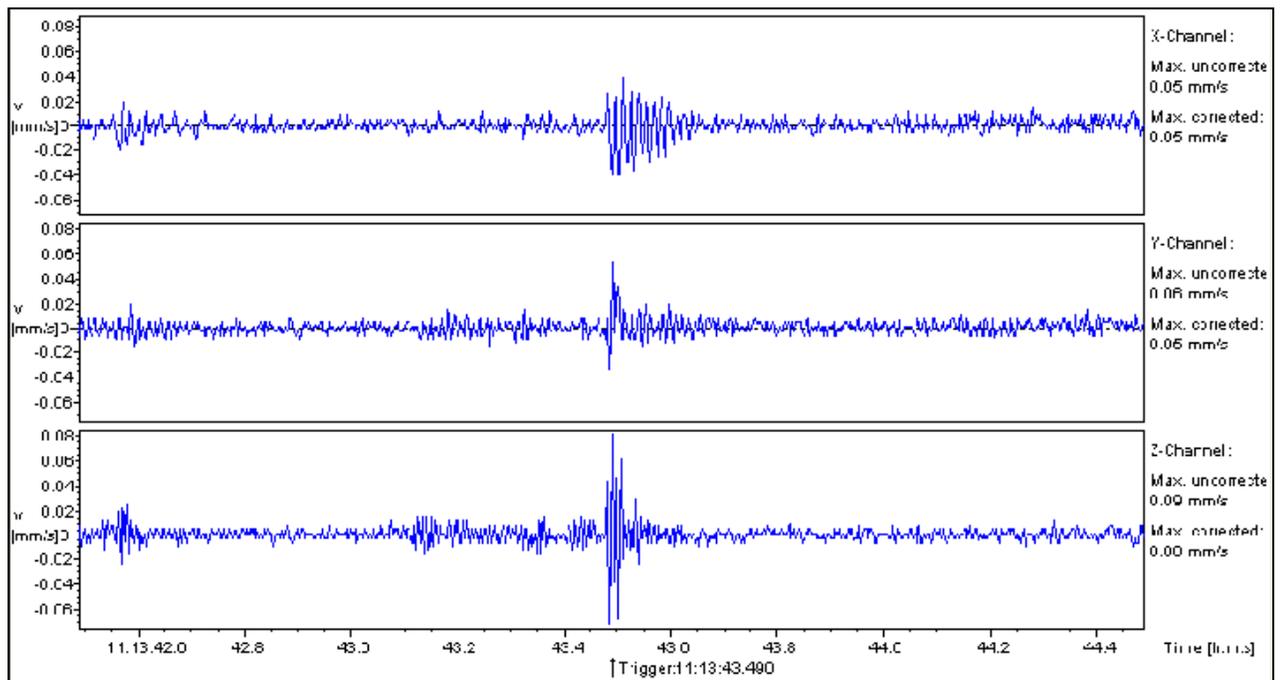
- Ubicación de los puntos de medición en el mapa. Con las coordenadas UTM del punto de medición obtenidas por el GPS, se ubica sobre el mapa digitalizado del túnel Carrizalito (facilitado por ASTALDI S.P.A.) el punto exacto en donde se realizo el registro. Para ello se utilizó el programa AutoCAD 2004, que ubica automáticamente un punto colocando las

coordenadas correspondientes a éste. En el apéndice B se observa el mapa digitalizado del túnel carrizalito con la ubicación de los puntos de las mediciones realizadas.

- Estimación de la distancia horizontal entre el punto de medición y la voladura. Con el programa AutoCAD 2004 se realizó una estimación bastante precisa de la distancia horizontal entre la voladura y el punto del registro, ya que se tiene el valor de la progresiva en donde se realizó la detonación dentro del túnel y el punto de medición. El programa AutoCAD 2004 determina automáticamente la distancia en metros entre ambos puntos.
- Estimación de la distancia real entre el punto de medición y la voladura. A pesar de que se tiene una distancia horizontal entre ambos puntos eso no implica que sea la distancia real, debido a que el estudio se está realizando en una zona montañosa correspondiente a la Cordillera de la Costa, y por lo tanto puede existir una diferencia significativa entre los valores de cota del punto del registro y el punto de la explosión dentro del túnel. Para determinar dicha distancia real, primero se determina la diferencia de cota entre punto y voladura, para ello se necesitan ambos valores de cota, el primero correspondiente al punto de observación se determina de dos formas: (a) con el valor de altitud obtenido por el GPS (b) las curvas de nivel que rodean al punto de medición ubicado ya en el mapa digitalizado del túnel Carrizalito (Generalmente ambas cotas coincidían). La cota de la progresiva de la voladura era facilitada por ASTALDI S.P.A. en la mayoría de los casos, si no se podía obtener geoméricamente a partir de la distancia de la voladura con respecto a los portales de entrada y salida del túnel Carrizalito y la pendiente del mismo, teniendo un control de la cota de los portales. Una vez calculada la distancia vertical entre el punto de registro y de voladura se determina la distancia real utilizando el teorema de Pitágoras el cual nos dará la diagonal que une ambos puntos y por consiguiente la distancia real.

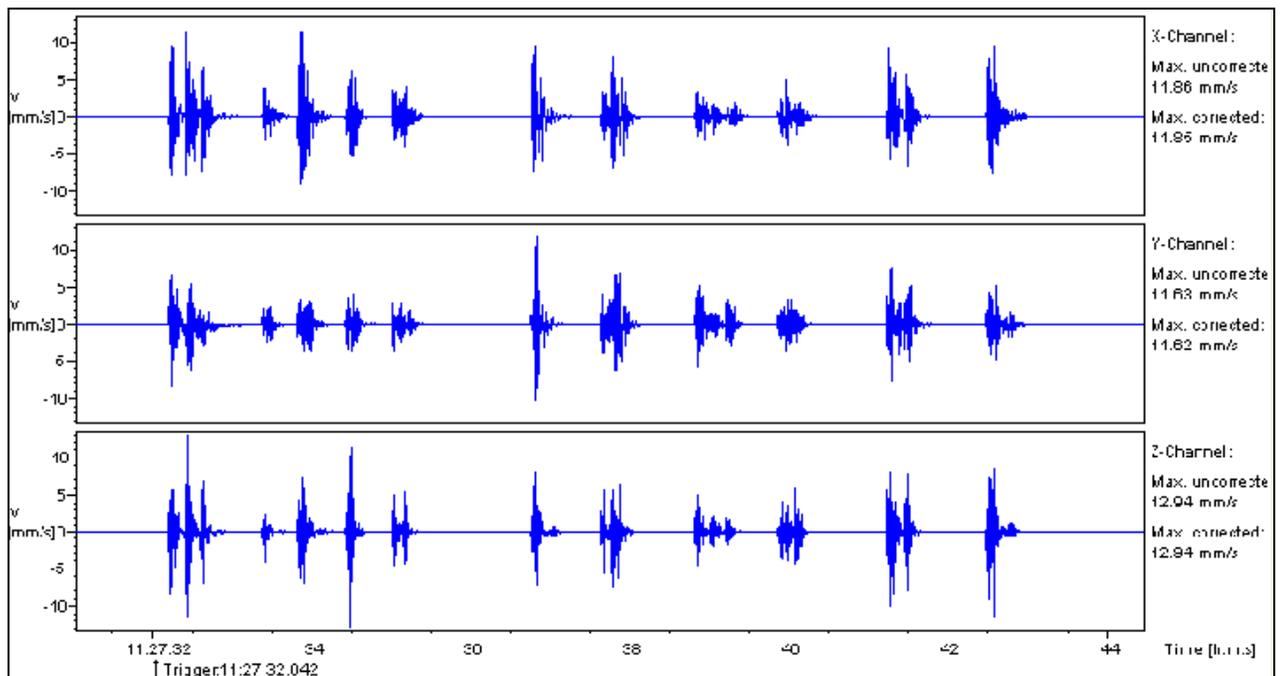
$$(Dist. Real)^2 = (Dist. Horizontal)^2 + (Dif. De Cota)^2$$

- Estimación de la distancia de la casa más cercana al punto de voladura. También es importante estimar la distancia entre la voladura y la casa más cercana a ésta, utilizando el mapa digitalizado del túnel Carrizalito en donde están cartografiadas todas las viviendas del sector, de esta forma se puede estimar la distancia real entre ambos ya que se puede determinar la distancia horizontal y la diferencia de cota.
- Separación de registros. Teniendo conocimiento de cuales son los eventos producidos por la actividad humana y los producidos por la voladura, se separan los registros: uno con el ruido producido por las actividades del sector y otro para las explosiones registradas. En la Figura 4.3.1 se ejemplifica los registros de las tres componentes del ruido ambiental producido por la actividad cotidiana en el sector de la medición antes de la voladura.



**Figura 4.3.1 Señal de ruido ambiental pre-evento (observada con el programa VIEW2002), registrada el 23 de Abril de 2004 en el Barrio Bertorelli Cisneros, Sector La Esperanza.**

- Comprobación de los registros. Este paso se realiza para observar si los registros gravados durante la voladura corresponden con las observaciones anotadas en campo como la hora del evento, además de comprobar si es un dato confiable que se encuentre dentro de los parámetros normales del registro y no presente ningún tipo de anomalía que pueda interferir en el procesamiento y arrojar resultados erróneos. Para ellos se utiliza el programa WAVEFORM ANALYSIS que automáticamente muestra la señal de la voladura, y los valores máximos de velocidad para cada una de las componentes, como se puede observar en la figura 4.3.2



**Figura 4.3.2 Señal producida por la voladura registrada el 23 de Abril de 2004 en el Barrio Bertorelli Cisneros, Sector La Esperanza.**

- Obtención de los valores de velocidad y frecuencia. Con el programa VIEW2002 a partir de los registros obtenidos en la adquisición, determina los valores de velocidad para cada una de las componentes y estima la suma vectorial entre ellas. Obtiene también los valores de frecuencia natural

asociados a cada una de las señales registradas en las componentes a través de la transformada rápida de fourier, estos valores obtenidos se pueden observar de forma ejemplificada en la figura 4.3.3 Además de obtener los valores de velocidad y frecuencia, estima la duración del evento, calcula los promedios de todas las mediciones realizadas durante la actividad de adquisición, el número de registros gravados y la desviación estándar de los datos de velocidad.

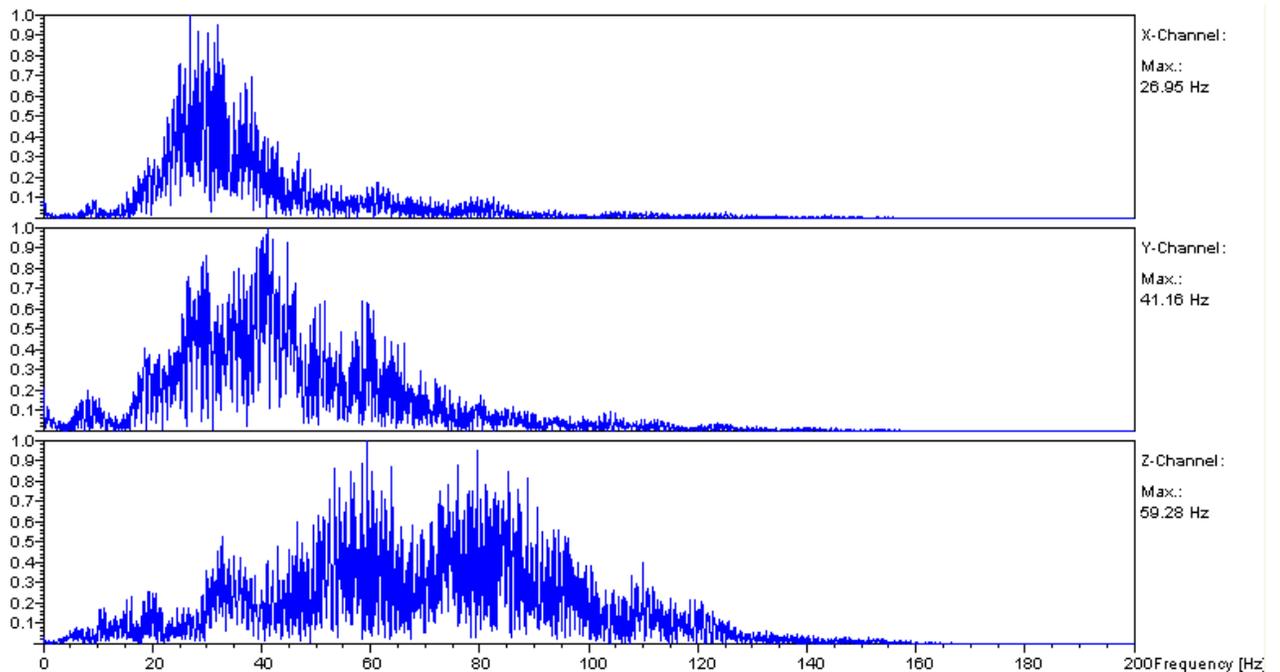
File Name	EventTime	Duration	Peak (1)	Peak (2)	Peak (3)	Vec Sum	Freq (1)	Freq (2)	Freq (3)
		[s]	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	Hz	Hz	Hz
oladura\-----006.VMR	1:13:43 a.m.	2,00	0,046	0,053	0,081	0,105	68,0	84,4	118,0
oladura\-----007.VMR	1:15:22 a.m.	2,02	0,103	0,053	0,120	0,153	68,8	65,6	82,0
oladura\-----008.VMR	1:15:27 a.m.	2,02	0,033	0,128	0,061	0,136	80,5	86,7	78,1
oladura\-----009.VMR	1:15:39 a.m.	2,05	0,064	0,146	0,137	0,172	85,9	85,9	118,0
oladura\-----010.VMR	1:17:58 a.m.	2,01	0,017	0,040	0,115	0,116	75,0	89,1	81,3
oladura\-----011.VMR	1:27:32 a.m.	13,42	11,849	11,619	12,937	13,922	27,0	41,2	53,4
oladura\-----012.VMR	1:29:02 a.m.	2,02	0,024	0,099	0,152	0,179	0,0	83,6	84,4
oladura\-----013.VMR	1:30:11 a.m.	2,00	0,013	0,054	0,088	0,093	83,6	83,6	117,2
oladura\-----014.VMR	1:30:42 a.m.	2,01	0,026	0,092	0,043	0,100	83,6	84,4	76,6

	Duration	Chan. 1	Chan. 2	Chan. 3	Vec. Sum
Maximum:	13,418	11,849	11,619	12,937	13,922
Average:	2,923	1,049	1,047	1,302	1,429
Std. Dev.:	3,030	3,125	3,056	3,398	3,646
Number of Events:	13				

**Figura 4.3.3** Tabla de valores de velocidad y frecuencia obtenidos durante la adquisición del día 23 de Abril de 2004 en el Barrio Bertorelli Cisneros, Sector La Esperanza.

- Visualización de la frecuencia para el registro de voladura. Para verificar y comparar los valores de frecuencia obtenidos por el programa VIEW2002, se utiliza el programa WAVEFORM ANALYSIS, que a partir del registro obtenido de la fuente, grafica y calcula automáticamente por medio de la transformada rápida de fourier la frecuencia asociada, ver figura 4.3.4



**Figura 4.3.4 Valores de frecuencia obtenidos para la voladura del día 23 de Abril de 2004 en el Barrio Bertorelli Cisneros, Sector La Esperanza.**

- Estimación del valor  $K_b$  de percepción humana. A partir de todos los registros de voladura obtenidos durante las actividades de detonación dentro del túnel Carrizalito del metro Los Teques, se estiman los valores de  $K_b$  para las componentes X Y Z con el programa VIEW2002.
- Construcción de tablas. Es importante tener todos los datos y variables de manera organizada para el procesamiento, análisis y elaboración de gráficas, por ello se realizaron una serie de tablas que contienen los datos y parámetros utilizados en campo como son: fecha y hora de la adquisición, ubicación de la voladura, ubicación de la medición, esquema de voladura, cantidad de explosivo, distancia de la voladura al equipo de medición y viviendas; también tablas de resultados que contengan: velocidad de las tres componentes, suma vectorial de las velocidades, frecuencia de las tres componentes, frecuencia dominante, actividad humana y valores  $K_b$ .

- Ejecución de análisis estadísticos. Es fundamental hacer un tratamiento estadístico de los datos obtenidos en campo y resultados del procesamiento, para obtener una congruencia sobre la densidad de datos en los cuales se estará trabajando. Con la ayuda del programa SPSS de razonamiento estadístico, se producen tablas e histogramas de frecuencia para cada uno de los parámetros y variables implicados dentro del trabajo especial de grado, obteniendo entre varias cosas, el intervalo de confianza, la desviación estándar, la media, el rango, etc. De esta manera se pueden incluir o descartar según sea el caso valores dentro de una variable que no estén incluidos en el área de la densidad de datos de la misma.
- Generación de graficas con el programa VIEW2002. Con dicho programa se puede generar varias graficas, entre las mas importantes: picos de velocidad versus frecuencia y picos de velocidad versus tiempo. Una de las bondades de este programa es que permite graficar algunas normas europeas sobre el control de vibraciones como son la norma alemana DIN 4150/3, la norma suiza SN 640312 y la norma francesa RT.23.7.1986 con los registros obtenidos de vibraciones y de esa forma hacer un análisis preliminar.
- Elaboración de graficas. Con la ayuda de los programas Excel y Grapher se procede a realizar una de las tareas más importantes dentro del trabajo especial de grado, que se basa en la construcción graficas desde las tablas previamente concebidas, las cuales van a permitir hacer el análisis de los resultados obtenidos a partir de las diversas curvas que estas generan. Las graficas contemplan las siguientes parámetros y variables:
  - Velocidad pico vs frecuencia dominante.
  - Velocidad pico vs distancia.
  - Valores de Kb

## CAPITULO V

### 5 RESULTADOS Y ANÁLISIS

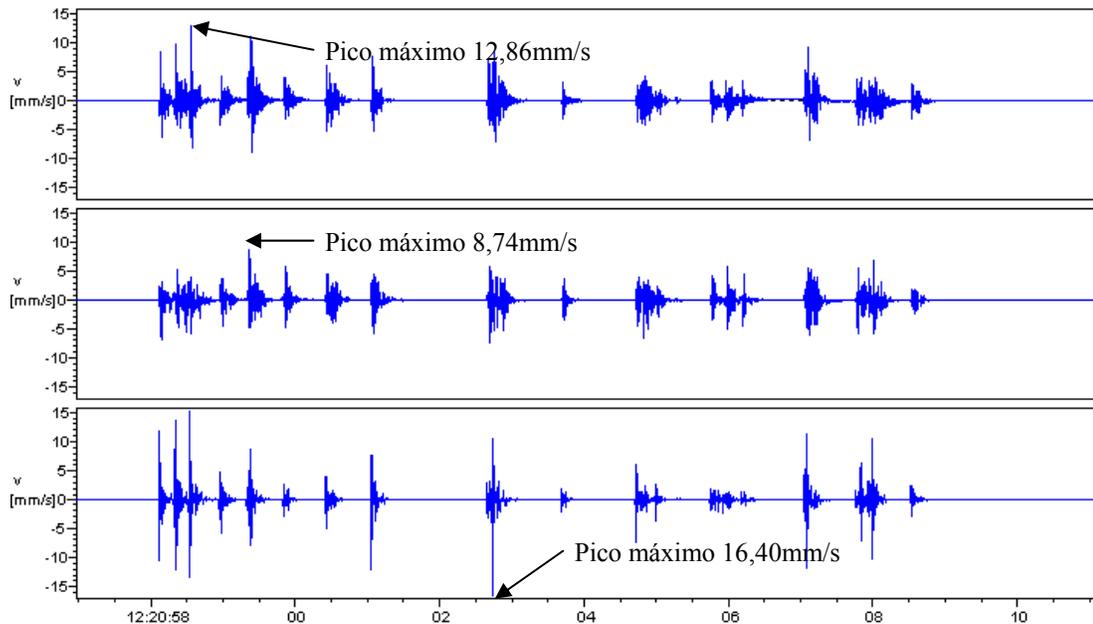
La velocidad de la partícula es representada por un vector de tres componentes: la dirección vertical compuesta por el eje Z, la dirección longitudinal compuesta por los eje X (que une con una línea imaginaria el centro de masa de la detonación con el punto de medición) y la dirección transversal compuesta por el eje Y (forma 90° con la longitudinal en el mismo plano horizontal). La tabla 5.1 muestra los valores del vector velocidad para cada uno de los 46 puntos de medición obtenidos en campo y su correspondiente suma vectorial para la obtención del valor de velocidad pico real. Es importante destacar que ese valor de velocidad pico obtenido por la suma vectorial de las tres componentes del vector velocidad no se corresponde con la expresión matemática apropiada para ese cálculo:

$$V_{pico} = (|V_x|_{max}^2 + |V_y|_{max}^2 + |V_z|_{max}^2)^{1/2}$$

Tabla 5.1 Velocidad de cada componente y velocidad pico calculada.

Punto	Velocidad Pico en X (mm/s)	Velocidad Pico en Y (mm/s)	Velocidad Pico en Z (mm/s)	Velocidad Pico (Sum Vectorial) (mm/s)	Punto	Velocidad Pico en X (mm/s)	Velocidad Pico en Y (mm/s)	Velocidad Pico en Z (mm/s)	Velocidad Pico (Sum Vectorial) (mm/s)
1	0,543	0,374	0,632	0,722	24	0,443	0,366	0,328	0,609
2	2,887	1,989	2,833	3,467	25	0,652	0,544	0,377	0,678
3	2,122	1,862	1,466	2,511	26	0,827	0,726	0,562	0,847
4	2,304	3,561	3,462	4,010	27	1,273	2,030	2,588	2,822
5	0,664	0,601	0,299	0,680	28	2,752	2,504	1,252	2,904
6	0,616	0,609	0,696	0,852	29	3,607	4,137	4,548	5,621
7	0,933	0,478	0,686	0,949	30	1,716	1,263	1,273	2,016
8	1,515	2,841	1,622	3,204	31	0,945	1,329	1,005	1,505
9	1,003	0,540	0,374	1,005	32	2,445	2,288	1,507	2,779
10	0,612	0,552	0,809	1,017	33	0,108	0,080	0,244	0,274
11	0,220	0,243	0,260	0,303	34	0,167	0,101	0,248	0,307
12	3,756	1,345	2,594	4,557	35	5,026	3,711	2,476	5,800
13	2,221	3,386	2,629	3,656	36	8,532	8,455	2,989	8,812
14	0,294	0,427	0,187	0,473	37	6,498	5,138	4,091	7,363
15	0,149	0,221	0,184	0,297	38	1,270	1,524	1,252	1,805
16	8,720	12,300	22,100	23,690	39	3,781	4,039	1,758	4,421
17	0,085	0,220	0,159	0,234	40	6,310	4,517	2,215	6,396
18	1,594	1,615	1,106	1,694	41	3,108	2,798	1,646	3,297
19	1,241	0,636	0,456	1,247	42	11,420	8,570	8,096	14,156
20	2,573	2,533	1,600	3,278	43	12,867	8,741	16,397	16,561
21	0,747	0,961	0,587	1,094	44	1,653	2,382	2,721	2,743
22	0,539	0,654	0,619	0,842	45	12,508	14,231	8,682	15,692
23	0,820	0,391	0,394	0,930	46	11,863	11,626	12,944	13,923

La explicación a esta situación se deduce de la Figura 5.1 en donde se puede observar un sismograma que presenta las tres componentes del registro de manera aislada, destacando que la velocidad de pico no se produce simultáneamente en las tres direcciones, de esta manera como es en éste caso, la componente vertical de velocidad puede presentar su pico algunas milésimas en inclusive segundos después del pico de velocidad longitudinal. Ocurre que lo que se desea medir, de acuerdo con las normas técnicas, es la velocidad resultante, por ende se debe calcular la velocidad resultante a cada intervalo de tiempo de modo de obtener la velocidad máxima. El sismógrafo MR2002 ya incorpora un programa de integración que permite el cálculo automático de la velocidad resultante.



**Figura 5.1 Sismograma correspondiente al punto 43 de medición marcando los valores máximos de velocidad de cada componente.**

Por otra parte, para los sismógrafos que no poseen el programa de integración para el cálculo de la velocidad resultante, se permite la suma vectorial de los máximos identificados en cada una de las componentes aunque se produzcan en tiempos diferentes. Esta aseveración es realizada por Chapot (1981), muestra que ese método para el cálculo de la velocidad pico trabaja a favor de la seguridad, ya que en

la peor de las hipótesis la velocidad resultante estimada será igual a la velocidad resultante real.

En la tabla 5.1 también se pueden distinguir el máximo y mínimo valor de velocidad pico de los registros obtenidos, el máximo de velocidad derivado es de 23,690mm/s registrado para el punto 16 y un mínimo de velocidad de 0,234mm/s para el punto 17. Tomando en cuenta que la velocidad de ondas P en las rocas metamórficas está alrededor de los 2000m/s – 6000m/s (Buitriago, 2001), dependiendo de los minerales que componga la roca, la consolidación de la roca, entre otros factores; indica que existe un efecto elevado de atenuación geométrica dependiente de la distancia a la cual se encuentra el punto de voladura con el punto de medición, éste fenómeno de amortiguamiento se vera dentro de este mismo capítulo de manera mas amplia cuando se le incorpore la variable distancia.

La tabla 5.2 muestra los valores de frecuencia de las tres componentes, derivadas de los espectros de frecuencia obtenidos a partir de la transformada rápida de Fourier (FFT) de los valores de amplitud provenientes de la velocidad registrada de la voladura en el punto de medición. La figura 5.2 ejemplifica los valores de frecuencia obtenidos para cada componente, ubicando el valor de frecuencia correspondiente dentro del espectro.

