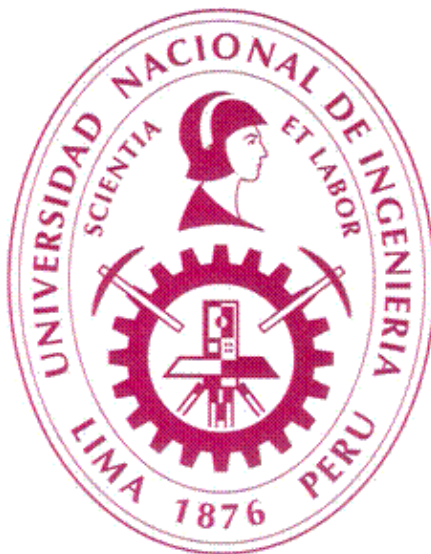


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLOGICA, MINERA Y METALURGICA



“CONTROL DE VIBRACIONES PARA CASAS DE TIERRA EN PERU”

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE MINAS

PRESENTADO POR:

GIRALDO IRIARTE, FERNANDO ALBERTO

LIMA, PERÚ

2010

DEDICATORIA

A mis padres, a mi hermano y a toda mi familia

Por apoyarme siempre y empujarme a realizar

la tesis,

AGRADECIMIENTO

A los Ing. Arturo Salvador y Ing. Carmen Matos, asesores de este proyecto, al Ing. Juan Giraldo, quienes apoyaron y aportaron tiempo para discusiones y correcciones de esta tesis.

Al Ing. Guillermo Giraldo y otros más quienes proveyeron información para la elaboración de este proyecto.

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

RESUMEN

La presente tesis es un trabajo realizado en el transcurso de un tiempo para lograr el entendimiento de las constantes quejas de las poblaciones aledañas a las mineras con respecto a la destrucción o fisuramiento de sus viviendas debido al efecto de las vibraciones generadas por las voladuras.

El proyecto se empezara mediante el estudio del entorno rural de la unidad minera, identificando en tipo de vivienda existente en la zona, así como un análisis estructural de las casas con peligro de daño por voladura. Así mediante el estudio de las viviendas se podrá determinar el nivel de vibración y de frecuencia que produciría algún daño en la propiedad. Este objetivo propuesto tuvo como resultados el análisis del tipo de casas de tierra, de los cuales se hicieron análisis tanto con simulación como con los programas de análisis estructurales. Los resultados obtenidos nos demostraron que los niveles de vibración deberían estar por debajo de los 5.25 mm/s y que la frecuencia de resonancia de estas viviendas es de 7 – 14 Hz en promedio, y que frecuencias menores a estas a pesar de no ser dañinas para las casas si son tomadas con mas temor por la población por el movimiento que causan a sus objetos. Por lo que se llego a la conclusión de que

se tenían que lograr vibraciones mayores a las de 14 Hz para evitar problemas con las poblaciones.

Interpretar en qué punto se encuentra los estudios de control de vibraciones en estructuras a escala mundial en cuanto al manejo de la información de vibraciones y las normatividades sobre las vibraciones producidas por la actividad humana. Estos estudios nos demuestran que para el tipo de casas de tierra no ha habido estudios importantes en el tema de control de vibraciones, siendo Colombia el país más avanzado al respecto por el alto grado de viviendas de ese tipo que hay en la zona.

Las casas del tipo tierra (Adobe y Tapial) tienen problemas en el tema de control de sismos y voladuras. Por lo que en el tema de vibraciones se debe actuar con mucho cuidado y seguridad para evitar la fisuración de estas.

El siguiente paso es el de monitorear las vibraciones de las voladuras mas cercanas a las zonas habitadas para ello se deben de realizar mediciones de vibraciones producidas por voladuras en la minera y realizar un modelo de vibraciones en campo lejano para poder estimar las vibraciones generadas por las voladuras y llegar a una relación de vibración vs Explosivo Usado. Estos datos nos arrojaron valores de vibraciones en la mayoría de los casos por debajo a los 5 mm/s y con frecuencias del orden de 1-5 Hz lo cual nos demuestra la imposibilidad de daño a las viviendas por encontrarse por debajo del umbral de daño. Sin embargo las frecuencias obtenidos nos demuestran que las voladuras si son detectadas y percibidas por los pobladores alertando a la población y pudiendo causar temor sobre sus viviendas. Lo mejor en estos casos seria una política de comunicación y explicación a la gente de la imposibilidad de daño a sus propiedades.

La velocidad de Onda P calculada de forma teórica y practica (rango de 1700 m/s a 2100 m/s) nos muestra que la zona de La Quinoa es una zona de roca entre suave a media y con gran numero de fallas y fracturas que nos indica que la vibración se mitiga bastante por el paso por todos esos lados.

El siguiente paso es el del Modelamiento de las vibraciones para lograr reducir aun mas las vibraciones producidas en el tajo, esto se lograr mediante el uso de la onda elemental para evitar los acoplamiento de taladros lo cual reducía enormemente la vibraciones al tener en muchas voladuras acoplamiento de las de cuatro taladros simultáneos lo cual aumenta enormemente los niveles de vibración y son responsables de los picos de velocidad que se tenían en los registros. Los registros demostraron que el mayor acoplamiento de taladros era al 33% de la longitud de la onda elemental, por lo que se recomendó pasar de los tiempos de 25 ms a los tiempos de 13 ms a 17 ms, estos tiempos evitaban el acoplamiento de cargas, mientras que el de 25 ms aumentaba tal acoplamiento.

INDICE

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	ii
RESUMEN.....	iii
INDICE	vii
INTRODUCCION01
CAPITULO I	
GENERALIDADES06
1.1 DEFINICION DEL PROBLEMA06
1.2 OBJETIVOS08
1.2.1 Objetivos Generales08
1.2.2 Objetivos Específicos.....	.08
CAPITULO II	

MARCO TEÓRICO Y LEGAL.....	10
2.1 GENERALIDADES TEÓRICAS.....	10
2.1.1 Ondas Primarias o Longitudinales “P”	11
2.1.2 Ondas Secundarias y Transversales “S”	13
2.1.3 Ondas Superficiales.....	13
2.2 PARÁMETROS DE ONDA SINUSOIDAL.....	15
2.3 MODELOS DE VELOCIDAD DE PARTÍCULA	18
2.3.1 Modelos de Campo Lejano “DEVINE”	19
2.3.2 Modelo de Campo Cercano “HOLMBERG & PERSSON.....	21
2.4 CRITERIO DE LA VELOCIDAD DE PARTÍCULA CRÍTICA	23
2.5 PROPIEDADES DE FRECUENCIA Y TIEMPO DE VOLADURAS	25
2.6 DAÑO Y RESPUESTA DE LAS ESTRUCTURAS	26
2.7 DIFERENCIACIÓN DE LAS VOLADURAS CON OTRAS FUENTES GENERADORAS	30
CAPITULO III:	
NORMATIVAS PARA EL CONTROL DE VIBRACIONES	32
3.1 ASPECTOS BÁSICOS.....	33
3.2 NORMATIVAS INTERNACIONALES.....	37
3.2.1. Normas de la Comunidad Europea	40
a). Norma UNE 22.381.93	40
b). Normativa Alemana DIN4150.....	45
c). Normativa Sueca SN640312.....	49

d). Normativa Sueca SS 48 66 1991	50
e). Directriz Alemana	51
f). Norma Suiza SN640 315 ^a	52
g). Normativa ISO 4866	54
h). Criterios Psicológicos	57
i). Normativa DIN4150 Parte 2	62
j). Normativa ISO 2631-1 y ISO 2631-2	64
3.2.2. Normativas Americanas	66
a). United States Bureau of Mines (USBM)	66
b). Office of Surface Mining (OSM)	68
3.2.3 Normativas Peruanas de Vibraciones	70
a). Guía Ambiental para P&V	70
b). Velocidad Máxima Partícula Pico	70
c). Ecuación de Distancia a escala	71

CAPITULO IV:

MÉTODOLOGIA DE MEDICION	73
4.1 MATERIALES Y EQUIPOS USADOS	73
4.1.1 Instrumentación para el Monitoreo de Vibraciones	73
4.1.2 Tipos de Sensores (Transductores)	74
4.1.3 Instalación de Sensores	75
4.1.4 Numero de Sensores	75

4.1.5 Tipos de Sensores (transductores).....	76
4.1.6 Sensibilidad de Geófonos.....	78
4.1.7 Interpretación de Signos (+,-)	78
4.1.8 Modo de Funcionamiento de los Geófonos Instantel.....	79
a). Transductor	79
b). Operación Geófono.....	79
c). Transductor Estándar de Instantel.....	81
4.1.9 Instalación de Orientación de Geófonos	81
4.2 EQUIPOS Y SISMÓGRAFOS USADOS	82
CAPITULO V:	
ANÁLISIS DE CRITERIO DE DAÑO DE CASAS.....	84
5.1 COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE UNA CASA TAPIAL.....	87
5.1.1 Prueba de Simulación Sísmica de una Casa Tapial	89
a). Equipo Usado	89
b). Instrumentación	92
c). Resultados Obtenidos.....	93
5.2 ANÁLISIS SÍSMICO – ESTRUCTURAL.....	96
5.2.1 Análisis Sísmico de una Vivienda de Tapial de 1 Piso.....	96
a). Análisis Sísmico.....	97

5.2.2 Análisis Sísmico de una Vivienda de Tapial de 2 Piso.....	102
a). Análisis Sísmico.....	103
5.2.3 Análisis Sísmico de una Vivienda de Adobe de 1 Piso	107
a). Análisis Sísmico.....	108
5.2.4 Análisis Sísmico de una Vivienda de Adobe de 2 Piso	112
a). Análisis Sísmico.....	113
CAPITULO VI:	
LÍMITES PERMISIBLES DE VIBRACIONES POR VOLADURA.....	119
6.1 VALORES REPRESENTATIVOS DE LAS NORMAS NACIONALES E INTERNACIONALES	126
6.1.1 Valores de la Norma Peruana.....	126
6.1.2 Valores de las Normas Internacionales.....	127
a) V.R Norma UNE 22.381.93.....	127
b) V.R de la Norma DIN4150 Alemana.....	128
c) V.R Normativa Sueca SN640312	129
d) V.R Normativa Sueca SS460 48 66.....	130
e) V.R Directriz Alemana KDT 046/72	131
f) V.R Normativa ISO 4866.....	132
g) V.R Norma Suiza Sn 640 312a.....	132

h) V.R Normativa Americana (USBM)	133
i) V.R Office Surface Mining (OSM)	134
6.2 ANALISIS DE LIMITES PERMISIBLES VS VALORES DE LAS NORMAS.....	135
6.2.1 Análisis de la Norma Peruana vs. Datos de Análisis Sísmico	136
6.2.2 Análisis de las Normas Internacionales vs. Datos de Análisis Sísmico	137
CAPITULO VII:	
MONITOREO EN CAMPO DE LA FRECUENCIA DE RESONANCIA	141
7.1. COLECCIÓN Y ANÁLISIS DE DATA	146
CAPITULO VIII	
LUGAR DE PRUEBAS.....	156
8.1 UBICACIÓN	156
8.2 GEOLOGÍA	158
8.2.1 Geología Regional.....	158
8.2.2 Geología Estructural.....	158
8.2.3 Geología Local – La Quinoa	159
8.2.4 Análisis Geológico y Estructural de la zona de Quishuar.....	162
CAPITULO IX	

MONITOREO DE VIBRACIONES EN LA QUINUA	166
9.1 PLAN DE MONITOREO DE VOLADURAS DEL TAJO LA QUINUA ...	166
9.2 CALCULO DE LA VELOCIDAD DE ONDA P – TEÓRICA	167
9.3 RECOPIACIÓN DE DATOS – UBICACIÓN DE GEÓFONOS	171
9.4.RESULTADOS MONITOREO DE VIBRACIONES.....	174
CAPITULO X	
ANÁLISIS DE VIBRACION	176
10.1 DIAGRAMA DE CORRELACIÓN Y DISPERSIÓN	176
10.2 CREACIÓN DEL MODELO DE VIBRACIONES DE CAMPO LEJANO	179
10.3 GENERACIÓN DEL MODELO PREDICTIVO	180
10.4 EL ESCALADOR.....	180
CAPITULO XI:	
OPTIMIZACIÓN DE MODELO PREDICTIVO.....	188
11.1 PRUEBAS DE VIBRACIONES	188
11.2 PRUEBA 01. DETONACIÓN DE CARGA INDIVIDUAL.....	190
11.3. DISEÑO DE VOLADURA DE PRODUCCIÓN.....	190
11.4 DISEÑO DE CARGUIO	191

11.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	194
11.5.1 Distancia de 50m. Sismógrafo 01	194
a) Eje Transversal.....	194
b) Eje Vertical	195
c) Eje Longitudinal.....	196
d) Vector Suma de Vibraciones	197
11.5.2 Distancia de 80 m. Sismógrafo 02	198
a) Eje Transversal.....	198
b) Eje Vertical	199
c) Eje Longitudinal.....	200
d) Vector Suma de Vibraciones	201
11.5.3 Distancia de 800 m. Sismógrafo 03	202
a) Eje Transversal.....	202
b) Eje Vertical	203
c) Eje Longitudinal.....	204
d) Vector Suma de Vibraciones	205
11.6 MODELO DE DEVINE DE CARGAS INDIVIDUALES	206
11.7 PREDICCIÓN DEL NIVEL DE VIBRACIÓN POR VOLADURAS	208
11.8 SELECCIÓN DE RETARDOS POR ONDA ELEMENTAL	210
11.9 CALCULO DE ONDA P PRACTICA	212

11.9.1 Técnica de Cross Hole	213
11.9.2 Aplicación de la Técnica de Cross Hole	214
11.10 SIMULACIÓN DE LA VOLADURA POR ONDA ELEMENTAL	219
11.10.1 Tiempos Críticos de Acoplamiento.....	224
a). Eje Transversal.....	226
b). Eje Vertical	228
c). Eje Longitudinal.....	230
CAPITULO XII	
CONCLUSIONES	233
CAPITULO XIII	
RECOMENDACIONES	237
CAPITULO XIV BIBLIOGRAFIA.....	
ANEXOS	243
ANEXO I,	
INSPECCIONES PREVIAS A LAS VOLADURAS.....	244
ANEXO II.	
CASAS ANALIZADAS MEDIANTE LA SIMULACIÓN SÍSMICA	245
ANEXO III.	

TIPOS DE FALLA Y AGRIETAMIENTO POR EVENTOS DE VOLADURAS 251

ANEXO IV.

REGISTROS DE BLASTWARE DE LOS MONITOREOS DE FRECUENCIAS
DE RESONANCIA REALIZADOS EN CASAS DE TAPIAL.....252

ANEXO V.

REGISTROS DE VIBRACIONES DE LAS VOLADURAS EN CAMPO
LEJANO.....260

ANEXO VI.

INFORME GEOLÓGICO – CASA SEÑOR JUAN VILLANUEVA-
QUISHUAR263

ANEXO VII.

CARACTERÍSTICAS DE LOS GEOFONOS DE CAMPO CERCANO Y
LEJANO.....269

INTRODUCCION

En la actualidad las Empresas Mineras del Perú y el mundo poseen en su mayoría sus operaciones en las cercanías a las ciudades o poblados, la mayoría de empresas mineras posee en sus perímetros algún poblado o una casa. En nuestro país, gran parte de la minería superficial tiene que afrontar debido a esta situación, demandas y protestas de los dueños de estas casas por daños tanto materiales como de salud (Auditiva) debido a la actividad minera cercana.

En los últimos años estas demandas han causado graves daños a la imagen de la minería, una imagen que se ha estado intentando cambiar durante mucho tiempo pero que debido a estos problemas en muchos lugares sigue siendo considerada como depredadora y dañina para sus vecinos.

Se ve en este problema también la falta de bibliografía por parte de las mineras establecidas en estas zonas para poder verificar que efectivamente sus operaciones no causan daño a su entorno rural; esto es al tener que guiarse de normativas

desarrolladas por diferentes países que no cuentan con el tipo de vivienda que se tiene en estas zonas, por lo que sus normativas son de difícil aplicación en esta parte del continente.

Para saber cómo actuar antes estos problemas, los mineros debemos entender que el proceso de voladura se basa en la liberación de la energía del explosivo, causando la fragmentación de la roca circundante, pero también esta liberación de energía genera una serie de ondas de esfuerzo que se desplazan por la corteza terrestre y una onda de choque generada en el aire. Las ondas internas que viajan por el suelo van acompañadas de ondas superficiales que parten del mismo punto de la perturbación y que se van diferenciando en la medida que los frentes de onda se van alejando de la fuente, debido principalmente a las diferentes velocidades de propagación y los diferentes periodos de vibración.

Durante su viaje las ondas mueven las partículas del medio que recorren produciendo sobre éstas velocidades, desplazamientos y aceleraciones que se pueden registrar en los aparatos destinados para este fin. Los registros de desplazamiento, velocidad y aceleración de partículas generados por las voladuras tienen tres características primordiales: la amplitud, el contenido frecuencial y la duración. La amplitud depende de la cantidad de material detonado y de la distancia al punto de registro, el contenido frecuencial depende de la fuente de perturbación y del camino recorrido y por último, la duración depende de la cantidad de material detonado y de la distancia entre la detonación y el punto de registro (Sarria, 2004).

Entendiendo esto, debemos ver los dos problemas principales que se intentaran resolver en el presente proyecto. El primero es encontrar una norma para las casas de tipo tapial, para saber cuales son los límites de vibración que puede soportar una estructura de este tipo. La segunda etapa es analizar las vibraciones generadas por la empresa minera, así como los métodos que podemos aplicar para su mitigación y control. Así observamos que estas vibraciones de causa humana requieren otro tipo de enfoque en su evaluación y control que las causadas por sismos, por varias razones:

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

Así tenido un claro planteamiento del problema recién podemos pasar a la parte de ver como se realizaría el proyecto.

El proyecto se empezara mediante el estudio del entorno rural de la unidad minera, identificando en tipo de vivienda existente en la zona, así como un análisis estructural de las casas con peligro de daño por voladura. Así mediante el estudio de las viviendas se podrá determinar el nivel de vibración y de frecuencia que produciría algún daño en la propiedad.

Se empezara mostrando de esta forma cuales son las normativas usadas en la actualidad y cuál es la norma a la que se llega con los análisis hechos a las viviendas. Con base en lo anterior para realizar un estudio del efecto de las vibraciones sobre las construcciones se deben tener en cuenta las siguientes actividades.

- Definición de límites para evitar daño en sistemas estructurales de acuerdo con los referentes internacionales.
- Medición de los movimientos del terreno producidos por las voladuras en las proximidades de las estructuras.
- Modelación dinámica de los sistemas estructurales que permitan establecer la respuesta estructural dinámica ante los desplazamientos del terreno. Esta modelación es posible realizarla mediante modelos simplificados de un grado de libertad o mediante análisis dinámicos más complejos (análisis modal espectral, análisis dinámicos lineales y no lineales, etc.) mediante técnicas numéricas como los elementos finitos.

La segunda parte del proyecto tratara de la operación de voladura, analizando los tipos de carguío y diseño utilizado. Mediante el monitoreo de las voladuras realizadas se podrá realizar un modelo de campo lejano (Devine - Duvall), que nos permitirá predecir el nivel de vibración de cada voladura que se desee programar.

De esta forma se podrá ver hasta qué nivel de vibración se podrá generar sin provocar daño a las viviendas de los pobladores logrando de esta forma una mejor

relación entre la comunidad y la minera. Como paso final para lograr optimizar el proceso minero se realizara pruebas para hallar la onda elemental producida por la carga más usada en la zona. Y se buscara recrear la voladura con los tiempos que se darían a la voladura para ver mediante la simulación de Montecarlo cual seria los retardos óptimos a usar que permitiría lograr estar dentro de los parámetros permisibles dados en la primera parte del proyecto, logrando realizar las voladuras requeridas sin causar problemas a las estructuras que se desean cautelar.

Siguiendo estos pasos se podrá determinar de mejor manera cuales son los niveles que se podrían considerar como límites permisibles para las voladuras en las zonas cercanas a las casas del tipo tapial, logrando de esta manera con la presente tesis, una bibliografía que podrá servir para las distintas unidades mineras que tengan en sus zonas de influencias casas de tipo tapial o tierra apisona.

CAPITULO I: GENERALIDADES

1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El proceso de la voladura es una actividad humana que genera vibraciones en el entorno donde se trabaja. Estas vibraciones en su mayoría pueden generar molestia y daño. El potencial de efectos perjudiciales depende de diversas características de estas vibraciones, o de su conjugación: amplitud, frecuencia, duración, cantidad de ocurrencias, etc. vs. Las propiedades de comportamiento dinámico de los sistemas que excitan (frecuencia de resonancia y resistencia, principalmente). En suma, es el sistema con las componentes fuente-suelo transmisor-estructura el que determina en conjunto el efecto del fenómeno vibratorio.

En general la Ingeniería de Minas es una carrera considerada como practica, por lo que generalmente no es factible – tiempo y costos- realizar evaluaciones

detalladas de los componentes a predecir, y así poder controlar los efectos de las vibraciones en el medio. Al igual que en el caso de los terremotos, se recurre entonces a leyes empíricas generalizadas, recomendaciones genéricas y normas para evaluar si las vibraciones generadas por actividad humana –y específicamente las causadas por voladuras– pueden tener efectos adversos sobre las estructuras.

Todas estas normas –hasta ahora– han sido elaboradas en países con condiciones de suelos y tipos de materiales y estructuras diferentes a las usuales en Perú; su aplicación local requiere entonces, como primer paso, un proceso de análisis de estas normas, al encontrar la factibilidad de uso de las normas se realiza el proceso de adaptación de ellas. En el caso de que estas normas no apliquen para el tipo de casa que hay en territorio peruano se deberá revisar los límites permisibles de vibraciones y generar una norma equivalente para el territorio nacional.

Tenemos que estudiar el tipo de estructura ubicada en territorio peruano, de las cuales el más débil y problemático por tener deficiencias en el tema de los sismos es el de las casas de tierra apisonada o del tipo tapial. Estas construcciones nos servirán de base para verificar y diseñar una norma adecuada para el Perú.

1,2. OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

- Analizar el campo de las vibraciones causadas por la actividad humana, principalmente respecto al tema de las voladuras, mediante el acoplo de análisis de la literatura técnica existente en el ámbito mundial. Ejemplarizar la problemática de la evaluación y control de sus efectos mediante la toma de análisis e interpretación de datos reales en condiciones locales para llegar a recomendaciones de procedimiento aplicables en la práctica de la Ingeniería en nuestro medio.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Interpretar en qué punto se encuentra los estudios de control de vibraciones en estructuras a escala mundial en cuanto al manejo de la información de vibraciones y las normatividades sobre las vibraciones producidas por la actividad humana.
- Realizar mediciones de vibraciones producidas por voladuras en la minera Yanacocha y realizar un modelo de vibraciones en campo lejano para poder estimar las vibraciones generadas por las voladuras y llegar a una relación de vibración vs Explosivo Usado.
- Generar un documento referente para las operaciones mineras que tengan en su perímetro casas del tipo de tierra apisonada o tapial para

conocer los límites permisibles de vibración y frecuencia para este tipo de estructuras.

- Investigar y establecer procedimientos de análisis de vibraciones generadas por voladuras.
- Presentar a las empresas mineras los pasos a seguir para lograr un buen control de las vibraciones en campo lejano producido por las voladuras realizadas.