Tabla 5.2 Frecuencia asociada a cada componente y frecuencia dominante

Punto	Frecuencia X (Hz)	Frecuencia Y (Hz)	Frecuencia Z (Hz)	Eje X,Y,Z	Frecuencia dominante (Hz)	Punto	Frecuencia X (Hz)	Frecuencia Y (Hz)	Frecuencia Z (Hz)	Eje X,Y,Z	Frecuencia dominante (Hz)
1	51,56	53,13	57,03	Y	53,13	24	71,95	151,95	65,14	X	71,95
2	30,08	59,96	38,87	X	30,08	25	126,30	52,44	59,77	X	126,30
3	52,45	14,26	96,09	X	52,45	26	52,10	40,60	40,60	X	52,10
4	49,41	57,81	78,52	Y	57,81	27	23,40	14,70	9,60	Z	9,60
5	56,45	80,47	9,38	X	56,45	28	52,10	95,80	79,90	X	52,10
6	88,87	102,54	154,00	Z	154,00	29	76,80	77,80	101,80	Z	101,80
7	59,86	83,98	145,80	X	59,86	30	79,70	78,70	96,53	X	79,70
8	46,09	62,89	103,22	Y	62,89	31	25,80	20,70	25,80	Y	20,70
9	108,40	9,18	10,55	X	108,40	32	105,00	29,00	31,50	X	105,00
10	-	-	15,00	Z	15,00	33	11,33	154,69	39,80	Z	39,80
11	-	-	10,00	Z	10,00	34	150,39	155,47	41,40	Z	41,40
12	37,11	20,02	9,77	X	37,11	35	82,90	61,20	75,00	X	82,90
13	54,88	65,04	94,63	Y	65,04	36	34,80	39,70	63,70	X	34,80
14	0,10	75,20	88,70	Y	75,20	37	41,70	84,70	53,40	X	41,70
15	0,20	84,00	114,50	Y	84,00	38	45,10	56,90	35,11	Y	56,90
16	40,90	40,90	50,00	Z	50,00	39	35,70	71,30	58,00	Y	71,30
17	37,50	112,50	106,20	Y	112,50	40	42,60	38,10	57,80	X	42,60
18	64,80	86,70	82,00	Y	86,70	41	39,10	40,60	55,30	X	39,10
19	57,40	58,80	35,40	X	57,40	42	35,60	32,40	76,10	X	35,60
20	59,00	91,40	65,60	X	59,00	43	76,70	63,10	66,00	Z	66,00
21	148,00	93,17	72,70	Y	93,17	44	70,14	65,24	110,70	Z	110,70
22	96,80	111,20	96,80	Y	111,20	45	49,40	32,30	80,70	Y	32,30
23	83,00	107,40	81,60	X	83,00	46	27,00	41,20	53,40	Z	53,40

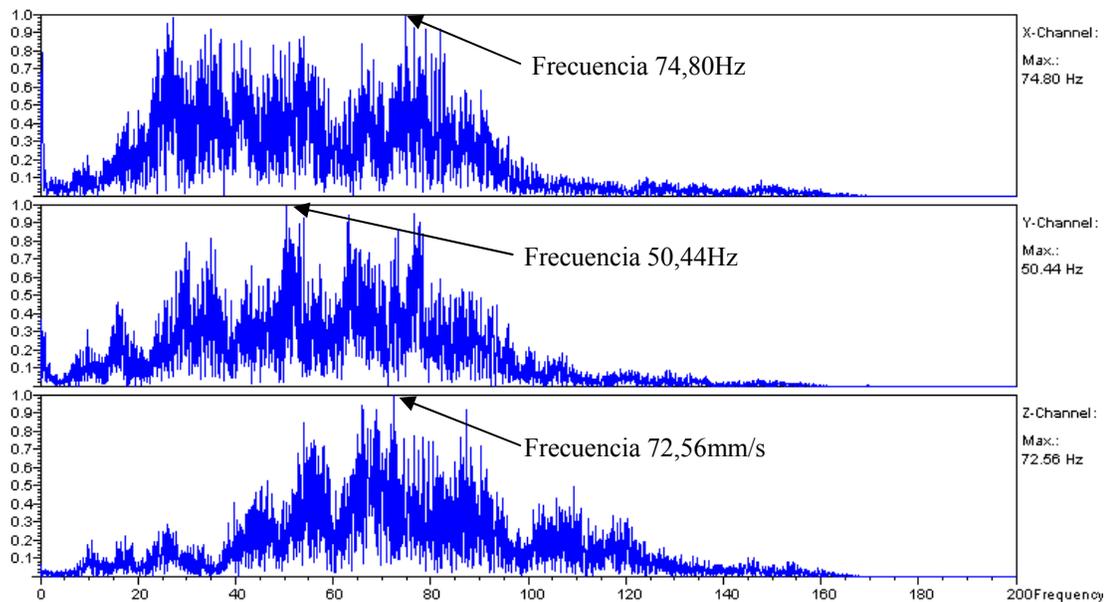


Figura 5.2 Espectro de frecuencia obtenido del punto 43.

Para cada vector velocidad conformado por las componentes x,y,z pertenece de igual manera una frecuencia en cada uno de los ejes, para el análisis corresponde determinar cual de esas tres frecuencias recae la frecuencia dominante. La tabla 5.2 muestra en una de sus columnas el eje correspondiente a la frecuencia dominante y seguidamente el valor, dicha frecuencia esta asociada al valor máximo de velocidad de componente registrado en cada punto.

Se observa que los valores de frecuencia dominante varían en un rango bastante amplio con un valor mínimo de 9,60Hz en el punto 27 hasta un valor de frecuencia que alcanzan 154Hz en el punto 6. Todos los valores de frecuencia entran en el rango de frecuencia del equipo de medición.

Los puntos 10, 11 y 27 poseen frecuencias de 10, 15 y 9,60 Hertz respectivamente, estos valores de frecuencia al ser bajos adquieren un gran interés sobre este tipo de estudios de control de vibraciones, debido a que el movimiento vibratorio de la frecuencia principal puede ser de igual orden que la frecuencia natural de la estructura, caso en el que el movimiento se amplificara y las deformaciones serán más importantes en la edificación, según Sánchez (1995).

La tabla 5.3 muestra simplemente los valores de las variables de velocidad pico, frecuencia dominante, distancia del punto de medición a la voladura y la carga que se utilizo en la detonación, en las 46 mediciones.

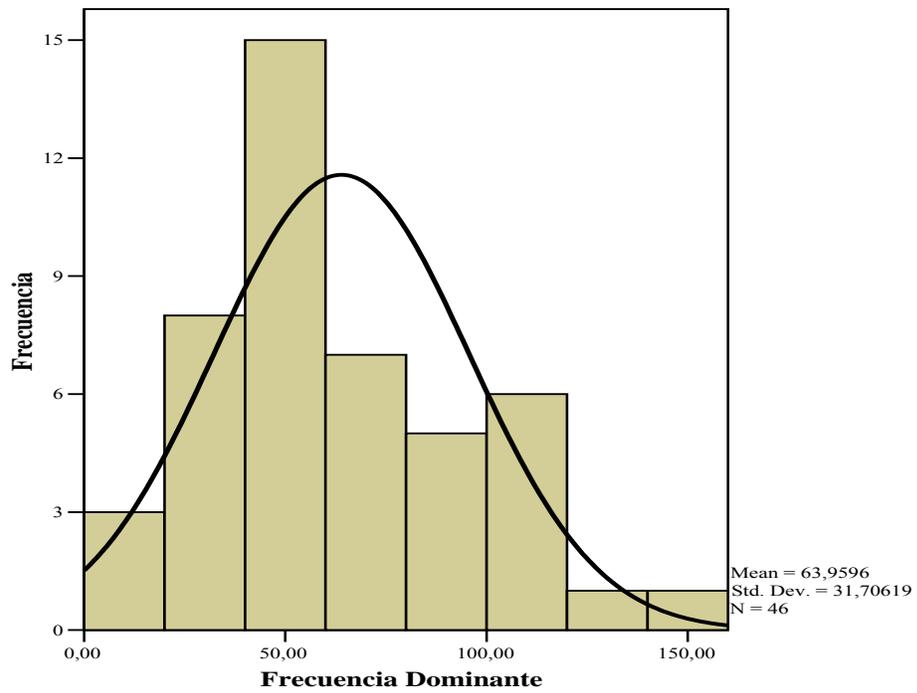
Las variables de velocidad y frecuencia medidas en los diferentes puntos son dependientes de los parámetros de carga y distancia a parte de las condiciones del sitio, como son las referentes a la geología.

Tabla 5.3 Valores de velocidad pico, frecuencia dominante, distancia y carga correspondiente a cada punto de medición.

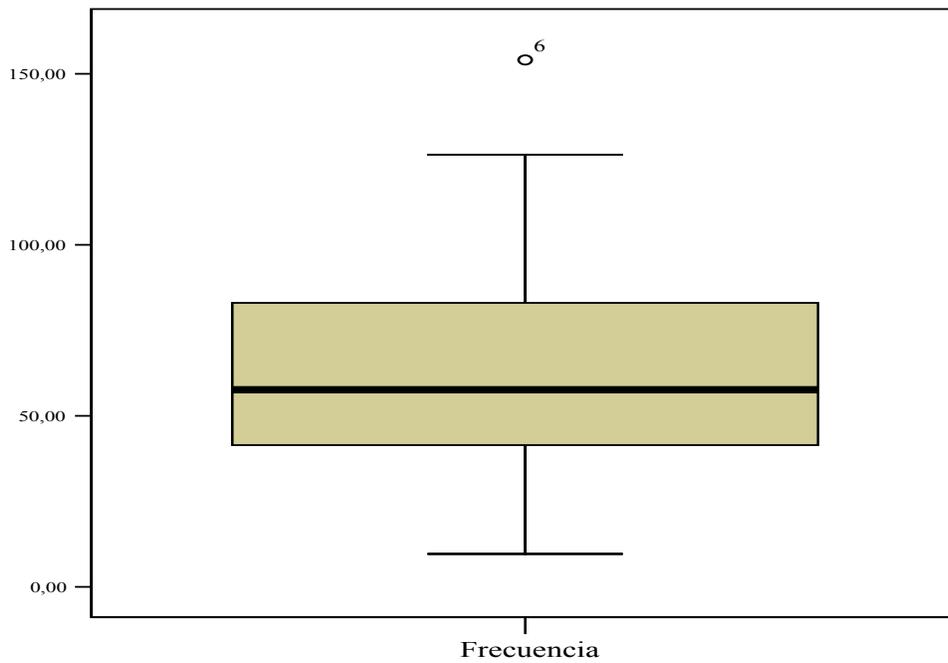
Punto	Frecuencia dominante (Hz)	Velocidad pico (mm/s)	Carga de la Voladura (Kg)	Distancia Punto-Voladura (m)	Punto	Frecuencia dominante (Hz)	Velocidad pico (mm/s)	Carga de la Voladura (Kg)	Distancia Punto-Voladura (m)
1	53,13	0,722	285,80	986,2	24	71,95	0,609	273,22	312,2
2	30,08	3,467	203,00	96,1	25	126,30	0,678	137,65	316,2
3	52,45	2,511	250,00	129,2	26	52,10	0,847	425,00	301,5
4	57,81	4,010	274,00	104,3	27	9,60	2,822	237,00	170,7
5	56,45	0,680	216,60	210,5	28	52,10	2,904	217,30	149,6
6	154,00	0,852	195,10	259,6	29	101,80	5,621	200,00	160,4
7	59,86	0,949	315,60	258,4	30	79,70	2,016	212,80	172,3
8	62,89	3,204	320,00	104,5	31	20,70	1,505	215,90	179,1
9	108,40	1,005	296,30	105,2	32	105,00	2,779	225,00	102,7
10	15,00	1,017	269,60	428,1	33	39,80	0,274	133,00	960,3
11	10,00	0,303	315,10	432,1	34	41,40	0,307	133,00	960,3
12	37,11	4,557	296,40	96,1	35	82,90	5,800	187,20	132,2
13	65,04	3,656	297,80	97,3	36	34,80	8,812	201,62	70,9
14	75,20	0,473	151,33	1254,4	37	41,70	7,363	217,21	130,5
15	84,00	0,297	297,00	2006,9	38	56,90	1,805	206,25	155,9
16	50,00	23,690	157,79	36,9	39	71,30	4,421	195,00	83,4
17	112,50	0,234	338,59	2516,8	40	42,60	6,396	149,00	67,2
18	86,70	1,694	159,90	330,0	41	39,10	3,297	149,00	67,2
19	57,40	1,247	330,00	136,6	42	35,60	14,156	225,00	35,1
20	59,00	3,278	344,77	234,4	43	66,00	16,561	212,00	35,0
21	93,17	1,094	206,00	208,1	44	110,70	2,743	150,00	54,8
22	111,20	0,842	214,00	200,4	45	32,30	15,692	142,00	23,5
23	83,00	0,930	273,22	290,2	46	53,40	13,923	250,00	36,9

Las distancias entre la voladura y el punto de medición varían desde los pocos metros (23.5 metros en la posición 45) hasta los poco mas de 2kilometros en el punto 15. La cantidad de carga utilizada por la compañía ASTALDI S.P.A. para los trabajos de voladura dentro del túnel Carrizalito varió entre 140 y 425 kilogramos de explosivos, teniendo una media en esta actividad de 230 Kilogramos aproximadamente.

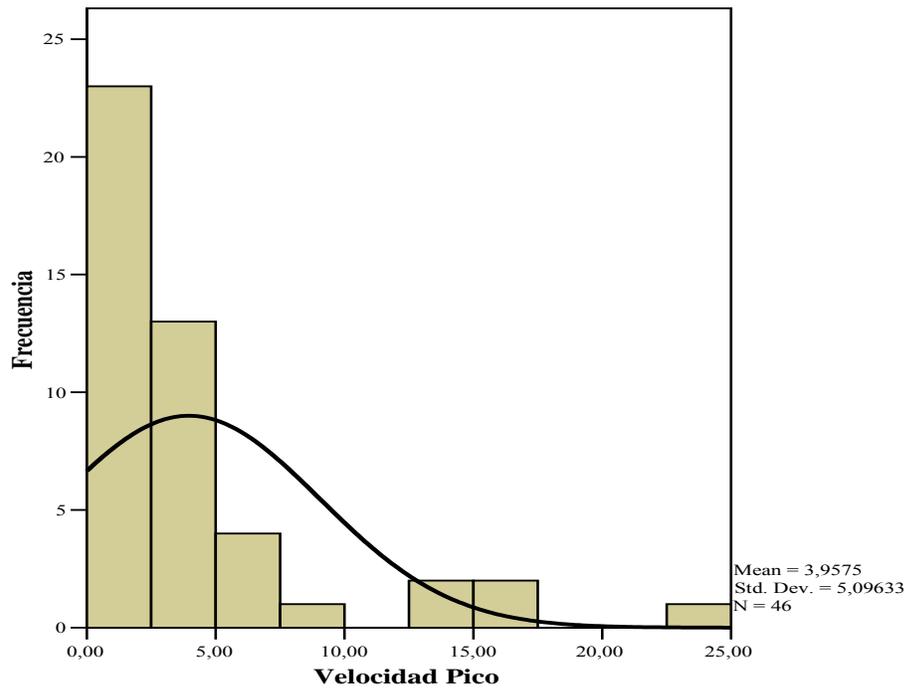
## 5.1 ANALISIS ESTADISTICO



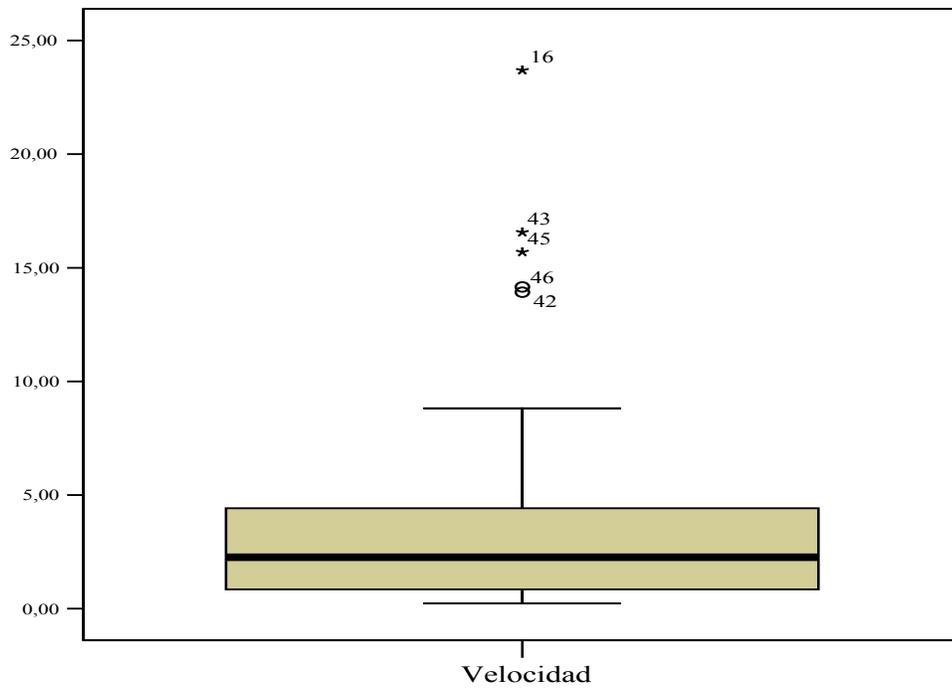
**Figura 5.1.1** Histograma de frecuencia para la frecuencia dominante



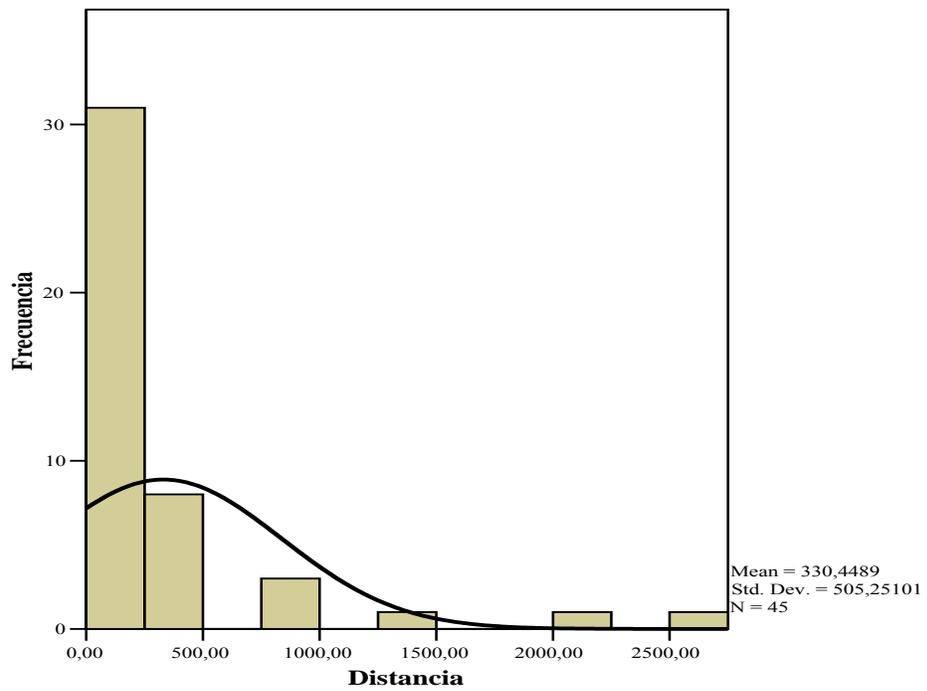
**Figura 5.1.2** Diagrama de caja para la frecuencia dominante



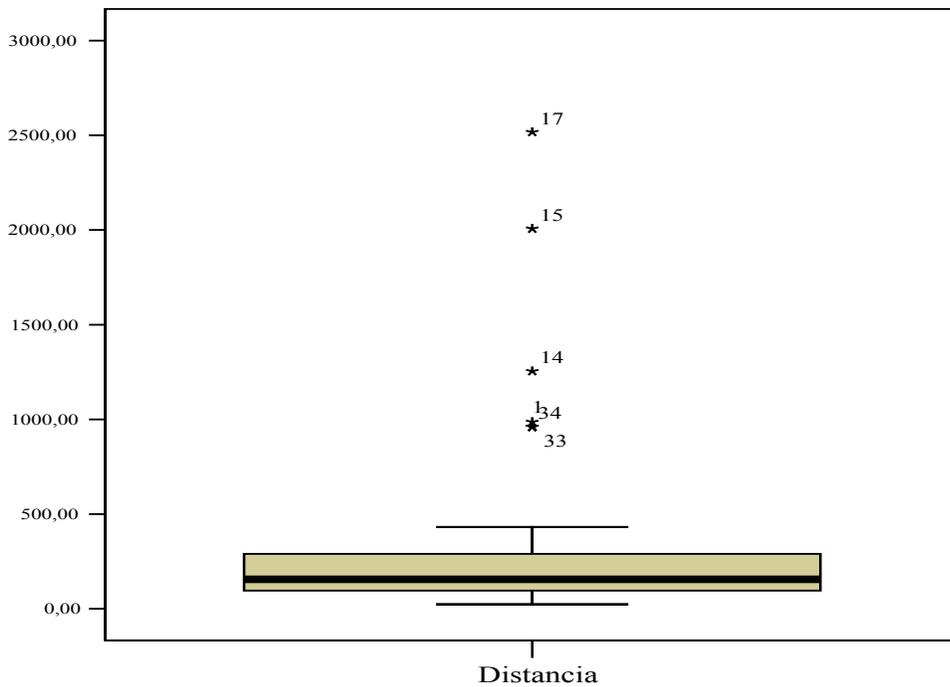
**Figura 5.1.3 Histograma de frecuencia para la velocidad pico**



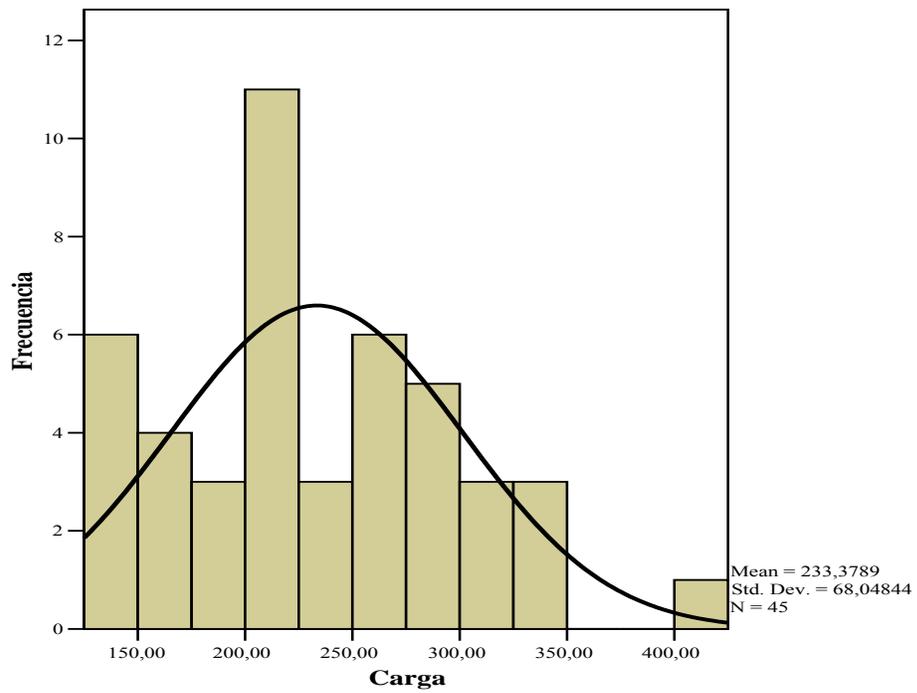
**Figura 5.1.4 Diagrama de caja para la velocidad pico**



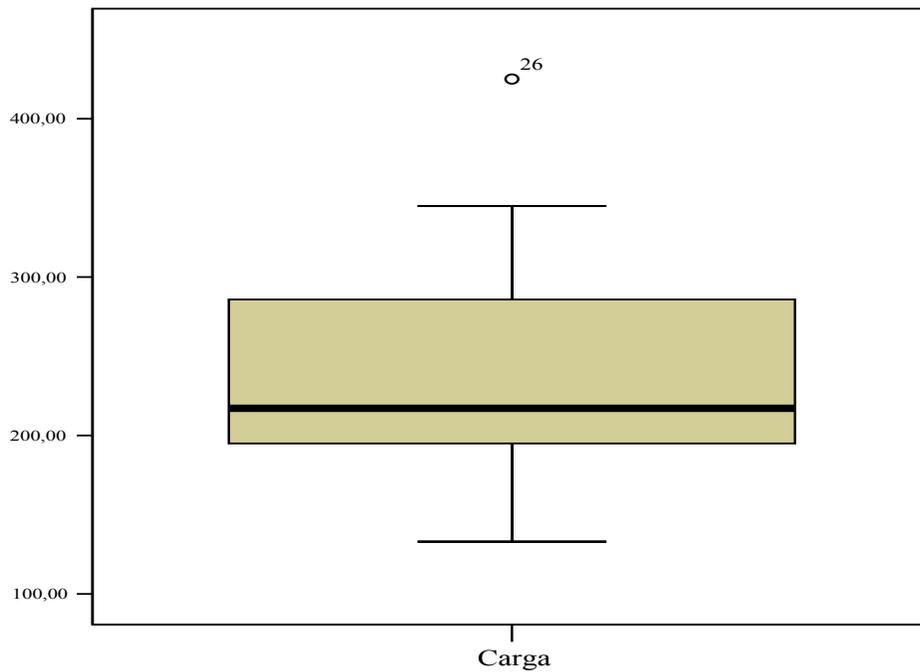
**Figura 5.1.5 Histograma de frecuencia para la distancia**



**Figura 5.1.6 Diagrama de caja para la distancia**



**Figura 5.1.7 Histograma de frecuencia para la carga**



**Figura 5.1.8 Diagrama de caja para la carga**

La herramienta estadística nos permite determinar la confiabilidad de las variables y parámetros obtenidos durante el estudio mediante los histogramas y los diagramas de caja, determinando cuales son los datos anómalos, no correspondientes o que se encuentren fuera del rango que podrían afectar considerablemente el resultado final y los análisis.

El histograma agrupa en intervalos las muestras o datos según su magnitud representando su frecuencia de aparición; bajo esta premisa el primer histograma (Figura 5.5.1) representa la frecuencia dominante muestra ocho intervalos, destacando el correspondiente a las frecuencias ubicadas entre los 40Hz y 60Hz sugiriendo que la mayor población de datos corresponde a esa extensión con 15 muestras sobre una población total de 46. La media obtenida para la distribución de la frecuencia es de 63,95Hz y una desviación estándar de 31,7; teniendo en cuenta que la curva de desviación estándar se aproxima a cero para el ultimo valor de frecuencia, se presenta factible la eliminación del dato si fuese necesario. La distribución de la frecuencia no se ajusta a la desviación estándar por que no existe una frecuencia claramente definida, si no por el contrario una gran espectro de frecuencias agrupadas en varias poblaciones, una distribución que se encuentra alrededor de los 50Hz y otra distribución alrededor de los 110Hz.

El diagrama de caja correspondiente a la figura 5.1.2 muestra los intervalos de confianza para la frecuencia dominante, excluyendo el punto número 6 que representa un valor de frecuencia de 154Hz, de tal manera dentro de estudio dicho valor puede ser descartado de acuerdo a los fundamentos estadísticos, además de representar un valor de frecuencia muy elevado fuera de consonancia con los objetivos que se quiere alcanzar. Descartando el punto 6, se obtiene en consecuencia una media para la frecuencia dominante de 61,95Hz.

La figura 5.1.3 y 5.1.4 presentan el histograma y el diagrama de caja para la velocidad pico respectivamente, de esos dos gráficos se puede destacar que la mayor población de datos se encuentra por debajo de los 5mm/s resaltando una media de 3,95mm/s. Según el diagrama de caja y el histograma de frecuencias los puntos: 16, 42, 43, 45 y 46 pueden ser descartados, pero por la importancia que la velocidad

representa en estos tipos de estudio es inviable eliminar dicho parámetro además de que truncaría el desarrollo de los objetivos que este estudio requiere.

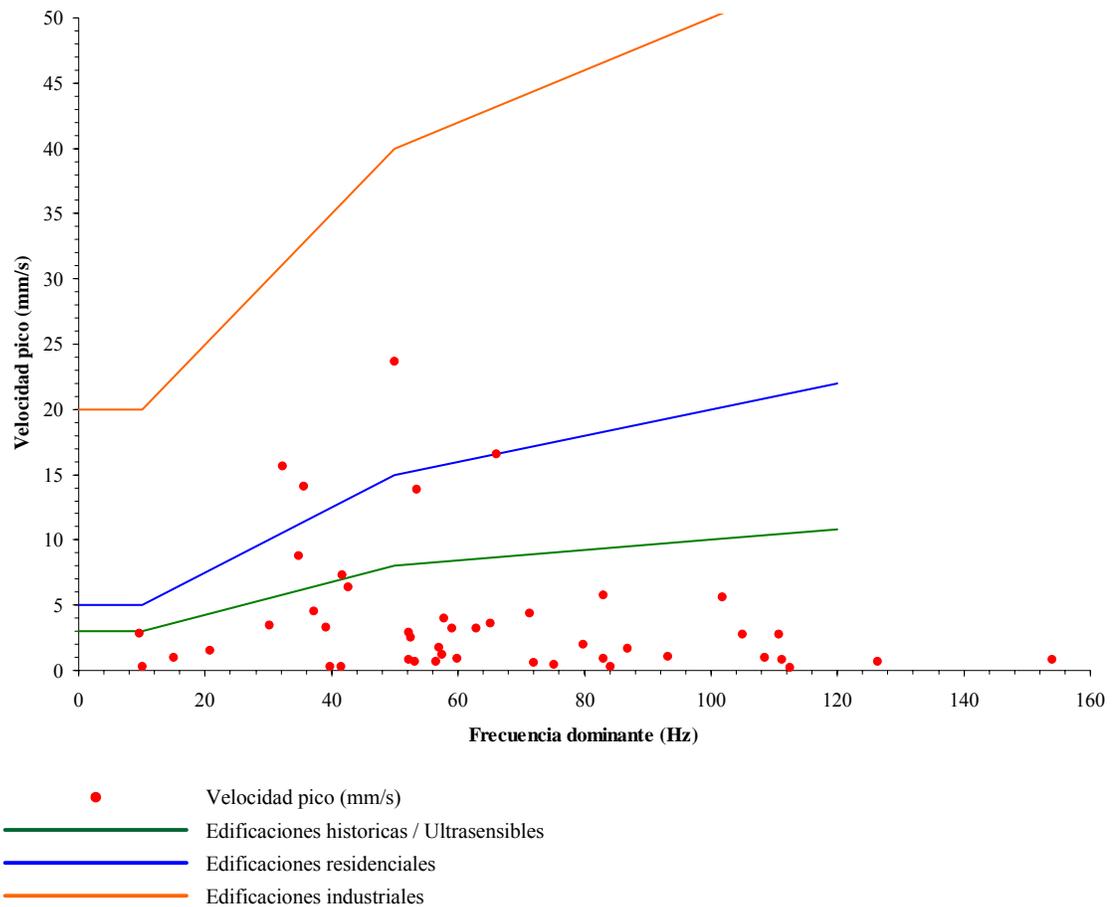
La distancia es un parámetro importante de controlar para los estudios sobre control de vibraciones, de forma tal que se requiere hacer un análisis estadístico de los valores obtenidos de distancia. La figura 5.1.5 muestra el histograma de frecuencia para la distancia en donde se puede observar que más del 50% de la población se ubica dentro de los primeros 250 metros, consecutivamente hasta los 500 metros disminuye la población en solo ocho muestras, a partir de allí los valores de distancia aumentan con poblaciones no representativas alejadas del valor de la media (330,44m), con una desviación estándar de 505. A pesar que el diagrama de caja correspondiente a la distancia en la figura 5.1.6, no tiene sentido con respecto al análisis estadístico debido a que la distancia es una variable controlada y por lo tanto no presenta un rango normal eficaz. No obstante desvela los puntos que están fuera de un hipotético rango normal y que son descartados, por la lejanía los puntos de medición con la fuente, los cuales son: 1, 14, 15, 17, 33 y 34.

Otro parámetro importante a seguir es el que identifica a la carga explosiva, el histograma de frecuencia que presenta a dicho parámetro indica una heterogeneidad entre los valores de carga utilizados para las actividades de voladura, debido a que no se advierte un intervalo definido de carga representativa, el valor de la media corresponde a 233,37 Kilogramos, la cual se ubica dentro del intervalo más frecuente. En la figura 5.1.8 que representa el diagrama de caja indicando que solo un punto (26) sobresale de los rangos normales observados dentro de las actividades.

## **5.2 ANALISIS SOBRE ALGUNAS NORMAS INTERNACIONALES SOBRE CONTROL DE VIBRACIONES**

Las normas internacionales sobre el control de vibraciones producidas por voladuras trabajan evidentemente sobre las vibraciones que se derivan de esa actividad, las cuales son oscilaciones de tipo transitorio y no periódicas que están definidas por dos parámetros característicos de mucha importancia para su observación, estos parámetros son el valor pico de velocidad de vibración y la frecuencia dominante o principal de vibración. La figura 5.2.1 muestra una gráfica de los parámetros principales (velocidad pico contra frecuencia dominante), mostrando tres límites que para la norma alemana DIN 4150/3 representa el máximo valor que puede existir entre ambos parámetros para la prevención de daños en las estructuras que dichos límites representan; un primer límite correspondiente a las edificaciones históricas / ultrasensibles, un segundo límite que representa a las edificaciones residenciales y un último límite que se relaciona con las edificaciones industriales.

Para los valores de velocidad y frecuencia obtenidos se permite descartar para el estudio de la norma, el límite sobre edificaciones industriales, ya que se puede verificar que el límite trabaja con velocidades superiores a los 20mm/s para frecuencias bajas y asciende para frecuencias mayores hasta 50mm/s. Sabiendo que de los datos obtenidos en campo solo un punto supero la barrera de los 20mm/s y que en la zona de estudio es un área popular donde solo existen vivienda y comercios, es completamente viable no hacer hincapié sobre él. Por su parte los márgenes que se ofrecen para las edificaciones históricas y residenciales son de especial importancia, en primer lugar porque el entorno en donde se realizaron las mediciones corresponde en gran medida con los tipos de estructuras colindantes a los trabajos de ejecución del túnel Carrizalito y por que los valores obtenidos se encuentran dentro de los parámetros máximos de velocidad y frecuencia donde se establecen ambos límites.



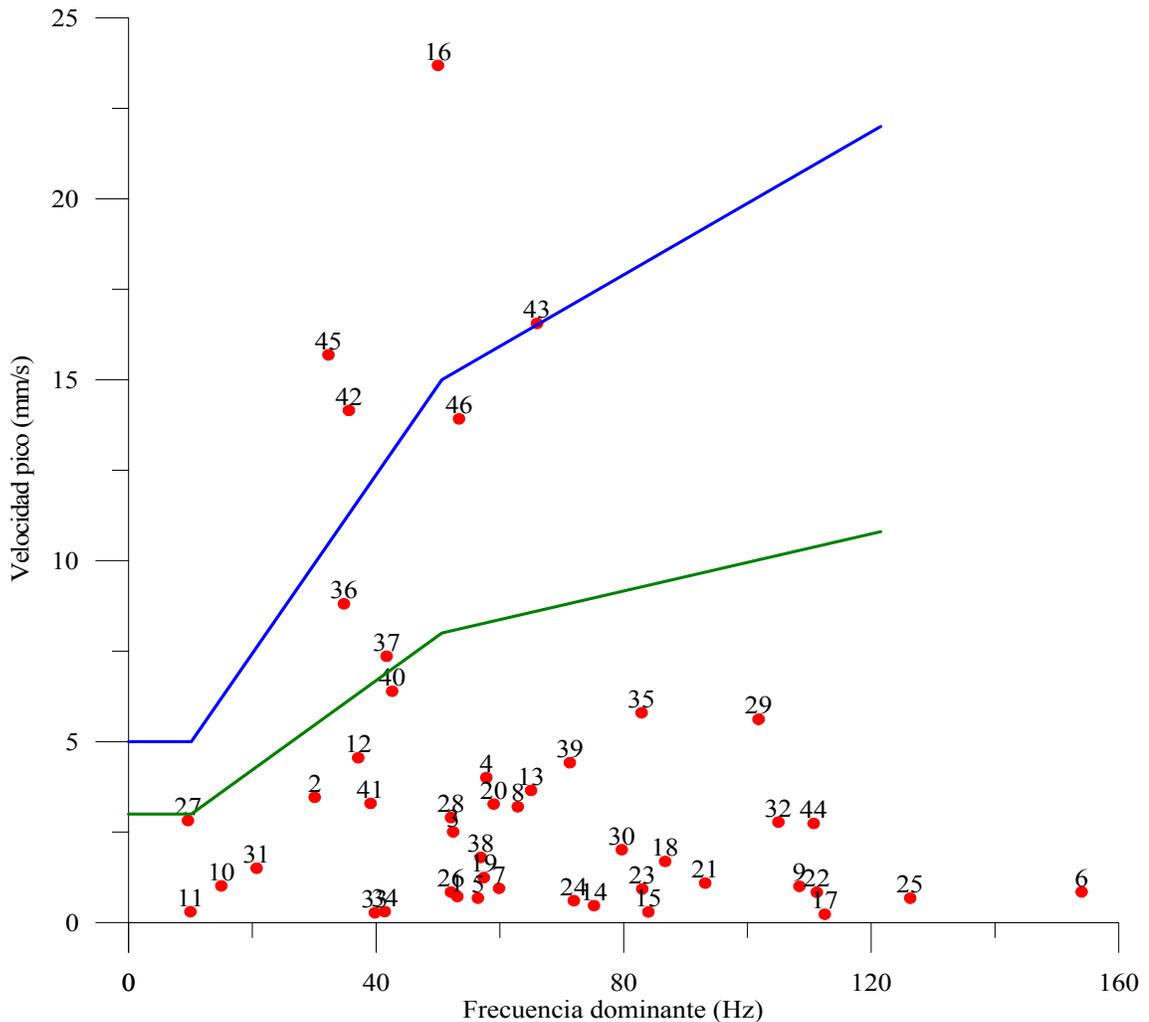
**Figura 5.2.1 Límite para valores de velocidad pico y frecuencia dominante de la norma alemana (DIN 4150/3)**

Sobre la norma se ubicaron los 46 puntos respecto a su velocidad y frecuencia, observándose que existe un gran rango de frecuencias que varían entre los 10Hz y los casi 160Hz, agrupados en su mayoría por debajo de los 3mm/s.

Para los efectos de la norma los valores obtenidos en campo sobre las actividades de voladura para la ejecución del túnel Carrizalito, se encuentran en su mayoría por debajo de los límites que dicho modelo describe, solo 7 de los 46 puntos obtenidos han sobrepasado los límites, de los cuales 4 sobrepasan el límite para las edificaciones residenciales.

La figura 5.2.2 identifica todos los puntos según su relación velocidad-frecuencia, develando cuales son las posiciones que sobrepasan los límites. Los

puntos que están por encima del límite para edificaciones residenciales son: 16, 42, 43 y 45; y sobre el límite para edificaciones históricas: 36, 37 y 46 además de los puntos nombrados anteriormente.

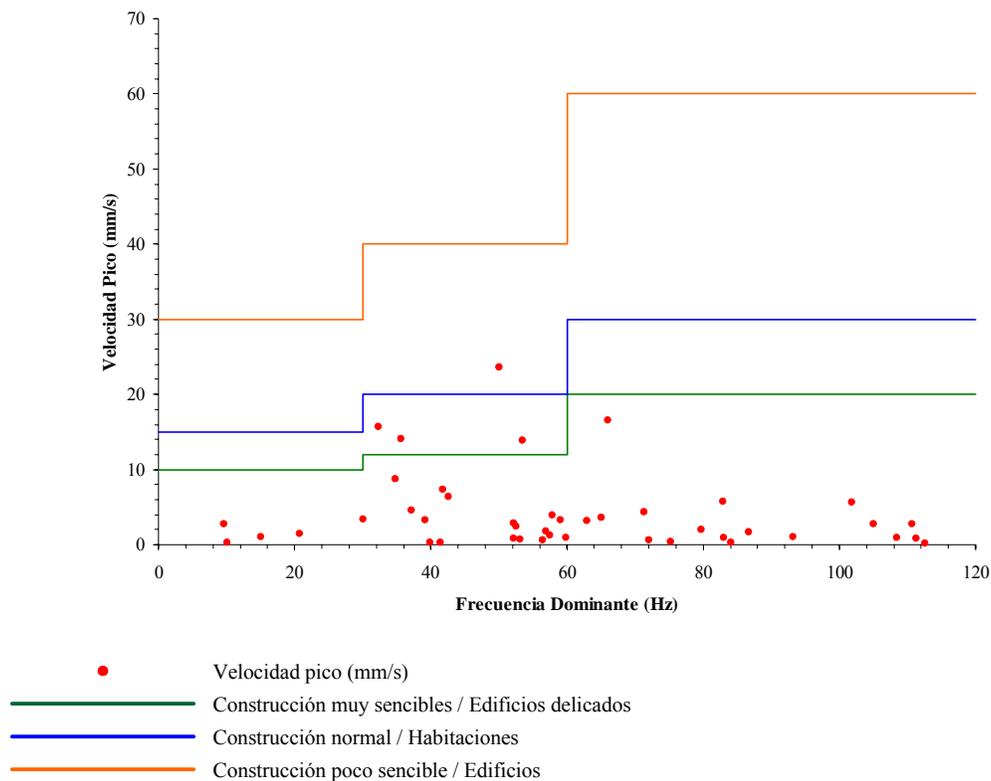


**Figura 5.2.2 Identificación de puntos respecto a la velocidad pico y frecuencia dominante con el fondo de la norma DIN 4150/3.**

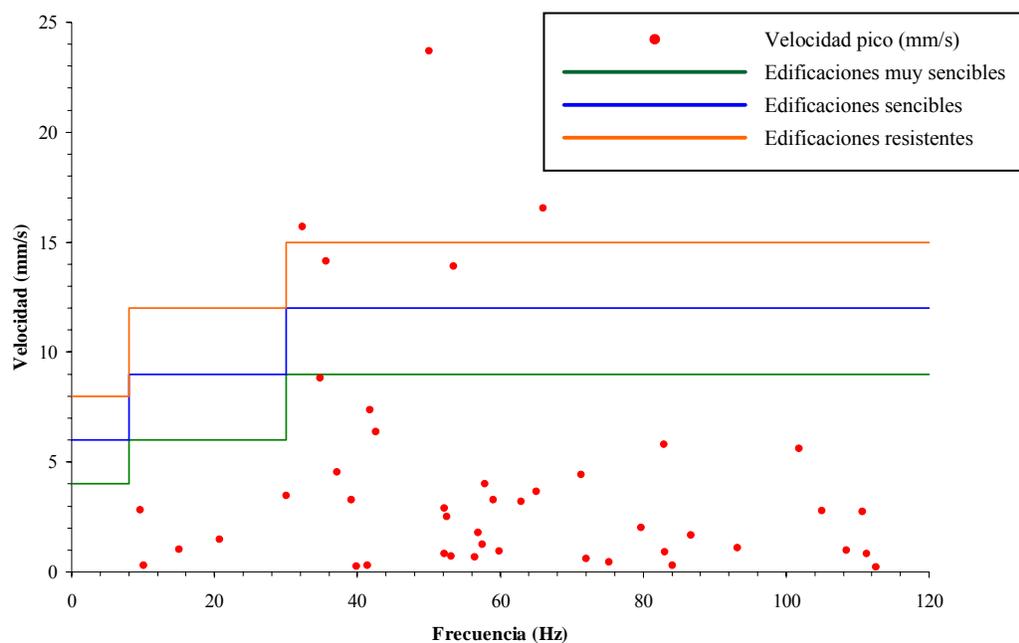
Observando la tabla 5.3 se puede deducir el motivo por el cual dichos puntos sobrepasaron los límites de las normas, en primer lugar y el más importante es la distancia que existe entre el punto de medición y la voladura, debido a que la mayoría de los puntos están a una distancia inferior a los 40 metros y en segundo lugar a la

cantidad de carga empleada para la voladura en especial para los puntos 36 y 37, los cuales están a una distancia entre 70 y 130 metros pero sus cargas son mayores a los 200 kilogramos de explosivos.

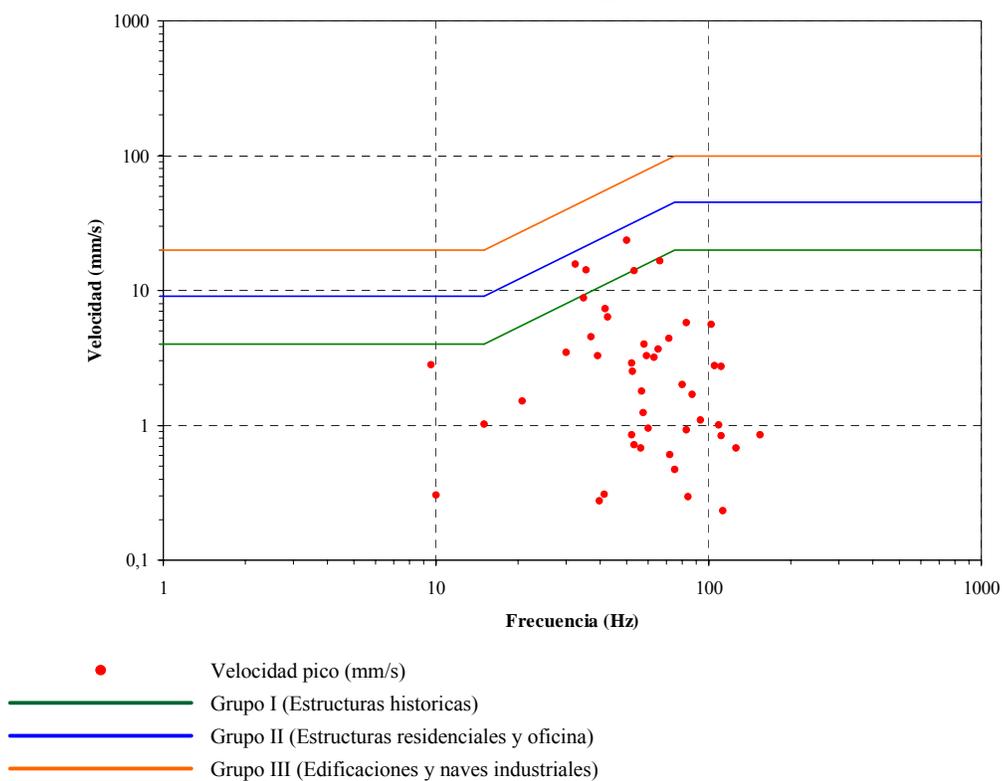
Los puntos 27 y 40 si bien es cierto que no están sobre el límite para edificaciones históricas, están bastante próximos, inclusive se podría decir que se ubican en la frontera de dicho límite. Observando los parámetros que conforman dichas mediciones se destaca que el punto 27 a pesar de tener una velocidad inferior a los 3mm/s posee una baja frecuencia (9,60Hz) colocándolo dentro de la norma muy próximo al límite, por su parte el punto 40 presenta una combinación de frecuencia, velocidad y distancia que lo ubican en esa posición dentro de la gráfica.



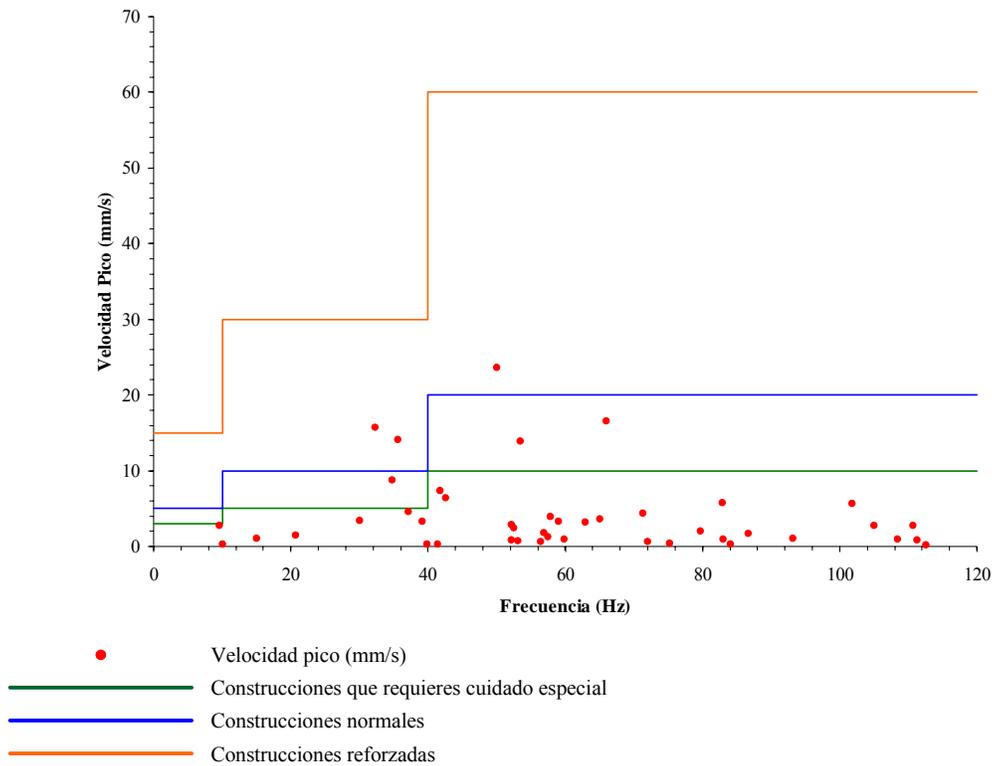
**Figura 5.2.3 Valores de velocidad y frecuencia sugeridos por la norma suiza (SN 640312)**



**Figura 5.2.4 Límites de velocidad de vibración de partícula  $V_p$  sugeridos por la circular del Ministerio de Ambiente francés para la norma francesa (23.7.1986)**



**Figura 5.2.5 Criterio de prevención de daños por el uso de voladuras con explosivos de la norma española (UNE 22-381-93)**



**Figura 5.2.6 Límites de vibración de partícula de la norma portuguesa (NP 2074)**

Observando la norma suiza, francesa, española y portuguesa, podemos advertir que al igual que la norma alemana, las 4 poseen estrictamente 3 límites para cada tipo de estructura, cada una de ellas nombrada como indica su respectiva norma, que al fin y al cabo hablan de los mismos tipos de estructuras (estructuras muy sensible, sensibles y resistentes) pero poseen según su tipo de estudio diferentes rangos de velocidad y frecuencia en cada uno de sus límites.

La norma suiza (SN 640312) posee rangos lineales para sus tres límites, el primero correspondiente a construcciones muy sensibles con velocidad de 10mm/s para frecuencias de 30Hz, 12mm/s entre 30Hz y 60Hz, y 20mm/s para frecuencias mayores a 60Hz; el segundo correspondiente a construcciones normales con velocidad de 15mm/s en 30Hz, 20mm/s entre 30Hz y 60Hz, y 30mm/s para mayores de 60Hz; por ultimo para construcciones poco sensibles bajo los mismos rangos de frecuencia, escala en velocidad en 30, 40 y 60mm/s.

Bajo las condiciones en que se presenta la norma SN 640312 los resultados obtenidos son diferentes con los de la norma DIN 4150/3, ya que en vez de estar 7 puntos sobre los límites identificados por la norma alemana, únicamente 4 son los que están por encima en la norma suiza, de los cuales uno solo sobrepasa el rango de las estructuras normales según esta norma. Como es de esperarse los 4 puntos que están fuera de los rangos de vibración aceptables dentro de la norma suiza corresponde con los puntos 16, 42, 45 y 46, por las mismas razones que sobrepasaron la norma DIN 4150/3.