CAPITULO II MARCO TEORICO Y LEGAL

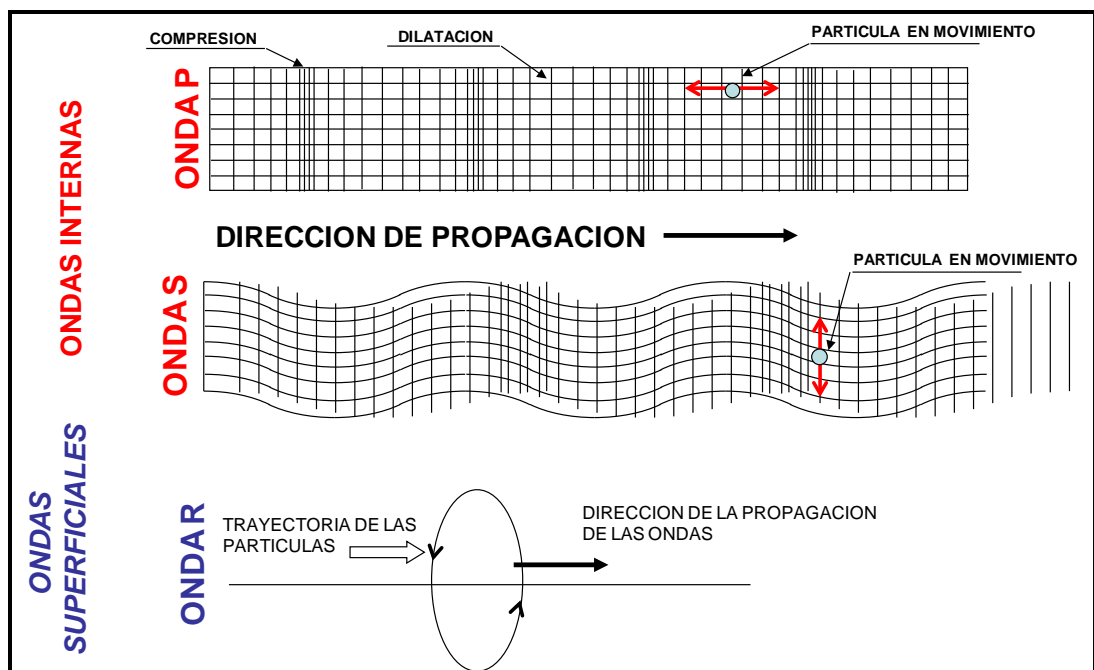
El marco teórico y legal que se dará a la presente parte será de la base preliminar que se necesita para realizar el estudio vibracional de una voladura por lo que dejaremos para más adelante lo que sería el tema de el estudio estructural (capítulo aparte) y las otras teorías que aplicaremos conforme la tesis vaya tomando forma con la finalidad principal de que el lector pueda seguir paso a paso como se fue desarrollando el presente proyecto de la misma forma en que fue concedido por el autor.

2.1 GENERALIDADES TEÓRICAS (ONDAS VIBRACIONALES)

Las vibraciones generadas por la voladura se transmiten a través del macizo rocoso como ondas sísmicas, cuyo frente se desplaza en forma radial a partir del punto de detonación, se clasifican en dos grupos: Ondas Internas y Ondas Superficiales. Así dentro de las ondas internas las más importantes son las Ondas

Longitudinales o Primarias “P” y las Transversales o Secundarias “S”, y dentro de las Superficiales las que se generan más comúnmente son las Ondas Love y las Ondas Rayleigh. A continuación damos una breve descripción de cada tipo de onda generada por la voladura.

FIGURA 01. ONDAS VIBACIONALES (ONDAS INTERNAS Y SUPERFICIALES)



Fuente: Libro de Vibraciones de EXSA

2.1.1 Ondas Primarias o Longitudinales “P”

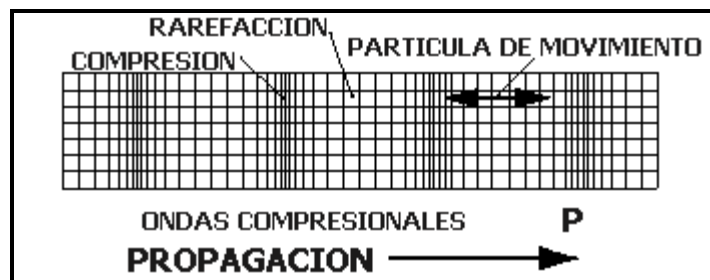
Las ondas P (PRIMARIAS O o PRIMAE) son ondas longitudinales o compresionales lo cual significa que el suelo es alternadamente comprimido y dilatado en la dirección de la propagación. Estas ondas generalmente viajan a una velocidad 1.73 veces de las ondas S y pueden viajar a través de cualquier tipo de

material líquido o sólido. Velocidades típicas son 1450m/s en el agua y cerca de 5000m/s en el granito.

En un medio isótropo y homogéneo la velocidad de propagación de las ondas P es:

FIGURA 02. ONDA PRIMARIA O LONGITUDINAL “P”

$$v_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}}$$



Fuente. Manual de Tronadura de Enaex. Año 2002

Donde K es el módulo de incompresibilidad, μ es el módulo de corte o rigidez y ρ la densidad del material a través del cual se propaga la onda mecánica. De estos tres parámetros, la densidad es la que presenta menor variación por lo que la velocidad está principalmente determinada por K y μ .

2.1.2 Ondas Secundarias y Transversales “S”

Las ondas S (SECUNDARIAS o *SECUNDAE*) son ondas en las cuales el desplazamiento es transversal a la dirección de propagación. Su velocidad es menor que la de las ondas primarias. Debido a ello, éstas aparecen en el terreno algo después que las primeras. Estas ondas son las que generan las oscilaciones durante el movimiento sísmico y las que producen la mayor parte de los daños. Sólo se trasladan a través de elementos sólidos.

La velocidad de propagación de las ondas S en medios isótropos y homogéneos depende del módulo de corte μ y de la densidad ρ del material.

FIGURA 03. ONDA SECUNDARIA O TRANSVERSAL “S”

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$



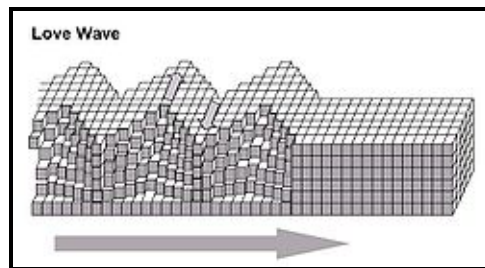
Fuente. Manual de Tronadura de Enaex. Año 2002

2.1.3 Ondas Superficiales

Onda de Tipo Love. Las ondas de Love son ondas superficiales que producen un movimiento horizontal de corte en superficie. Se denominan así en honor al

matemático neozelandés A.E.H. Love quien desarrolló un modelo matemático de estas ondas en 1911. La velocidad de las ondas Love es un 90% de la velocidad de las ondas S y es ligeramente superior a la velocidad de las ondas Rayleigh.

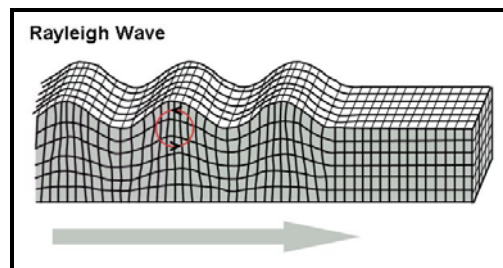
FIGURA 04. ONDA SUPERFICIALES O LOVE “L”



Fuente. Manual de Tronadura de Enaex. Año 2002

Ondas de Tipo Rayleigh. Las ondas Rayleigh, también denominadas *ground roll*, son ondas superficiales que producen un movimiento elíptico retrógrado del suelo. La existencia de estas ondas fue predicha por John William Strutt, Lord Rayleigh, en 1885. Son ondas más lentas que las ondas de cuerpo y su velocidad de propagación es casi un 70% de la velocidad de las ondas S.

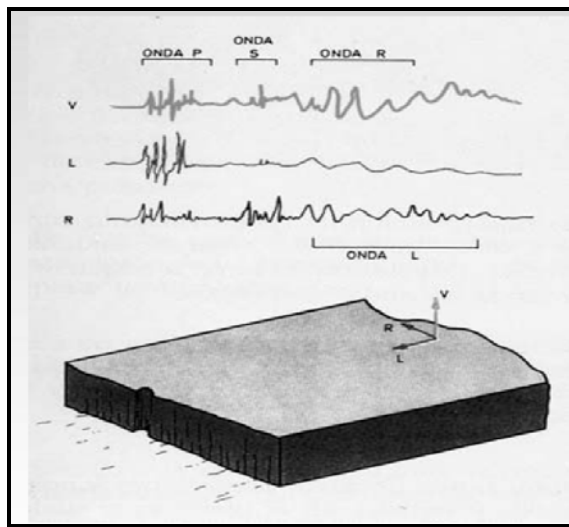
FIGURA 05. ONDAS SUPERFICIALES O WAVE “W”



Fuente. Manual de Tronadura de Enaex. Año 2002

En el grafico siguiente podemos observar en donde se muestran las ondas tanto las primeras y secundarias, como las superficiales. Mediante este grafico podremos analizar los registros obtenidos de las voladuras del modelo y de las pruebas de onda elemental.

FIGURA 06. ONDAS VIBRACIONALES



Fuente. Manual de Tronadura de Enaex. Año 2002

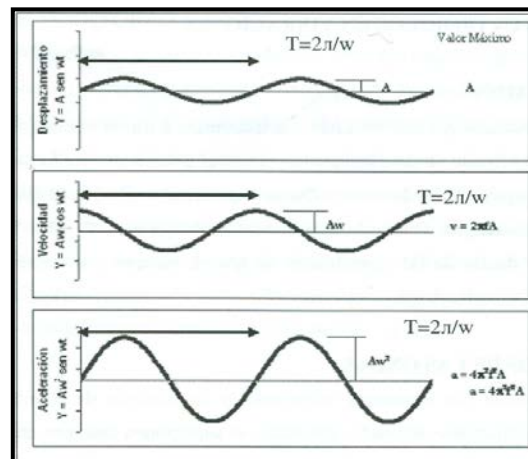
2.2 PARÁMETROS DE LA ONDA SINUSOIDAL

Como las ondas viajan con diferentes velocidades y los tiempos de retardo utilizados en la voladura varían ampliamente, las ondas generadas se superponen unas con otras en el tiempo y en el espacio (por condiciones geométricas y secuencia de iniciación), por lo que resultan movimientos complejos, para analizarlas se requiere la utilización de sensores dispuestos según tres direcciones: radial, transversal y vertical. El paso de una onda sísmica por un medio rocoso produce en cada punto de este un movimiento que se conoce por vibración. Una

simplificación para el estudio de las vibraciones generadas por las voladuras consiste en considerar estas como ondas de tipo sinusoidal.

A continuación se presente la siguiente figura, en donde se señalan los parámetros de una onda sinusoidal.

FIGURA 07. SIMPLIFICACIÓN DE UNA ONDA SÍSMICA COMO UN MOVIMIENTO ONDULATORIO SINUSOIDAL



Fuente. Manual de Tronadura de Enaex. Año 2002

Donde:

A: Amplitud (Desplazamiento máximo de un punto desde su posición de reposo.)

V: Velocidad de Partícula (Velocidad a la que se desplaza el punto).

a : Aceleración (Ritmo de cambio de velocidad).

f : Frecuencia (Numero completo de oscilaciones o ciclos por segundo).

T: Periodo (Inverso de la Frecuencia).

Matemáticamente el desplazamiento “y” en cualquier instante equivale a:

$$y = A * \text{sen}(\omega * t)$$

Siendo:

$$\omega = 2\pi * f = 2\pi * \left(\frac{1}{T}\right)$$

La longitud de la onda “λ” para una velocidad de Propagación “Vc” es:

$$\lambda = Vc * T = Vc * \left(\frac{1}{f}\right)$$

Las relaciones entre el desplazamiento, la velocidad y la aceleración de partícula son:

$$y = A * \text{sen}(\omega * t)$$

$$v = \frac{dy}{dt} = A * \omega * \text{cos}(\omega * t)$$

$$a = \frac{dv}{dt} = -A * \omega^2 * \text{sen}(\omega * t)$$

Cuando solo se tienen en cuenta los valores máximos absolutos de tales parámetros, las relaciones anteriores se convierten en:

$$v_{\text{máx}} = A * \omega = A * 2\pi * f$$

$$a_{\text{máx}} = A * \omega^2 = A * 4\pi^2 * f^2 = v_{\text{máx}} * 2\pi * f$$

2.3 MODELOS DE VELOCIDAD DE PARTÍCULA. (MODELOS DE VIBRACIONES)

Un elemento importante en el proceso de evaluación y optimización de la operación de voladura, es poder predecir a través de un modelo, las consecuencias y beneficios al introducir distintos cambios en los parámetros más relevantes, sin que ello deba necesariamente tener que realizarse a escala real. Se pueden distinguir distintos enfoques asociados al Modelamiento de vibraciones, los cuales tienen como objetivo final predecir los niveles de vibración en un punto específico de acuerdo a un diseño de voladura.

Varios son los modelos experimentales que representan la velocidad de partícula en función del explosivo detonado y la distancia a la que se registra dicha detonación. Entre los más conocidos se encuentran el modelo general (ecuación 3.1) y el de regresión múltiple. El cual no considera una simetría de carga particular y utiliza la expresión descrita por la ecuación.

$$PPV = K * D^{\alpha}$$

Donde :

- PPV : Velocidad de Partícula Peak (mm/s)
- D : Distancia Escalar
- K : Factor de Velocidad
- α : Factor de Atenuación

En la ecuación, el término “D” o distancia escalar, da cuenta de la influencia de la distancia en (m) y la cantidad de explosivo detonada en forma instantánea en (kg.).

Teóricamente, el criterio que mejor representa el comportamiento de la vibración generadas por el tipo de cargas explosivas usadas en voladuras de rajo abierto, es el de DEVINE puesto que al utilizar cargas explosivas con geometría cilíndricas, se tiene que las distancias deben ser corregidas por la raíz cuadrada de la carga.

$$PPV = K * \left(\frac{d}{W^{1/2}} \right)^{\alpha}$$

Donde :

- PPV : Velocidad de Partícula Peak (mm/s)
- W : Peso de la carga explosiva
- d : Distancia entre el punto de medición y la carga explosiva detonando
- K : Factor de Velocidad
- α : Factor de Atenuación

En la ecuación, “W” corresponde a la carga detonada en forma instantánea en kilogramos y “d” la distancia a la cual se cuantifica la velocidad de partícula.

Teóricamente, éste criterio es al que mejor representa el comportamiento de la vibración para el campo lejano (aproximadamente $d > 3$ largo de carga), generadas por el tipo de cargas explosivas usadas en voladuras a rayo abierto.

2.3.1 Modelo de Campo Lejano “Devine

El análisis de los registros de vibraciones, permiten conocer la velocidad de la partícula que genera cada carga o grupos de cargas en la voladura y posteriormente agrupar estas por sectores. Fue así, como se obtuvieron datos de velocidad de partícula, distancia y carga por retardo en cada una de los sectores, a las que se ajustó posteriormente la ecuación del modelo propuesto por Devine.

Una vez determinada la ecuación de comportamiento de la vibración, fue ajustada a objeto de establecer un modelo más representativo y confiable. La corrección en cuestión consistió en desplazar paralelamente el modelo obtenido, de modo de cubrir un número mayor de puntos recogidos en terreno. Este modelo es el denominado en tablas y gráficas como el “modelo ajustado”.

Este proceso de ajuste no significa cambiar los valores de los datos recogidos en terreno, sino darles una interpretación estadística más conservadora y por lo tanto, más segura. El modelo propiamente tal, que se genera vía el ajuste estadístico describe la condición media de la población de datos, es decir, el 50% de los datos se ubican por debajo de la curva que representa el modelo y los 50% restantes se encuentran sobre la curva. Matemáticamente esto es correcto, sin embargo, significa que existe una probabilidad del 50% que una carga explosiva producirá un nivel de vibración que supera a lo predicho por el modelo, situación que deja inútil el modelo para propósitos prácticos, particularmente para diseño orientados a controlar la vibración máxima, la cual provoca el daño. La solución se encuentra en desplazar el modelo hasta que sus predicciones cubran una mayor cantidad de datos de terreno, en rangos que oscilan entre un 80% y 95% haciendo más confiable y segura la estimación de vibraciones.

$$PPV = K * \left(\frac{d}{W^{1/2}} \right)^{\alpha}$$

Donde :

PPV : Velocidad de Partícula Peak (mm/s)
 W : Peso de la carga explosiva
 d : Distancia entre el punto de medición y la carga explosiva detonando
 K : Factor de Velocidad
 α : Factor de Atenuación

Además de DEVINE existen diferentes modelos aplicativos para lo que es campo lejano, los cuales mencionamos sus formulas a continuación.

CRITERIO	COEFICIENTE ESCALAR
Criterio General Exponencial	$D = \left(\frac{d}{W^{1/2}} \right) * e^{\left(\frac{d*\beta}{\alpha} \right)}$
Criterio General	$D = \left(\frac{d}{W^{\beta/\alpha}} \right)$
Langefors (1963)	$D = \left(\frac{d}{W^{3/2}} \right)$
Hendron (Bulletin 656)	$D = \left(\frac{d}{W^{1/3}} \right)$
Devine(1966)	$D = \left(\frac{d}{W^{1/2}} \right)$

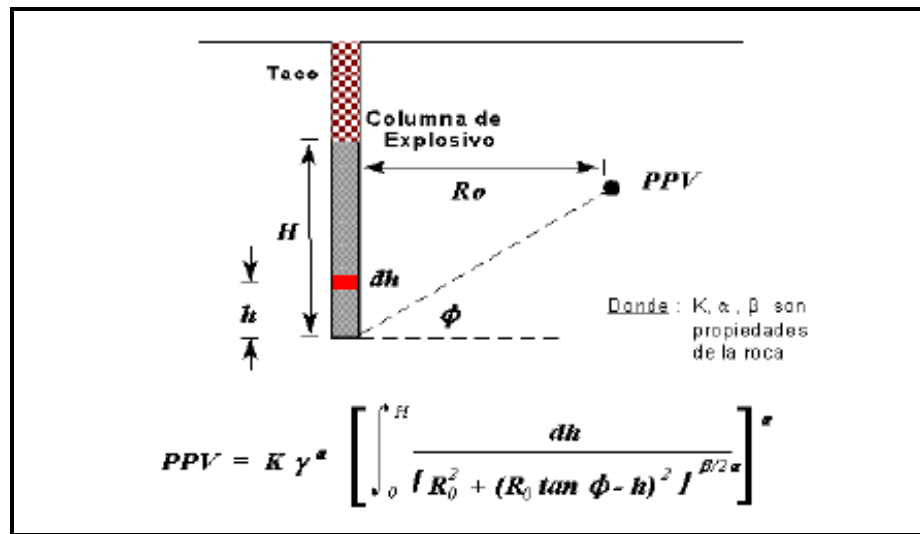
2.3.2 Modelo de Campo Lejano “HOLMBERG & PERSSON”

El análisis de los registros de vibraciones, permiten conocer la velocidad de partícula que genera cada carga o grupos de cargas en la voladura. Fue así como se obtuvieron datos de velocidad de partícula, distancia y carga por taladro, a la que se ajusto posteriormente la ecuación del modelo propuesto por Holmberg & Persson.

Una vez determinada la ecuación de comportamiento de la vibración, fue ajustada a objeto de establecer un modelo más representativo y confiable. La corrección en cuestión consistió en desplazar paralelamente el modelo obtenido,

de modo que cubriera un número mayor de puntos recogidos en terreno. Este modelo es el denominado en tablas y graficas como el “Modelo Ajustado”.

FIGURA 08. MODELO DE CAMPO CERCANO DE HOLMBERG AND PERSSON



Fuente. Presentaciones de Trabajos Técnicos de Orica. Año 2009

Donde K, α y β son las mismas constantes que se muestran en la ecuación 3.2 (Modelo Multivariable Tradicional), a excepción de que γ que representa la densidad de carga lineal en el taladro, expresada en Kg/m.

Es importante destacar, que en esta ecuación para el campo cercano, la densidad de carga lineal o concentración de carga por metro γ , es el parámetro que determina el nivel de vibración inducida y no la carga total ni el factor de carga. La concentración de carga lineal o densidad de carga, es controlada por una combinación del diámetro de la perforación, la densidad del explosivo y la potencia en peso del explosivo.

Cabe mencionar que al calibrar este modelo a las condiciones del terreno, es factible utilizar este modelo para estudiar alternativa en diseño de la voladura para cumplir con las varias exigencias como por ejemplo reducir el nivel de daño ocasionado por vibraciones.

2.4 CRITERIO DE LA VELOCIDAD DE PARTÍCULA CRÍTICA (PPVC)

Los altos niveles de vibración producidos por voladuras pueden dañar al macizo rocoso, produciendo fracturas nuevas o extendiendo y dilatando fracturas existentes. La vibración en este contexto puede ser considerada como un esfuerzo o deformación del macizo rocoso.

Con bajos niveles de vibración, tales como los presentes a grandes distancias desde las voladuras, los niveles de deformación son muy pequeños para inducir el fracturamiento al macizo rocoso. A menores distancias, las vibraciones son suficientemente altas para extender las fracturas preexistentes, pero insuficientes para inducir nuevo fracturamiento. Muy cerca de las cargas explosivas, sin embargo, los niveles de vibración son lo suficientemente altos como para producir diferentes grados de fracturamiento a su alrededor.

La velocidad vibracional de las partículas, frecuentemente es relacionada con su habilidad para inducir nuevo fracturamiento, a través de la relación entre velocidad de partícula y deformación de partícula, valido esto para un condición de roca confinada en la vecindad inmediata a las cargas explosivas, en donde el impacto de la voladura es más intenso y los niveles de esfuerzo inducidos son similares a los esfuerzos necesarios para la fragmentación de la roca. Dada esta

relación con deformación, es que el análisis de velocidad de partícula tiene la cualidad de ser un buen método para estimar el grado de fracturamiento inducido por la voladura.

De acuerdo a lo indicado:

$$\varepsilon = \frac{PPV}{V_p}$$

De la ley de Hooke y asumiendo un comportamiento elástico, la velocidad de partícula máxima, PPV_c , que puede ser soportada por la roca antes de que ocurra la falla por tensión, es estimada conociendo la resistencia a la Tracción (σ_t), el modulo de Young Dinámico E, y la velocidad de programación de la Onda P, V_p , usando la ecuación:

$$PPV_c = \frac{\sigma_t \times V_p}{E}$$

Según lo indicado para el daño producido por las voladuras según el PPV_c se tienen el siguiente cuadro.

TABLA 01. TABLA DE VELOCIDAD PICO PARTICULA CRITICA PARA DAÑO.

INTENSO FRACTURAMIENTO	$PPV > 4 PPV_c$
CREACION DE NUEVAS FRACTURAS	$PPV > 1 PPV_c$
EXTENSION DE FRACTURAS EXISTENTES	$PPV > \frac{1}{4} PPV_c$

Fuente. Presentaciones de Trabajos Técnicos de Orica. Año 2009

2.5 PROPIEDADES DE LA FRECUENCIA Y TIEMPO EN LAS VOLADURAS MINERAS

La amplitud, frecuencia y duración de las vibraciones en el macizo rocoso cambian mientras se propagan a través de este, debido a:

- La interacción con varios medios geológicos e interfaces estructurales.
- La expansión del grupo de ondas a través de la dispersión y/o
- La absorción, la cual es mayor para las frecuencias más altas.

Cerca de la voladura el carácter de la vibración es afectado por los factores del diseño de voladura y la geometría de la mina, particularmente el peso de carga por retardo, intervalo de retardo, y hasta cierto punto la dirección de iniciación, burden y el espaciamiento. A distancias mayores los factores del diseño de voladura se vuelven menos críticos y el medio de transmisión de la roca y la sobrecarga del terreno dominan las características de la onda.

Las amplitudes de velocidad de partícula dan cuenta de la energía sísmica que viaja desde un material dentro de otro, probablemente por conservación de la energía. Sin embargo, la frecuencia de vibración y consecuentemente las amplitudes de desplazamiento y aceleración dependen fuertemente del medio de propagación. La sobrecarga del terreno, también como las distancias absolutas largas (opuestas a las escaladas) crean grupos de onda de larga duración y baja frecuencia esto aumenta la respuesta y potencial de daño de las estructuras próximas.