La norma francesa (23.7.1986) a simple vista se presenta más rigurosa que el resto de las normas aquí estudiadas, tomando en cuenta que para lo que se ha denominado estructuras resistentes o industriales posee rangos de velocidad medios, comparables con los límites que las otras normas consideran estructuras normales o edificaciones residenciales. A pesar de ello el primer límite correspondiente a edificaciones muy sensibles se encuentra aproximadamente bajo los mismos rangos de velocidad y frecuencia que rigen las otras normas. El comportamiento de la norma 23.7.1987 es lineal en sus límites al igual que la norma suiza, pero reducen en mayor orden los rangos de frecuencia y velocidad, con escalas que van entre 4, 6, 8, 9, 12 y 15 milímetros sobre segundos para la velocidad y frecuencias entre 4 y 15 hertz. Inversamente a lo que se esperaría por tener rangos muy bajos de velocidad y frecuencia, solamente se salen de los tres límites de la norma, correspondientes a los puntos 16, 42, 43, 45 y 46, los cuales superan los dos últimos límites.

La norma portuguesa NP 2074, no presenta novedad con respecto a las normas anteriormente mencionadas, ya que también es de comportamiento lineal. Posee rangos muy bajos de velocidad para las estructuras sensibles y normales hasta los 40Hz, variando desde los 3mm/s hasta los 10mm/s. de los 46 mediciones realizadas solo seis sobrepasan los límites para construcciones que requieren de un cuidado especial de las cuales tres sobrepasan el de construcciones normales, dichos puntos nuevamente corresponden al 16, 36, 42, 43, 45 y 46 por razones ya nombradas anteriormente.

Para la norma española UNE 22-381-93 se presenta la novedad en la exposición de los resultados en una grafica logarítmica. De la misma forma que las otras normas sobre el control de vibraciones aquí expuestas, presenta límites según velocidad y frecuencia para estructuras históricas, estructuras residenciales u oficina y edificaciones industriales. El primer límite trabaja con rangos desde 1Hz hasta 15Hz para una velocidad de 4mm/s, de 15Hz a 75Hz para velocidades entre 3mm/s y 20mm/s y frecuencias superiores a 20mm/s, los límites para el grupo 2 y 3 trabajan bajo los mismos términos de frecuencia pero varían en velocidad, 9mm/s hasta 45mm/s para las estructuras residenciales y de 20mm/s hasta 100mm/s para edificaciones industriales.

Llevando las 46 mediciones obtenidas, se observa que los puntos 16, 42 y 45 sobrepasan el primer límite para estructuras históricas, mientras que los puntos 36, 43 y 46 están sobre el borde de dicho límite.

En este análisis se tomaron únicamente las cinco normas presentadas anteriormente debido a que están referidas al control de vibraciones por el uso de explosivos en áreas urbanas y no se incorporaran el resto de normas expuesta en el marco referencial ya que plantean los mismos controles pero para actividades de minería como lo es la U.S. Bureau of Mines.

Es importante destacar que en Venezuela no existen normas especializadas para estas aplicaciones sobre el control de vibraciones en zonas urbanas, por ello es importante hacer una correlación de dichas normas para el estudio particular de los trabajos de ejecución del túnel Carrizalito del metro Los Teques. La norma seleccionada para realizar dicha correlación es la norma alemana DIN 4150/3, la cual se destaca sobre las otras cuatro porque no presenta intervalos estrictamente lineales de velocidad para los diferentes rangos de frecuencia y el equipo utilizado para la medición (sismógrafo MR2002) aplica directamente sobre la señal registrada los filtros requeridos para dicha norma, además de poseer programas incorporados para la obtención de resultados bajo los conceptos de las normas DIM4150/3, SN 640312 y 23.7.1986. Por último y lo mas importante es que la norma alemana resulta ser más estricta que las anteriormente nombradas porque como se puede observar, 7 de los 46

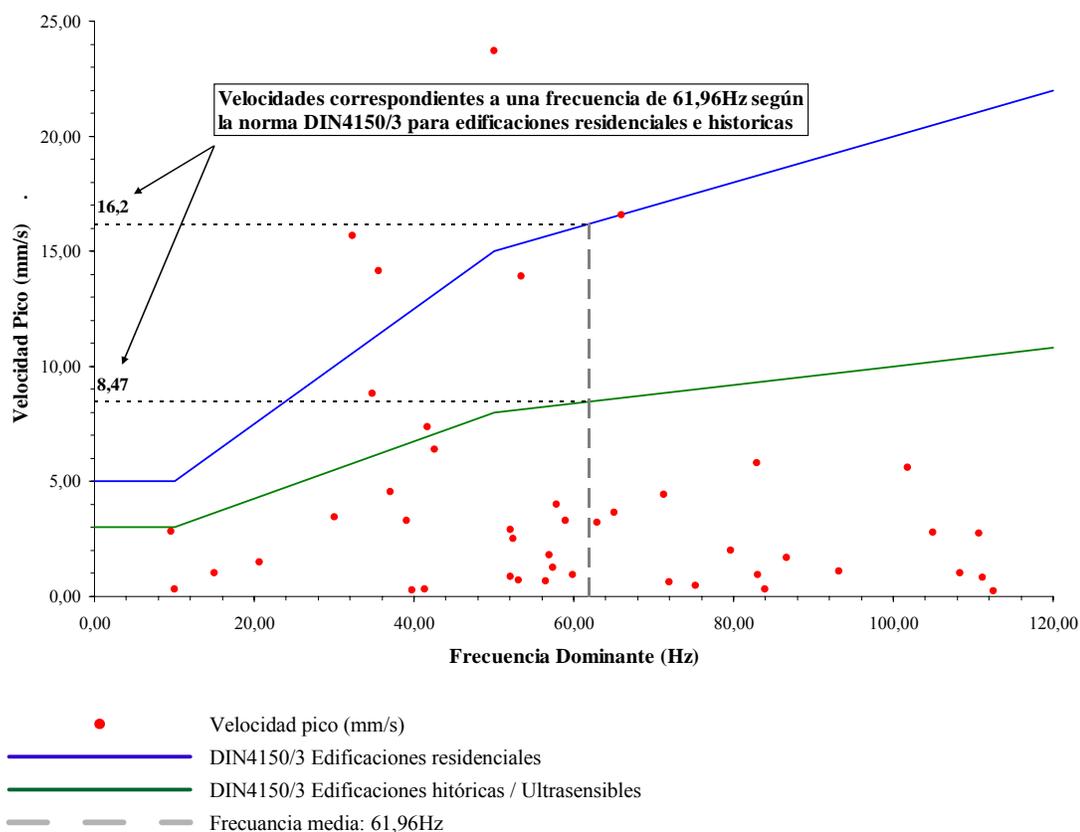
puntos medidos sobrepasaron el límite mas sensible de la norma correspondiente a estructuras históricas, mientras que en la norma francesa sobrepasaron solo cinco el límite mas bajo, en la norma española tres, en la norma suiza cuatro y en la portuguesa seis, de esta manera en función de la seguridad la norma mas aconsejable a ser utilizada es la DIN 4150/3.

La norma alemana define a las edificaciones históricas como estructuras sin fundaciones de características muy sensibles por los materiales utilizados para su construcción que pueden presentar problemas estructurales a vibraciones muy fuertes, y a las edificaciones residenciales como estructuras construidas con materiales más resistentes sobre fundaciones. En las zonas populares adyacentes a los trabajos de ejecución de los túneles del metro Los Teques, las edificaciones que allí se observan podrían considerarse una mezcla de ambas construcciones contempladas en la norma alemana, existiendo una gran variedad y tipos estructuras, fabricadas con diversos materiales y algunas con fundaciones. Considerando que la tipología de las estructuras estimadas en la DIN 4150/3 no es análoga a las edificaciones de la zona investigada colindante a los trabajos del túnel Carrizalito del metro Los Teques se toma como límite base para el estudio las estructuras históricas, trabajando en esa forma a favor de la máxima seguridad de cualquier tipo de estructura que allí se encuentre.

### **5.3 ANALISIS DE DISTANCIAS DE SEGURIDAD**

En el periodo de monitoreo sobre las vibraciones producidas por las voladuras en los trabajos del túnel Carrizalito del metro Los Teques, se obtuvieron 46 mediciones ubicadas en diferentes puntos de las áreas colindantes a mencionada obra. De los 46 registros, siete sobrepasaron los límites expuestos por la norma DIN 4150/3 para la prevención de daños por vibraciones en edificaciones históricas y ultrasensibles. Una de las principales razones por la cual el monitoreo en esos puntos supero el límite, es por la poca distancia que existía entre la progresiva donde se realizaba la voladura al punto de medición, por tal razón es adecuado determinar una distancia mínima de seguridad aproximada bajo las condiciones geológicas en las cuales están ubicadas las zonas populares adyacentes a las operaciones del construcción del túnel Carrizalito del metro Los Teques.

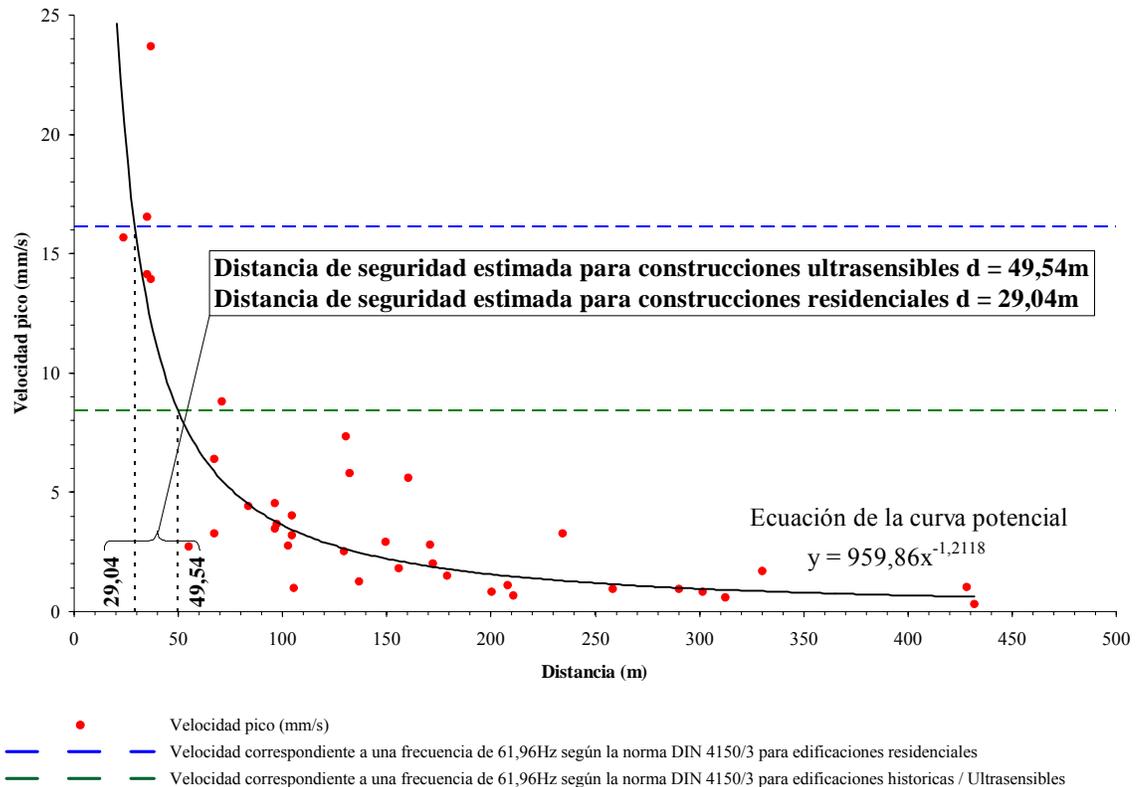
La figura 5.3.1 presenta los puntos monitoreados según su relación velocidad pico y frecuencia, y los dos primeros límites que contempla la norma DIN 4159/3. Se advierten los siete puntos que sobrepasan ambas normas, notándose que los valores de velocidad que estos puntos representan están por encima de la media de velocidad calculada de 3,95mm/s.



**Figura 5.3.1 Intersección de frecuencia media con los límites de la norma DIN 4150/3**

La media para la frecuencia dominante es de 61,96Hz, interceptando ese valor de frecuencia con los límites para edificaciones históricas y residenciales de la norma DIN 4150/3, se obtiene como correspondencia una velocidad 8,47mm/s para el primer límite y 16,2mm/s para el segundo.

En la figura 5.3.2 se observa la relación entre la velocidad obtenida y la distancia de la voladura con respecto a los puntos de medición, es evidente que a distancias mayores la velocidad disminuye, este fenómeno es debido a tres razones principalmente: la primero se refiere a que la onda de choque es amortiguada a medida que su frente se aleja del origen denominándose atenuación geométrica por dispersión de la energía, la segunda razón por el carácter inelástico de las rocas y por ultimo la presencia de agua en espacios vacíos como son las fallas.

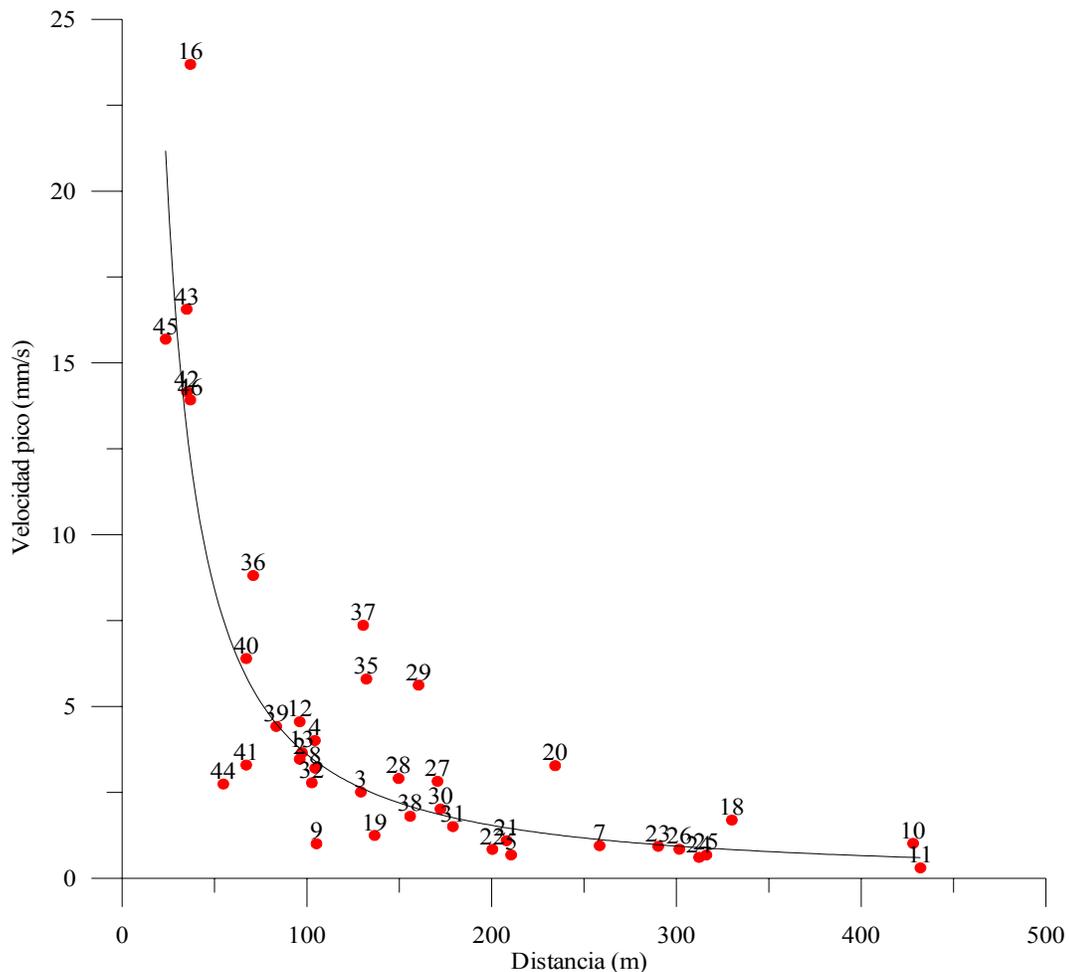


**Figura 5.3.2 Relación velocidad pico – distancia ajustada a una curva potencial**

La tendencia de los puntos puede ser ajustados con una curva potencial, en la cual se puede observar el decaimiento de la velocidad con la distancia, dicha curva esta representada por la ecuación:  $y = 959,86x^{-1,2118}$ . Al interceptar las velocidades correspondientes a la frecuencia media de 61,96Hz obtenida de los límites de la norma DIN 4150/3 (8,47mm/s y 16,2mm/s) con la curva potencial representativa al decaimiento de la velocidad de los puntos por la distancia, se obtiene dos valores de distancia.

Los valores de distancia calculados son: 26,04 metros para las estructuras históricas o ultrasensibles y 49,54 metros para edificaciones residenciales. Ambos valores de distancia pueden ser considerados como la distancia mínima de seguridad que debe existir entre la voladura y las estructuras o viviendas colindantes a los trabajos de ejecución del túnel Carrizalito del metro Los Teques.

Según los datos de longitud para cada medición, se destaca que los valores de distancia para los puntos que sobrepasaron los límites de la norma para el control de vibraciones DIN 4150/3 superan los valores de distancia de seguridad mínima calculados. Específicamente los puntos: 16, 42, 43, 45 y 46 tienen distancias inferiores a los 49,54 metros, por lo tanto según el límite de la norma y la distancia de seguridad, esos puntos se ubican dentro de un perímetro de riesgo estructural por las actividades de voladura en el túnel Carrizalito. Si bien los puntos 37 y 38, tienen distancias superiores a la distancia de seguridad calculada y sobrepasan el límite que da la norma para edificaciones ultrasensibles, esto podría estar asociado a que la medición fue realizada sobre un terreno poco consolidado causando mayor amplitud de movimiento en bajas frecuencias.



**Figura 5.3.3 Identificación de puntos respecto a la velocidad pico y distancia.**

En la gráfica anterior se puede vislumbrar que los puntos que superaron la distancia de seguridad se encuentran ubicados a la derecha de la curva potencial, pudiendo considerar de esta forma que en una grafica velocidad pico – distancia de la voladura bajo las condiciones geológicas en donde se realizo el estudio puede determinar que puntos se encuentran en la zonas de riesgo. Observando la figura 5.4.3 y analizado lo anteriormente expuesto se puede decir que la curva potencial puede ser una relación empírica entre la velocidad pico y la distancia hasta los primeros 100 metros ya que a partir de allí, los valores ubicados sobre la curva están por encima de las distancias de seguridad calculada para el estudio realizado sobre las actividades de voladura en el túnel Carrizalito del metro Los Teques.

Tomando en cuenta que se posee una distancia de seguridad estimada para estructuras ultrasensibles y residenciales, se puede determinar si durante las actividades monitoreadas de voladura dentro del túnel Carrizalito, existió algún riesgo en las casas colindantes a la actividad, específicamente con la estructura más cercana al punto de detonación. La tabla 5.3.1 muestra las distancias de las viviendas más cercanas a la voladura, en donde se puede destacar que la mayoría de ellas se encontraban fuera del rango de distancia mínima de seguridad, únicamente las viviendas que se encontraron cercanas a las voladura durante los monitoreos 40, 41, 42, 43, 44, 45 y 46, estando por fuera del perímetro de seguridad.

Las viviendas mas próximas a las actividades de voladura durante ese periodo de monitoreo corresponde a las casas que conforman el barrio popular Bertorelli Cisneros paralelo a la carretera Las Adjuntas – Los Teques, en donde pudieron existir pequeñas fallas estructurales en las viviendas por la cercanía de las detonaciones. La proximidad de esta actividad por parte del metro Los Teques se debe a que en ese sector esta proyectada la salida de un túnel peatonal, denominado ventana peatonal número dos.

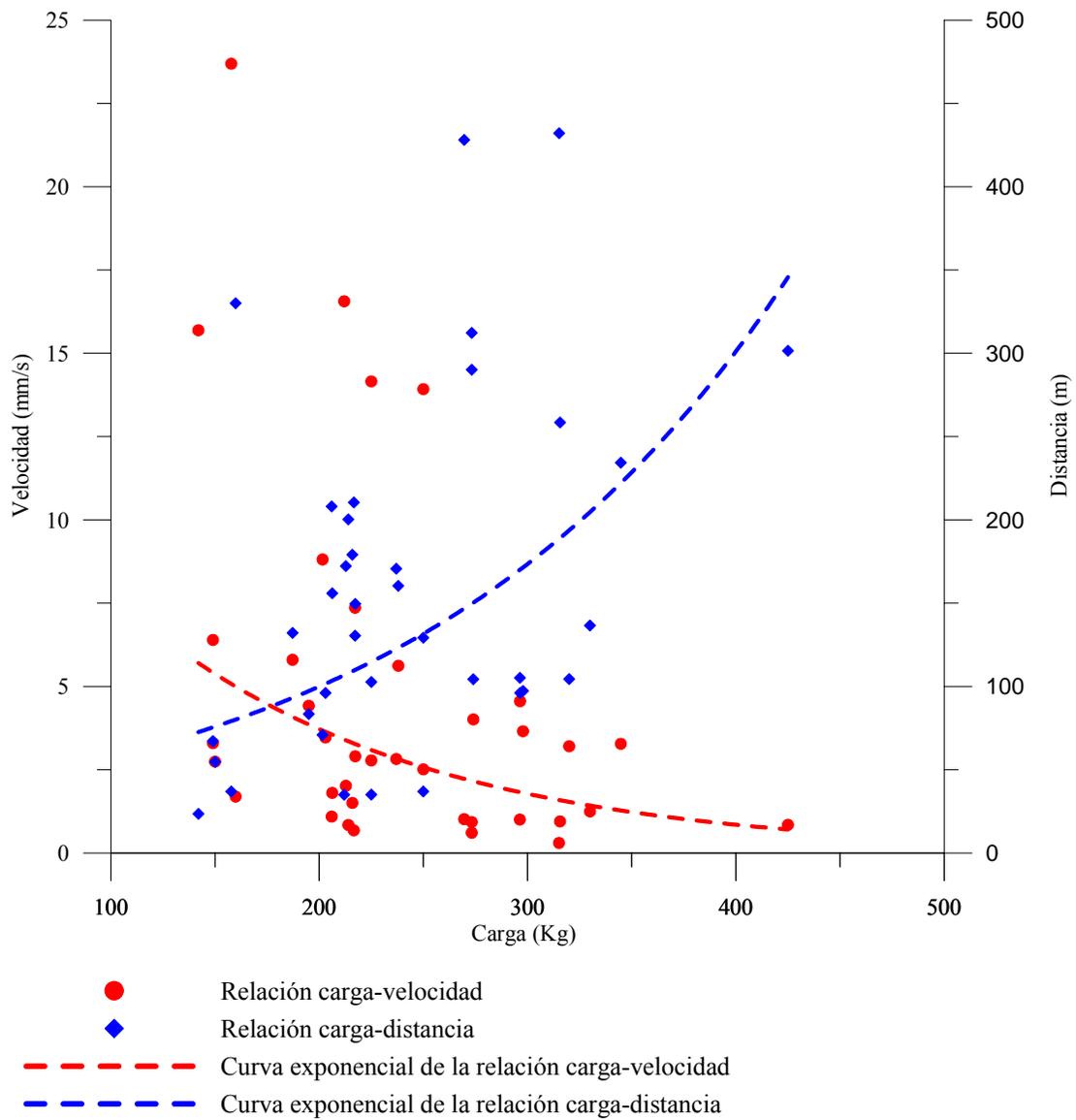
Tabla 5.3.1 Distancia entre voladura y viviendas

Punto	Distancia Casa-Voladura (m)	Punto	Distancia Casa-Voladura (m)	Punto	Distancia Casa-Voladura (m)
1	152,83	16	142,15	32	68,65
2	70,94	17	90,11	33	258,30
3	70,75	18	100,11	34	258,30
4	69,95	19	89,55	35	63,80
5	70,02	20	87,51	36	60,00
6	70,29	21	82,00	37	54,12
7	69,54	22	80,71	38	50,20
8	69,79	23	86,82	39	64,81
9	70,27	24	273,22	40	40,00
10	71,60	25	137,65	41	40,00
11	73,09	26	138,30	42	18,86
12	75,39	27	103,00	43	26,50
13	76,97	28	100,00	44	17,00
14	259,35	29	94,82	45	26,10
15	87,30	30	74,66	46	25,10
		31	73,32		

La figura 5.3.4 anterior expone la relación que tiene la carga con la velocidad y la distancia según los registros obtenidos para este estudio, se presenta un dispersión bastante amplia para ambos parámetros con respecto a la carga, por lo tanto es conveniente examinar la curva de tendencia exponencial que se ajusta al comportamiento de ambas variables en relación a la carga.

Se esperaría que a mayor carga mayor velocidad de la partícula en el registro si no se tomara un medio homogéneo, pero según se puede observar en la figura 5.3.4 ocurre el caso contrario, evidenciado por la curva exponencial que se ajusta a esa tendencia donde las mayores velocidades picos se obtuvieron con las menores cantidades de carga. Una de las posibles explicaciones al fenómeno podría estar referido a la distancia entre el punto de monitoreo y la voladura también presentados en la figura, donde existe un aumento de la carga a mayores distancias.

Sánchez (1995), expone algunas recomendaciones para la minimización de los efectos de las vibraciones que entre las cuales destaca la importancia de la carga, aconsejando detonar las cargas explosivas en diferentes momentos con retardadores, con el fin de no sumar los trenes de ondas entre las detonaciones. Esta es otra razón por la cual registros de velocidad son bajos para elevados niveles de carga.