Las frecuencias menores a 10 Hz producen grandes desplazamientos de suelo y altos niveles de tensión, y también se acoplan eficientemente dentro de las estructuras donde las frecuencias de resonancias típicas son de 4 a 12 Hz para los movimientos de deformación transversal y vertical. Las características de frecuencia de las vibraciones de voladura dependen fuertemente de la geología y de los intervalos de retardo de la voladura.

Una de las partes más importantes de la presente tesis es analizar esta frecuencia de resonancia en las casas de tapial y poder analizar la frecuencia típica de las casas estudiadas. Con estos datos podemos aplicar esa frecuencia en nuestro modelo para predecir el comportamiento de la estructura antes las vibraciones generadas por las voladuras.

También debemos hacer hincapié que a diferencia de los modelos que podrían ser construidos por sismos se tiene que ver que las voladuras tienen periodos de retorno pequeños (1/2, 1, 2 días, ocasionalmente una semanal o mensual), por lo cual el daño más bien puede ser por fatiga sobre elementos no estructurales.

2.6 DAÑO Y RESPUESTA DE LAS ESTRUCTURAS PRODUCIDO POR LA VIBRACIÓN DEL SUELO POR VOLADURA

Las vibraciones generadas por la voladura son producto directo del uso de explosivos para la fragmentación de la roca. Esta vibración del suelo o energía sísmica es comúnmente descrita como un desplazamiento con variación del tiempo, velocidad o aceleración de un punto particular (partícula) en el suelo. También puede ser medido en varios niveles de energía integrada (promedio). Se

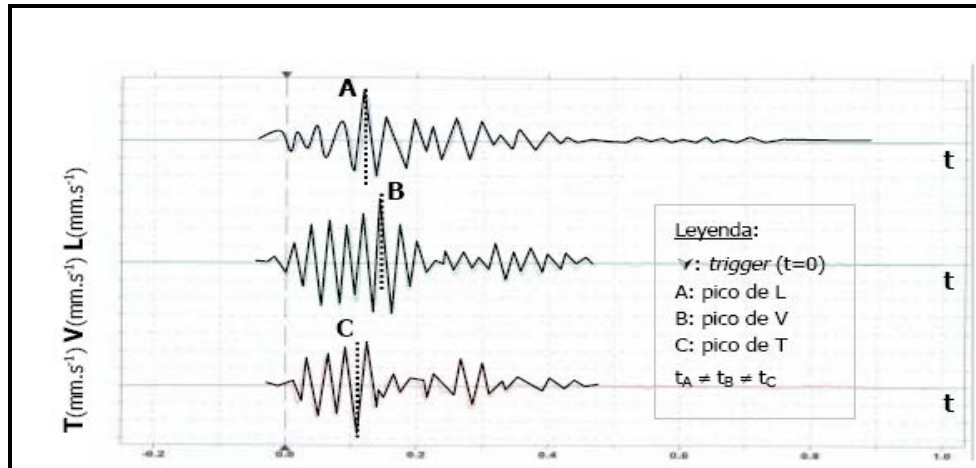
requieren tres componentes mutuamente ortogonales de tiempo-sincronizado para caracterizar completamente el movimiento. Se pueden combinar, alternativamente, los tres componentes dentro de una masa de vector verdadera para cualquier momento del tiempo o unas pseudo sumas de vector derivada de una suma de vector de los máximos de cada componente, independientes del tiempo.

Es fundamental obtener, a partir de mediciones de vibraciones, los parámetros que permiten el análisis de las vibraciones, la velocidad de vibración de partículas y la frecuencia. La obtención de esos datos experimentales (trabajos de campo) es hecha con sismógrafos de ingeniería dotados de geófonos múltiples, apropiadamente localizados en el terreno con relación a la geometría de la voladura. Los geófonos transforman la energía mecánica de vibración en energía eléctrica con intensidad proporcional al movimiento de oscilación del macizo.

Después de cada detonación los geófonos reciben los impulsos sísmicos, en diferentes instantes, registrándolos. En ese registro, dependiendo de los límites de detección del equipo y del “trigger” (valor mínimo de activación, definido para dar inicio la medición), queda señalado el instante de la detonación, que constituye el inicio del conteo del tiempo, relacionado a ese evento de vibración.

Las ondas sísmicas inducidas por las voladuras al macizo tienen tres componentes: longitudinal (L) en dirección horizontal que pasa por los puntos de detonación y de medición), transversal (T) perpendicular al anterior y vertical en dirección vertical y ortogonal a las anteriores (V), pudiendo aún ser medida la onda aérea.

FIGURA 09. EJES VIBRACIONALES (TRANSVERSAL, VERTICAL Y LONGITUDINALES)



Fuente. Presentaciones de Trabajos Técnicos de Orica. Año 2009

El valor máximo de la velocidad, registrado en el evento vibratorio, normalmente designado por PVS (“peak velocity sum”), es presentado en los sismogramas como el resultado del cálculo de la resultante del vector (L,V,T), correspondiendo a las tres coordenadas al mismo instante de tiempo (t) y no el resultante del vector con las componentes máximas (puntos A,B,C) en instantes de tiempo distintos. Es usual que ocurra en el instante de tiempo correspondiente al mayor de las componentes registradas (A, B o C), siendo generalmente 5 a 10 % mayor que este pico (Dowding, 1992).

$$v_{m\acute{a}x} = \left| \sqrt{v_L^2(t) + v_V^2(t) + v_T^2(t)} \right|$$

$$v_{m\acute{a}x} < \left| \sqrt{m\acute{a}x.[v_L^2(t_A)] + m\acute{a}x.[v_V^2(t_B)] + m\acute{a}x.[v_T^2(t_C)]} \right|$$

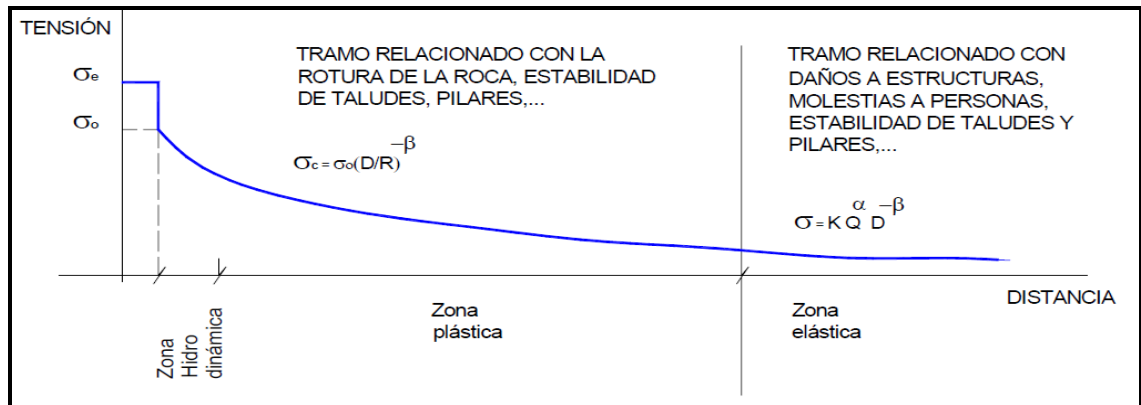
Las vibraciones generadas por voladuras han sido un continuo tema de estudio para la industria de la minería, ya sea por su incidencia en los niveles de daño generados al macizo rocoso como su potencial daño a estructuras aledañas a los frentes de producción, como en el caso de las casas y poblados del norte del Perú.

Un aspecto relevante en el estudio del potencial daño a estructuras esta dada por las frecuencias dominantes, reconociendo que las características de la respuesta y el contenido de la frecuencia de las vibraciones son críticos para lo niveles de respuesta y las probabilidades de daño. Por lo tanto, el análisis de daño a las estructuras no requiere saber lo que pasa entre la fuente generadora de la vibración (voladura) y el receptor o el tipo de la onda. Solo requiere la energía de vibración recibida por la estructura. Un aspecto importante de destacar, es la complejidad que existe en la identificación de ondas individuales producto de las características geométricas y la secuencia de iniciación utilizadas en los diseños de voladura.

Para contrarrestar tal efecto, existen técnicas de obtención de ondas elementales que consisten fundamentalmente en la separación de cargas que permitan realizar la caracterización de una onda en particular (técnica que ha sido empleada en el desarrollo del proyecto.)

A continuación mostramos una grafica simple de cómo actúa la detonación sobre su entorno, según la distancia del punto a la voladura.

**FIGURA 10. DETONACIÓN EN SU ENTORNO SEGÚN LA DISTANCIA
A LA VOLADURA.**



Fuente. Presentaciones de Trabajos Técnicos de Orica. Año 2009

2.7 DIFERENCIACIÓN DE LAS VOLADURAS CON OTRAS FUENTES GENERADORES DE VIBRACIÓN.

Terremotos, voladuras nucleares y voladuras en minas de gran envergadura, producen vibraciones de suelo potencialmente dañinas, también lo hacen otras fuentes de vibración estáticas y cuasi estáticas (tráfico, manejo de pilas, bombas sonicas, etc.). El primer resumen de vibración de voladura en 1942 de la Oficina de Minas de Estados Unidos examinó los niveles de vibración de terremotos y las intensidades de Mercalli correspondientes para el daño producido, y concluyó que estas no se aplican a las vibraciones generadas por las voladuras. Los terremotos producen eventos de muy baja frecuencia y larga duración, a diferencia de las voladuras que son eventos de alta frecuencia y corta duración.

Los niveles de aceleración son comúnmente usados por los sismo por los sismólogos para cuantificar el potencial de daño de un terremoto. Estos pueden ser de niveles moderados y aun más bajos que los generados por un evento de voladura; sin embargo, sus bajas frecuencias producen desplazamiento enormes y grandes velocidades de partícula. Como un ejemplo; Richter establece que una aceleración de 0.1g a 1Hz es ordinariamente dañina en la sismología de los terremotos, la velocidad de partícula y el desplazamiento correspondiente son 155.9 mm/s y 24.8 mm respectivamente, asumiendo el movimiento armónico simple. La misma aceleración a 20 Hz solo produciría una velocidad de partícula de 7.8 mm/s y un desplazamiento de 0.06 mm. Richter también observa que el potencial de daño de una vibración dada depende de su duración, con 0.1g a 1 Hz es probable que no se produzca daño para eventos de poco segundos, pero si muy serios para eventos del tipo terremotos de 25 a 30 seg

CAPITULO III NORMATIVAS PARA EL CONTROL DE

VIBRACIONES

En la mayoría de países desarrollados se ha diseñado normas aplicadas a su realidad (Tipos de Estructuras), las cuales les brinda la posibilidad a las unidades mineras ubicadas en esos países, de tener pautas para saber si sus voladuras realizadas en sus aéreas pueden generar daño a las estructuras cercanas. De esta forma estos estados pueden regular las vibraciones generadas proponiendo criterios de limitación a las minas.

En estos países, los límites generados equivalen a patrones de orden ambiental, los cuales son respetados por las empresas mineras. Los países que no han generado estos límites permisibles para los tipos de estructuras ubicadas en su terreno, mayormente utilizan las normas realizadas por estos países, lo cual debemos anotar pueden no aplicarse adecuadamente para los diferentes tipos de estructuras que se tienen. Por lo que se recomienda que cada país genere sus

propias leyes con respecto a estos temas para evitar los problemas existentes entre las diferentes realidades que hay entre las estructuras de los países desarrollados vs las estructuras de los países en vías de desarrollo.

A continuación describiremos las diferentes normativas de vibraciones existentes en el mundo. Describiendo después la utilizada por el estado peruano en su Guía Ambiental para la Perforación y Voladura en Operaciones Mineras, realizada por el Sub Sector de Minera por la Dirección General de Asuntos Ambientales, en el año 1995.

3.1 ASPECTOS BÁSICOS

Las vibraciones causadas por el ser humano pueden causar daños desde estructurales a cosméticos en las edificaciones; en la mayoría de los casos tales vibraciones son generadas por voladuras, maquinaria de construcción y tráfico vehicular o férreo.

Estas vibraciones inducen esfuerzos dinámicos en edificaciones, generando deformaciones temporales en todos los elementos constitutivos de la edificación. Sumados a los esfuerzos estáticos preexistentes, estas deformaciones dinámicas pueden causar daños en la edificación.

La relación entre velocidad de vibración –velocidad de partícula o resultante– y esfuerzos, en el caso idealizado de una onda plana en un medio elástico infinito, está dada por

$$\sigma = \varepsilon E, \varepsilon = \dot{u}/c, \sigma = \dot{u}E/c,$$

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

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

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

- La duración de las vibraciones,
- La cantidad de sollicitaciones a las que es sometida la estructura,
- La resistencia de los materiales que constituyen la estructura,
- La calidad de la construcción - los esfuerzos estáticos preexistentes (incrementados por ejemplo por asentamientos del suelo)

- El nivel de mantenimiento y conservación de la estructura.

Una evaluación rigurosa del potencial de daños por vibración en una serie de estructuras no es económicamente justificable en la mayoría de los casos. Por esto se ha recurrido generalmente a normas y recomendaciones que relacionan características de la estructura y del suelo de cimentación con el tipo de vibración, o con los niveles de vibración (velocidad de partícula, frecuencia dominante, cantidad de sollicitaciones), o solo con características de la voladura misma (cantidad de carga, distancias, etc.) Estas normas generalmente se fundamentan en la experiencia de varias décadas, involucrando miles de mediciones y observaciones de daños. Sin embargo, su aplicación en ambientes diferentes a los de su origen requiere una cuidadosa evaluación y asimilación, debiéndose considerar aspectos tales como las tipologías de las estructuras, materiales de construcción y practicas constructivas. Con este requisito, las normas también pueden ser utilizadas como guías en países que no poseen norma propia, como ocurre en Perú.

Salvo las normas específicas para voladuras con explosivos, las reglamentaciones para el control de efectos de vibraciones antropogenicas no distinguen el tipo de fuente. En esos casos la diferenciación de la fuente se hace a partir de los parámetros de movimiento, estableciendo diferencias según la cantidad de sollicitaciones –duración de los máximos– presentes en la señal.

Hoy en día el control de los efectos adversos de vibraciones causadas en la Ingeniería Civil y Minería, se logra mediante el acatamiento de los niveles

sugeridos en las normas específicas, así como mediante el diseño y manejo apropiado de los respectivos equipos y procesos causantes de las vibraciones. Por ejemplo los niveles de vibración causados por voladuras se pueden reducir mediante la limitación de las cargas o secuenciando las voladuras de tal forma que la energía transmitida al suelo sea distribuida en el tiempo, lo cual disminuye las velocidades máximas de vibración. Hoy en día hay técnicas aun más sofisticadas, que mediante una secuenciación muy controlada (y previamente diseñada) logran fenómenos de interferencia destructiva y directividad en el campo de ondas generado por la voladura.

Los valores máximos de velocidades de partícula permitidos o recomendados varían de una norma a otra. Quizás el valor indicativo que más se ha implantado es el de 2 pulg/s (50.8 mm/s), que se fundamenta en voluminosas observaciones de Langefors y Kihlstrom (Bollinger, 1980; Persson et al., 1994), quienes en 1963 establecieron, para diversos tipos de suelos, valores de la velocidad de partícula pico y sus efectos asociados.

Por otro lado, es importante evaluar las vibraciones en 3 direcciones ortogonales (como algunas normas lo exigen), con el fin de observar asimetría de radiación en las voladuras, propiedades de los diferentes tipos de onda generadas, así como observar particularidades de la transmisión de ondas elásticas en el suelo.

3.2 NORMATIVAS INTERNACIONALES

Los países considerados desarrollados siempre han tenido un mayor interés para el control de las operación llevadas a cabo en sus territorios, parte importante de ese control son los limites que tienen para sus problemáticas ambientales. De esta forma han creado instituciones que mediante estudios técnicos y aplicados a la realidad de esos países han constituidos normas y leyes para la protección de su entorno.

El ámbito de las vibraciones producidas por la voladuras tampoco ha estado ajeno a este interés por lo que se ha creado en estos países diferentes normas con diferentes valores de velocidad máxima de la partícula, para evitar daño a las construcciones o edificaciones aledañas. Los valores propuestos ha estado mayormente entre dos factores los muy conservadores como la Normativas DIN 4150 alemana que da valores hasta de 4 mm/s para zonas de edificación antigua o las normas americanas que brinda valores de hasta 50 mm/s para sus estructuras. De esta forma estas normas nos brindan valores que van desde los 4 mm/s a los 50 mm/s mayormente.

Las normas internacionales de los países del entorno Europeo más destacadas son las siguientes:

- Alemania: DIN 4150
- Francia: GFEE
- Gran Bretaña: BS 7385
- Suecia: SS460 48 66

- Portugal NP-2074
- Internacional: ISO 2631
- Estados Unidos: USBM RI 8507
- Borrador de Norma Europea

Debemos así tomar en cuenta que la mayoría de estos análisis no predicen el comportamiento de una onda si solo nos brinda una herramienta de gestión que permite monitorear las vibraciones para que estas se encuentren en valores aceptados y libres de riesgo.

También debemos hacer hincapié que estas normas han sido realizadas para las construcciones presente en estos países, cuyas estructuras son diferentes a las encontradas en el territorio peruano por lo que tomarlas en cuenta para nuestros análisis sería un grave error que es lamentablemente cometido por la mayoría de empresas mineras del medio no solo peruano sino de las países colindantes. De esta forma presenciamos que el método de construcción de tierra apisonada no existe en esas zonas teniendo las construcciones del territorio sudamericano y más de la zona andina muchas diferencias con las estructuras para los cuales esas normas fueron realizadas. Por lo que está sola mención ya nos coloca en otro ámbito completamente diferente a la vez que nuevo y por lo tanto interesante.

Sin embargo a continuación citaremos y veremos varias de estas normas que a pesar de no poder ser aplicadas a nuestras viviendas andinas si pueden servir de guía para la construcción de una norma que si podría ser de aplicación en territorio nacional. Por lo que podemos ver que en todas las normas desarrolladas

se tomaron como criterios generales para la limitación de vibraciones la velocidad de partícula máxima (VPP) y la frecuencia de forma directamente proporcional a la misma. Así redactaremos los siguientes criterios seguidos por la mayoría de normas desarrolladas.

1. Variación de la velocidad de vibración límite (VPP) con la frecuencia, de forma directamente proporcional a la misma.
2. Consideración de varios tipos de estructuras generales distintas (según el nivel de resistencia adherido en el momento de su construcción) y exclusión de ciertas estructuras especiales como lo son túneles, puentes, represas, entre otros.
3. Establecimiento de unos criterios de cálculo de la frecuencia predominante basados en hallar el espectro de frecuencias mediante un análisis FFT de los registros de vibraciones.

A continuación mencionaremos las principales normas desarrolladas y usadas en el mundo entero, para terminar con las normativas de vibraciones que posee el estado peruano. Se presentaran primeramente las normativas internacionales dividiéndolas en europeas primero y después en norteamericanas y después de esa división primaria se hará una división secundaria que consistirá según el orden que se le ha dado por importancia y uso haciendo mención de los factores psicológicos que toman en cuenta las normas. Al terminar con la normativa americana de mayor uso en esta parte del continente se seguirá con mencionar la normativa peruana que está basada en la americana.

3.2.1 Normas De La Comunidad Europea

a). Norma UNE 22.381.93

En España, la elección del criterio de prevención de daños y, por consiguiente, la velocidad de vibración límite que se imponga, ha de ser fijada de acuerdo con la normativa vigente (ITC 10.3.01, “Voladuras Especiales” del RGNBSM), por la autoridad competente. Dicha velocidad de vibración límite varía fundamentalmente con la frecuencia de vibración.

Dicha ITC hace referencia a la Norma UNE 22.381.93 “Control de Vibraciones producidas por Voladuras”. Esta Norma está estructurada en una serie de contenidos que permiten describir, limitar y estudiar las vibraciones producidas por las voladuras, de tal manera que facilitan tanto el trabajo de la ejecución del proyecto de voladuras como de la interpretación y evaluación del mismo por parte de la Autoridad Minera competente.

En primer lugar, la norma define los parámetros fundamentales de la vibración y cómo calcularlos:

Velocidad pico, entendiendo como tal la amplitud máxima de la componente principal de la onda de vibración, expresada en términos de velocidad de vibración y medida en mm/s. Frecuencia principal, siendo ésta una de las tres siguientes:

- La obtenida de aplicar el criterio del semiperiodo a cada uno de los ciclos de la vibración,

- La de mayor amplitud relativa resultante de aplicar la FFT a la onda,
- La que resulta de obtener el pseudoespectro de respuesta para la estructura estudiada.

A continuación, distingue tres grupos de estructuras de origen antrópico:

Estructura Grupo I Estructuras industriales.

Estructura Grupo II Viviendas.

Estructura Grupo III Monumentos y estructuras delicadas.

El resto de estructuras están excluidas de la norma y precisan un tratamiento particular en cuanto a la definición del límite o límites de la vibración, bien de forma explícita o bien en forma de variación de la velocidad con la frecuencia, desplazamiento o aceleración máximos, etc.

Para cada tipo de edificio y en función de la frecuencia, se tiene una velocidad límite de vibración, que crece proporcionalmente con ésta. En la Figura se recoge el ábaco y la tabla que representan el citado criterio de limitación de vibraciones. A continuación, la norma define el tipo de estudio requerido en función de la carga de explosivo que se vaya a detonar y la distancia entre el punto de disparo y la estructura a preservar. Aquí se introduce el concepto de *carga operante*, que es la carga instantánea máxima que se detona en la voladura, entendiendo por instantánea la que esta secuenciada de las demás (con detonadores secuenciadores de micro retardo) menos de 8 milisegundos. Es importante no confundir ésta con

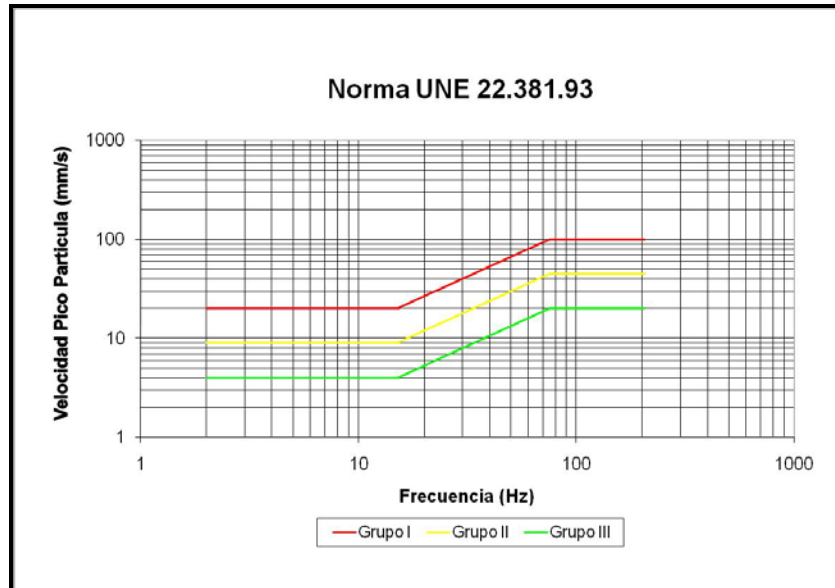
la carga total detonada en la voladura, ya que la segunda suele ser mucho mayor; el empleo de detonadores secuenciadores es una práctica habitual en la actualidad.

Los tres tipos de estudios que pueden requerirse son:

- Proyecto tipo: el de menor nivel de exigencia, consiste en una justificación teórica, obtenida por la aplicación directa de la norma, de que los niveles de vibración no van a alcanzar en ningún caso los límites establecidos.
- Control de vibraciones: de grado intermedio, se trata de una medición real en las primeras voladuras del proyecto, con objeto de delimitar las vibraciones generadas.
- Estudio Preliminar: el más estricto, se aplica cuando se prevén alcanzar niveles superiores a los definidos por la norma; consiste en la obtención de la ley de transmisividad del terreno donde se va a ejecutar el proyecto mediante ensayos reales (disparo de cargas y medida de vibraciones)

En la Figura 11 se recoge el ábaco que representa el criterio de selección del tipo de estudio requerido por la norma. Se observa cómo la norma distingue tres tipos de rocas (Blanda, V_p menor de 2000 m/s; media, V_p entre 2000 y 4000 m/s; dura, V_p mayor de 4000 m/s; V_p es la velocidad de transmisión de las ondas sísmicas del tipo P a través de la roca), con lo que está considerado en ella el diverso comportamiento en cuanto a amplitud y en cuanto a frecuencia de los distintos tipos de roca.

FIGURA 11. NORMA UNE 22.381.93



Fuente. Grafico realizado en archivo Excel – Asistencia Técnica Orica

TABLA 02. NORMA UNE 22.381.93

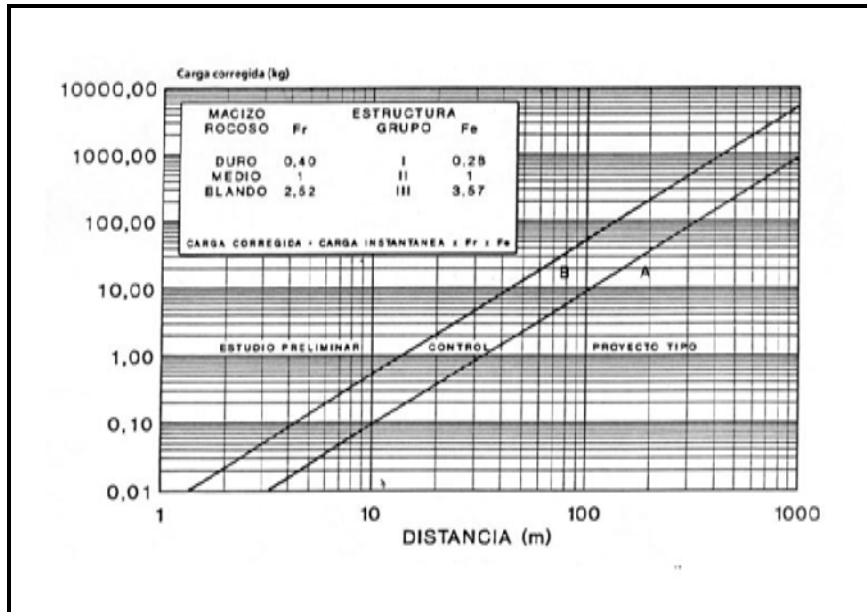
VALORES LÍMITES DEL CRITERIO	FRECUENCIA (Hz)		
	2...15	15...75	>75
VELOCIDAD (mm/s)	20	0.212	100
DESPLAZ. (mm)	9	0.095	45
GRUPO III	4	0.042	20

VALORES LÍMITES DEL CRITERIO	FRECUENCIA (Hz)		
	2...15	15...75	>75
DESPLAZ. (mm)	0.212	0.212	0.212
GRUPO II	0.095	0.095	0.095
GRUPO III	0.042	0.042	0.042

VALORES LÍMITES DEL CRITERIO	FRECUENCIA (Hz)		
	2...15	15...75	>75
ACELERACION (g)	0.188	0.188...4.712	4.712
GRUPO II	0.085	0.085...2.121	2.121
GRUPO III	0.038	0.038...0.042	0.942

Fuente. Grafico realizado en archivo Excel – Asistencia Técnica Orica

FIGURA 12. NORMA UNE 22.381.93



Fuente. Manual de Tronadura de Enaex (2002)

Haciendo una lectura inversa de este ábaco, es posible obtener una tabla de cargas/distancias para cada tipo de material (blando, medio o duro), según el tipo de estudio que se prevé realizar y en función del límite de vibraciones aplicable.

Por último, la norma define el tipo de instrumentación que debe emplearse en la medida de vibraciones generadas por voladuras y cómo deben medirse. Los requerimientos básicos son la frecuencia de muestreo, la resolución, la capacidad de almacenamiento y análisis de las vibraciones, la capacidad de medir en las tres componentes del movimiento, etc. Evidentemente, estas características están adaptadas a los órdenes de magnitud normales de las voladuras: frecuencias de 2 a 200 Hz, amplitud de 1 a 100 mm/s, etc.

En la Figura 12 se recogen las características del modelo de sismógrafo empleado por UEE en los estudios y controles de vibraciones que realiza para sus clientes. Esta norma está considerada por la Administración competente en temas de minería y obra pública y por las empresas que realizan voladuras en España como una herramienta útil y clarificadora de las circunstancias que envuelven a las vibraciones generadas por las voladuras, definiendo clara y explícitamente las limitaciones y los criterios aplicables en cada proyecto.

b)... Normativa Alemana DIN 4150

La normativa alemana DIN 4150 en su tercera parte trata los efectos en edificios y sus elementos estructurales de vibraciones de carácter internas o externas. Para la valoración mediante este criterio, las velocidades, las frecuencias o las tensiones debidas a las cargas dinámicas si es necesario, se comparan con los valores del criterio. Partiendo de los tiempos de actuación de las vibraciones aparecen tres criterios de aceptación:

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

Para esta normativa, el objetivo es marcar los límites en las vibraciones que no supongan para el edificio perder su uso habitual. La reducción del uso del edificio por efecto de las vibraciones incluye la afectación de la estabilidad del edificio o de alguno de sus componentes o la reducción de la capacidad resistente de los

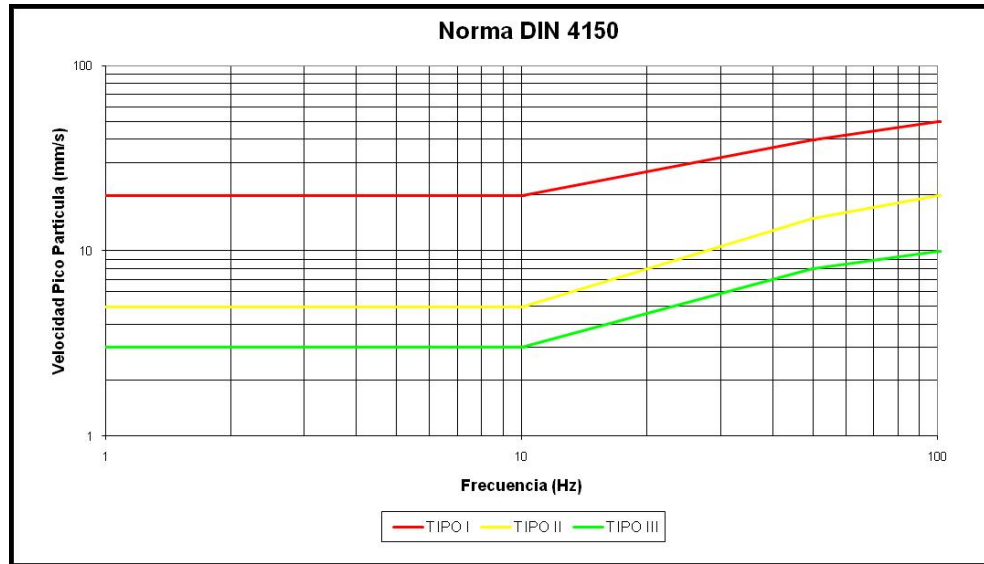
forjados. Para las estructuras incluidas en los tipos “Tipo 2” y Tipo 3” su uso se puede ver reducido si aparecen fisuras o grietas en las superficies de las paredes, empeoran fisuras o grietas existentes o si las particiones o tabiquerías se ven afectadas por la pérdida de resistencia de los forjados. Estos tipos de lesiones se consideran menores pero pueden suponer una pérdida de servicio del edificio.

En la tabla 03 y la figura 13 se dan los valores de las velocidades máximas para la cimentación y para el plano del piso más alto de varios tipos de edificios para vibraciones de corta duración. Si se cumplen estos valores, ningún efecto dinámico debería producir daños importantes para provocar la pérdida de servicio del edificio cosa que supondría que la posible aparición de patologías tendría otras causas. En cambio, el hecho de superar dichos valores, no supone obligatoriamente la aparición de los daños descritos anteriormente.

TABLA 03. NORMA ALEMANA DIN4150

Tipo de Edificación	FRECUENCIA (Hz)		
	< 10 Hz	10 - 50 Hz	50 - 100 Hz
	VELOCIDAD (mm/s)	VELOCIDAD (mm/s)	VELOCIDAD (mm/s)
TIPO I: Edificios públicos o industrial	20	20...40	40...50
TIPO II: Edificios de viviendas o asimilables a viviendas	5	5...15	15...20
TIPO III: Edificios históricos o por su construcción son sensibles a la vibración	3	3...8	8...10

Fuente. Grafico realizado en archivo Excel – Asistencia Técnica Orica

FIGURA 13. NORMA ALEMANA DIN4150

Fuente. Grafico realizado en archivo Excel – Asistencia Técnica Orica

Para el caso de estudio de los forjados, la norma alemana establece como valor límite, para no producirse reducción del servicio o uso de los edificios sometidos a vibraciones de corta duración, una velocidad no superior a los 20 mm/s. En los edificios encuadrados en la “Tipo 3” será necesario prever valores inferiores para evitar los daños.

En la tabla inferior se dan los valores de las velocidades máximas para el plano del piso más alto de varios tipos de edificios para vibraciones de larga duración. Al igual que en el caso de vibraciones de corta duración, si se cumplen estos valores, ningún efecto dinámico debería producir daños importantes para provocar la pérdida de servicio del edificio cosa que supondría que la posible aparición de patologías tendría otras causas. En cambio, el hecho de superar dichos valores, no supone obligatoriamente la aparición de los daños descritos anteriormente

TABLA 04. NORMA ALEMANA DIN4150

Line	Type of structure	Guideline values for velocity, v_i , in mm/s, of vibration in horizontal plane of highest floor, at all frequencies
1	Buildings used for commercial purposes, industrial buildings, and buildings of similar design	10
2	Dwellings and buildings of similar design and/or occupancy	5
3	Structures that, because of their particular sensitivity to vibration, cannot be classified under lines 1 and 2 and are of great intrinsic value (e.g. listed buildings under preservation order)	2,5

Fuente. Manual de Tronadura Enaex (2002)

Los efectos sobre los forjados de las vibraciones de larga duración se valoran en la norma alemana mediante una formulación, pero como indicación general se limita la velocidad máxima en dirección vertical a 10 mm/s debiendo estudiar de manera particular los edificios de tipo “Tipo 3”.

Podemos acotar en esta primera parte que la normativa alemana es la más estricta en el tema de control de vibraciones por lo que sus valores son más conservadores que el resto de normativas.

c). Normativa Sueca SN 640312 (1978)

La Asociación Suiza de Ingenieros de Carreteras en su normativa SN 640312, diferencia cuatro tipos de construcciones o edificios de acuerdo principalmente con el tipo de construcción, tal como se observa en la tabla inferior.

En este caso, el dato para aplicar el criterio de aceptación de esta normativa es la velocidad pico de las vibraciones, considerando dos casos distintos en función de la causa de las vibraciones (fuente de origen que las provoca) que se distinguen también en su forma de producirse; el primer grupo incluye tráfico, maquinaria y equipos de trabajo mientras que el segundo se refiere a vibraciones producidas por explosiones que al ser poco frecuentes se permiten límites superiores. Los valores máximos admisibles para cada caso se muestran en la tabla inferior.

FIGURA 14. NORMATIVA SUECA SN 640312 (1978)

structural category	definition
I	reinforced-concrete and steel structures (without plaster) such as industrial buildings, bridges, masts, retaining walls, unburied pipelines; underground structures such as caverns, tunnels, galleries, lined and unlined
II	buildings with concrete floors and basement walls, above-grade walls of concrete, brick or ashlar masonry; ashlar retaining walls, buried pipelines; underground structures such as caverns, tunnels, galleries, with masonry lining
III	buildings with concrete basement floors and walls, above-grade masonry walls, timber joist floors
IV	buildings which are particularly vulnerable or worth protecting

Fuente. Manual de Tronadura Enaex (2002)

FIGURA 15. NORMATIVA SUECA SN 640312 (1978)

structural category	source M		source S	
	f [Hz]	v _{max} [mm/s]	f [Hz]	v _{max} [mm/s]
I	10 ÷ 30	12	10 ÷ 60	30
	30 ÷ 60	12 ÷ 18*	60 ÷ 90	30 ÷ 40**
II	10 ÷ 30	8	10 ÷ 60	18
	30 ÷ 60	8 ÷ 12*	60 ÷ 90	18 ÷ 25**
III	10 ÷ 30	5	10 ÷ 60	12
	30 ÷ 60	5 ÷ 8*	60 ÷ 90	12 ÷ 18**
IV	10 ÷ 30	3	10 ÷ 60	8
	30 ÷ 60	3 ÷ 5*	60 ÷ 90	8 ÷ 12**

source M: machinery, traffic, construction works – (*) the lower value applies to 30 Hz, the upper to 60 Hz, with interpolation in between.
source S: blasting operations – (**) the lower value applies to 60 Hz, the upper to 90 Hz, with interpolation in between.

Fuente. Manual de Tronadura Enaex (2002)

d). Normativa sueca SS 460 48 66 1991

La norma sueca tampoco considera las molestias causadas a humanos, ni el riesgo de equipos sensibles a vibración, pues solo contempla el efecto de las vibraciones producidas por voladuras sobre las edificaciones.

Esta norma está sustentada en cientos o miles de observaciones en el lecho rocoso escandinavo, donde se han podido estimar con buena certeza niveles de daño en las estructuras.

Esto ha hecho que la norma tenga en cuenta varios tipos de estructuras geológicas, que otras normas no han tenido en cuenta; sin embargo, el no incluir información de frecuencias y de otras componentes diferentes a la vertical hace que sea desactualizada respecto a los estándares actuales.

FIGURA 16. NORMATIVA SUECA SS 460 48 66 1991

<i>Norma Sueca SS 460 48 66 del año 1991</i>				
PPV = Vo x Fb x Fm x Fd x Ft				
Vo	Velocidad peak de partícula para la componente vertical sin corregir			
Fb	Factor descriptor del tipo de Edificio según tipo de Construcción			
Fm	Factor que considera el material de la construcción			
Fd	Factor que da cuenta del cambio de frecuencia de la vibración con la distancia			
Ft	Factor del tiempo de duración de la actividad de tronadura			
TIPO DE TERRENO, Velocidad de partícula vertical sin corregir, Vo				
Rocas Blandas, Gravas, arenas				18
Rocas Medias				35
Rocas duras, Granitos, cuarcita				70
Puede también ser calculado como : Vo = Vp [m/s] / 65				
TIPO DE CONSTRUCCIÓN, Factor Fb				
Construcc. pesadas tipo puentes, portuarios				1.7
Edificios industriales y de oficinas				1.2
Edificios de viviendas estandar				1
Edificios especialmente sensibles, iglesias, museos				0.65
Edificios históricos en mal estado y ruinas				0.5
TIPO DE MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN, Factor Fm				
Hormigón armado, acero o madera				1.2
Hormigón en masa, ladrillos o cemento				1
Hormigón porosos prefabricado				0.75
Tabiques prefabricados				0.65
FACTOR DE DISTANCIA, Factor Fd				
Arcilla	Si 1<d<10	Fd =	1.91 x d ^	-0.28
Morrena	Si 10<d<350	Fd =	1.56 x d ^	-0.19
Roca	Si 10<d<350	Fd =	1.91 x d ^	-0.29
			2.57 x d ^	-0.42
TIPO DE ACTIVIDAD, Factor Ft				
Trabajos de construcción				1
Trabajos estacionarios, tipo minería				0.75 - 1.0

Fuente. Informe Tecnico de Orica (2008)

e) Directriz Alemana KDT 046/72 (1972)

La directriz presentada por la Cámara Tecnológica de la antigua República Democrática Alemana, también diferencia cuatro tipos de edificaciones o construcciones para los que proporciona unos valores límite para sus velocidades pico en caso de oscilaciones, tal como se puede ver en la tabla inferior.

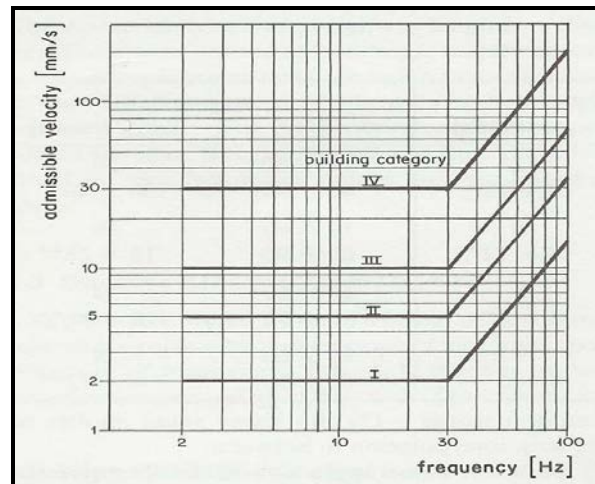
FIGURA 17. NORMA DIRECTRIZ ALEMANA KDT 046/72 (1972)

	building category	$v_{z,adm}$ [mm/s]
I	historical monuments	2
II	half-timbered houses	5
III	wall construction (e.g. buildings of slab walls, blocks, masonry)	10
IV	framed construction (e.g. buildings of steel, reinforced concrete, timber)	30

Fuente. Manual de Tronadura Enaex (2002)

Los valores límite que la directriz alemana expone para vibraciones debidas a explosiones para las distintas categorías de edificios expuestas en la tabla 5, se muestran en la figura inferior.

**FIGURA 18. GRAFICA DE NORMA DIRECTRIZ ALEMANA KDT
046/72 (1972)**



Fuente. Manual de Tronadura Enaex (2002)

f). Norma Suiza SN 640 315a de 1992

La norma de Suiza fue elaborada para ser aplicada a las vibraciones causadas por: voladuras, maquinaria y tráfico y que pueden causar daño cosmético en la edificación. Al igual la mayoría de las normas de control de vibraciones, no tiene en cuenta: la percepción humana, los daños en equipos delicados, y los efectos en suelos blandos de las vibraciones causadas por las fuentes antes mencionadas.

Esta norma contempla frecuencias desde los 8 hasta los 150 Hz, y establece que por fuera de este rango deben ser estudiadas con base en otras normas y consideraciones. La inclusión del número de sollicitaciones –cantidad de vibraciones en la señal y su correspondiente diferencia en los valores indicativos máximos de velocidad, es la responsable de que esta norma sea realmente aplicable a una amplia gama de vibraciones, y que por lo tanto sea versátil

Los valores máximos establecidos en la norma dependen de varios parámetros como la cantidad de sollicitaciones y de la susceptibilidad de la edificación, obteniéndose así un rango amplio de valores indicativos. Esta norma también contempla la posibilidad de cambiar estos valores previa consulta a un experto en el tema.

Según la norma, las mediciones deben realizarse con geofonos, es decir sensores cinemáticas que midan velocidad y que deben tener una respuesta lineal entre 5 y 150 Hz. Prácticamente todos los sismómetros de ingeniería (sensores activos) cumplen con este objetivo.

Adicionalmente la norma espera que los sensores sean rutinariamente calibrados con el fin de obtener valores de vibraciones correctos.

El sitio definido por esta norma para instalar los sensores es dentro de la estructura estudiada en los pisos superiores, ya que se espera que bajo esa condición la velocidad de partícula sea superior a la que se registra en la base de la estructura. Sin embargo, en este proyecto no se requiere evaluar los efectos en una estructura en particular, por lo cual las vibraciones fueron registradas en una pequeña zapata ubicada dentro de una caseta.

FIGURA 19. NORMA SUIZA SN 640 315A DE 1992

Clases de susceptibilidad	Frecuencia de solicitaciones	Valores máx. del vector de velocidad resultante (mm/s)		
		Frecuencia dominante		
		<30 Hz	30 - 60 Hz	>60 Hz
1) muy poco susceptible	Ocasional	Valores indicativos: hasta el triple de los valores correspondientes de la clase de susceptibilidad 3)		
	Frecuente			
	Permanente			
2) poco susceptible	Ocasional	Valores indicativos: hasta el doble de los valores correspondientes de la clase de susceptibilidad 3)		
	Frecuente			
	Permanente			
3) susceptibilidad normal	Ocasional	15	20	30
	Recurrente	6	8	12
	Permanente	3	4	6
4) particularmente susceptible	Ocasional	Valores indicativos: entre los valores indicativos de la clase 3) y la mitad de éstos		
	Frecuente			

Fuente. Manual de Tronadura Enaex (2002)

g). Normativa ISO 4866 (1990)

En la normativa ISO 4866 “*Mechanical vibration and shock-Vibration of buildings-Guidelines for the measurement of vibrations and the evaluation of their effects o buildings*” no se especifica propiamente ningún criterio para la aceptación de vibraciones en las estructuras. En cambio, en su anexo A, se define una clasificación de los edificios en 14 categorías distintas de acuerdo con su tipología, cimentación, tipo de terreno, importancia del edificio, etc.

En la tabla inferior se muestra la clasificación de las estructuras en ocho tipos distintos en función del tipo de edificio según la ISO 4866. Los grupos de edificios 1 y 2 hacen referencia a la antigüedad de la construcción. El grupo 1

hace referencia a edificios antiguos o construidos más recientemente pero con técnicas, materiales y maquinaria antigua. Este tipo de edificaciones suelen ser pesadas pero con materiales poco resistentes y tienen un coeficiente de amortiguamiento elevado. El grupo 2 se refiere a estructuras modernas que suelen ser más ligeras y con materiales más resistentes en todas sus direcciones, y un coeficiente de amortiguamiento pequeño.

TABLA 04. NORMATIVA ISO 4866 (1990)

Category of structure	Group of building (see clause A.4)		
	1	2	
↓ Resistance to vibration decreasing	1	Heavy industrial multi-storey buildings, five to seven storeys high, including earthquake-resistant forms Heavy structures, including bridges, fortresses, ramparts	Two- and three-storey industrial, heavy-frame buildings of reinforced concrete or structural steel, clad with sheeting and/or infilling panels of blockwork, brickwork, or precast units, and with steel, pre-cast or <i>in situ</i> concrete floors Composite, structural steel and reinforced concrete heavy industrial buildings
	2	Timber frame, heavy, public buildings, including earthquake-resistant forms	Five- to nine-storey (and more) blocks of flats, offices, hospitals, light-frame industrial buildings of reinforced concrete or structural steel, with infilling panels of blockwork, brickwork, or precast units, not designed to resist earthquakes
	3	Timber-frame, single- and two-storey houses and buildings of associated uses, with infilling and/or cladding, including "log cabin" kinds, including earthquake-resistant forms	Single-storey moderately lightweight, open-type industrial buildings, braced by internal cross walls, of steel or aluminium or timber, or concrete-frame, with light, sheet-cladding, and light panel-infilling, including earthquake-resistant types
	4	Fairly heavy multi-storey buildings, used for medium warehousing or as living accommodation varying from five to seven storeys or more	Two-storey, domestic houses and buildings of associated uses, constructed of reinforced blockwork, brickwork or precast units, and with reinforced floor and roof construction, or wholly of reinforced concrete or similar, all of earthquake-resistant types
	5	Four- to six-storey houses, and buildings of associated urban uses, made with blockwork or brickwork, load-bearing walls of heavier construction, including "stately homes" and small palace-style buildings	Four- to ten-storey domestic and similar buildings, constructed mainly of lightweight load-bearing blockwork and brickwork, calculated or uncalculated, braced mostly by internal walls of similar material, and by reinforced concrete, preformed or <i>in situ</i> floors at least on every other storey.
	6	Two-storey houses and buildings of associated uses, made of blockwork, brickwork or pis-à-terre, with timber floors and roof Stone- or brick-built towers, including earthquake-resistant forms	Two-storey domestic houses and buildings of associated uses, including offices, constructed with walls of blockwork, brickwork, precast units, and with timber or precast or <i>in situ</i> floors and roof structures
	7	Lofty church, hall and similar stone- or brick-built, arched or "articulated" type structures, with or without vaulting, including arched smaller churches and similar buildings Low heavily constructed "open" (i.e. non-cross-braced) frame church and barn type buildings including stables, garages, low industrial buildings, town halls, temples, mosques, and similar buildings with fairly heavy timber roofs and floors	Single- and two-storey houses and buildings of associated uses, made of lighter construction, using lightweight materials, pre-fabricated or <i>in situ</i> , separately or mixed
	8	Ruins and near-ruins and other buildings, all in a delicate state All class 7 constructions of historical importance	

Fuente. Manual de Tronadura de Enaex (2002)

En la tabla inferior se muestra la clasificación de los edificios de acuerdo con su resistencia a las vibraciones. La categoría del edificio se obtiene de la tabla 4,

mientras que las dos letras (mayúscula y minúscula) responden al tipo de cimentación y al tipo de terreno según las siguientes clasificaciones

Tipo de cimentación:

Clase A: pilotes de hormigón armado, metálicos o de madera unida, muro de gravedad o zapatas de hormigón armado.