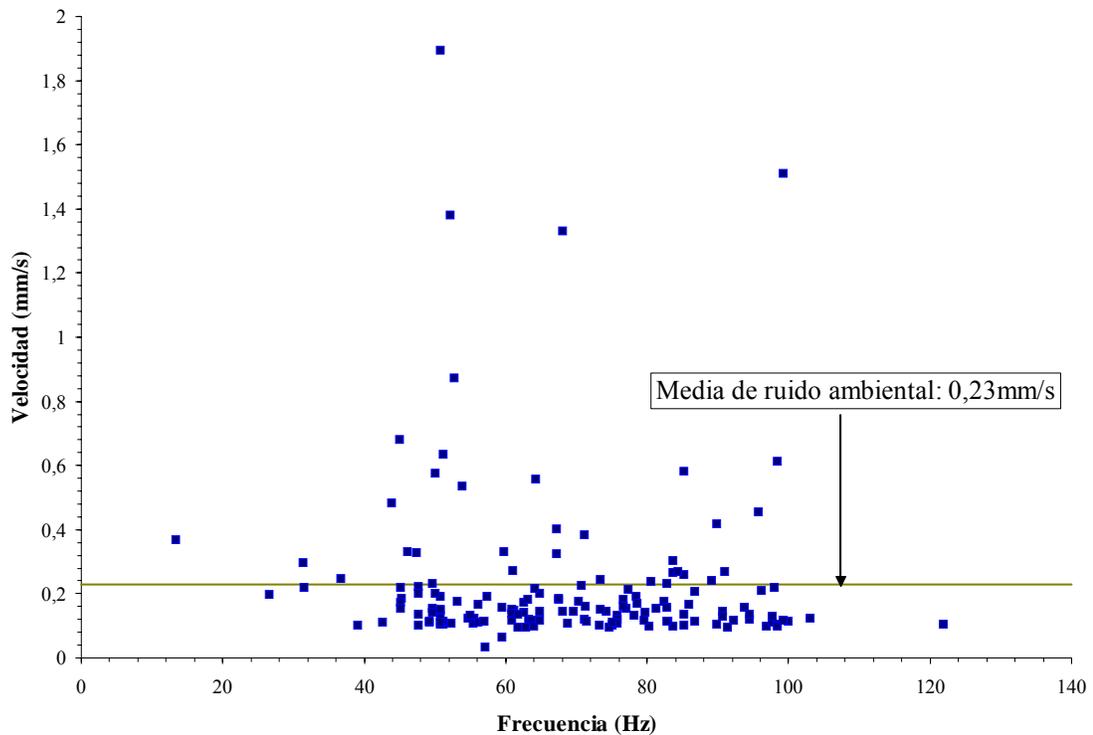


**Figura 5.3.4 Relación carga-distancia y carga-velocidad**

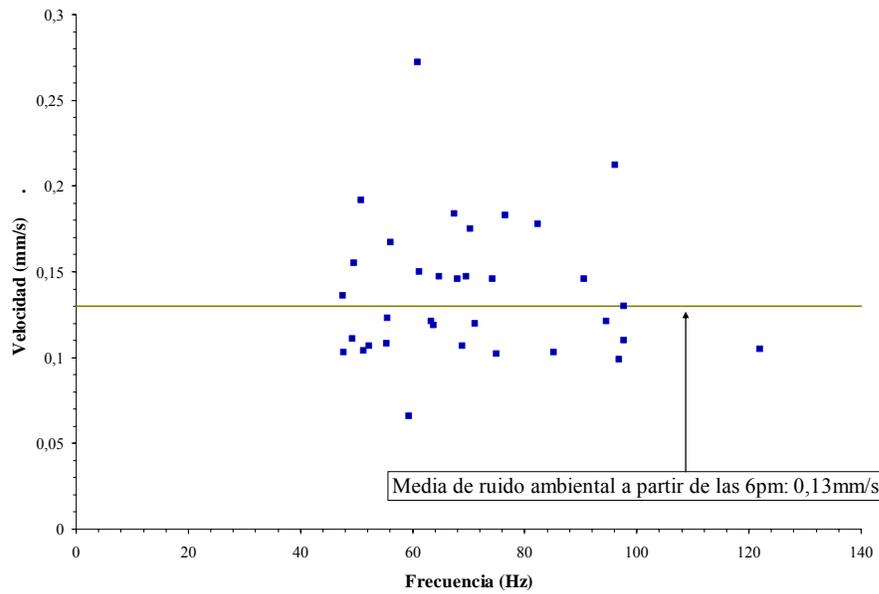
La figura 5.3.4, presenta una elevada dispersión de los valores de velocidad y distancia, con respecto a la carga, no resultando conveniente tratar de ajustar una curva a dicha tendencia.

## 5.4 ANALISIS DE LAS VIBRACIONES DE FONDO

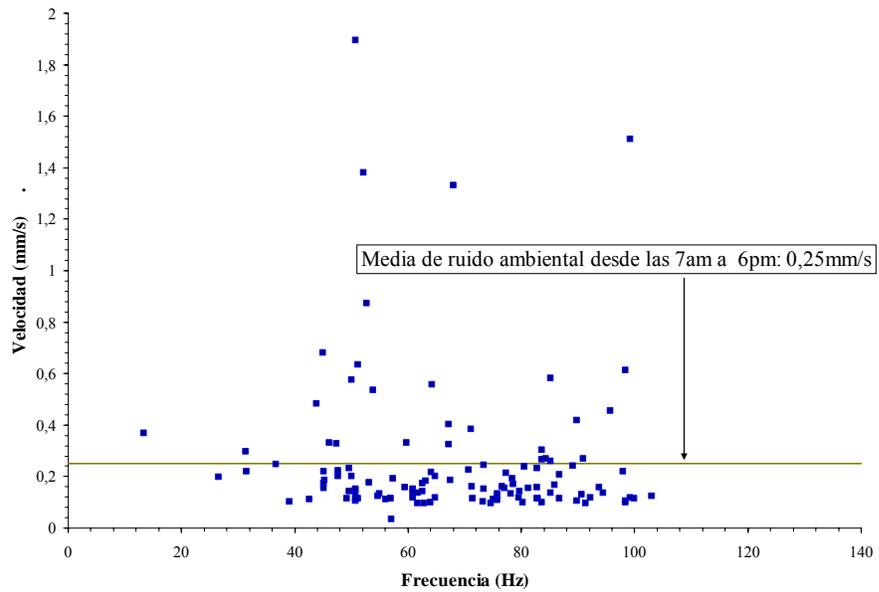
El ruido de fondo asociado al background y a la actividad normal de la zona (tráfico, actividad humana, etc.) varía entre un mínimo de 0,1mm/s hasta un máximo de 1,8mm/s con una media de 0,23mm/s, la mayor densidad de puntos se encuentran justamente por debajo del valor de la media para la velocidad. Referente a los valores de frecuencia asociados al ruido de fondo oscilan alrededor de la media de 68,29Hz de manera prácticamente simétrica como demuestra la curva de desviación estándar en la figura 5.4.4. Los valores de frecuencia obtenidos se ajustan casi perfectamente a una distribución normal teórica, no tanto así los valores de velocidad como se demuestra en la figura 5.4.5, pero en ambos casos se puede decir que el ajuste es aceptable, y de esa forma se esperaría que los valores de ruido de fondo en las áreas adyacentes a los trabajos del túnel Carrizalito del metro Los Teques, estén ajustados al valor normal esperado obtenido de los gráficos Q-Q.



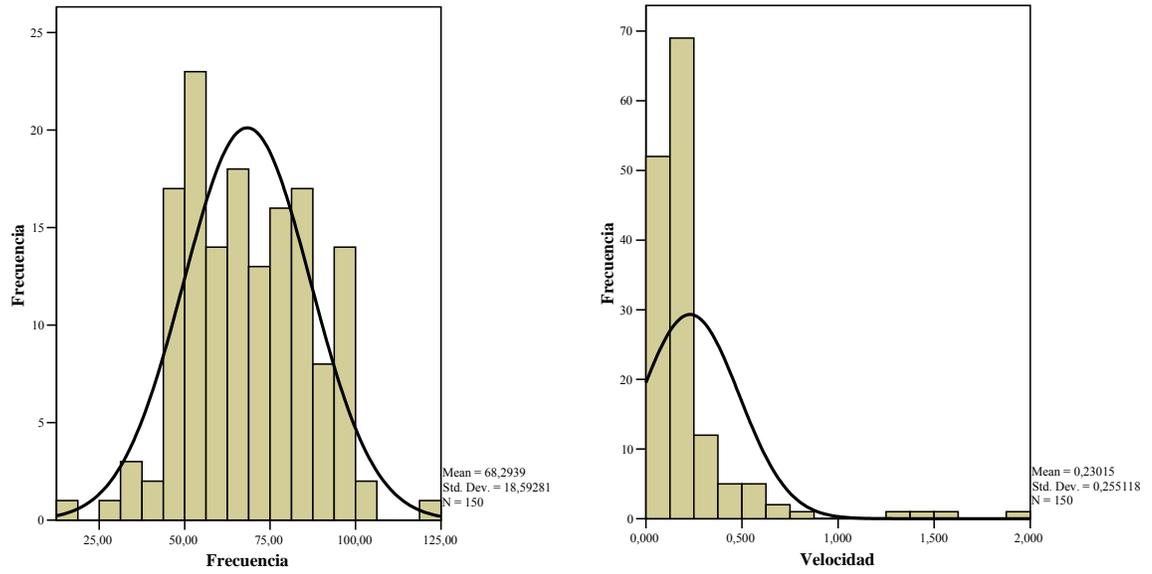
**Figura 5.4.1 Vibraciones de fondo (Ruido ambiental)**



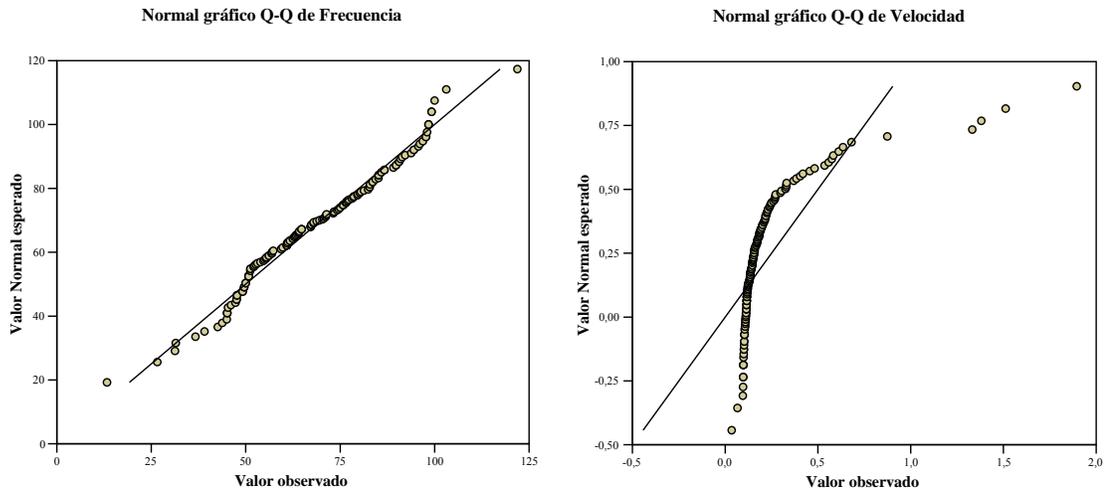
**Figura 5.4.2 Vibraciones de fondo después de las 5pm(Ruido ambiental)**



**Figura 5.4.3 Vibraciones de fondo entre las 7am y 5pm (Ruido ambiental)**



**Figura 5.4.4** histogramas de velocidad y frecuencia para el ruido de fondo



**Figura 5.4.5** Gráfico Q-Q de velocidad y frecuencia para el ruido de fondo

Las figura 5.4.2 y 5.4.3, demuestran que en las horas diurnas el promedio de actividad humana es mucho mayor antes de las 5 de la tarde, por ser horarios laborables con gran actividad en la zona de estudio, y por lo tanto aumenta el valor de la velocidad media para todo el rango medido.

Los máximos valores de velocidad obtenidos para el ruido de fondo son provenientes principalmente de pisotones y actividades con maquinaria pesada cerca del equipo de medición, destacando un mayor ruido de fondo durante las actividades de medición en los puntos 12, 17 y 19. En algunos casos los picos de velocidad asociados a la voladura están por debajo de los valores de ruido de fondo, como son el caso de los monitoreos realizados en los puntos: 11, 17, 33 y 34, y en otros casos están dentro de los rangos máximos y mínimos que se ha definido por las vibraciones de ruido ambiental como ocurre en los monitoreos: 1, 5, 6, 7, 9, 10, 14, 19, 21, 22, 23, 24, 25, y 26. Esto indica que el 39% de las voladuras asociadas a los trabajos del túnel Carrizalito del metro Los Teques que fueron monitoreadas no presentaron ningún tipo de peligro por las vibraciones generadas en las estructuras colindantes a dichos trabajos.

En los casos en que el ruido ambiental es mayor que la vibración producida por la voladura en el día en que se realizó el monitoreo, coincide con que la medición fue realizado en horas diurnas, en donde la actividad humana es mucho mayor como se comprueba en las figuras 5.4.2 y 5.4.3.

## 5.5 ANALISIS DE AFECTACION POR VIBRACION A HUMANOS

Según la respuesta humana a vibraciones en régimen transitorio (desarrollada por Oriard en 1970) como es el caso de las voladuras dentro del túnel Carrizalito del metro Los Teques, se obtuvo que ocho actividades monitoreadas se encuentran en el rango de percepción severa para los humanos, el resto en el rango apreciable y solo seis por debajo del umbral de percepción. Las velocidades de partícula superiores a los 6mm/s entran dentro del rango de percepción severa, por lo tanto las medidas obtenidas en los monitoreos 16, 36, 37, 40, 42, 43 45 y 46 corresponden a los puntos que están dentro de ese rango, esto indica que durante el momento en que se realizaron las detonaciones dentro del túnel Carrizalito se produjo un grado de perturbación a los habitantes de las zonas aledañas a la actividad.

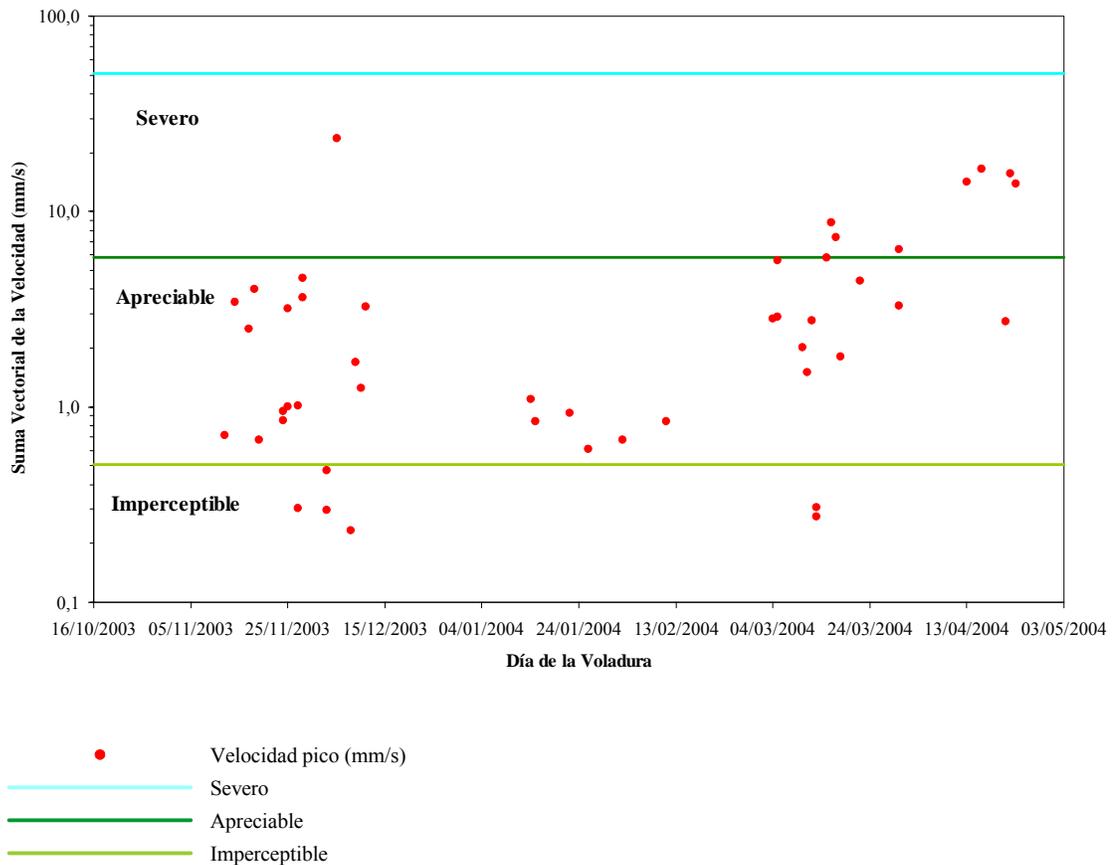


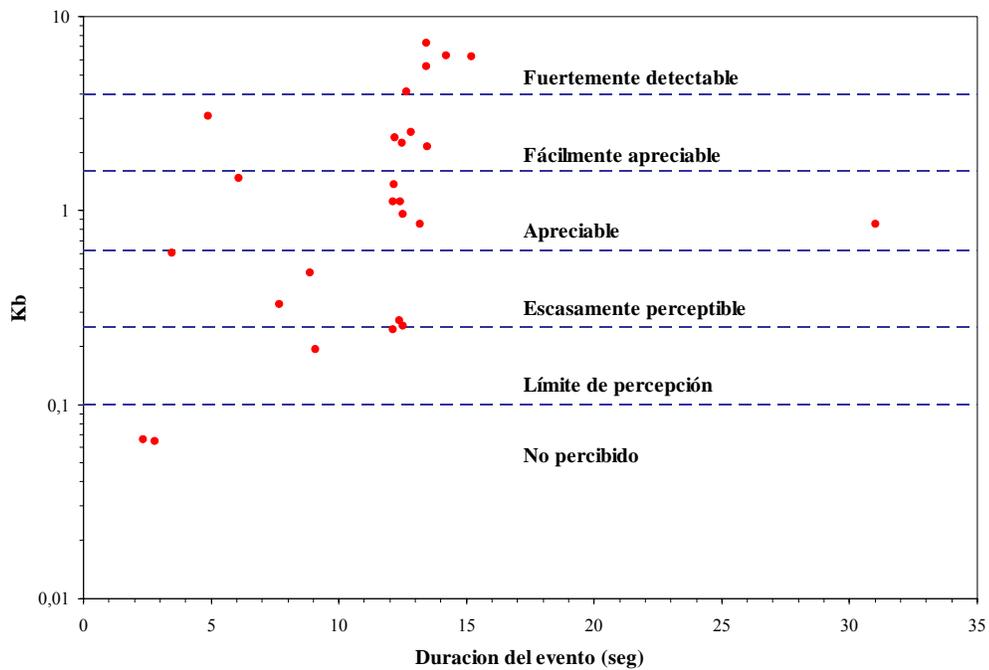
Figura 5.5.1 Respuesta humana a vibraciones en régimen transitorio

Este estudio sobre respuesta humana a las vibraciones se refiere únicamente a las velocidades de las partículas excluyendo el parámetro de frecuencia, esto es explicado por Oriard (1970), en donde expone que las frecuencias de resonancia distintas partes del cuerpo humano son bajas (menores a los 10Hz) y por lo tanto difícilmente se producirán frecuencias bajas en vibraciones inducidas por voladuras.

Por su parte la norma alemana DIN 4150/2 contempla el estudio de la afectación por vibraciones a humanos introduciendo el factor Kb, el cual utiliza la variable de la frecuencia dominante a partir de la relación:

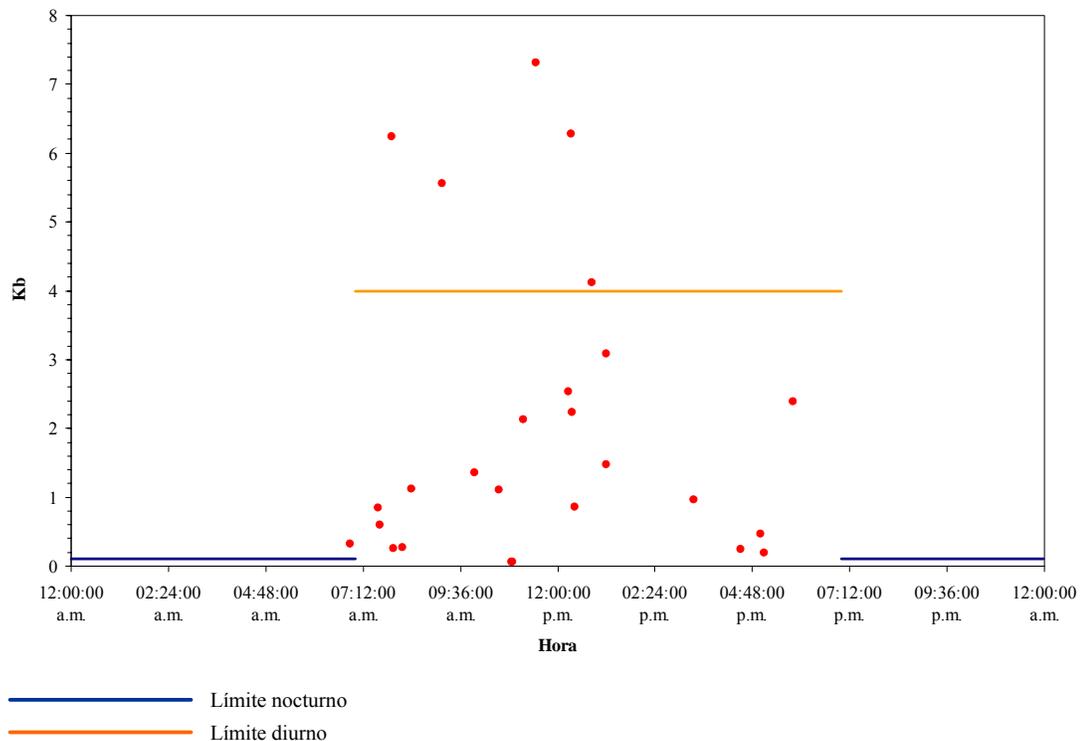
$$Kb = 0,005 \cdot A \cdot f^2 / 100 + f^2$$

Donde: A es el desplazamiento en micrones y f la frecuencia dominante en Hertz.



**Figura 5.5.2 Relación entre valores Kb y la percepción humana de vibraciones**

La figura 5.5.2 muestra los valores de  $K_b$  calculados por la norma DIN 4150/2 con respecto a la percepción humana a la vibración obtenida durante las actividades de voladura dentro del túnel Carrizalito, obteniendo que ocho puntos fueron escasamente apreciables a imperceptibles, cinco fuertemente apreciables y el resto dentro del umbral comprendido entre un nivel mínimo de percepción hasta fácilmente apreciable. Los cinco puntos que se encuentran dentro del rango de fuertemente apreciable corresponde a las mediciones: 36, 42, 43, 45 y 46, cabe destacar que estos puntos corresponden con los resultados obtenidos para la respuesta humana a vibraciones en régimen transitorio, indicando que a pesar de incorporar la variable frecuencia en el factor  $K_b$ , los resultados obtenidos son prácticamente los mismos, dependiendo en gran medida de la velocidad de partícula.



**Figura 5.5.3 Niveles sugeridos de vibración aceptable en zonas residenciales para valores de  $K_b$**

La figura 5.6.3 muestra los niveles sugeridos de vibraciones en valores de  $K_b$  para zonas residenciales según las horas de actividad, en donde se puede apreciar dos límites de en valores  $K_b$  para horas diurnas y nocturnas. Para las horas nocturnas entre 6pm hasta las 6am del día siguiente el valor máximo de  $K_b$  permitido es de 0,1 correspondiente al límite de percepción según la figura 5.6.2; el resultado obtenido en esas horas es aceptable ya que en esos horarios la actividad de voladura dentro del túnel Carrizalito es casi nula, solo un valor supero ese rango ya que la actividad se produjo antes del límite de las 6am.

Por su parte el límite diurno, los valores obtenidos se encuentran en mas del 70% dentro del rango permitido de vibración durante ese horario que parte desde las 6am hasta las 6pm, solo 5 valores superan ese límite por que su valor supera los 4  $K_b$  correspondientes a vibraciones fuertemente detectables, como es de esperar dichos puntos corresponden a los monitoreos: 36, 42, 43, 45 y 46.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La norma alemana DIN 4150/3, representa una buena referencia para conocer los límites de velocidad y frecuencia que pueden tolerar las estructuras frente a las vibraciones producidas por voladuras con explosivos.

La norma alemana DIN 4150/3, resulta más conveniente que las otras normas analizadas durante este trabajo de grado, en primer lugar por que el comportamiento de los límites no es lineal y segundo por que resulta ser más estricta que las demás trabajando de esa forma por una mayor seguridad.

Uno de los sectores afectados por las actividades de voladura dentro del túnel Carrizalito, corresponde al barrio Bertorelli Cisneros, ya que los registros obtenidos superaron la normativa internacional DIN 4150/3 tanto en velocidad como en frecuencia, esto es debido que en ese sector se esta construyendo la ventana peatonal número dos, la cual esta a poca distancia de ese sector.

Las actividades de voladura asociadas a los puntos de medición: 16, 42, 43, 45 y 46, presentaron riesgo para las estructuras colindantes y afectación por vibración a los seres humanos que se encontraban en las cercanías de la actividad.

El 84% de las mediciones realizadas sobre la actividad de voladura dentro del túnel Carrizalito, no registraron ningún peligro sobre las estructuras colindantes ni para los seres humanos que residen o realizan actividades en esa zona.

La actividad de voladura dentro del túnel Carrizalito asociada a la medición correspondiente al punto número 16, a pesar de presentar el pico de velocidad mas alto combinado con una frecuencia alrededor de 50Hz, el cual supero los dos primeros límites de la norma DIN 4150/3 correspondientes a edificaciones históricas y residenciales, no presento ningún tipo de peligro para las estructuras, debido a que la medición se realizo en un área despejada de viviendas en donde la casa mas cercana se encontraba a mas de 140 metros, cruzado el río San Pedro.

Los valores de velocidad inferiores a 3mm/s en cualquier rango de frecuencia, obtenidos de la actividad de voladura no presentaron ningún tipo de riesgo a las estructuras colindantes a las obras de ejecución del túnel Carrizalito.

Los registros de vibraciones debido a las voladuras dentro del túnel Carrizalito del metro Los Teques, no presento una frecuencia nítidamente definida ya que el rango obtenido durante los monitoreos están entre 9.60Hz hasta 126,30Hz.

Las bajas frecuencias pueden ser perjudiciales para las estructuras ya que la frecuencia dominante del movimiento vibratorio puede ser igual que la frecuencia natural de la estructura, amplificándose la magnitud del movimiento, según Sánchez (1995).