Clase B: Pilotes con encepados, muros con zapata corrida, zapatas de hormigón en masa y pilotes de madera.

Clase C: muros de contención ligeros, grandes piedras o sin cimentación.

Tipo de terreno:

Tipo a: rocas sin fisurar, o ligeramente fisuradas y arenas cementadas.

Tipo b: terrenos compactos y macizados.

Tipo c: terrenos poco compactos y macizados.

Tipo d: terrenos con pendiente y con planos potenciales de deslizamiento.

Tipo e: suelos granulares, grava, suelos no cohesivos y arenas cohesivas saturadas.

Tipo f: rellenos.

TABLA 05. NORMATIVA ISO 4866 (1990)

Class of building ¹⁾	Category of structure (see table A.1)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	
	Categories of foundations (capital letters) and types of soil (lower case letter) (see clause A.5 and clause A.6)								
↓ Level of acceptable vibration decreasing	1	A a							
	2	A b	A a	A a	A a				
	3		A b B a	A b B a	A b	A a A b			
	4		A c B b	B b	A c	A c B a B b			
	5		B c	A c		B c	B a		
	6		A f		A d	B d	B b C a	B a	
	7			A f	A e	B e	B c C b	B b C a	
	8						B e C c	B c C b	
	9		B f				C d	B d C c	A a
	10			B f			C e	B e C d	A b
	11				C f	C f		C e	B a
	12						C f		B c C a
	13							C f	B d C b C c
	14								C d C e C f

1) High class number = high degree of protection required.

Fuente: Manual de Tronadura de ENAEX (2002)

h). Criterios Psicológicos

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

percepción de las oscilaciones; la costumbre de percibir las, o el hecho de ser el protagonista que crea las vibraciones (no son una agresión externa) puede disminuir su importancia subjetiva.

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

A pesar del gran número de factores que influyen en la percepción de las vibraciones, la intensidad de esta percepción depende de parámetros físicos objetivos de las oscilaciones como por ejemplo: amplitud del desplazamiento, velocidad, aceleración, duración de las vibraciones y frecuencia de vibración. En las tablas y figuras que siguen se presentan diversos criterios de percepción de las vibraciones por las personas en función de las frecuencias, velocidades y aceleraciones según bibliografía consultada.

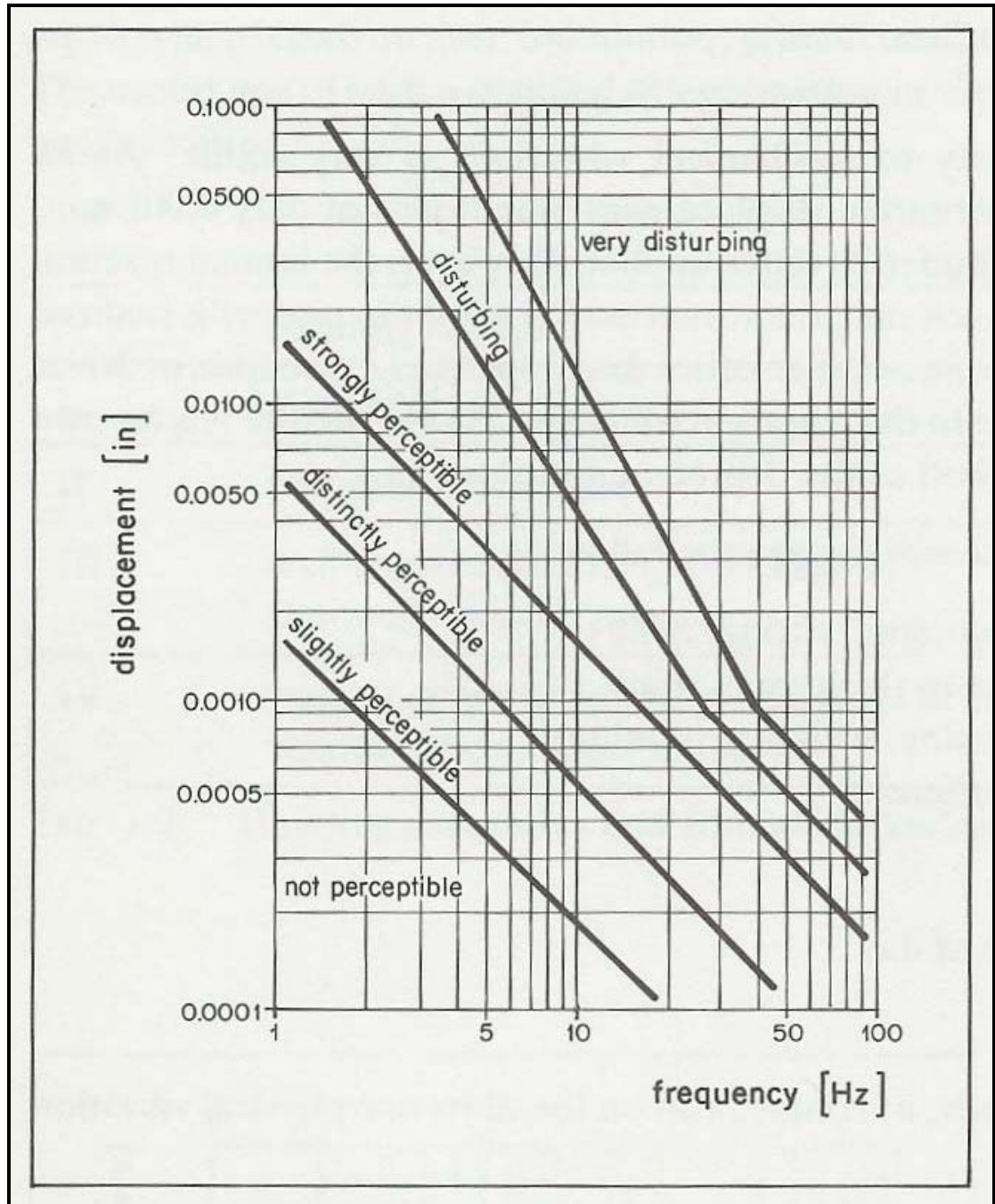
TABLA 06. NORMATIVA ISO 4866 (1990)

vibration effects on people	frequencies 1 ÷ 10 Hz a_{\max} [mm/s ²]	frequencies 10 ÷ 100 Hz v_{\max} [mm/s]
imperceptible	10	0.16
just perceptible	40	0.64
clearly perceptible	125	2.0
annoying	400	6.4
unpleasant, painful if lasting	1000	16.0
harmful	> 1000	> 16.0

Fuente: Manual de Tronadura de ENAEX (2002)

En la tabla superior se muestra el criterio de aceptación del Ministerio Soviético de Ingeniería metalúrgica y química que fecha del año 1955. Como se puede observar, el criterio distingue dos casos: frecuencias entre 1-10 Hz y entre 10-100 Hz. Para el primer rango de valores, se considera determinante en la percepción de las vibraciones el valor máximo de la aceleración, mientras que para valores superiores de las frecuencias, el parámetro definitivo es la velocidad.

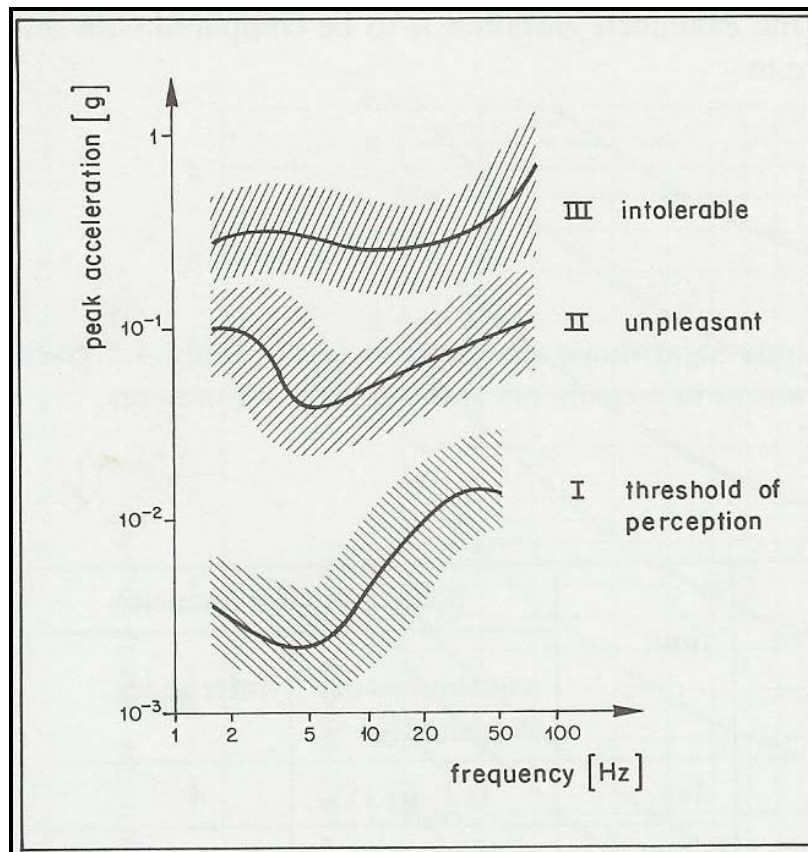
FIGURA 20. NORMA SUIZA SN 640 315A DE 1992 (CRITERIOS PSICOLÓGICOS)



Fuente: Manual de Tronadura de ENAEX (2002)

En la figura 20 los parámetros que influyen en la consideración de la percepción de las oscilaciones son la frecuencia y el desplazamiento. En este caso no se diferencian distintos rangos de valores para la frecuencia, considerando que el valor determinante para valorar la sensación de molestia a partir de la frecuencia es el desplazamiento. Lo mismo ocurre en la figura inferior, pero en este caso el valor a estudiar conjuntamente con la frecuencia es la aceleración pico.

FIGURA 21. NORMA SUIZA SN 640 315A DE 1992 (CRITERIOS PSICOLÓGICOS)



Fuente: Manual de Tronadura de ENAEX (2002)

i). Normativa DIN 4150, Parte 2 (1999)

La normativa DIN 4150, en su parte segunda trata sobre los efectos de las vibraciones de muy diversos orígenes sobre las personas en edificios residenciales o similares. En su última versión (1999) propone una nueva metodología para la valoración de las vibraciones diferente a la versión anterior (1992). Dado que en esta nueva versión se necesitan datos de los que no se disponen, se aplica en esta tesina la versión anterior para la cual se dispone de todos los datos y presenta además un método más simple. El rango de frecuencias se acota a valores entre 1Hz y 80Hz.

Conjuntamente con la frecuencia de las oscilaciones, la velocidad, el desplazamiento y la aceleración permiten obtener un valor empírico para la intensidad de la percepción conocido por KB. Éste se obtiene con la fórmula:

$$KB = d \frac{0.8f^2}{\sqrt{1+0.032f}}$$

Donde d es la amplitud del desplazamiento en mm y f el valor de la frecuencia de vibración expresada en Hz. El valor de KB puede también expresarse en términos de velocidad (v) o aceleración (a) de la oscilación que se relacionan, si el movimiento es armónico, de la siguiente manera:

$$d = \frac{v}{2\pi f} = \frac{a}{4\pi^2 f^2}$$

El valor KB que se obtiene de este cálculo debe compararse con los valores del criterio de aceptación teniendo en cuenta factores como el uso del edificio, la frecuencia de ocurrencia de las vibraciones, la duración de los efectos y el momento del día en que se produce la vibración tal como se muestra en la tabla inferior.

TABLA 07. NORMATIVA DIN 4150, PARTE 2 (1999)

building zone (actual utilization and development of the estate within radius of vibration emission)	time	acceptable KB intensity	
		continuous or repeatedly	infrequent
purely residential, housing estate, holiday resort	day	0.2 (0.15*)	4
	night	0.15 (0.1*)	0.15
village and small business, town-centres	day	0.3 (0.2*)	8
	night	0.2	0.2
business and trade (incl. offices)	day	0.4	12
	night	0.3	0.3
industrial	day	0.6	12
	night	0.4	0.4
exceptional areas (acc. to residential content)	day	0.1 ÷ 0.6	4 ÷ 12
	night	0.1 ÷ 0.4	0.15 ÷ 0.4

(*) Values in brackets should be complied with if buildings are excited horizontally with a frequency below ~ 5 Hz.

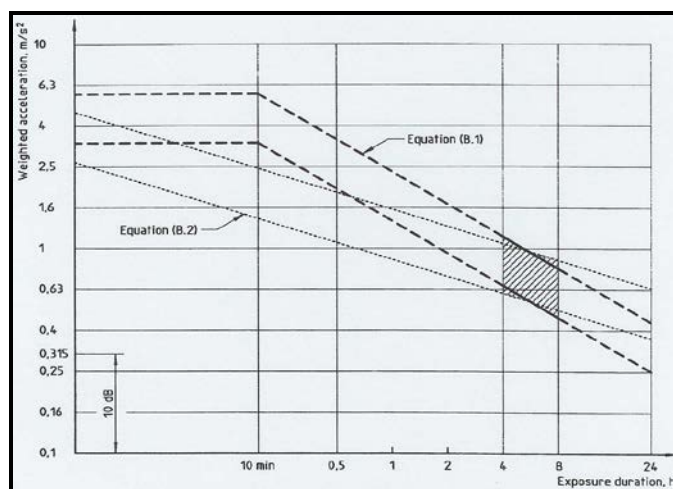
Fuente: Manual de Tronadura de ENAEX (2002)

j). Normativas ISO 2631-1 (1997) y ISO 2631-2 (2003)

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

En la figura Inferior se muestra la zona de la gráfica que relaciona la aceleración ponderada con la duración de la exposición, en la que pueden aparecer problemas de salud. En este caso los factores determinantes son el tiempo de exposición a las oscilaciones y la aceleración de la vibración ponderada. Los valores para la ponderación de las aceleraciones se describen en la norma y dependen esencialmente de los efectos que estudiemos (salud, percepción, confort...) y de la posición relativa entre la columna vertebral del individuo y la dirección de actuación de la oscilación, tal como se muestra en la figura inferior.

FIGURA 22. NORMATIVAS ISO 2631-1 (1997) Y ISO 2631-2 (2003)



Fuente: Manual de Tronadura de ENAEX (2002)

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

Valores inferiores a 0.315 m/s² comfortable

de 0.315 a 0.63 m/s² un poco inconfortable

de 0.5 a 1.0 m/s² bastante inconfortable

de 0.8 a 1.6 m/s² inconfortable

de 1.25 a 2.5 m/s² muy inconfortable

valores superiores a 2.0 m/s² extremadamente inconfortable

En la norma ISO 2631-2 “Vibrations in buildings”, se establecen como válidos los resultados anteriormente citados, pero destacando la subjetividad de la sensación de confort dependiendo de la posición, actividad que se esté realizando, etc.

Es por esta razón que estudios realizados en distintos países muestran que las quejas de personas en edificios suelen producirse para valores de las vibraciones ligeramente por encima de los valores de percepción de estas. Es decir, que en cuanto las oscilaciones se perciben en los edificios provocan malestar, cosa que en otras situaciones (transportes públicos, paseos por la calle, actividades deportivas...) no se produce y los criterios de confort responden más acertadamente a los indicados anteriormente.

3.2.2 Normativas Americanas.

a). United States Bureau of Mines (USBM)

El USBM es una organización líder en el campo de la investigación de los efectos de una voladura, analizando desde hace varias décadas la generación de vibraciones, su propagación y el impacto que tienen en las diferentes estructuras que existen

Una de las primeras investigaciones relacionadas a las vibraciones producto de voladuras consistió en hacer detonar cierta cantidad de explosivo en un desmonte de rocas, para posteriormente, medir los daños causados en las estructuras cercanas. Este fue el inicio de un programa de investigaciones por el USBM en 1930. El primer trabajo que realizó este equipo fue el de desarrollar un tipo de sismógrafo que se pudiera adaptar a la tarea de captar vibraciones producidas durante las operaciones normales de explotación de minas. Luego de estudiar los aparatos utilizados en la captación de vibraciones originadas por movimientos telúricos, y a varios proyectos, se fabricaron algunos modelos, los cuales fueron los precursores de los modernos sismógrafos de ingeniería.

Una nueva síntesis del USBM fue hecha por Fogelson en 1971, en el cual incluía el análisis de nuevos datos pero se mantenía como límite los 50 mm/s (VPP), bajo el cual, la probabilidad de daños era muy pequeña. Sin embargo, fue en el año 1980 donde el USBM revé este valor, el cual era visto bastante alto en otras partes del mundo e incluso para algunos estados norteamericanos; y decide introducirle la frecuencia, considerándolo como un parámetro tan importante

como la velocidad de partícula. Los valores que se propusieron son mostrados en el cuadro siguiente.

**TABLA 08. NORMATIVA UNITED STATES BUREAU OF MINES
(USBM)**

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

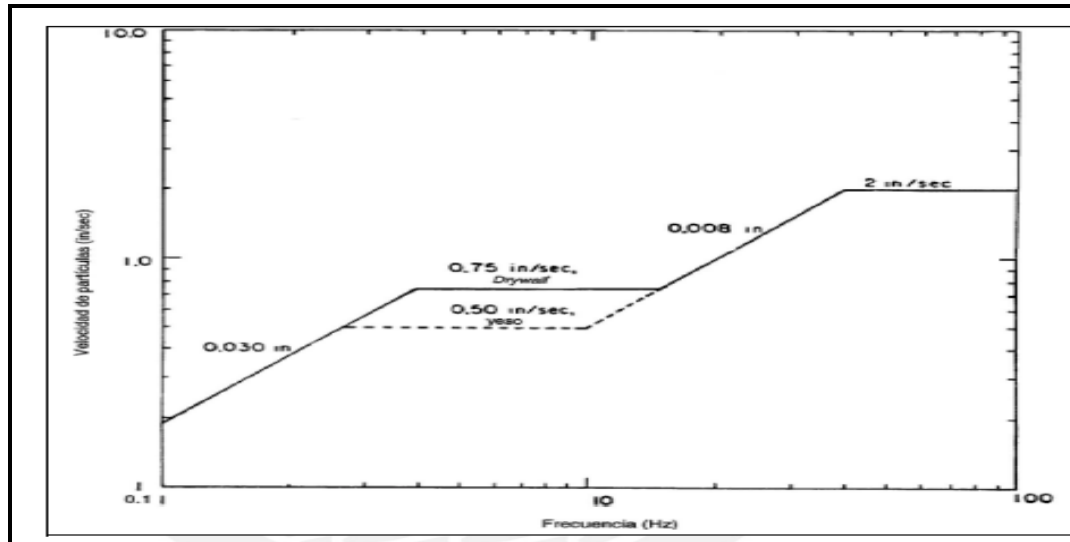
Baja frecuencia: < 40 Hz, todo pico espectral que se produzca por debajo de 40 Hz y dentro de una faja de 6 dB (o sea, 5% de la amplitud verificada a la frecuencia predominante) justifica el empleo del criterio de baja frecuencia.

Alta frecuencia: > 40 Hz

Fuente: Informe Tecnico de Orica Mining Services (2009)

Debido a que el daño en las estructuras se encuentra directamente relacionado a las velocidades de la partícula y al nivel de la frecuencia, el USBM creó un gráfico donde se combinan ambos parámetros, para así, establecer los límites donde es posible que ocurra una falla.

**FIGURA 23. NORMATIVA UNITED STATES BUREAU OF MINES
(USBM)**



Fuente: Informe Técnico de Orica Mining Services (2009)

b). Office of Surface Mining (OSM)

Por último, la Oficina de Minería de Superficie (OSM), cuando preparaba sus normas, modificó los criterios propuestos por la USBM basados en contrapropuestas que recibieron y que contenían estándares menos rigurosos, similares al criterio alternativo de voladuras de la USBM.

Reconociendo una dependencia de la frecuencia para la vibración asociada con la distancia, la Oficina de Minería de Superficie presentó su norma de la siguiente manera:

TABLA 09. NORMATIVA OFFICE OF SURFACE MINING (OSM)

DISTANCIA AL AREA DE LA VOLADURA	VELOCIDAD MAXIMA DE PARTICULA (mm/s)	DISTANCIA REDUCIDA QUE SE ACONSEJA CUANDO NO SE DISPONE DE INSTRUMENTACION (m/kg ^{1/2})
0 a 90 m	32	22,30
90 a 1500 m	25	24,50
> 1500 m	19	29,00

Fuente: Informe Tecnico de Orica Mining Services (2009)

Esta tabla combina los efectos de la distancia y de la frecuencia, en distancias cortas, predomina la vibración con alta frecuencia. En distancias más grandes, la vibración de alta frecuencia se ha atenuado o disipado y predomina la vibración de baja frecuencia. Los edificios tienen características de respuesta de baja frecuencia, entrarán en resonancia y pueden resultar con daños. Por lo tanto, para distancias grandes se ordena una velocidad pico de partícula más baja, 19 mm/s. y una distancia escalada mayor $D_s = 29.5$. En las distancias más cortas se permite una velocidad pico de partícula más alta, 31.8 mm/s. y una distancia escalada menor, $D_s = 22.7$

3.2.3 Normativas Peruanas de Vibraciones

a). Guía Ambiental para Perforación y Voladura en Operaciones Mineras.- Sub Sector de Minería – Dirección General de Asuntos Ambientales – Setiembre 1995

Los límites de vibración son importantes; el nivel por encima del cual es probable la ocurrencia de daños y el nivel por encima del cual es probable que se quejen los residentes vecinos. No hay un nivel preciso en el cual empiecen a ocurrir daños. El nivel de daños depende del tipo, condición y edad de la estructura, el tipo del terreno sobre el cual se ha construido la estructura y la frecuencia de la vibración en hertz. En general, todos los edificios públicos y privados, viviendas y otras instalaciones (por ejemplo torres de agua, tuberías y otros servicios públicos, túneles, minas subterráneas, represas, pozas, etc.) deberán protegerse de daños inducidos por voladuras, que sean el resultado de vibraciones de tierra.

b). Velocidad Máxima Partícula Pico

La vibración máxima de tierra no deberá exceder los siguientes límites en donde se encuentre cualquier vivienda, edificio público, colegio, iglesia, o edificios comunal o institucional fuera del área de coladura:

TABLA 10. NORMATIVA PERUANA DE VIBRACIONES

Distancia (D) desde el área de voladura en pies	Velocidad de partícula máxima permitida (V _{max}) para vibración de tierra en pulgadas/segundo ¹	Factor de distancia a escala por aplicación sin monitoreo sísmico ² D
0a 300	1,25	50
301 a 5000	1,00	55
5001 a más	0,75	65

Fuente. Guía Ambiental para Perforación y Voladura- Setiembre 1995

La vibración de tierra se medirá como velocidad de partícula. La velocidad de partícula deberá registrarse en tres direcciones recíprocamente perpendiculares. La velocidad de partícula pico máxima permitida se deberá aplicar a cada una de las tres mediciones. Aplicable a la ecuación de distancia a escala.

c). Ecuación de distancia a escala:

Un operador podrá usar la ecuación de distancia a escala $W=(D/Ds)^2$, para determinar el peso de carga permitido de los explosivos por detonarse en cualquier período de 8 milésimas de segundo, sin monitoreo sísmico, donde:

W = el peso máximo de explosivos, en libras;

D = la distancia, en pies, desde el área de voladura hasta la estructura protegida más cercana; y

Ds = el factor de distancia a escala

El desarrollo de un factor de distancia a escala modificado puede ser utilizado por el operador, si de justifica en base a registros sismográficos de las operaciones

de voladura en el área de la mina. El factor de distancia a escala modificado deberá ser determinado de manera tal que la velocidad de partícula de la vibración de tierra pronosticada no exceda los valores establecidos en el cuadro anterior.

En general, las vibraciones de tierra de menos de 2 pulgadas por segundo (5,1cm/seg) rara vez ocasionan daños a la propiedad o a estructuras construidas. (51 mm/seg)

CAPITULO IV. METODOLOGIA DE MEDICION

4.1 MATERIALES Y EQUIPOS USADOS.

4.1.1 Instrumentación para el Monitoreo de Vibraciones

La instrumentación que se utiliza para medir las vibraciones de la roca inducidas por voladura, consta de los siguientes componentes.

- Transductores (geófonos o acelerómetros) que se instalan en forma solidaria a la roca.
- Un sistema de cable que llevan la señal captada por los transductores al equipo de monitoreo.
- Un equipo de adquisición, el cual recibe la señal y la guarda en la memoria.

- Un computador, el cual tiene el software requerido para el traspaso de la información desde el equipo monitor, y su posterior análisis.

IMAGEN 03. EQUIPOS DE SISMÓGRAFOS INSTANTEL.



Fuente. Fotografía de la Base de Datos de Orica

4.1.2 Tipo de Sensores (Transductores)

Gran parte de las capacidades y ventajas de la técnica de monitoreo de vibraciones descansa en la habilidad para recolectar datos de vibración de buena calidad. La característica de estos datos tiene directa relación con el tipo de transductor utilizado, la técnica empleada para su instalación y orientación.

Los dos tipos básicos de transductores usados para medir las vibraciones del terreno son el acelerómetro y el geófono. En la práctica, la selección de los transductores es un compromiso entre la precisión, el costo y la relación señal ruido.

4.1.3 Instalación de Sensores

La cantidad de información utilizable de cada registro de vibraciones depende de la ubicación y orientación de los transductores. La forma de la onda recibida es función de lo siguiente:

- Propiedades y cantidad de explosivo.
- Configuración geométrica de la fuente y detector.
- Orientación del detector.
- Propiedades del transductor.
- Propiedades de la roca (ejemplo. Velocidad de la onda-p).

4.1.4 Numero de Sensores (Transductores)

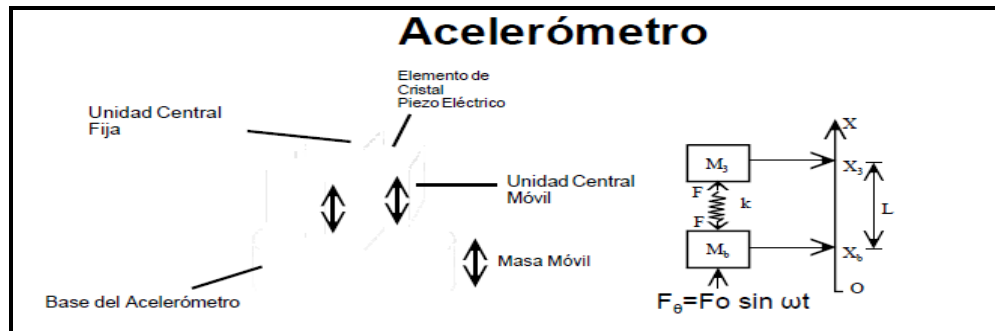
El número de transductores usados depende de la cantidad de información requerida.

Si el interés principal es confirmar la detonación e cada carga (o grupo de carga en cada retardo), o la medición de la dispersión de los retardos, entonces se requerirá solo un transductor y su localización no será muy crítica.

Si se desea examinar la contribución de carga de la voladura, o si el interés es conocer la forma de la onda por cada componente, La fuente generadora de cada vibración debe ser conocida. Se requiere para esto una cuidadosa ubicación y selección del número de transductores a utilizar.

4.1.5 Tipo de Sensores (Transductores)

FIGURA 24. TIPO DE SENSOR - ACELEROMETRO

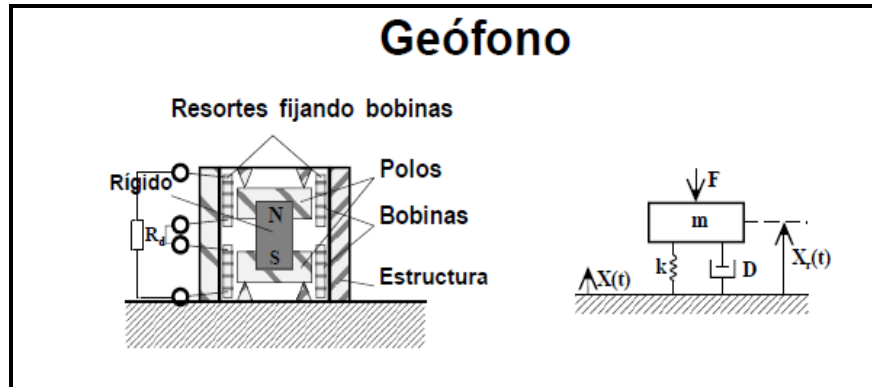


Fuente. Manual de Vibraciones de ASP Blastronics

Características Generales.

- Mejor respuesta en un amplio rango de frecuencias (1Hz a 20.000Hz)
- Su unidad de medida es el g ($1g=9.8 \text{ m/s}^2$), con rangos de 0-250g.
- No poseen partes móviles, lo que resulta en una mayor fiabilidad
- La deformación del cristal piezoeléctrico genera voltajes muy pequeños que deben amplificarse con elementos externos
- Son de pequeño tamaño
- Alto costo (aprox. US\$ 1.000)

FIGURA 25. TIPO DE SENSOR - GEÓFONO



Fuente. Manual de Vibraciones de ASP Blastronics

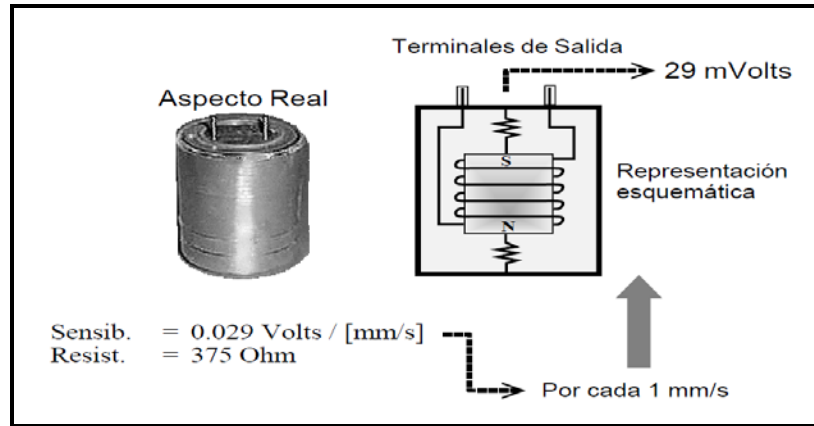
Características Generales

- Su unidad de medida es el Volt/mm/s
- Entregan una medición directa de la velocidad
- Miden bien en el rango de 1mm/s hasta 1200mm/s
- Su respuesta a la frecuencia varía entre 4.5 a 1000 Hz
- La sensibilidad varía entre 0.003Volts/[mm/s] a 0.041Volts/[mm/s]
- Bajo costo (aprox. US\$ 100).

Los equipos con los que se realizaron las mediciones fueron los sismógrafos Instantel los cuales cuentan con geófonos para sus mediciones por lo que revisaremos los geófonos.

4.1.6 Sensibilidad de Geófonos

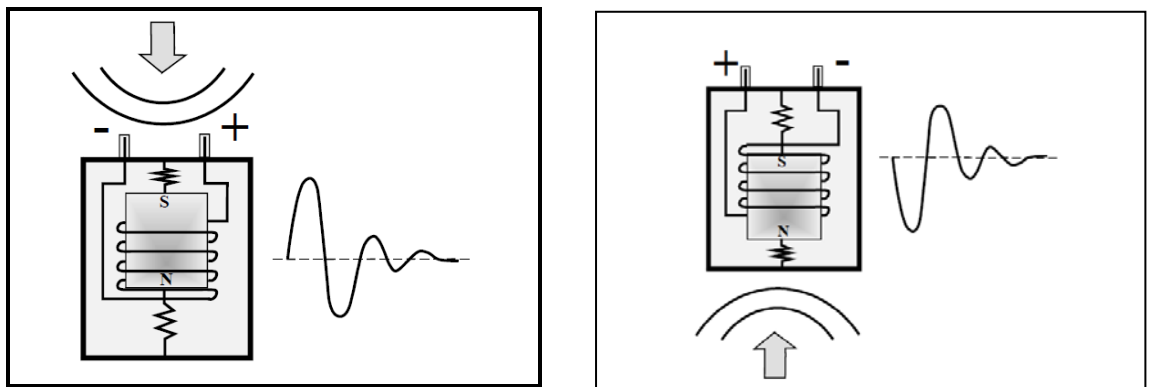
FIGURA 26. SENSIBILIDAD DE GEÓFONOS.



Fuente. Manual de Vibraciones de ASP Blastronics

4.1.7 Interpretación de Signos. (+, -)

FIGURA 27. INTERPRETACIÓN DE LOS GEÓFONOS. (+, -)



Fuente. Manual de Vibraciones de ASP Blastronics

Podemos ver en las graficas superiores que la onda será graficada según la dirección por donde sea percibida por los geófonos, mediante esta simple recepción se puede apreciar la dirección de la onda generada por la carga explosiva. Además debemos tomar en cuenta que cada carga genera una onda de vibración lo cual sumando a la dirección y ubicación que nos da el geófono nos permite saber la ubicación exacta del taladro detonado, como se puede apreciar en el grafico inferior.

4.1.8 Modo de Funcionamiento de los Geófonos Instantel Usados

Esta sección describe como operan el transductor de Instantel. También discute el programa de Chequeo de Sensor de Instantel, el filtro anti-alias, y las técnicas de análisis de información usadas para calcular los resultados del monitoreo.

a). Transductor

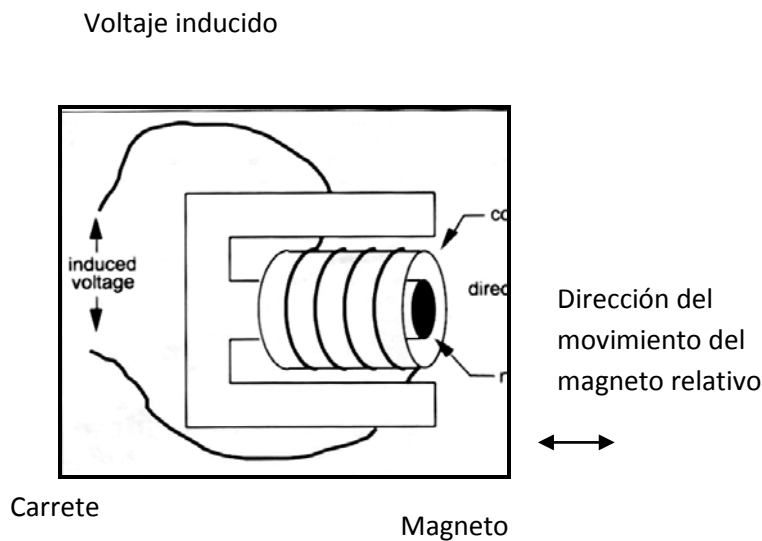
Un transductor mide las vibraciones del suelo. El mecanismo actual dentro del transductor es llamado geófono. Los transductores tienen un geófono, llamado transductor uniaxial, o tres geófonos, llamados transductores estándar.

b). Operación Geófono

Funcionalmente un sensor de geófono es un carrete de alambre suspendido alrededor de un magneto. El magneto es libre de moverse en un terreno de líneas de flujo magnéticos. Por la Ley de Lenz, el voltaje inducido es proporcional a la velocidad a la cual las líneas de flujo son atravesadas. El voltaje de carrete inducido, por lo tanto, es proporcional a la velocidad relativa del carrete al

magneto. En la práctica, no importa si el carrete o el magneto se mueven. Solo es importante el movimiento y la velocidad relativa a cada uno de ellos

FIGURA 28. OPERACIÓN DE GEÓFONO (ESQUEMA INTERNO DE UN GEÓFONO)



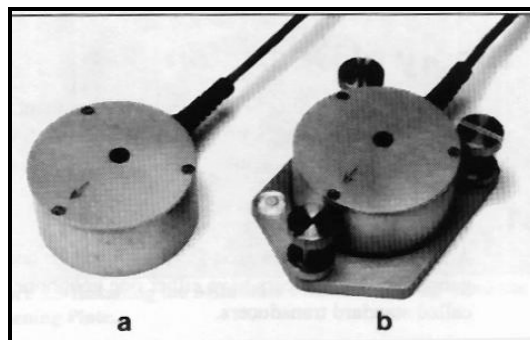
Fuente. Manual de Vibraciones de ASP Blastronics

Las especificaciones del sensor geófono dan un número conocido como Sensibilidad Intrínseca del Voltaje. Es el voltaje del carrete inducido para un carrete dado versus la velocidad del magneto con las unidades de V/pulgadas/s. En aplicaciones sísmicas, el magneto es movido por la energía de la voladura ya que esta acoplado a las partículas del terreno circundante. El carrete, debido a su inercia, no se mueve y el movimiento resultante del magneto versus el carrete induce a un voltaje el cual es proporcional a la velocidad de la partícula.

c). **Transductor Estándar de Instantel**

Instantel ofrece un transductor estándar de 2 a 300 Hz en un paquete redondo. El transductor puede ser instalado en el piso, pared, o techo usando una variedad de procedimientos de instalación incluyendo pernos de burbujas, soterramiento, varilla de montaje, o una placa niveladora opcional con un pie nivelador y un nivel de burbuja integrado. La figura de abajo incluye un Transductor Estándar Instantel (a) y un Transductor Estándar con una placa niveladora (b).

FIGURA 29. TRANSDUCTOR ESTÁNDAR DE INSTANTEL.



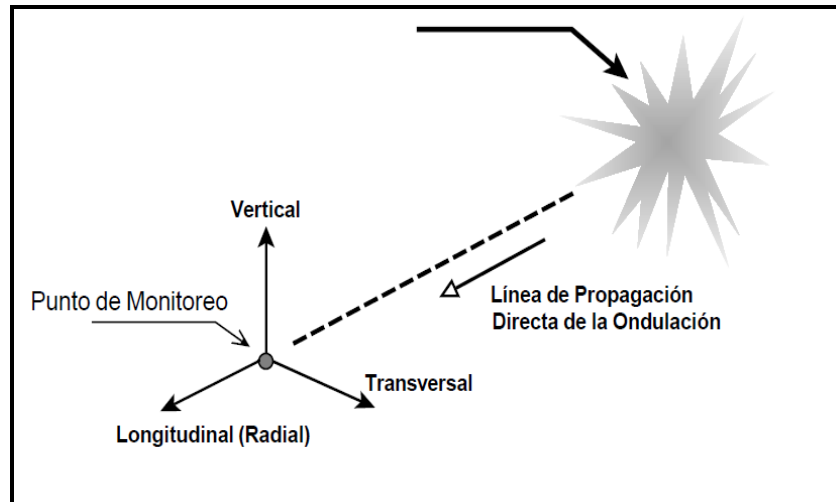
Fuente: Manual de Uso de Equipos Instantel.

4.1.9 Instalación de Orientación de Geófonos

En la presente tesis hacemos hincapié en algo muy importantes, que es que la voladura actúa como una fuente sísmica de menor tiempo de duración. Por eso varios de los análisis estructurales usados son de pruebas hechas para proteger las casas de sismos. Viendo esto sabemos que la voladura tiene una línea de propagación directa al punto de monitoreo que se acerca como una onda, por lo

que sería registrado en tres direcciones por el geófono como se muestra en la imagen inferior.

FIGURA 30. INSTALACIÓN DE ORIENTACIÓN DE GEÓFONOS



Fuente. Manual de Vibraciones de ASP Blastronics

5.2 EQUIPOS Y SISMÓGRAFOS USADOS

Para los trabajos de recolección de datos se utilizaron cuatro equipos de tipo sismógrafo sismógrafos Minimate Plus de la compañía Instanetel, proporcionados por la Colorado School of Mines.

Un sismógrafo es un instrumento que registra el movimiento del suelo causado por el paso de las ondas sísmicas. Los sismógrafos en minería están contruidos especialmente para realizar los estudios de vibraciones, producto de una voladura, y sobre todo, para poder establecer el cumplimiento con las normas y evaluar el desempeño de los explosivos.

Sus partes esenciales son el geófono, un amplificador y un registrador. Un geófono es el encargado de captar las vibraciones mecánicas y las transforma en corriente eléctrica, transmitida por cable al amplificador que a su vez las registra en la memoria, para luego transmitir toda la data a un microcomputador. Los datos resultantes son suministrados en términos de velocidad y frecuencia.

Las velocidades de partícula son representadas por un vector de tres componentes el cual tiene la dirección vertical, la longitudinal y la transversal. La velocidad pico no se produce simultáneamente en las tres direcciones, de este modo, lo que debe ser medido, de acuerdo a las normas técnicas, es la velocidad resultante a cada intervalo de tiempo de tal manera que se pueda obtener la velocidad máxima.

Los sismógrafos utilizados constaban de un geófono, el cual medía las vibraciones en el suelo; y el micrófono, encargado de medir las ondas aéreas que se generaban. Debido a que el presente proyecto se trata solo de voladuras de prueba, en donde el explosivo no se encontraba confinado, los datos de las presiones de aire sobrepasaban cabalmente los límites registrables de la máquina, por lo que se concentró en las mediciones hechas por los geófonos.

TABLA 11. DATOS TÉCNICOS DE LOS GEÓFONOS Y MICRÓFONOS

Geophone	Seismic	Range	10 in/s
		Trigger Levels	0.005 to 10 in/s
		Accuracy	3% at 15Hz
Microphone	Air Linear	Range	0.5 to 500 Pa
		Trigger Levels	100-148 dB
		Accuracy	0.2 dB at 30Hz

Fuente: Manual de Uso de Equipos Instantel.

CAPITULO V. ANÁLISIS DE CRITERIO DE DAÑO DE CASAS

Revisando la teoría anterior usada por Lope y Jimeno para lo que es el criterio de daño por estructuras podemos ver su aplicación a la realidad peruana. El estudio de criterio de daño a las casas de tierra apisonada se realizó tomando en cuenta la teoría de sismicidad usada tanto por la ingeniería estructural. Así podemos llegar a las siguientes conclusiones para hacer un análisis adecuado del nivel de riesgo de una estructura.

Para poder lograr un análisis adecuado de nivel de riesgo de una estructura por vibración, se debe empezar por saber con cuánto de vibración se podría generar un daño a la estructura. Si no tenemos esa información se tendrá la seguridad de andar a ciegas, pudiendo realizar para evitar el daño, secuencias o carguíos o demasiado conservadores o demasiado arriesgados. Perdiéndose en el primer caso en fragmentación y productividad de equipos (Frentes Duros o Amarrados). Y en

el segundo caso se podría generar daño a la casa (Problemas con las comunidades cercanas.)

Por ello para evitar estos dos panoramas, debemos empezar un análisis de riesgo vibracional, analizando aquello que queremos proteger. Sabiendo esto recién podemos pasar al análisis de cómo controlar nuestras voladuras.

Para un adecuado análisis de riesgo en construcciones debemos ver los siguientes aspectos.

- Investigación del Terreno donde se encuentra la construcción.
- Cimentación de las Construcciones.
- Condiciones de las Construcciones.
- Como se comportan las vibraciones en el terreno de la construcción.

Con el conocimiento de estos parámetros se podrá tomar recién una decisión para la Operación de Voladura y realizar un análisis de riesgo adecuado.

Debemos acotar que entonces para el presente análisis no es suficiente con manejar el tema de voladura (Perforación, Carguío, Secuencia de Disparo, etc.), sino que también es importante tener conocimientos de Mecánica de Suelos e Ingeniería Civil. Así como en el caso de la Percepción Humana lo óptimo sería tener conocimientos del tema de Medicina. Las carreras podemos observar entonces siempre se irán acoplando y apoyándose entre sí.

Mediante el análisis de los tipos de casas ubicadas en territorio peruano, debemos considerar que las casas que podrían presentar más problemas a los

movimientos sísmicos Vibracionales son las casas hechas sin una fabricación estructural definida, las cuales son principalmente las casas del tipo tapial y las de adobe, de estas dos las del tipo más sensible son las casas del tipo tapial que son las que más se encuentran en las inmediaciones de los centros mineros.

Entonces para lograr una normativa adecuada debemos buscar el tipo de casa de las más comunes deberemos análisis mediante un análisis sísmico tanto una casa de tapial como una de adobe para ver cuál de las dos puede ser la que es más débil estructuralmente y puede ser considerada como el límite permisible más bajo.

Mediante el análisis sísmico y consultando la bibliografía que hay respecto a vulnerabilidad sísmica de los tipos de casas de tierra. Se llegó a la conclusión que el tipo a estudiar será la casa de tapial o tierra apisonada debido a que presenta una vulnerabilidad sísmica mayor, y que es la de mayor construcción en las zonas cercanas a las mineras, por lo que se tendría mayor acceso a las casas para hacer las mediciones de frecuencia y vibración respectivas. Entonces de las casas estipuladas en el Anexo, se elegirá la casa del primer grupo para el análisis sísmico con el SAP y para los cálculos de gabinete y medición de frecuencias de resonancia.

Teniendo las casas de tapial como base para los cálculos de límites permisibles de vibración. Para la búsqueda del límite permisible de vibración para ese tipo de casas realizaremos los siguientes análisis.

1. Análisis de Laboratorio (Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico de la Universidad de Los Andes (CITEC))

2. Análisis Sísmico de una Casa Tapial (Programa SAP 2000)
3. Calculo de Gabinete (Formulas Estructurales basadas en la Normativa Sismo-Resistente Peruana – E30)
4. Monitoreo en Campo de la Frecuencia de Resonancia (Vivienda de Tapial)

5.1 COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE UNA CASA TAPIAL (ANÁLISIS DE LABORATORIO)

Teniendo el tipo de estructuras mencionadas arriba como nuestro tema principal de análisis tenemos que referirnos a las pruebas realizadas por la Universidad de Los Andes en Bogotá, específicamente a los Ingenieros K Diaz y J Rios que presentaron un documento para determinar el comportamiento sísmico de estructuras construidas en tapia pisada.

Se realizo una Modelación de viviendas a escala reducida para someterla a cargas dinámicas en la mesa vibratoria del Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico de la Universidad de Los Andes (CITEC).

El resumen de las propiedades de los materiales utilizados se describe a continuación, con estos datos se realizaron las fases tanto experimental como analítica.

**TABLA 12. COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE UNA CASA TAPIAL –
COMPRESIÓN (MPA)**

Compresion (Mpa)					
Material	p (kg/m3)	Esfuerzo Maximo	σ Estandar	Modulo Elastico	σ Estandar
Adobe	1770	0.8	0.09	45.9	6.52
Tapia	1930	0.6	0.014	55.9	23.4

**Fuente. Informe del Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico de la
Universidad de Los Andes (CITEC).**

**TABLA 13. COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE UNA CASA TAPIAL –
TRACCIÓN (MPA)**

Traccion (Mpa)					
Material	p (kg/m3)	Esfuerzo Maximo	σ Estandar	Modulo Elastico	σ Estandar
Adobe	1770	0.016	0.001	16.52	1.41
Tapia	1930	0.023	0.0029	29.52	2.82

**Fuente. Informe del Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico de la
Universidad de Los Andes (CITEC).**

Analizando tanto las propiedades de compresión como las de tracción podemos ver que tanto los materiales de adobe como de tapia no tiene una resistencia a la tracción muy buena, lo que es un problema debido a que las fuerzas de tracción son las más generadas por las voladuras y son las que más daño causan a las estructuras según los estudios realizados en todo el mundo.