Empíricamente se pudo establecer un curva límite de velocidad contra distancia definida por la ecuación  $y = 959,86x^{-1,2118}$ . Para afinar dicho límite se recomienda hacer una adquisición con un sismógrafo multicanal, con el fin de obtener varios registros bajo un mismo factor de carga a diferentes distancias.

La distancia de seguridad sugerida por este trabajo para edificaciones ultrasensibles es de 29,04 metros y 49,54 metros para edificaciones residenciales, bajo el marco geológico que representa la formación las brisas en este sector.

Según la distancia de seguridad sugerida y las distancias calculadas entre el punto de voladura, solo el 15% de las estructuras cercanas al área de actividad del metro los Teques, pudieron presentar algún tipo de daño estructural, ya que se encuentran por dentro del perímetro mencionado.

Sánchez en 1995, menciona que la onda de choque es amortiguada a medida que su frente se aleja del origen, por el fenómeno geométrico de dispersión de la energía en un espacio tridimensional, por el carácter no completamente elástico de las rocas y por la presencia de agua llenando espacios vacíos en las rocas.

Empíricamente, el efecto de dispersión por amortiguamiento a causa de la atenuación geométrica por la distancia, puede ser analizado detonándose la misma carga explosiva a distancias variables, o realizando varios registros sobre una detonación colocando varios geofonos con un sismógrafo multicanal a distancias diferentes con respecto al punto de voladura.

Los máximos valores de velocidad obtenidos para el ruido de fondo son provenientes principalmente de pisotones y actividades con maquinaria pesada cerca del equipo de medición. La media de ruido de fondo esta alrededor de loa 0,23mm/s.

En algunos casos los picos de velocidad asociados a la voladura están por debajo de los valores de ruido de fondo.

Las actividades de voladuras con explosivos dentro del túnel Carrizalito monitoreadas durante este trabajo, no presentaron en su mayoría afectación por vibración a los seres humanos que se encontraban en las zonas adyacentes a la actividad, debido a que los rangos obtenidos apenas fueron perceptibles para el individuo, con la excepción de los registros obtenidos de la ventana peatonal número dos, que sobrepasaron tanto el límite en humanos como en estructuras debido a su cercanía.

La cantidad de carga utilizado por Astaldi S.P.A. no es constante en todas las actividades de voladura monitoreadas impidiendo determinar una correlación entre la carga de la voladura y los parámetros de velocidad y frecuencia.

Se recomienda utilizar el límite más sensible de la norma DIN 4150/3 correspondiente a edificaciones históricas según dicha norma, con el fin de evaluar las actividades de voladura bajo las máximas condiciones de seguridad para las estructuras.

Controlar la distancia entre las estructuras y el punto de voladura, es uno de los principales parámetros que deben manejar las empresas que van a realizar actividades con explosivos en zonas urbanas.

Las investigaciones sobre la propagación de vibraciones realizadas por Aparicio en 1997 mostraron que al detonarse cargas explosivas no simultáneas, los efectos no se suman si el tren de onda llega en impulsos individualizados. De esta manera él recomienda detonar las cargas explosivas de con el uso de retardadores.

Es recomendable conocer con antelación los futuros niveles de vibración resultante en trabajos donde este implicadas voladuras con explosivos. Para ello, con miras a una situación futura, se podría servir de modelos que representen las condiciones de propagación de ondas sísmicas en un macizo rocoso. Para ello es necesario una investigación amplia de las vibraciones en diferentes condiciones geológicas.

El equipo de medición se recomienda colocarlo sobre roca sana, ya que en rocas no consolidadas puede causar mayor amplitud del movimiento en bajas frecuencias, obteniendo un registro alterado no correspondiente con el entorno.

Para la creación de una normativa venezolana sobre control de vibraciones es imprescindible calcular la frecuencia natural de las estructuras y edificaciones características del país, como son las estructuras en las zonas populares, con el fin de generar los límites correspondientes a la frecuencia y velocidad de la onda.

Para el control de vibraciones por el uso de voladuras con explosivos en zonas urbanas, es importante tener un control sobre la amplitud de la velocidad obtenida y el rango de frecuencia con que viaja ese frente de onda, ya que es tanto o más importante que la velocidad.

## REFERENCIA BIBLIOGRAFICA

- AGUILERA, L. (1967). Vibraciones y daños producidos por voladuras. Boletín de la Sociedad de Geólogos de Venezuela, Volumen 3, 133-151.
- APARICIO, J. (1997) Investigación de voladuras como fuente de información para fines ingenieriles. Memorias del VIII Congreso Geológico Venezolano, Sociedad Venezolana de Geólogos. Tomo I, 47-52.
- A.F.T.E.S. Groupe de Travail. (1978). Recommandations concernant l'étude des effets sismiques de l'explosif. Tunnels et Ouvrages Souterrains (2), 89-93.
- BACCI, D.C. (2000). Vibrações geradas pelo uso de explosivos no desmonte de rochas: avaliação dos parâmetros físicos do terreno e dos efeitos ambientais. Tesis de doctorado. Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Ríó Claro.
- BERTA, G. (1985). L'esplosivo strumento di lavoro. Milano: ITALESPLOSIVI. 488p.
- BOLRA, G. (1993). Esame delle principali normative e raccomandazioni esistenti per il controllo delle vibrazioni provocate dal brillamento di esplosivi ed indotte da queste negli edifici. GEAM - Geingegneria Ambientale e Mineraria. Associazione Mineraria Subalpina. Año XXX (4), 243-248.
- BS-5228 - Parte 4 -. (1992). Code of practice for noise and vibrations control applicable to pilling operations. British Standard.
- BS-5228 - Parte 5 -. (1997). Noise and vibrations control on constructions and open sites. Code of practice applicable to surface mineral extractions (except coal) sites. British Standard.

- BS-6472. (1992). Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings (1Hz to 80Hz). British Standard.
- BS-7385 - Parte 1 -. (1990). Evaluation and measurement for vibration in buildings. Guide to measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings. British Standard.
- BS-7385 - Parte 2 -. (1993). Evaluation and measurement for vibration in buildings. Guide to damage groundborne vibration. British Standard.
- BUTRIAGO, J. (2001). Codificación sismológica de un segmento de la falla Cauca-Almaguer y sus aplicaciones en el Departamento de Antioquia. Trabajo dirigido de grado. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- CHAPOT, P. (1981). Étude des vibrations provoquées par les explosifs dans les massifs rocheux. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Rapport de Recherche 105: 1-56.
- CRANDELL, F. J. (1949). Ground vibrations due to blasting and its effect upon structures. Journal of the Boston Society of Civil Engineers, 222-245.
- DENGO, G. (1951). Geología de la región de Caracas. I (1), 39-116.
- DEUTSCHE NORM (DIN 4150). (1986). Structural vibration in buildings - effects on structures.
- DOTT, (1979). The Geosynclinal concept. R. H. Dott y R.H. Shaver Editores. Especial publication 19, 380p.
- DOWDING, C. H.; Corser, P. G. (1981). Cracking and construction blasting. Journal of the Construction Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers 107 (CO1), 89-106.

- DOWDING, C. H. (1985). *I*Blast vibration monitoring and control. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 297 p.
- DUBAL, (1963). Review of critical for estimating damage to residences from blasting. U. S. Bureau of mines. Report investigation 2968, Denver.
- EDWARDS, A. T.; NORTHWOOD, T. D. (1960). Experimental studies of the effects of blasting on structures. *The Engineer* 210, 538-546.
- ESTEVEZ, J.M. (1994). Project for updating the portuguese standard NP2074 (1983): Assessment of the influence of vibrations caused on buildings due to blasting or similar forces. *EXPLOSIVES 94 - CONFERENCE PROCEEDINGS - University of Leeds, U.K. -The Institute of Explosives Engineers. The European Federation of Explosives Engineers & The University of Leeds Departament of Mining & Mineral Engineering*, 27-30.
- FELICIANO, P. (1988). Informe geológico-geotécnico de superficie metro Los Teques. Trabajo no publicado. Caracas.
- FOGELSON, D. E. (1971). U. S. Bureau of Mines research on vibration from blasting. *Revue de l'Industrie Minérale. Número Especial*, 158-165.
- FORNARO, M. (1980). Vibrazioni dannose per le costruzioni in conseguenza dello sparo di mine: esame di quanto amesso dalle norme e suggerito dall'esperienza. *Notiziario dell'Associazione Mineraria Subalpina, Anno VI (3-4)*, 18-28.

- FUNVISIS, Ministerio de Ciencia y Tecnología. (2003). Medición de vibraciones producto de voladuras en los frentes el chorrillo y ventana sur. Metro Las Adjuntas – Los Teques. Caracas: GONZALES, J.; ZARAGOZA F.; RENDÓN H.; GRIMÁN C.
- GARCÍA FERNÁNDEZ, JOSÉ BERNARDINO (1999). Asturias Minera. Disponible: <http://mineria.iespana.es/mineria/index.htm>.
- GONZÁLEZ DE JUANA C., ITURRALDE DE AROZENA J. M., PICARD X. (1980). Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas. 2 tomos. Ediciones FONINVES, Caracas. 1031 p.
- ISEE, International Society of Explosives Engineers. (2002). ISEE Field Practice Guidelines for Blasting Seismographs. Society of Explosives Engineers, Inc. Cleveland, Ohio.
- JIMÉNEZ, J. (1980). Geotecnia y cimientos, Cimentaciones, excavaciones y aplicaciones de la Geotecnia. Tomo III. Editorial Rueda, 977-998.
- LANGFORS, U.; KIHLSSTROM, B. (1978). The modern technique of rock blasting, 3ra ed. Estocolmo: Almqvist & Wiksell. 438 p.
- LANGFORS, U.; WESTERBERG, H.; KIHLSSTROM, B. (1958). Ground Vibrations in Blasting. Water Power 10, 390-395.
- LEE, F. W.; THOENEN, J. R.; WINDES, S. L. (1936). Earth vibrations caused by quarry blasting. U.S. Bureau of Mines Report of Investigation 3319. Washington. 19 p.
- ORIARD, L. (1970). Blasting operations in the urban environment. Geol Annual Meeting, Washintong.

- PERSSON, (1994). Rock blasting and explosives engineering. International Society of Explosives Engineers. CRC Press, Inc. USA. 1994. 540 p.
- RATHBONE, T. (1963). Human sensitivity to product vibration. Product Engineering.
- REIHER, H., MEISER, F.J. (1931). Human annoyance of vibrations. Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens.
- ROCKWELL, E.H. (1927). Vibrations caused by quarry blasting and their effect on structures, Engineering and Contracting.
- SÁNCHEZ, L. E. (1995). Control de Vibraciones. Aspectos Geológicos de Protección Ambiental, UNESCO. Volumen I, 282-293.
- SERWAY, R. (1997). Física. 4ª Edición. Mc Graw Hill. 1452p.
- SISKIND, D. E. et al. (1980). Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting. U. S. Bureau of Mines Report of Investigation 8507. Washington. 74p.
- THOENEN, J. R.; WINDES, S. L. (1942). Seismic effects of quarry blasting. U.S. Bureau of Mines Bulletin 442. Washington. 83 p.
- TRITSCH, J. (1983). Les vibrations engendrées par les tirs de mines en carrières et grands travaux. CERCHAR, Centre d'Études et Recherches des Charbonnages de France, Verneil-en-Halatte. 29 p.
- UCAR, R. (1981). Vibraciones producidas por voladuras, su control y criterios de daños un caso practico. Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de los Andes. 49-94

UNI 9916. (1991). Norma italiana - criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici.

UNE-22-381. (1993). Control de vibraciones producidas por voladuras. Norma Española.

URBANI, F. (1989). Código Estratigráfico de las Cuencas Petroleras de Venezuela. Petróleos de Venezuela, S.A. Disponible: <http://www.pdv.com/lexico/l66w.htm>.

WAITE, Carlos (2004). Waite Explosivos. Disponible: [http://mx.geocities.com/waite\\_explosivos/index.html](http://mx.geocities.com/waite_explosivos/index.html).

WEHRMANN, M. (1972). Geología de la región de Guatire-Colonia Tovar. IV Congreso de Geología de Venezuela, Caracas. (4), 2093-2121.

ZIEGLER, A. (2002). Vibración measurement with the MR2002-CE from SYSCOM. Ziegler Consultants, Zürich, Report Nr 1216. 14 p.

ZIEGLER, A. (2002). User Manual. Ziegler Consultants, Zürich. 75 p.

**APÉNDICE A**  
Tablas

Tabla A.1 Datos de adquisición

Punto	Fecha	Hora	Posicion Monitoreo UTM		Ubicación de la Voladura	Progresiva de la Voladura	Esquema de la Voladura
			E	N			
1	12/11/2003	02:21:00 p.m.	717065,0	1150044,0	Ventana Peatonal 1	0+080,10	INT-AS-088R1
2	14/11/2003	09:07:00 a.m.	716270,0	1147855,0	Tunel Carrizalito	6+214,00	INT-AS-095R0
3	17/11/2003	11:58:00 a.m.	716232,0	1147839,0	Tunel Carrizalito	6+219,75	INT-AS-095R0
4	18/11/2003	09:18:00 a.m.	716274,0	1147792,0	Tunel Carrizalito	6+223,10	INT-AS-095R0
5	19/11/2003	09:33:00 a.m.	716154,0	1147791,0	Tunel Carrizalito	6+225,78	INT-AS-095R0
6	24/11/2003	08:46:00 a.m.	716105,0	1147774,0	Tunel Carrizalito	6+233,41	INT-AS-095R0
7	24/11/2003	04:54:00 p.m.	716105,0	1147774,0	Tunel Carrizalito	6+236,71	INT-AS-095R0
8	25/11/2003	07:59:00 a.m.	716270,9	1147796,0	Tunel Carrizalito	6+241,57	INT-AS-095R0
9	25/11/2003	04:56:00 p.m.	716270,9	1147796,0	Tunel Carrizalito	6+245,29	INT-AS-095R0
10	27/11/2003	07:56:00 a.m.	716200,9	1148185,3	Tunel Carrizalito	6+257,56	INT-AS-095R0
11	27/11/2003	04:57:00 p.m.	716200,9	1148185,3	Tunel Carrizalito	6+261,68	INT-AS-095R0
12	28/11/2003	07:59:00 a.m.	716279,0	1147814,0	Tunel Carrizalito	6+266,18	INT-AS-095R0
13	28/11/2003	04:57:00 p.m.	716279,0	1147814,0	Tunel Carrizalito	6+270,80	INT-AS-095R0
14	03/12/2003	08:43:00 a.m.	716690,1	1149743,4	Ventana Peatonal 1	4+833,00	INT-AS-095R0
15	03/12/2003	08:49:00 a.m.	716690,1	1149743,4	Tunel Carrizalito	6+291,97	INT-AS-088R1
16	05/12/2003	09:24:00 a.m.	716574,2	1149171,3	Ventana Peatonal 1	0+167,81	INT-AS-095R0
17	08/12/2003	08:25:00 a.m.	716992,0	1149960,0	Tunel Carrizalito	6+303,05	INT-AS-095R0
18	09/12/2003	08:10:00 a.m.	716327,5	1149341,6	Ventana Peatonal 1?	4+177,18	INT-AS-095R0
19	10/12/2003	07:57:00 a.m.	716304,9	1147853,0	Tunel Carrizalito	6+332,34	INT-AS-095R0
20	11/12/2003	07:58:00 a.m.	716228,0	1147840,7	Tunel Carrizalito	6+333,68	INT-AS-095R0
21	14/01/2004	07:57:00 a.m.	716228,0	1147834,0	Tunel Carrizalito	6+638,90	INT-AS-088R1
22	15/01/2004	08:10:00 a.m.	716228,0	1147834,0	Tunel Carrizalito	6+373,24	INT-AS-088R1
23	22/01/2004	06:52:00 a.m.	716080,0	1147696,0	Tunel Carrizalito	6+407,33	INT-AS-088R1
24	26/01/2004	05:05:00 p.m.	716056,0	1147673,0	Tunel Carrizalito	6+421,45	INT-AS-088R1
25	02/02/2004	04:30:00 p.m.	716059,0	1147676,0	Tunel Carrizalito	6+451,63	INT-AS-088R1
26	11/02/2004	04:59:00 p.m.	716070,0	1147623,0	Tunel Carrizalito	6+483,92	INT-AS-088R1
27	04/03/2004	12:25:00 p.m.	716175,0	1147406,0	Ventana Peatonal 2	0+017,90	INT-AS-088R1
28	05/03/2004	09:56:00 a.m.	716192,0	1147405,0	Ventana Peatonal 2	0+022,65	INT-AS-088R1
29	05/03/2004	05:48:00 p.m.	716175,0	1147420,0	Ventana Peatonal 2	0+026,50	INT-AS-088R1
30	10/03/2004	07:34:00 a.m.	716164,0	1147330,0	Ventana Peatonal 2	0+046,66	INT-AS-088R1
31	11/03/2004	07:37:00 a.m.	716169,0	1147300,0	Ventana Peatonal 2	0+048,00	INT-AS-088R1
32	12/03/2004	10:33:00 a.m.	716223,0	1147374,0	Ventana Peatonal 2	0+052,63	INT-AS-088R1
33	13/03/2004	10:51:00 a.m.	717037,0	1150222,0	Tunel Carrizalito	4+650,00	Perfilaje
34	13/03/2004	10:53:00 a.m.	717037,0	1150222,0	Tunel Carrizalito	4+650,00	Perfilaje
35	15/03/2004	12:21:00 p.m.	716204,0	1147325,0	Ventana Peatonal 2	0+057,66	INT-AS-088R1
36	16/03/2004	12:50:00 p.m.	716231,0	1147403,0	Ventana Peatonal 2	0+062,82	INT-AS-088R1
37	17/03/2004	12:15:00 p.m.	716189,0	1147474,0	Ventana Peatonal 2	0+067,21	INT-AS-088R1
38	18/03/2004	03:21:00 p.m.	716187,0	1147513,0	Ventana Peatonal 2	0+071,08	INT-AS-088R1
39	22/03/2004	11:08:00 a.m.	716223,0	1147374,0	Ventana Peatonal 2	0+076,52	INT-AS-088R1
40	30/03/2004	01:11:00 p.m.	716223,0	1147374,0	Ventana Peatonal 2	0+104,00	INT-AS-088R1
41	30/03/2004	01:12:00 p.m.	716223,0	1147374,0	Ventana Peatonal 2	0+104,00	INT-AS-088R1
42	13/04/2004	09:08:00 a.m.	716231,0	1147403,0	Ventana Peatonal 2	0+115,00	INT-AS-088R1
43	16/04/2004	12:20:00 p.m.	716213,0	1147408,0	Ventana Peatonal 2	0+127,28	INT-AS-088R1
44	21/04/2004	08:23:00 a.m.	716175,0	1147406,0	Ventana Peatonal 2	0+137,25	INT-AS-088R1
45	22/04/2004	07:54:00 a.m.	716213,0	1147408,0	Ventana Peatonal 2	0+137,70	INT-AS-088R1
46	23/04/2004	11:27:00 a.m.	716192,0	1147405,0	Ventana Peatonal 2	0+140,24	INT-AS-088R1

Tabla A.2 Distancias

<b>Punto</b>	<b>Distancia horizontal Punto-Voladura (m)</b>	<b>Distancia Real Punto-Voladura (m)</b>	<b>Distancia Casa-Voladura (m)</b>
1	985,9	986,2	152,83
2	95,7	96,1	70,94
3	128,7	129,2	70,75
4	89,0	104,3	69,95
5	207,9	210,5	70,02
6	258,1	259,6	70,29
7	256,9	258,4	69,54
8	91,2	104,5	69,79
9	92,1	105,2	70,27
10	427,0	428,1	71,60
11	431,1	432,1	73,09
12	87,3	96,1	75,39
13	88,7	97,3	76,97
14	1254,0	1254,4	259,35
15	2006,9	2006,9	87,30
16	20,0	36,9	142,15
17	2516,0	2516,8	90,11
18	330,0	330,0	100,11
19	136,6	136,6	89,55
20	234,2	234,4	87,51
21	208,0	208,1	82,00
22	200,0	200,4	80,71
23	288,4	290,2	86,82
24	312,1	312,2	273,22
25	316,0	316,2	137,65
26	301,3	301,5	138,30
27	170,0	170,7	103,00
28	148,0	149,6	100,00
29	160,0	160,4	94,82
30	171,0	172,3	74,66
31	176,7	179,1	73,32
32	89,9	102,7	68,65
33	960,0	960,3	258,30
34	960,0	960,3	258,30
35	125,9	132,2	63,80
36	60,0	70,9	60,00
37	129,0	130,5	54,12
38	153,3	155,9	50,20
39	68,4	83,4	44,81
40	49,2	67,2	20,00
41	49,2	67,2	20,00
42	8,9	35,1	8,89
43	26,3	35,0	
44	54,4	54,8	7,00
45	7,6	23,5	16,10
46	34,5	36,9	5,10

Tabla A.3 Velocidades y frecuencias

Punto	Pico X (mm/s)	Pico Y (mm/s)	Pico Z (mm/s)	Suma Vectorial (mm/s)	Frecuencia X (Hz)	Frecuencia Y (Hz)	Frecuencia Z (Hz)	Frecuencia dominante (Hz)
1	0,543	0,374	0,632	0,722	51,56	53,13	57,03	53,13
2	2,887	1,989	2,833	3,467	30,08	59,96	38,87	30,08
3	2,122	1,862	1,466	2,511	52,45	14,26	96,09	52,45
4	2,304	3,561	3,462	4,010	49,41	57,81	78,52	57,81
5	0,664	0,601	0,299	0,680	56,45	80,47	9,38	56,45
6	0,616	0,609	0,696	0,852	88,87	102,54	154,00	154,00
7	0,933	0,478	0,686	0,949	59,86	83,98	145,80	59,86
8	1,515	2,841	1,622	3,204	46,09	62,89	103,22	62,89
9	1,003	0,540	0,374	1,005	108,40	9,18	10,55	108,40
10	0,612	0,552	0,809	1,017	-	-	15,00	15,00
11	0,220	0,243	0,260	0,303	-	-	10,00	10,00
12	3,756	1,345	2,594	4,557	37,11	20,02	9,77	37,11
13	2,221	3,386	2,629	3,656	54,88	65,04	94,63	65,04
14	0,294	0,427	0,187	0,473	0,10	75,20	88,70	75,20
15	0,149	0,221	0,184	0,297	0,20	84,00	114,50	84,00
16	8,720	12,300	22,100	23,690	40,90	40,90	50,00	50,00
17	0,085	0,220	0,159	0,234	37,50	112,50	106,20	112,50
18	1,594	1,615	1,106	1,694	64,80	86,70	82,00	86,70
19	1,241	0,636	0,456	1,247	57,40	58,80	35,40	57,40
20	2,573	2,533	1,600	3,278	59,00	91,40	65,60	59,00
21	0,747	0,961	0,587	1,094	93,17	148,00	72,70	93,17
22	0,539	0,654	0,619	0,842	96,80	111,20	96,80	111,20
23	0,820	0,391	0,394	0,930	83,00	107,40	81,60	83,00
24	0,443	0,366	0,328	0,609	71,95	151,95	65,14	71,95
25	0,652	0,544	0,377	0,678	126,30	52,44	59,77	126,30
26	0,827	0,726	0,562	0,847	52,10	40,60	40,60	52,10
27	1,273	2,030	2,588	2,822	23,40	14,70	9,60	9,60
28	2,752	2,504	1,252	2,904	52,10	95,80	79,90	52,10
29	3,607	4,137	4,548	5,621	76,80	77,80	101,80	101,80
30	1,716	1,263	1,273	2,016	79,70	78,70	96,53	79,70
31	0,945	1,329	1,005	1,505	25,80	20,70	25,80	20,70
32	2,445	2,288	1,507	2,779	105,00	29,00	31,50	105,00
33	0,108	0,080	0,244	0,274	11,33	154,69	39,80	39,80
34	0,167	0,101	0,248	0,307	150,39	155,47	41,40	41,40
35	5,026	3,711	2,476	5,800	82,90	61,20	75,00	82,90
36	8,532	8,455	2,989	8,812	34,80	39,70	63,70	34,80
37	6,498	5,138	4,091	7,363	41,70	84,70	53,40	41,70
38	1,270	1,524	1,252	1,805	45,10	56,90	35,11	56,90
39	3,781	4,039	1,758	4,421	35,70	71,30	58,00	71,30
40	6,310	4,517	2,215	6,396	42,60	38,10	57,80	42,60
41	3,108	2,798	1,646	3,297	39,10	40,60	55,30	39,10
42	11,420	8,570	8,096	14,156	35,60	32,40	76,10	35,60
43	12,867	8,741	16,397	16,561	76,70	63,10	66,00	66,00
44	1,653	2,382	2,721	2,743	70,14	65,24	110,70	110,70
45	12,508	14,231	8,682	15,692	49,40	32,30	80,70	32,30
46	11,863	11,626	12,944	13,923	27,00	41,20	53,40	53,40

Tabla A.4 Ootros valores de interés

<b>Punto</b>	<b>Carga de la Voladura (Kg)</b>	<b>Promedio Actividad Humana (mm/s)</b>	<b>Duración (s)</b>
1	285,80	0,288	2,07
2	203,00	0,394	7,16
3	250,00	0,325	12,12
4	274,00	0,367	6,04
5	216,60	0,171	7,67
6	195,10	0,310	12,10
7	315,60	0,310	11,97
8	320,00	0,240	12,53
9	296,30	0,366	7,74
10	269,60	0,282	12,5
11	315,10	0,061	53,34
12	296,40	0,714	12,96
13	297,80	0,47	12,63
14	151,33	0,258	7,04
15	297,00	0,258	6,00
16	157,79	0,091	20,88
17	338,59	1,539	2,64
18	159,90	1,003	8,73
19	330,00	0,755	7,54
20	344,77	0,543	14,40
21	206,00	0,131	12,49
22	214,00	0,130	12,35
23	273,22	0,271	7,65
24	273,22	0,193	9,08
25	137,65	0,359	12,10
26	425,00	0,356	8,86
27	237,00	0,100	31,00
28	217,30	0,953	12,16
29	-	0,187	12,18
30	212,80	0,175	13,17
31	215,90	0,325	3,46
32	225,00	0,322	12,12
33	133,00	0,245	2,80
34	133,00	0,245	2,32
35	187,20	0,402	12,48
36	201,62	0,212	12,64
37	217,21	0,169	12,82
38	206,25	0,152	12,49
39	195,00	0,183	13,46
40	149,00	0,122	4,87
41	149,00	0,122	6,08
42	225,00	0,127	13,42
43	212,00	0,145	14,19
44	150,00	0,583	12,38
45	142,00	0,498	15,20
46	250,00	0,171	13,42