A continuación describiremos la prueba experimental realizada en Colombia para el tipo de casa de tapial.

5.1.1 Prueba de Simulación Sísmica de una Casa Tapial a escala reducida

a). Equipo Usado

Simulador sísmico

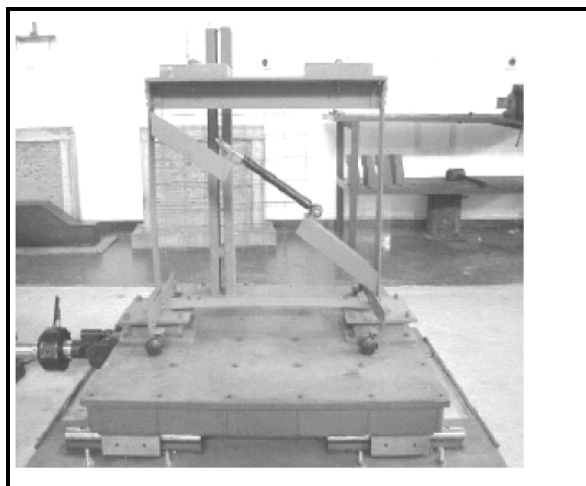
La mesa vibratoria es un sistema que permite realizar ensayos de simulación sísmica en estructuras a escala reducida (ver Figura 5). Su objetivo principal es el estudio del comportamiento dinámico y/o sísmico de estructuras construidas con materiales como concreto, acero y principalmente estructuras frágiles de mampostería, adobe o tapia pisada.

En ella se pueden probar modelos a escala con pesos hasta de 1000 kg y frecuencias de excitación entre 0 y 100 Hz. La mesa vibratoria es de un grado de libertad y consta de una plataforma cuadrada de 1.05 m de lado, hecha de acero (A36) con un peso de 500 Kg.

Para asegurar el espécimen del ensayo y eventualmente, también para fijar un marco de referencia, la plataforma tiene anclajes roscados y pasantes, ubicados en una cuadrícula de 0.20 m x 0.20 m. La plataforma metálica está soportada por un sistema de rodamientos dobles. La mesa se apoya en una cimentación maciza de concreto de 27000 kg que tiene 2.90 m de ancho por 4.40 m de largo por 0.90 m de espesor.

La plataforma es impulsada por un actuador hidráulico con capacidad de 5000 kg, perteneciente al sistema electrónico e hidráulico del laboratorio (MTS), generador de las cargas dinámicas necesarias para el movimiento de la mesa vibratoria.

IMAGEN 07. IMAGEN DEL SIMULADOR SÍSMICO



Fuente. Informe del Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico de la Universidad de Los Andes (CITEC).

Descripción del Modelo Usado. Se construyó un modelo de tapia pisada (casas). Se construyó un tapial (formaleta para la compactación de la tierra) especial, compuesto de dos tablas de madera con longitud de 0.40 m, altura de 0.20 m y una separación entre tablas de 0.10 m, ésta separación se garantiza por medio de cuatro pernos ($\varphi = 5/16''$).

Se ubicaron dos ventanas cuadradas de 0.10 x 0.10 m, centradas en los muros y dos puertas de 0.40 x 0.20 m, igualmente centradas. De acuerdo a la escala, el espesor de muros fue de 0.10 m. La cubierta se construyó en madera (balso),

teniendo en cuenta los entramados típicos para este tipo de edificaciones. La capa de apoyo de la teja se construyó con entramado en chusque (caña muy delgada), amarrado a la estructura principal de cubierta.

Sobre el entramado de caña se colocó una capa delgada (espesor de 0.02 m) de mortero de tierra, donde se adhirieron unas platinas metálicas, con el fin de simular el peso real de la cubierta, luego se adicionó otra capa de mortero de tierra (espesor de 0.03 m), donde finalmente iría la teja pegada

IMAGEN 07. IMAGEN DE LA CASA DE TAPIAL REPRODUCIDA



Fuente. Informe del Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico de la Universidad de Los Andes (CITEC).

Una vez establecidos los diseños de los modelos de las casas a escala reducida (1:5), se procedió a la construcción, las características de los modelos se describen en la Tabla

TABLA 14. DATOS DEL MODELO DE TAPIAL REPRODUCIDO.

Modelo	Material	Dimensiones	Tipo de Refuerzo
1	Tapia Pisada	Largo: 60 cm Ancho 60 cm Alto 90 cm	Ninguno

Fuente. Informe del Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico de la Universidad de Los Andes (CITEC).

b). Instrumentación

La instrumentación de los modelos se basó en la colocación de acelerómetros en la mesa vibratoria, y en la cubierta.

La Figura superior muestra algunos detalles de la colocación de instrumentos de medición en los modelos. La instrumentación es útil principalmente para corroborar datos de señales de entrada y obtener propiedades dinámicas propias de cada modelo hasta niveles de aceleración medibles.

c). **Resultados obtenidos**

**TABLA 15. RESULTADOS OBTENIDOS POR EL MODELO DE TAPIAL
CON EL SIMULADOR SÍSMICO.**

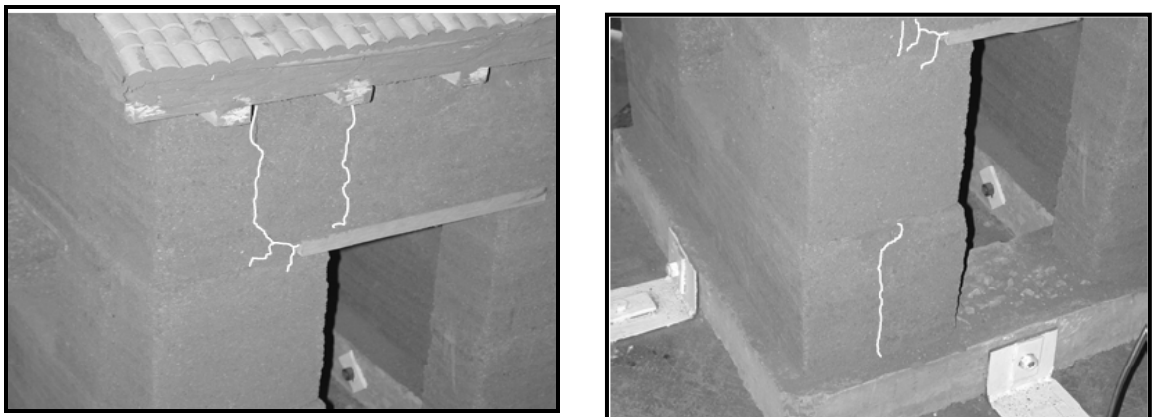
Gravedad [g]	Deriva max [mm]	Rigidez [kg/mm]	Cortante base [kg-f]	Detalle
0.04	3.62	291.56	32.74	No Daños
0.08	3.62	280.31	32.74	No Daños
0.12	9.28	248.78	57.82	Leve Fisuracion
0.16	6.74	250.5	57.82	Pequeñas Fisuras
0.20	15.6	189.8	85.08	Pequeñas Fisuras
0.25	11.7	164.72	101.95	Fisuracion
0.30	13.5	146.07	124.98	Grietas Visibles
0.35	-	-	-	Deterioro del Modelo

**Fuente. Informe del Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico de la
Universidad de Los Andes (CITEC).**

Los primeros agrietamientos se presentan en una aceleración de horizontal 0.16 g de la señal de entrada. El agrietamiento se inició con grietas pequeñas a 45 grados en las esquinas de las ventanas, luego se generaron grietas verticales en los dinteles de las puertas que se extendían hasta la parte superior de los muros y grietas verticales y diagonales en la parte inferior de los muros.

Luego de aplicarle un porcentaje mayor de aceleración al modelo de 0.35g, se observan fisuras de gran tamaño por todo el modelo, que deterioraran la rigidez del modelo, produciendo desprendimiento de bloques de material. Finalmente, el colapso de la edificación es inminente para una aceleración de 0.45g o mayor, debido al desprendimiento entre bloques de material que conforman los muros y el desprendimiento de los muros en la base, presentándose desplazamiento del modelo.

IMAGEN 08,09. IMÁGENES DE LAS CASA TAPIAL SOMETIDA A FISURACION.



Fuente. Informe del Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico de la Universidad de Los Andes (CITEC).

Aquí podemos notar que las grietas producidas por las vibraciones son generadas principalmente en las esquinas de las ventanas y en los dinteles de las puertas, por lo que las grietas en las partes superiores de las casas no pueden ser producto de las voladuras a menos que se encuentren grietas en las zonas descritas con anterioridad.

La prueba realizada nos brinda también el dato de 0.08g como el límite de una casa de tapial (La más leve de las edificaciones descritas) por lo que no basaremos en ese dato como el límite permisible para las vibraciones cercanas a las casas de tapial.

A continuación se hizo los análisis de resultado para lo que es periodo fundamental de la casa de tapial, describiéndose a continuación.

TABLA 16. PERIODO FUNDAMENTAL Y FRECUENCIA OBTENIDA DE LAS PRUEBAS.

Modelo	Periodo Fundamental	Frecuencia de Resonancia
Tierra Apisonada	0.06 seg	16.7 Hz

Fuente. Informe del Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico de la Universidad de Los Andes (CITEC).

Como resultado final de el experimento en laboratorio tenemos que el límite de aceleración permisible es de 0.08 g, y que la frecuencia del periodo fundamental es de 16.7 Hz. Con estos datos iniciales podemos realizar un modelo de velocidad y estimar el límite permisible para las casas de tipo tapial y de estructuras del Perú

5.2. ANÁLISIS SÍSMICO – ESTRUCTURAL (ADOBE Y TAPIAL)

A continuación basándonos en la normativa sismo resistente E30 del Perú y mediante el software SAP 2000 hicimos un análisis estructural de tanto casas de tapial como de casas de adobe para uno y dos pisos de cada uno respectivamente obteniendo los datos descritos a continuación.

5.2.1 Análisis Sísmico de una Vivienda de Tapial de 1 Piso

En el presente Informe se mostrarán los resultados de un análisis sísmico de una estructura de 1 nivel que se usará como “Vivienda” en la Zona 2 correspondiente a la zonificación brindada en el RNE actualmente vigente.

Parámetros Sísmicos:

a) Zonificación Sísmica

Zona2 → $C = 0.15$

b) Condiciones Geotécnicas

Tipo de Suelo: S II

$S = 1.2$

c) Tipo de Edificación

- Uso: Vivienda



- Categoría: Vivienda y otras edificaciones Comunes

$$U = 1.0$$

Cargas a considerar:

Debido a que la edificación en estudio data de un solo piso, solo se considerará el peso del techo sobre él que consta de calamina, cuyas características generales consideraremos como 2.52kg/m^2

d) Detalles de la estructura

Material	γ (ton/m ³)	E (kg/cm ²)
Tapial	1.93	570.18

$$\text{Altura} = 2.50\text{m}$$

$$\text{Periodo fundamental de la estructura} = 0.042\text{seg.}$$

$$\text{Aceleración máxima: } S_{a_{\text{máx}}} = S * U * C * g = 0.18g$$

Donde: g= aceleración de la gravedad

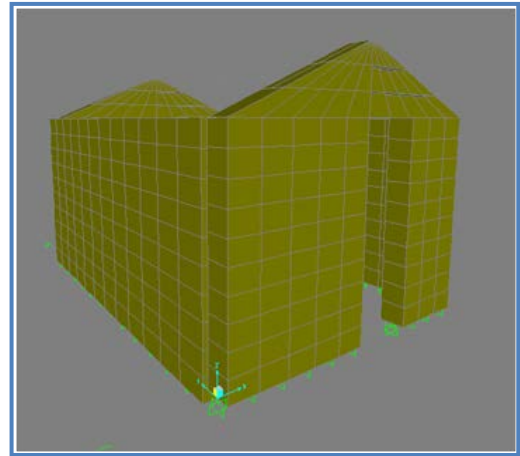
a). Análisis Sísmico

Para el análisis de la estructura se tendrá presente la siguiente relación que proporcionará los efectos de fuerza sísmica en la base en cada dirección.

$$H = S * U * C * P$$

El peso de la vivienda será calculada automáticamente por el software empleado en el análisis.

Imagen modelada en el software SAP2000



Ya modelada la vivienda en estudio en el SAP2000 se procederá al análisis; de esta manera obtenemos lo siguiente:

- *Factores de Participación Modal*

OutputCase	StepType	StepNum	Period Sec	UX Tonf-s2	UY Tonf-s2	UZ Tonf-s2	RX Tonf-m-s2	RY Tonf-m-s2	RZ Tonf-m-s2	ModalMass Tonf-m-s2	ModalStiff Tonf-m
MODAL	Mode	1	0.1598	0.89207	0.02302	-0.02840	-0.04133	1.36532	-1.29611	1	1545.292
MODAL	Mode	2	0.1225	0.05113	-0.23050	0.00156	0.55134	0.08540	-0.56956	1	2632.919
MODAL	Mode	3	0.1100	-0.00686	0.89244	0.00273	-1.29346	-0.00816	1.17940	1	3262.699

De lo mostrado en la figura se pueden apreciar los periodos de los modos de vibración de la estructura teniendo el más significativo de 0.1689 seg.

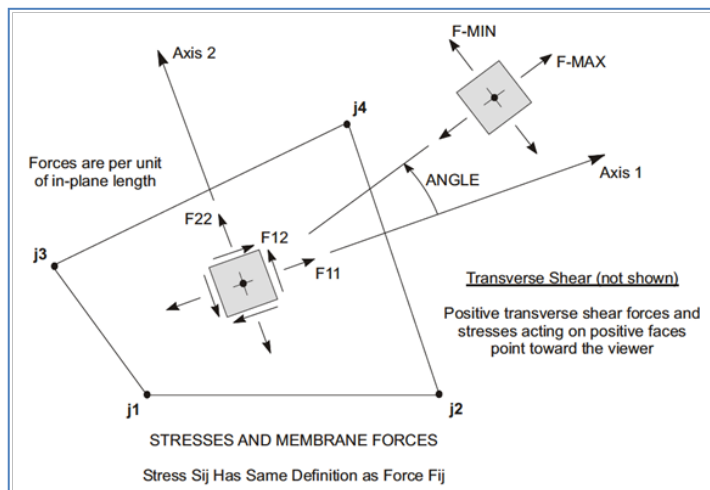
- *Periodos y Frecuencias*

OutputCase	StepType	StepNum	Period Sec	Frequency Cyc/sec	CircFreq rad/sec	Eigenvalue rad2/sec2
MODAL	Mode	1	0.1598	6.2564	39.31	1545.3
MODAL	Mode	2	0.1225	8.1666	51.312	2632.9
MODAL	Mode	3	0.1100	9.0909	57.12	3262.7

Así mismo, el software nos brinda el esquema de las fuerzas a través de los muros de la vivienda.

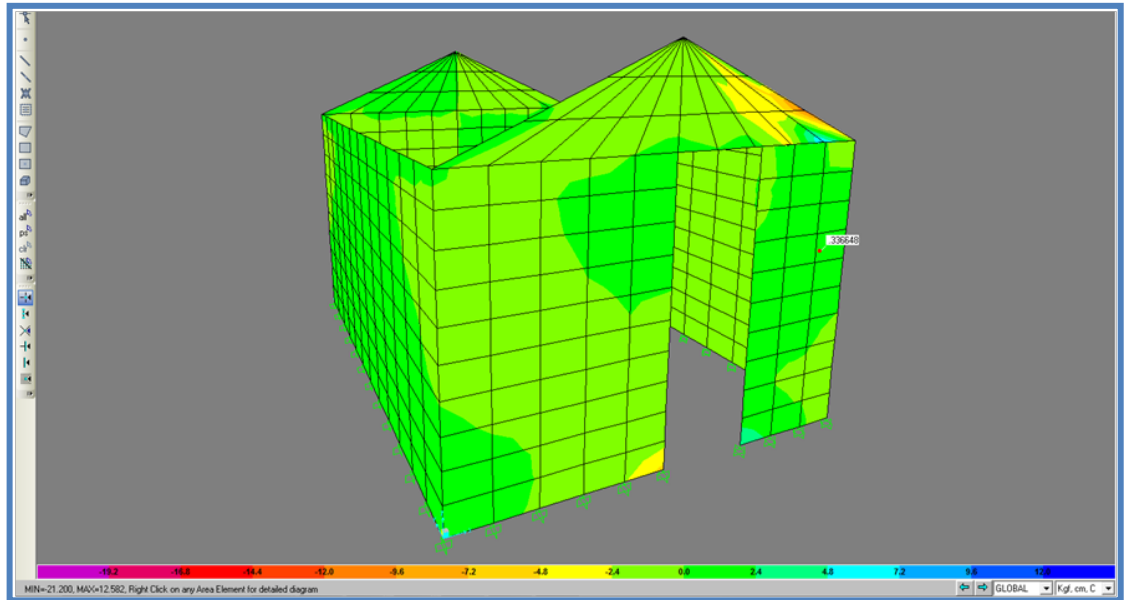
Para poder revisar bien el rango de valores por cada efecto del sismo en ambas direcciones, se mostrarán los efectos F_{11} y F_{22} tanto para los sismos SX y SY, siendo estos las fuerzas sísmicas en la dirección “X” y en la dirección “Y” respectivamente.

De acuerdo con el software SAP2000 las características de fuerzas F_{11} y F_{22} se rige bajo lo siguientes:

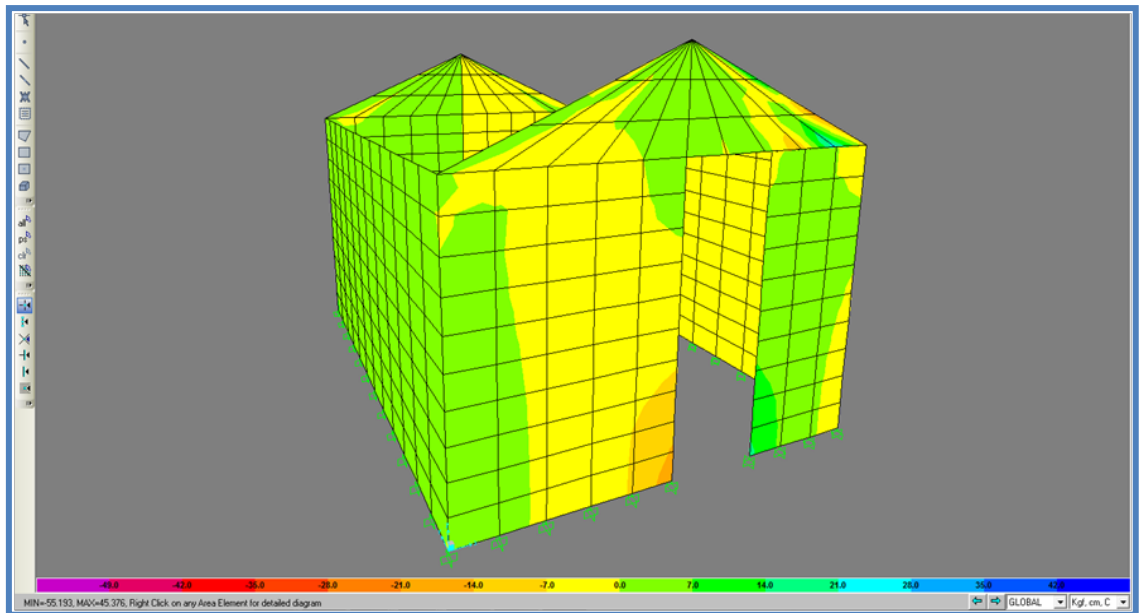


La imagen expuesta puede ser verificada en el capítulo V “The Shell Element” en la pag. 47 del archivo SapBasic.pdf que viene con el software.

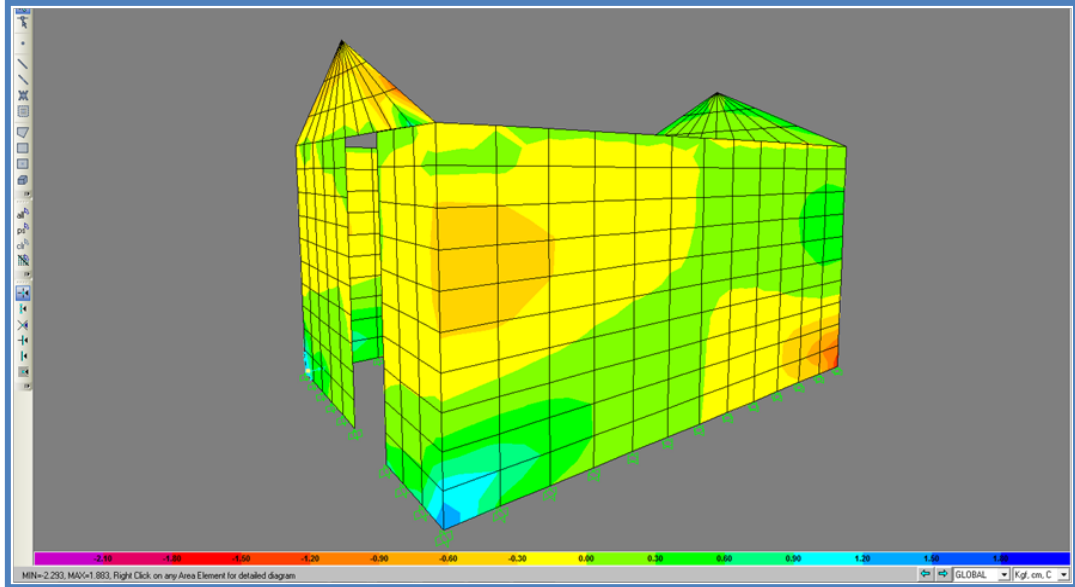
Obs: La dirección “X” considerada va en la cara correspondiente a la ubicación de la puerta frontal de la vivienda.

SX – F11

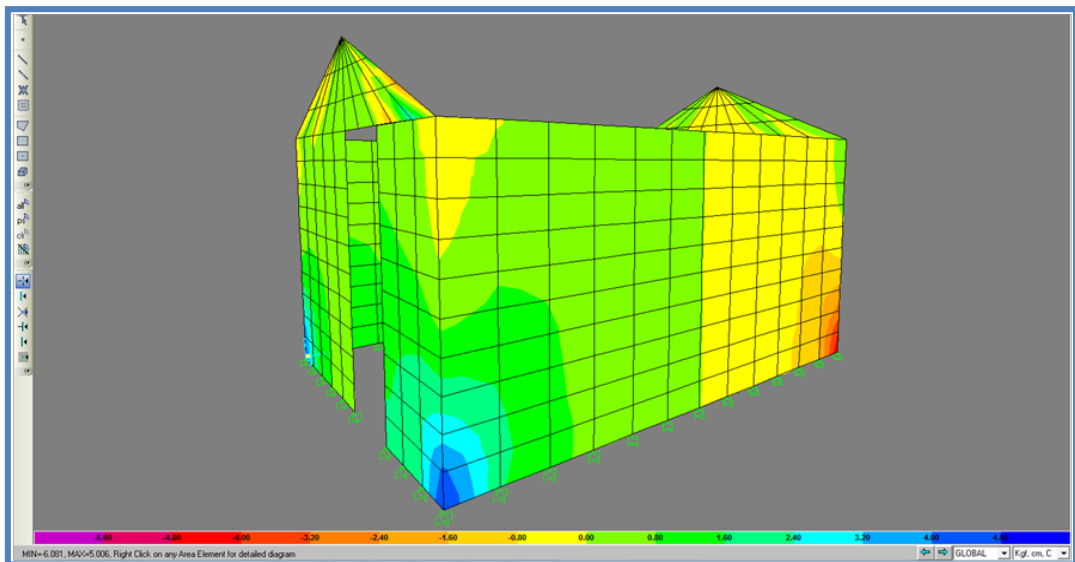
De lo mostrado el valor más significativo es: 7.01 kgf

SX – F22

De lo mostrado el valor más significativo es: 23.73 kgf

SY – F11

De lo mostrado el valor más significativo es: 1.46 kgf

SY – F22

De lo mostrado el valor más significativo es: 4.85 kgf

5.2.2 Análisis Sísmico de una Vivienda de Tapial de 2 Piso

En el presente Informe se mostrarán los resultados de un análisis sísmico de una estructura de 2 niveles que se usará como “Vivienda” en la Zona 2 correspondiente a la zonificación brindada en el RNE actualmente vigente.