Tabla A.5 Valores de Kb

<b>Punto</b>	<b>KbFTi (1)</b>	<b>KbFTi (2)</b>	<b>KbFTi (3)</b>	<b>Suma vec Kb</b>
21	0,165	0,158	0,117	0,257
22	0,178	0,153	0,138	0,272
23	0,294	0,111	0,105	0,331
24	0,139	0,074	0,111	0,193
25	0,139	0,149	0,136	0,245
26	0,304	0,345	0,130	0,478
27	0,373	0,612	0,471	0,858
28	1,112	0,722	0,332	1,367
29	1,328	1,727	0,994	2,395
30	0,609	0,495	0,343	0,856
31	0,349	0,395	0,297	0,605
32	0,656	0,688	0,588	1,118
33	0,020	0,015	0,060	0,065
34	0,020	0,014	0,062	0,067
35	1,594	1,353	0,810	2,242
36	2,791	2,882	0,952	4,123
37	1,650	1,637	1,034	2,544
38	0,507	0,739	0,362	0,967
39	1,621	1,241	0,622	2,134
40	2,551	1,534	0,816	3,087
41	1,103	0,818	0,549	1,479
42	3,778	3,314	2,397	5,568
43	4,026	2,567	4,095	6,290
44	0,502	0,818	0,581	1,122
45	4,613	3,582	2,218	6,247
46	4,280	4,291	4,114	7,325

Tabla A.6 Datos de ruido de fondo

Velocidad mm/s	Frecuencia Hz	Velocidad mm/s	Frecuencia Hz	Velocidad mm/s	Frecuencia Hz
0,325	67,20	0,155	49,60	0,224	47,60
0,369	13,30	0,119	63,70	0,114	51,23
0,331	59,80	0,329	47,30	0,186	67,41
0,146	67,90	0,192	50,80	0,113	56,14
0,272	60,90	0,33	46,10	0,115	49,20
0,147	69,50	0,136	47,60	0,135	85,20
0,123	55,40	0,104	51,20	0,202	47,70
0,183	76,56	0,184	67,40	0,192	57,30
0,103	85,16	0,167	56,10	0,219	45,10
0,107	52,30	0,111	49,20	0,558	64,20
0,175	70,30	0,259	85,20	0,191	78,50
0,107	68,80	0,103	47,70	0,113	42,60
0,12	71,10	0,536	53,90	0,681	45,00
0,147	64,80	0,175	53,10	0,198	26,60
0,105	121,90	0,874	52,70	0,098	64,00
0,099	96,90	0,158	59,40	0,404	67,20
0,121	94,50	0,635	51,20	0,219	31,50
0,212	96,10	1,332	68,00	0,27	91,00
0,11	97,70	1,381	52,10	0,155	77,00
0,13	97,70	0,035	57,00	0,133	55,00
0,146	74,20	0,303	83,60	0,143	62,50
0,066	59,40	0,125	54,70	0,456	95,70
0,178	82,40	0,118	92,20	0,227	70,70
0,121	63,30	0,158	93,80	0,246	73,40
0,108	55,40	0,231	82,80	0,101	39,10
Velocidad mm/s	Frecuencia Hz	Velocidad mm/s	Frecuencia Hz	Velocidad mm/s	Frecuencia Hz
0,249	36,70	0,202	50,00	0,116	71,40
0,298	31,30	0,115	56,90	0,11	75,00
0,098	80,20	0,173	45,10	0,104	98,40
0,482	43,80	0,117	60,90	0,136	94,50
0,612	98,40	0,104	50,80	0,098	98,40
0,114	82,90	0,104	89,80	0,172	62,50
0,15	61,20	0,216	64,10	0,219	98,00
0,102	75,00	0,419	89,80	0,13	90,60
0,146	90,60	0,162	71,30	0,117	99,20
1,512	99,20	0,151	50,80	0,184	63,10
0,116	86,70	0,141	79,70	0,583	85,20
0,214	77,30	0,16	76,60	1,895	50,80
0,134	75,80	0,152	60,90	0,112	50,80
0,384	71,10	0,096	62,90	0,141	49,60
0,241	89,10	0,124	103,10	0,575	50,00
0,185	45,30	0,138	60,90	0,114	56,90
0,117	64,80	0,097	61,70	0,156	45,10
0,156	81,30	0,135	61,70	0,269	84,40
0,097	91,40	0,115	100,00	0,239	80,50
0,208	86,70	0,122	75,80	0,116	82,80
0,202	64,80	0,267	83,60	0,158	82,80
0,152	73,40	0,1	83,60	0,134	78,10
0,131	50,80	0,109	75,80	0,167	85,90
0,148	50,80	0,095	74,60	0,119	79,60
0,231	49,60	0,101	73,20	0,171	78,60

**APÉNDICE B**

Mapa del túnel Carrizalito con la ubicación de los puntos de medición  
Escala 1:250



## **APÉNDICE C**

Estadística (Tablas, histogramas, diagramas de caja y gráficos Q-Q)

Tabla C.1 Valores estadísticos de la velocidad pico.

			Estadístico	Error tít.	
Velocidad	Media		3,9575	,75141	
	Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior	2,4440		
		Límite superior	5,4709		
	Media recortada al 5%		3,2968		
	Mediana		2,2635		
	Varianza		25,973		
	Desv. tít.		5,09633		
	Mínimo		,23		
	Máximo		23,69		
	Rango		23,46		
	Amplitud intercuartil		3,61		
	Asimetría		2,248		,350
	Curtosis		5,055		,688

Tabla C.2 Valores estadísticos de la frecuencia dominante.

			Estadístico	Error tít.	
Frecuencia	Media		59,2448	5,17099	
	Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior	48,8299		
		Límite superior	69,6597		
	Media recortada al 5%		58,2334		
	Mediana		56,6750		
	Varianza		1230,002		
	Desv. tít.		35,07138		
	Mínimo		,10		
	Máximo		154,00		
	Rango		153,90		
	Amplitud intercuartil		46,19		
	Asimetría		,447		,350
	Curtosis		,073		,688

Tabla C.3 Valores estadísticos de la distancia.

			Estadístico	Error tít.	
Distancia	Media		330,4489	75,31837	
	Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior	178,6547		
		Límite superior	482,2431		
	Media recortada al 5%		246,0648		
	Mediana		155,9000		
	Varianza		255278,587		
	Desv. tít.		505,25101		
	Mínimo		23,50		
	Máximo		2516,80		
	Rango		2493,30		
	Amplitud intercuartil		199,75		
	Asimetría		3,017		,354
	Curtosis		9,604		,695

Tabla C.4 Valores estadísticos de la carga.

			Estadístico	Error típ.
Carga	Media		233,3789	10,14406
	Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior	212,9349	
		Límite superior	253,8229	
	Media recortada al 5%		230,7956	
	Mediana		217,2100	
	Varianza		4630,591	
	Desv. típ.		68,04844	
	Mínimo		133,00	
	Máximo		425,00	
	Rango		292,00	
	Amplitud intercuartil		99,95	
	Asimetría		,489	,354
	Curtosis		-,097	,695

Tabla C.5 Valores estadísticos del ruido ambiental.

			Estadístico	Error típ.
Ruidos	Media		,3396	,04094
	Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior	,2572	
		Límite superior	,4221	
	Media recortada al 5%		,3047	
	Mediana		,2645	
	Varianza		,077	
	Desv. típ.		,27767	
	Mínimo		,06	
	Máximo		1,54	
	Rango		1,48	
	Amplitud intercuartil		,20	
	Asimetría		2,444	,350
	Curtosis		7,433	,688

Tabla C.6 Valores estadísticos de la duración del evento.

			Estadístico	Error típ.
Duracion	Media		11,5924	1,18796
	Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior	9,1997	
		Límite superior	13,9851	
	Media recortada al 5%		10,5668	
	Mediana		12,1400	
	Varianza		64,917	
	Desv. típ.		8,05711	
	Mínimo		2,07	
	Máximo		53,34	
	Rango		51,27	
	Amplitud intercuartil		5,41	
	Asimetría		3,380	,350
	Curtosis		16,231	,688

Normal gráfico Q-Q de Velocidad

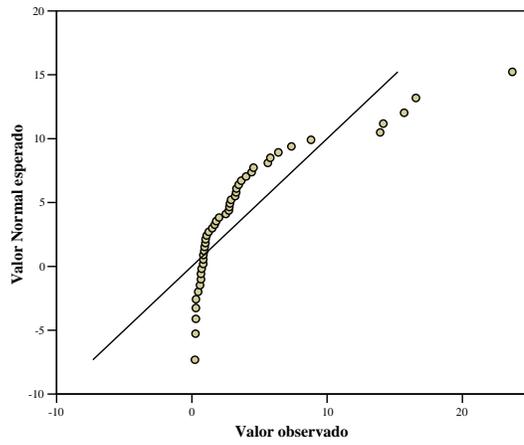


Figura C.1 Gráfico Q-Q de velocidad

Normal gráfico Q-Q de Frecuencia

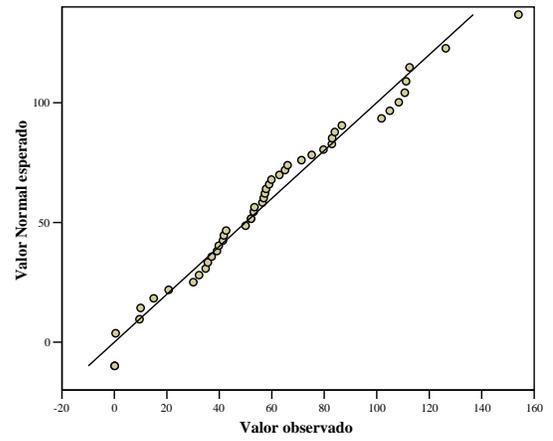


Figura C.2 Grafico Q-Q de frecuencia

Normal gráfico Q-Q de Distancia

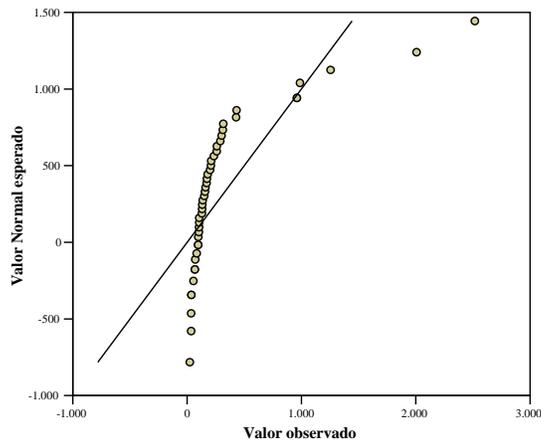


Figura C.3 Gráfico Q-Q de distancia

Normal gráfico Q-Q de Carga

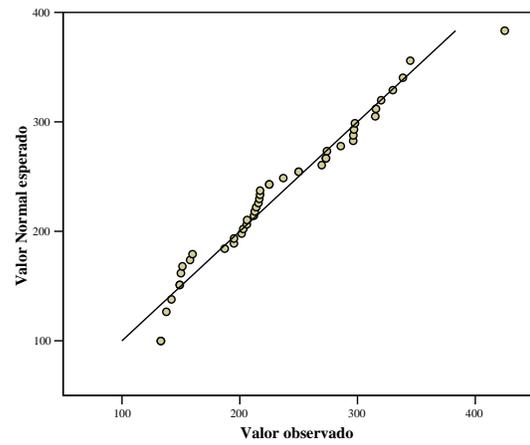


Figura C.4 Grafico Q-Q de carga

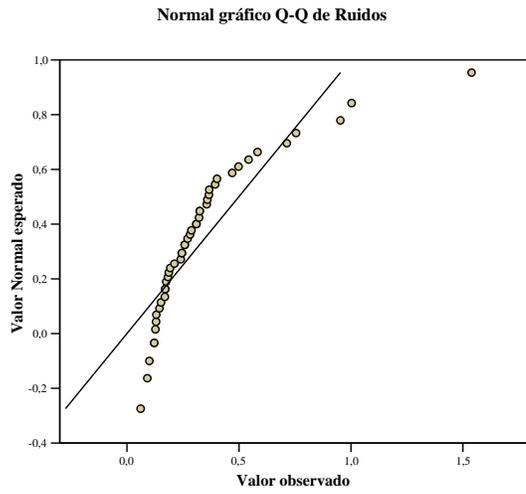


Figura C.5 Gráfico Q-Q de ruido

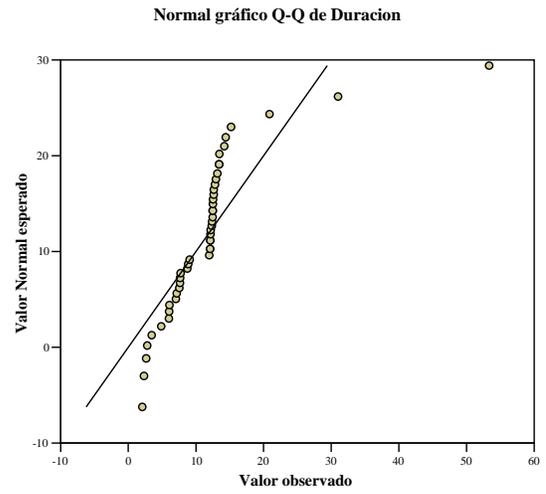


Figura C.6 Grafico Q-Q de duración

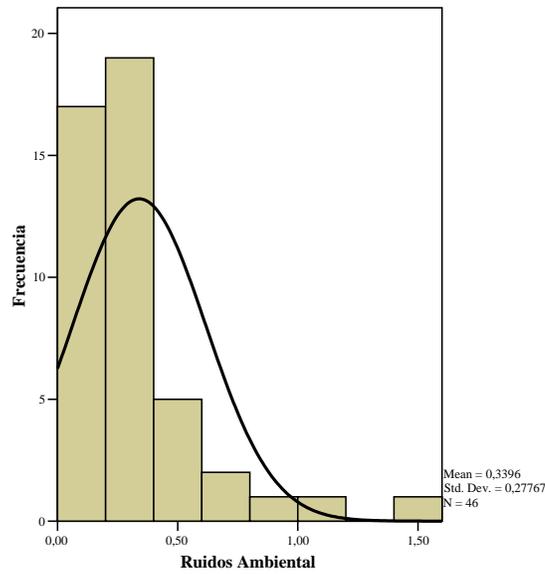


Figura C.7 Histograma de ruido

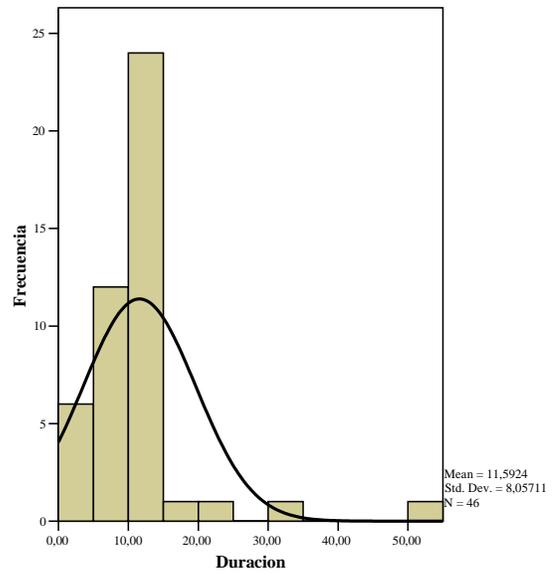


Figura C.8 Histograma de duración

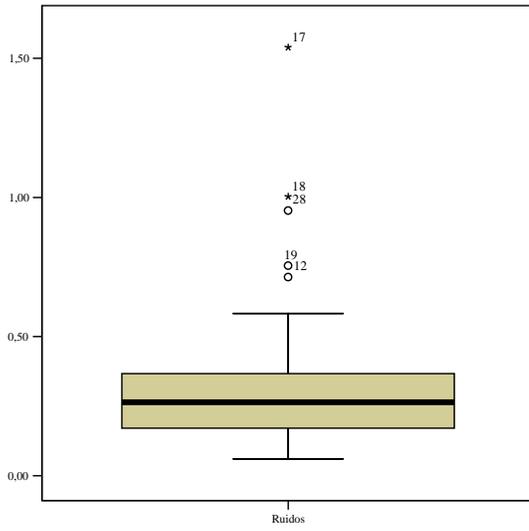


Figura C.7 Diagrama de caja de ruido

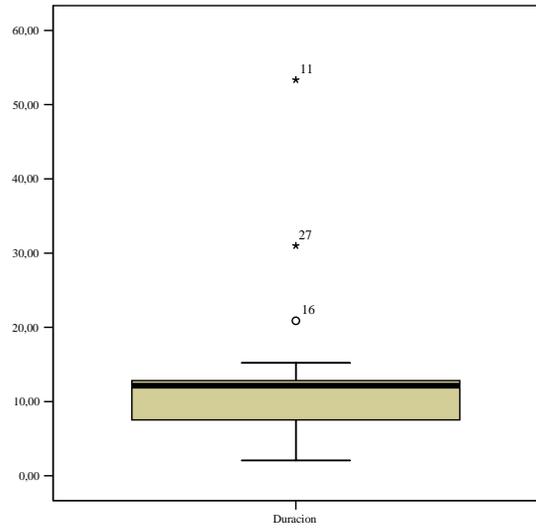


Figura C.8 Diagrama de caja de duración

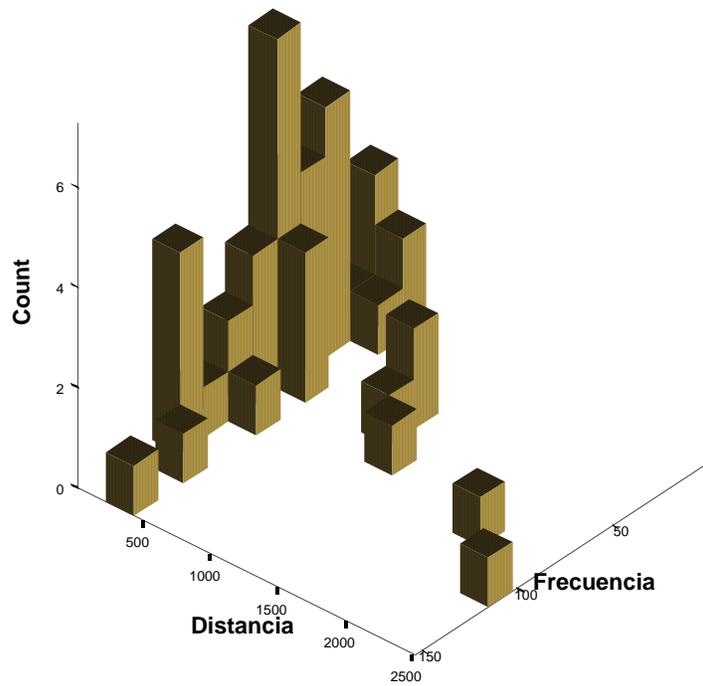


Figura C.9 Histograma combinado de frecuencia y distancia

## **APÉNDICE D**

Límite para valores de velocidad pico y frecuencia dominante por componentes de la norma alemana (DIN 4150/3)

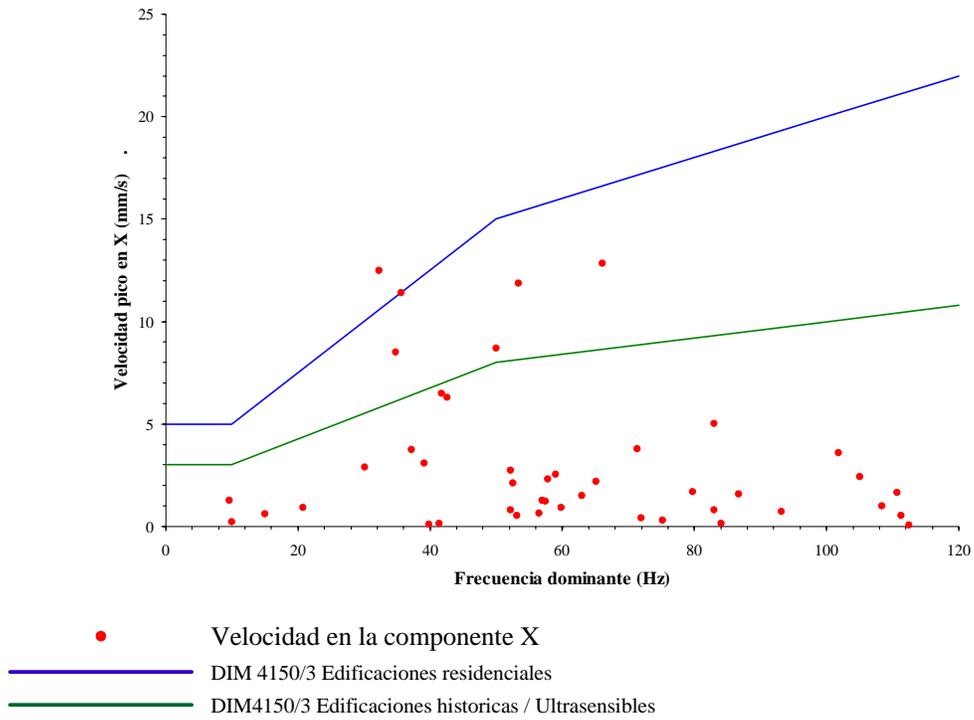


Figura D.1 Límite para valores de la velocidad en la componente X con su correspondiente frecuencia de la norma alemana (DIN 4150/3)

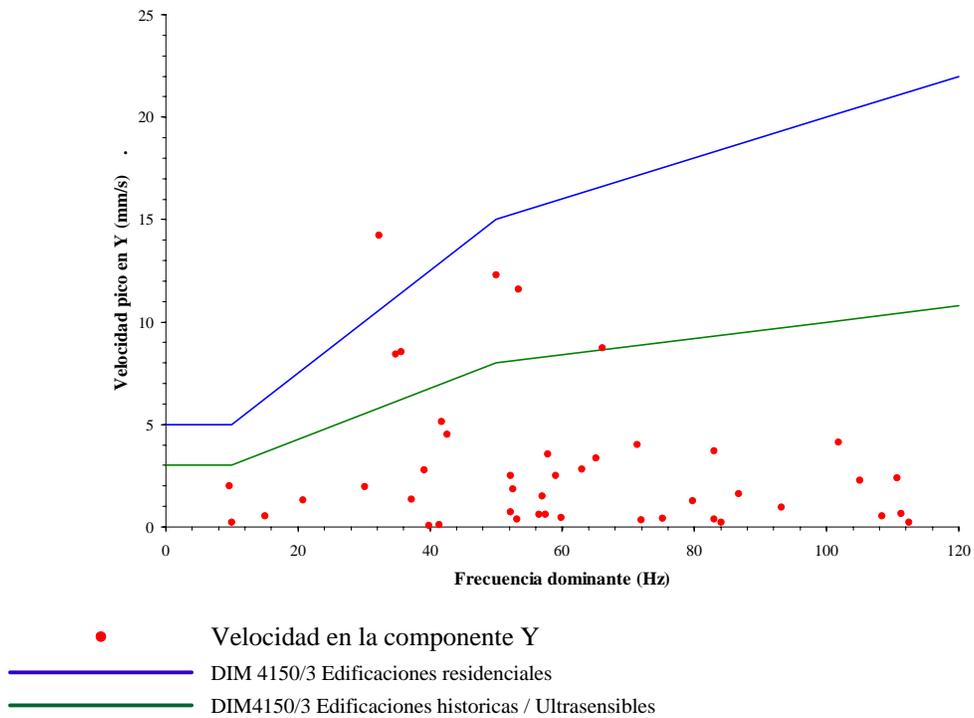


Figura D.2 Límite para valores de la velocidad en la componente Y con su correspondiente frecuencia de la norma alemana (DIN 4150/3)

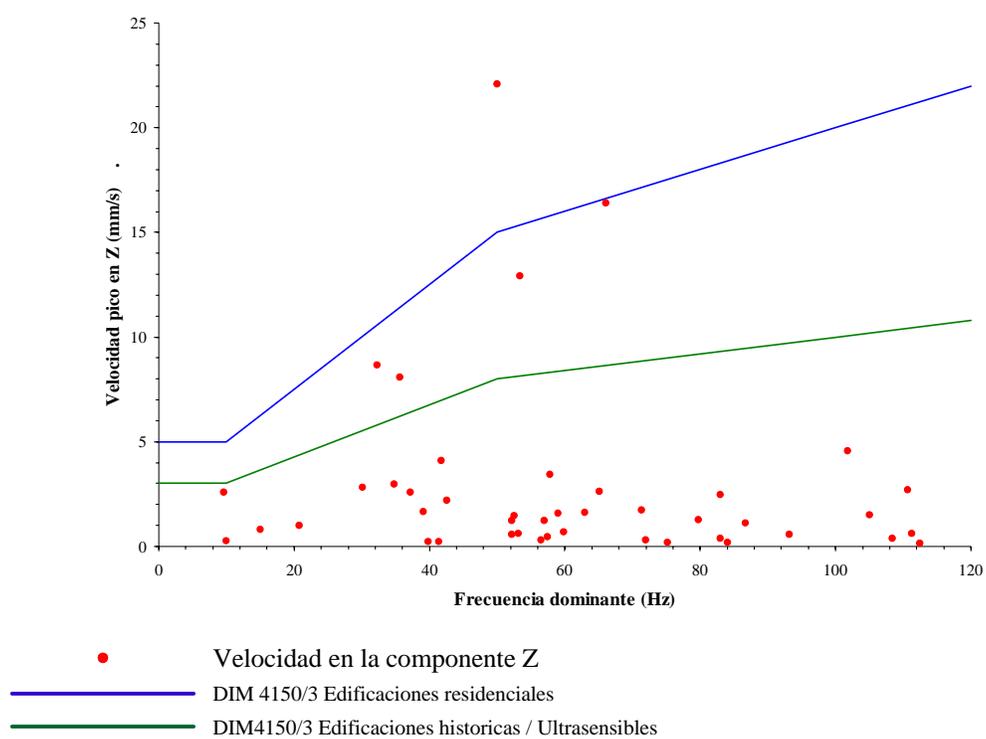


Figura D.2 Límite para valores de la velocidad en la componente Z con su correspondiente frecuencia de la norma alemana (DIN 4150/3)

## **APÉNDICE E**

Gráficas de afectación por vibración a humanos por componentes

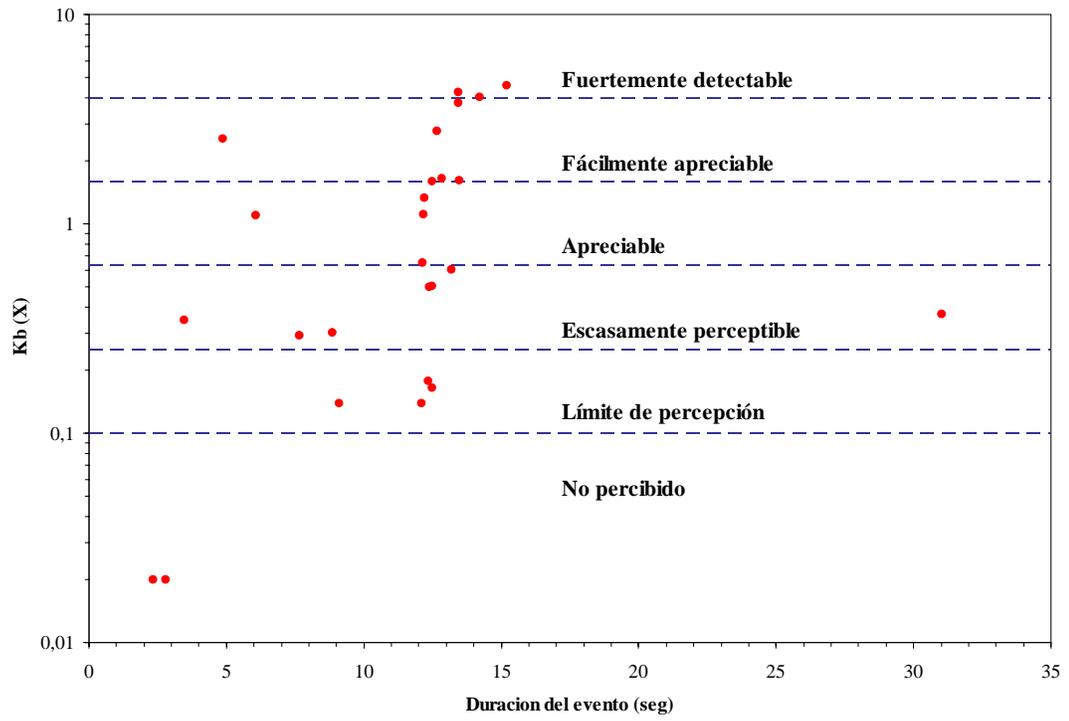


Figura E.1 Relación entre valores  $K_b(X)$  y la percepción humana de vibraciones

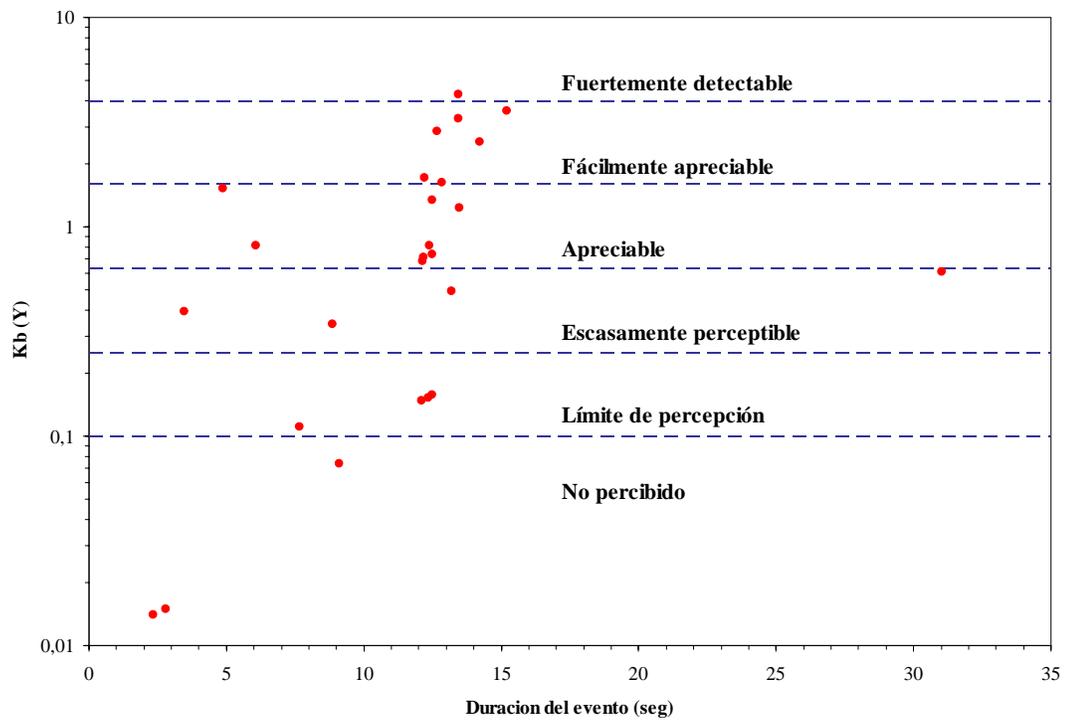


Figura E.2 Relación entre valores  $K_b(Y)$  y la percepción humana de vibraciones

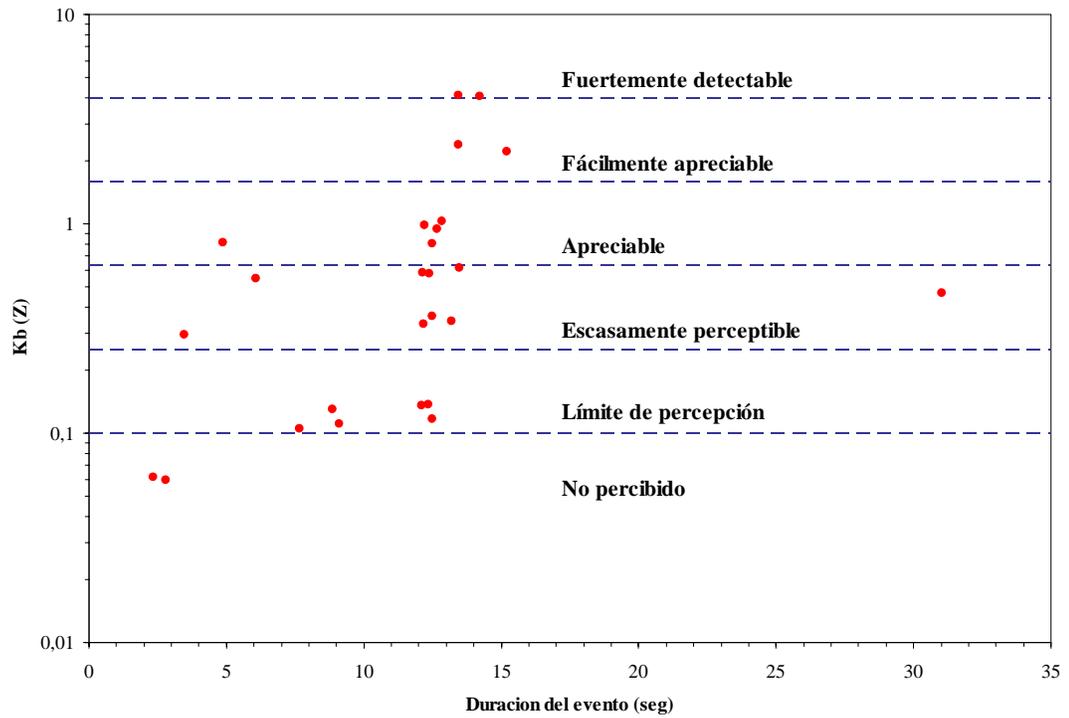


Figura E.3 Relación entre valores  $K_b(Z)$  y la percepción humana de vibraciones

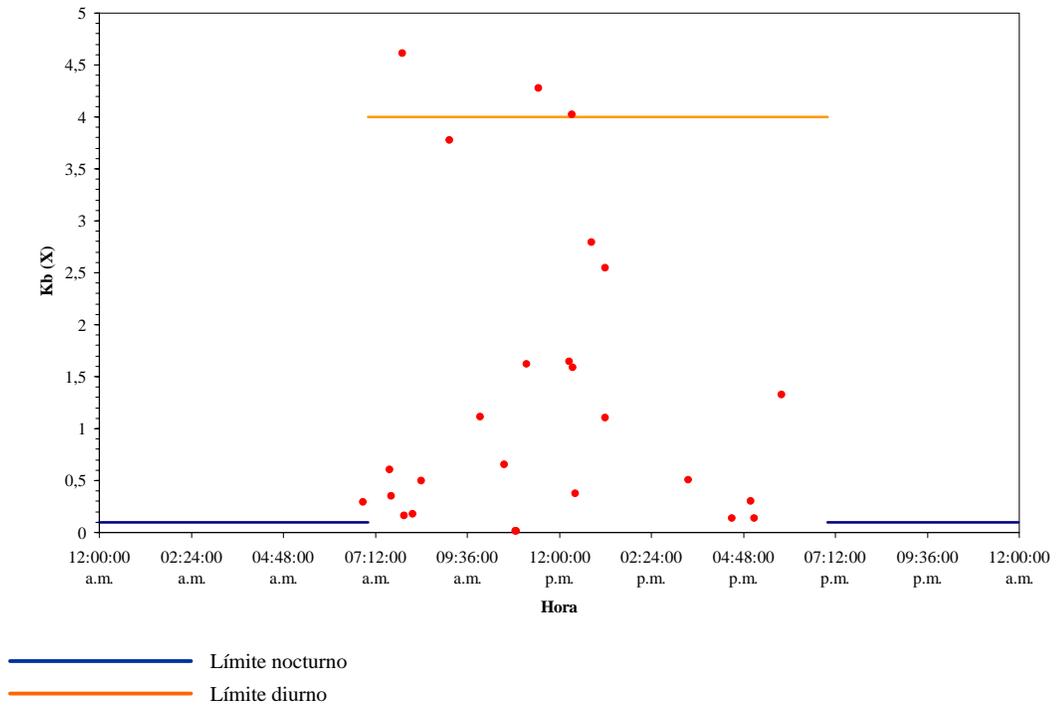


Figura E.5 Niveles sugeridos de vibración aceptable en zonas residenciales para valores de  $K_b(X)$

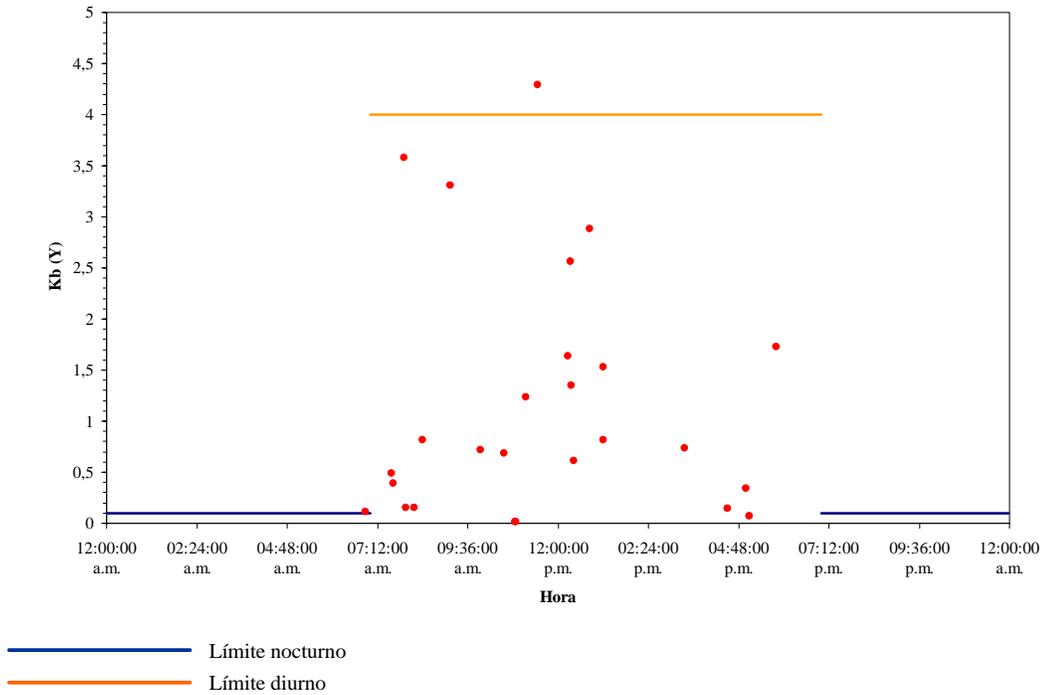


Figura E.5 Niveles sugeridos de vibración aceptable en zonas residenciales para valores de Kb(Y)

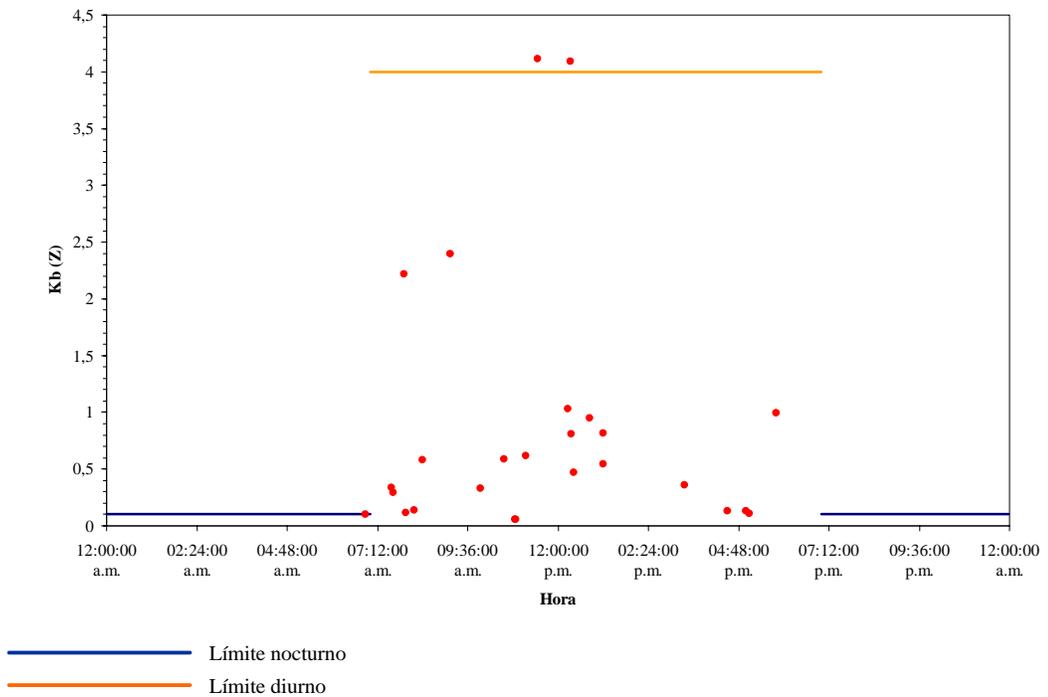


Figura E.5 Niveles sugeridos de vibración aceptable en zonas residenciales para valores de Kb(Y)

## **APÉNDICE F**

Transformada de Fourier y transformada rápida de Fourier

## F.1 La transformada de Fourier

La aplicación de las series de Fourier en el análisis de señales está restringida para señales periódicas. Además, la serie de Fourier sólo consideran armónicas múltiplos enteros. Debe agregarse que su evaluación computacional implica el cálculo de integrales trigonométricas, lo que hace que las series de Fourier sean de alta demanda computacional.

Para una función  $f(t)$ , se define la función  $F(j\omega)$  llamada Transformada de Fourier. Continua como:

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot \varepsilon^{-j\omega t} dt \quad (\text{F.1})$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) \cdot \varepsilon^{j\omega t} dt \quad (\text{F.2})$$

La señal  $f(t)$  es representada como una sumatoria de señales exponenciales complejas, en forma semejante a su representación en series trigonométricas de Fourier. Los coeficientes  $F(j\omega)$  se calculan similarmente a los coeficientes de la serie de Fourier trigonométrica.

La función compleja  $F(j\omega)$  puede representarse en forma polar con una función "Espectro de Amplitud" (módulo) y una función "Espectro de Fase" (ángulo). El espectro de amplitud es una función par y el espectro de fase es una función impar de la frecuencia. Se define una señal de banda limitada cuando esta señal contiene componentes de frecuencia en un rango limitado, como es el caso de una señal filtrada idealmente.

## F.2 La transformada de Fourier discreta

Definición: Para fines computacionales se utiliza:

- Espectro de frecuencias discreto (líneas espectrales muestreadas en frecuencia).
- Muestras de una señal en tiempos discretos.

Para estos efectos se usa la versión discreta de la Transformada de Fourier de una señal  $x(t)$  definida como:

$$X(f_k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(t_n) W^{kn} \quad (\text{F.3})$$

$$X(t_n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(f_k) W^{-kn} \quad (\text{F.4})$$

Donde:

$$W = e^{-j2\pi n}$$

N= Número de muestras

### F.3 Transformada rápida de Fourier (FFT)

La forma compacta de la Transformada de Fourier Discreta es:

$$X(f_k) = (1/N) \sum_{n=0}^{N-1} W^{kn} x(t_n) \quad (\text{F.5})$$

Donde:

$X(f_k)$ : Vector de N componentes

$W^{kn}$ : Matriz de dimensión N\*N

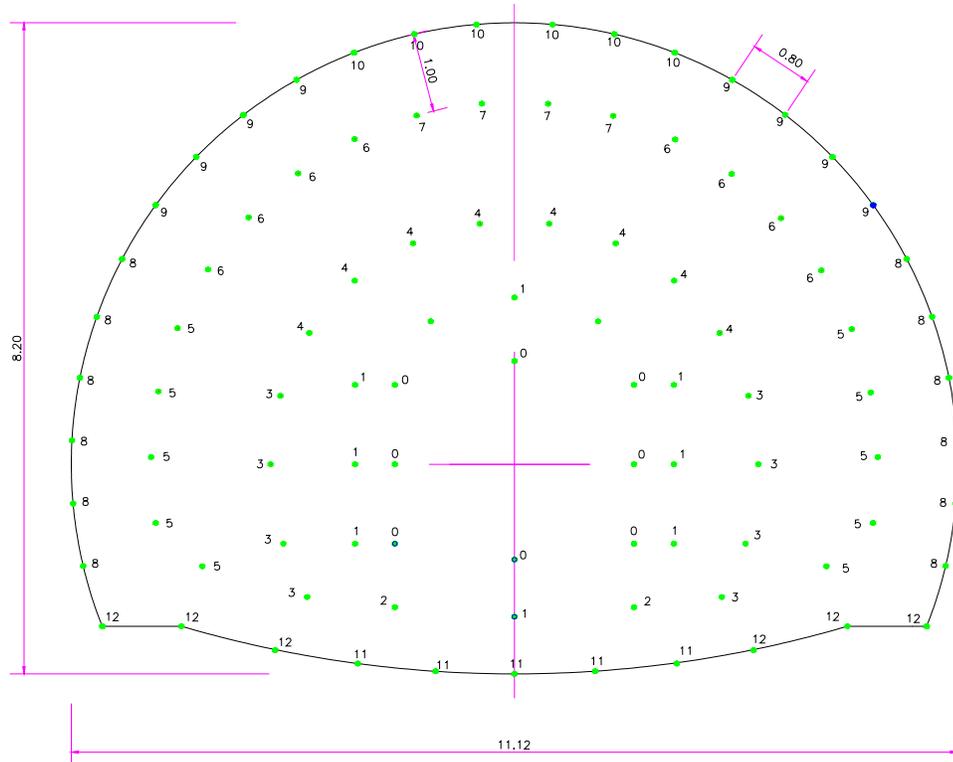
$x(t_n)$ : Vector de N elementos

La FFT es un algoritmo que permite la determinación computacional de la Transformada Discreta de Fourier usando sólo  $(N/2)\log_2(N)$  multiplicaciones en vez de  $N \cdot N$  multiplicaciones, lo que para el caso de  $N=1024$  representa un factor de 200 en el ahorro de tiempo computacional

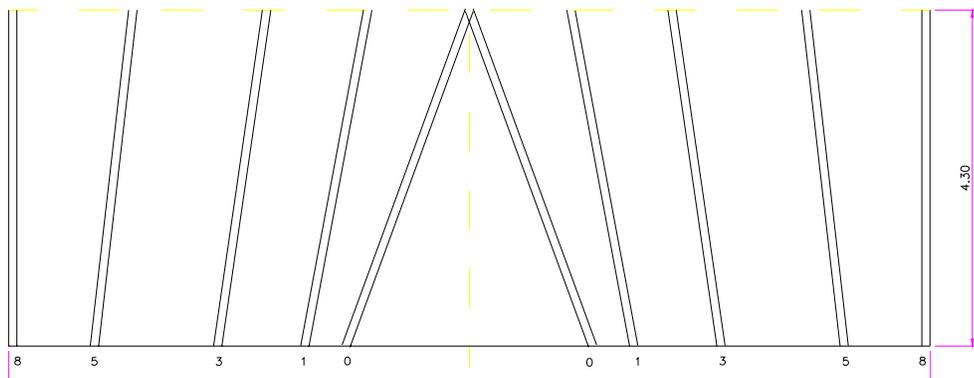
**APÉNDICE G**  
Patrón de Voladura

Para la ejecución de las obras del metro Los Teques, en el Túnel Carrizalito y para los días en que se efectuaron las mediciones, según ASTALDI S.P.A. se utilizaron dos tipos de patrón de voladura en donde se puede observar su diagrama a continuación (Facilitados por ASTALDI, S.P.A.).

**G.1 INT-AS-017 R0(AT-01)**



**Figura G.1 Esquema barrenos y posición cargas al frente del túnel (ASTALDI S.P.A.)**



**Figura G.2 Sección barrenos al frente del túnel (ASTALDI S.P.A.)**

G.2 INT-AS-095 R0(AT-03)

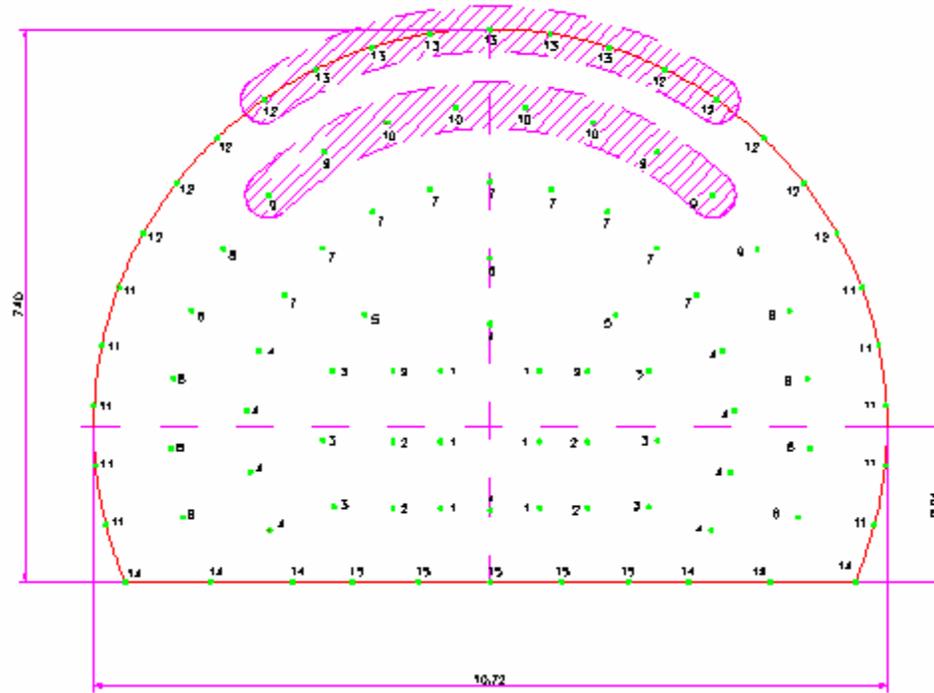


Figura G.3 Esquema barrenos y posición cargas al frente del túnel (ASTALDI S.P.A.)

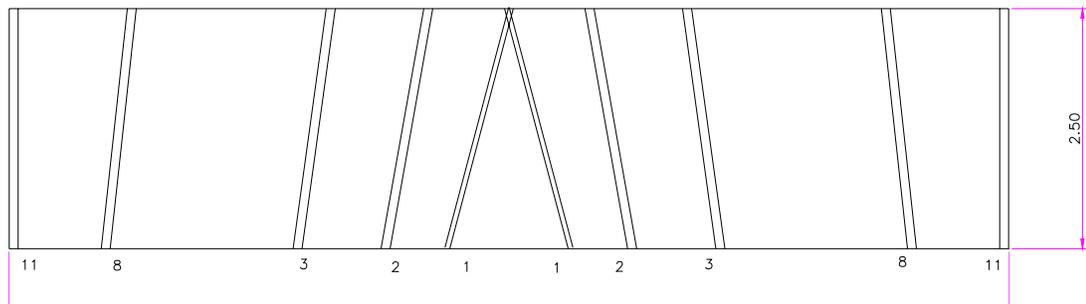


Figura G.4 Sección barrenos al frente del túnel (ASTALDI S.P.A.)