Parámetros Sísmicos:

e) Zonificación Sísmica

Zona2 → $C = 0.15$

f) Condiciones Geotécnicas

Tipo de Suelo: S II

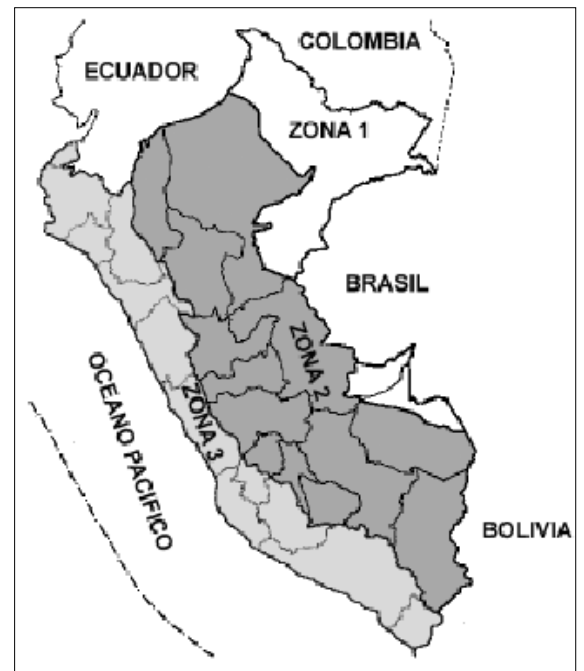
$S = 1.2$

g) Tipo de Edificación

- Uso: Vivienda
- Categoría: Vivienda y otras edificaciones Comunes

$U = 1.0$

Cargas a considerar:



Debido a que la edificación en estudio data de un solo piso, solo se considerará el peso del techo sobre él que consta de calamina, cuyas características generales consideraremos como 2.52kg/m^2

h) Detalles de la estructura

Material	γ (ton/m ³)	E (kg/cm ²)
Tapial	1.93	570.18

Altura = 4.50m

Periodo fundamental de la estructura = 0.075seg.

Aceleración máxima: $S_{a_{\text{máx}}} = S*U*C*g = 0.18g$

Donde: g= aceleración de la gravedad

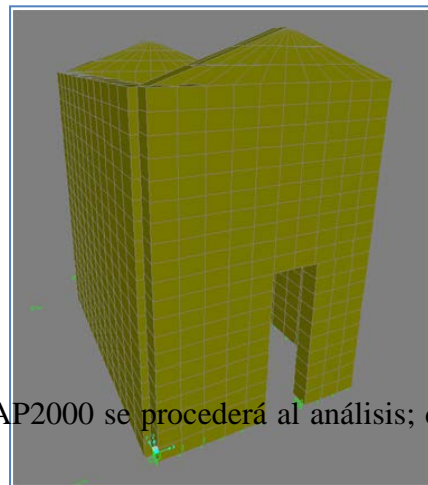
a). **Análisis Sísmico**

Para el análisis de la estructura se tendrá presente la siguiente relación que proporcionará los efectos de fuerza sísmica en la base en cada dirección.

$$H = S*U*C*P$$

El peso de la vivienda será calculada automáticamente por el software empleado en el análisis.

Imagen modelada en el software SAP2000



Ya modelada la vivienda en estudio en el SAP2000 se procederá al análisis; de esta manera obtenemos lo siguiente:

- *Factores de Participación Modal*

OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	RX	RY	RZ	ModalMass	ModalStiff
			Sec	Tonf-s2	Tonf-s2	Tonf-s2	Tonf-m-s2	Tonf-m-s2	Tonf-m-s2	Tonf-m-s2	Tonf-m-s2
MODAL	Mode	1	0.3552	1.32559	-0.01780	-0.02467	0.06810	3.90591	-2.06823	1	312.846
MODAL	Mode	2	0.2525	-0.03443	-1.31936	-0.02592	4.10033	-0.04552	-1.75751	1	619.290
MODAL	Mode	3	0.1964	-0.20432	0.01126	-0.02065	-0.02454	-0.74927	3.00367	1	1023.893
MODAL	Mode	4	0.1426	0.00259	-0.00112	0.00368	-0.02030	-0.00254	-0.00198	1	1940.789
MODAL	Mode	5	0.1288	0.47994	-0.00873	-0.00162	0.02526	0.21576	-1.09029	1	2380.159
MODAL	Mode	6	0.1186	-0.02090	-0.07211	-0.01652	0.27296	-0.00064	-0.04351	1	2808.474

De lo mostrado en la figura se pueden apreciar los periodos de los modos de vibración de la estructura teniendo el más significativo de 0.3754 seg.

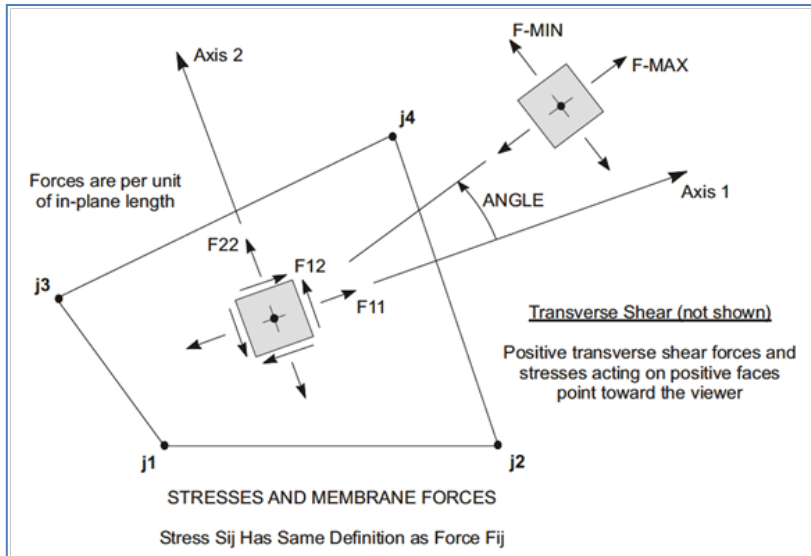
- *Periodos y Frecuencias*

OutputCase	StepType	StepNum	Period	Frequency	CircFreq	Eigenvalue
			Sec	Cyc/sec	rad/sec	rad2/sec2
MODAL	Mode	1	0.3552	2.815	17.687	312.85
MODAL	Mode	2	0.2525	3.9607	24.886	619.29
MODAL	Mode	3	0.1964	5.0927	31.998	1023.9
MODAL	Mode	4	0.1426	7.0115	44.054	1940.8
MODAL	Mode	5	0.1288	7.7647	48.787	2380.2
MODAL	Mode	6	0.1186	8.4344	52.995	2808.5

Así mismo, el software nos brinda el esquema de las fuerzas a través de los muros de la vivienda.

Para poder revisar bien el rango de valores por cada efecto del sismo en ambas direcciones, se mostrarán los efectos F11 y F22 tanto para los sismos SX y SY, siendo estos las fuerzas sísmicas en la dirección “X” y en la dirección “Y” respectivamente.

De acuerdo con el software SAP2000 las características de fuerzas F11 y F22 se rige bajo lo siguientes:

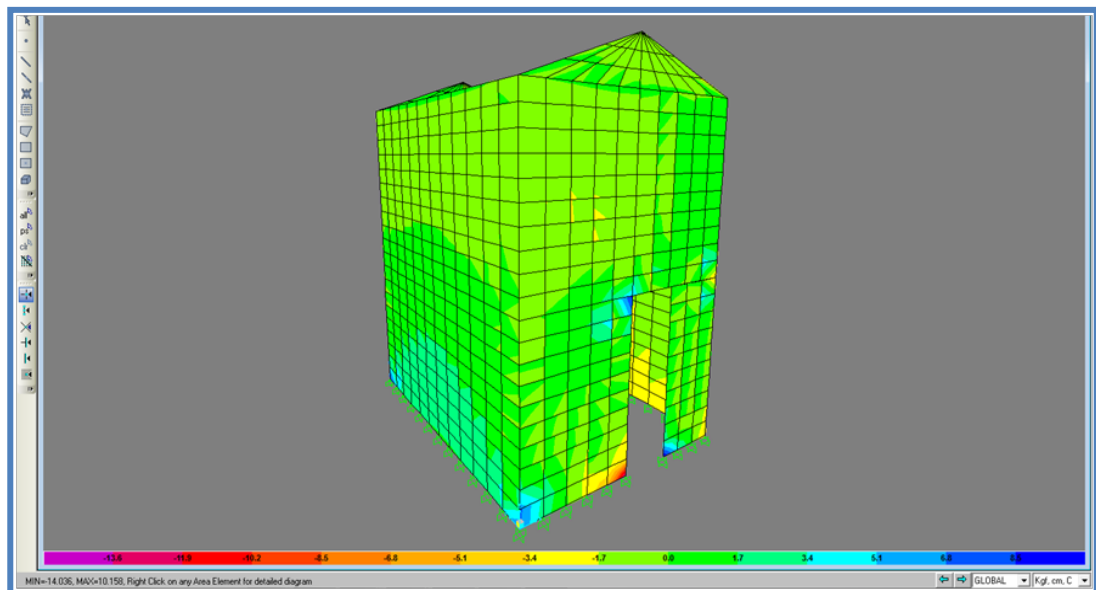


La imagen expuesta puede ser verificada en el capítulo V “The Shell Element” en la pag. 47 del archivo SapBasic.pdf que

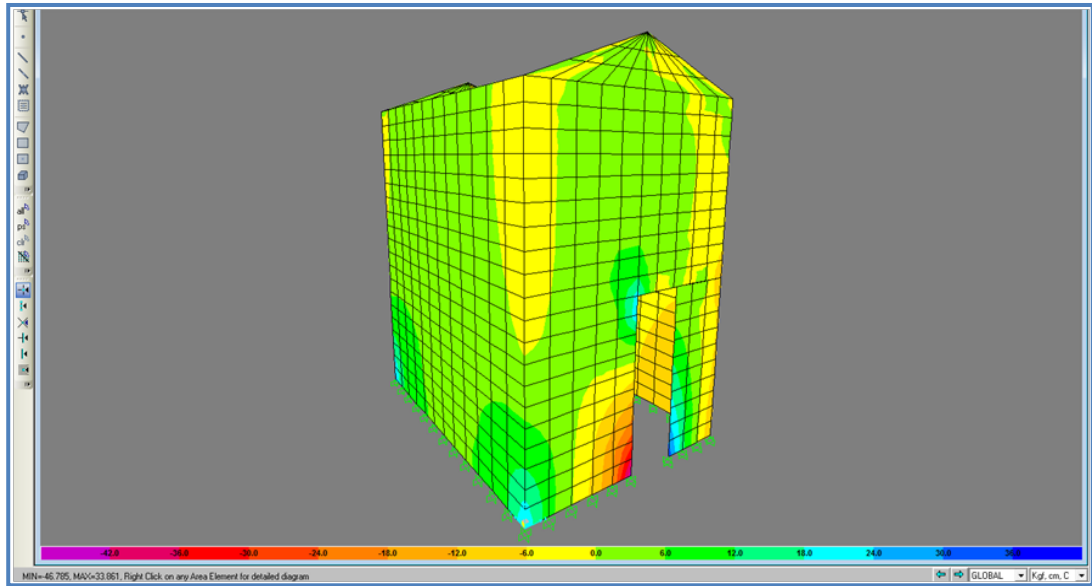
viene con el software.

Obs: La dirección “X” considerada va en la cara correspondiente a la ubicación de la puerta frontal de la vivienda

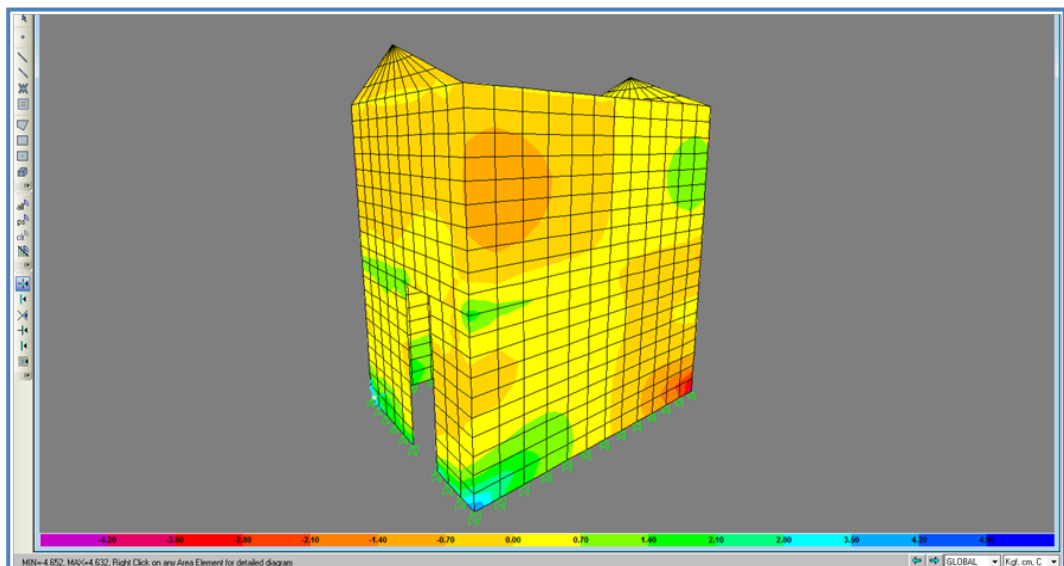
SX – F11



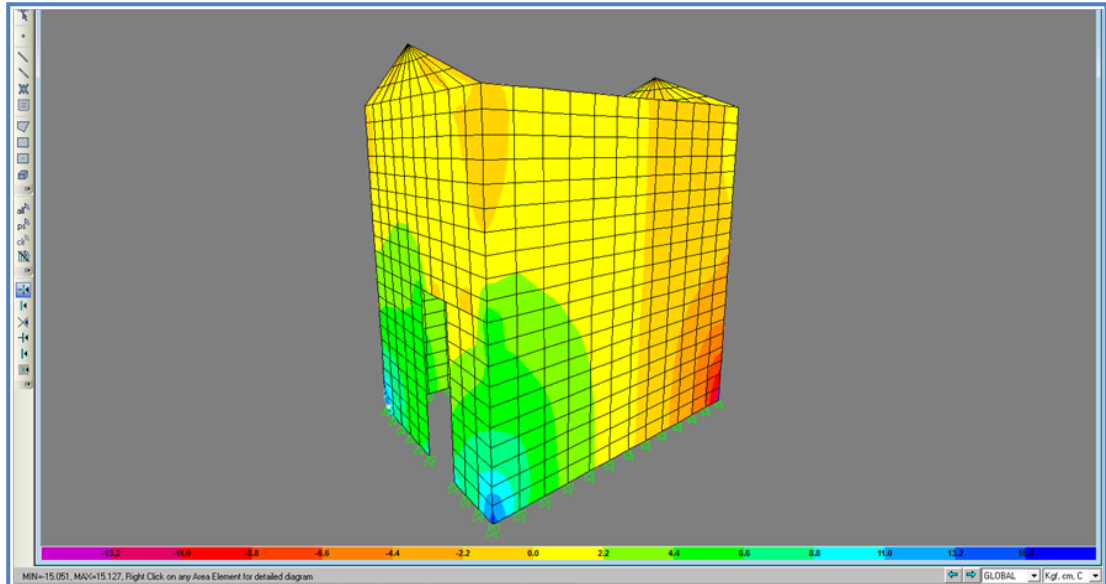
De lo mostrado el valor más significativo es: 10.16 kgf

SX – F22

De lo mostrado el valor más significativo es: 33.86 kgf

SY – F11

De lo mostrado el valor más significativo es: 4.30 kgf

SY – F22

De lo mostrado el valor más significativo es: 14.33 kgf

5.2.3 Análisis Sísmico de una Vivienda de Adobe de 1 Piso

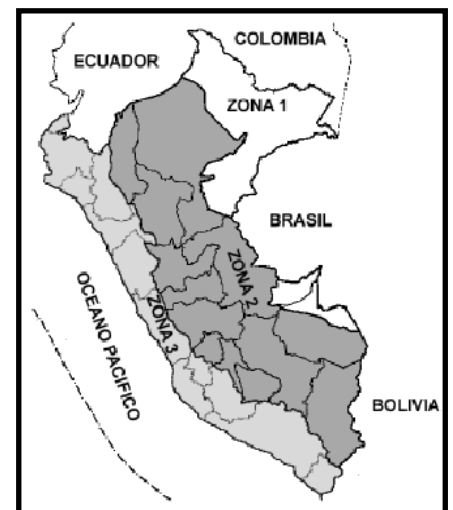
En el presente Informe se mostrarán los resultados de un análisis sísmico de una estructura de 1 nivel que se usará como “Vivienda” en la Zona 2 correspondiente a la zonificación brindada en el RNE actualmente vigente.

Parámetros Sísmicos:i) Zonificación Sísmica

Zona2 → $C = 0.15$

j) Condiciones Geotécnicas

Tipo de Suelo: S II



$$S = 1.2$$

k) Tipo de Edificación

- Uso: Vivienda
- Categoría: Vivienda y otras edificaciones Comunes

$$U = 1.0$$

Cargas a considerar:

Debido a que la edificación en estudio data de un solo piso, solo se considerará el peso del techo sobre él que consta de calamina, cuyas características generales consideraremos como 2.52kg/m^2

l) Detalles de la estructura

Material	γ (ton/m ³)	E (kg/cm ²)
Adobe	1.77	468.18

Altura = 2.50m

Periodo fundamental de la estructura = 0.042seg.

Aceleración máxima: $S_{a_{\text{máx}}} = S*U*C*g = 0.18g$

Donde: g= aceleración de la gravedad

a). Análisis Sísmico

Para el análisis de la estructura se tendrá presente la siguiente relación que proporcionará los efectos de fuerza sísmica en la base en cada dirección.

$$H = S*U*C*P$$

El peso de la vivienda será calculada automáticamente por el software empleado en el análisis.

Ya modelada la vivienda en estudio en el SAP2000 se procederá al análisis; de esta manera obtenemos lo siguiente:

- *Factores de Participación Modal*

OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	RX	RY	RZ	ModalMass	ModalStiff
			Sec	Tonf-s2	Tonf-s2	Tonf-s2	Tonf-m-s2	Tonf-m-s2	Tonf-m-s2	Tonf-m-s2	Tonf-m-s2
MODAL	Mode	1	0.1689	0.85429	0.02205	-0.02719	-0.03958	1.30750	-1.24122	1	1383.552
MODAL	Mode	2	0.1294	-0.04897	0.22074	-0.00149	-0.52799	-0.08178	0.54544	1	2357.341
MODAL	Mode	3	0.1163	0.00657	-0.85465	-0.00261	1.23868	0.00782	-1.12945	1	2921.204

De lo mostrado en la figura se pueden apreciar los periodos de los modos de vibración de la estructura teniendo el más significativo de 0.1689 seg.

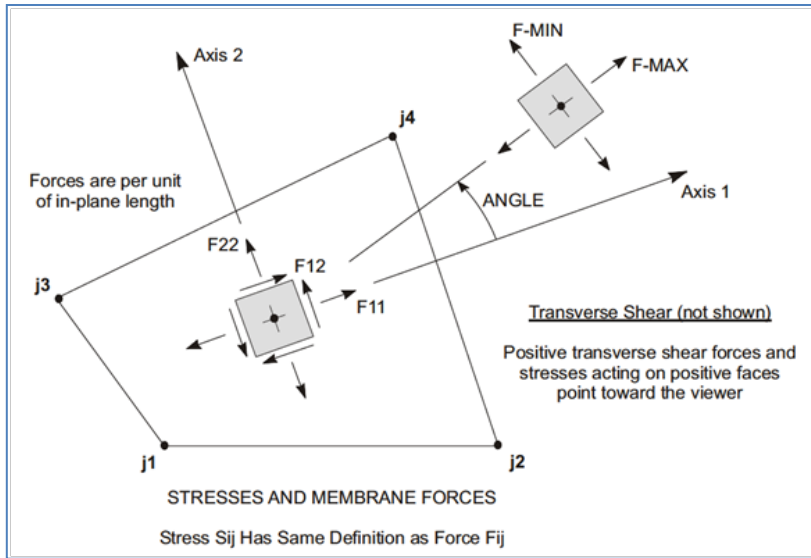
- *Periodos y Frecuencias*

OutputCase	StepType	StepNum	Period	Frequency	CircFreq	Eigenvalue
			Sec	Cyc/sec	rad/sec	rad2/sec2
MODAL	Mode	1	0.1689	5.9199	37.196	1383.6
MODAL	Mode	2	0.1294	7.7274	48.552	2357.3
MODAL	Mode	3	0.1163	8.602	54.048	2921.2

Así mismo, el software nos brinda el esquema de las fuerzas a través de los muros de la vivienda.

Para poder revisar bien el rango de valores por cada efecto del sismo en ambas direcciones, se mostrarán los efectos F11 y F22 tanto para los sismos SX y SY, siendo estos las fuerzas sísmicas en la dirección "X" y en la dirección "Y" respectivamente.

De acuerdo con el software SAP2000 las características de fuerzas F11 y F22 se rige bajo lo siguientes:

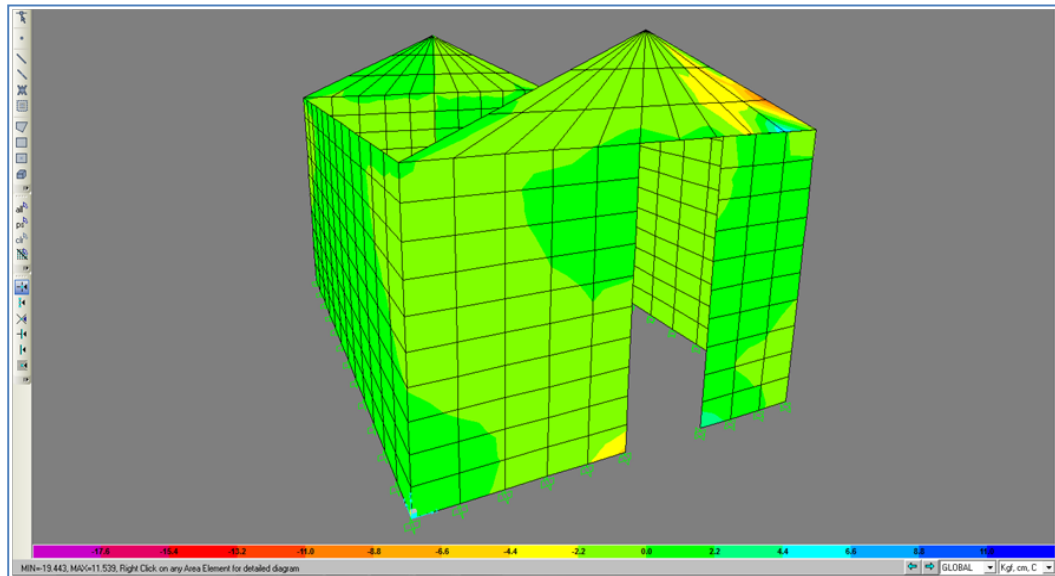


La imagen expuesta puede ser verificada en el capítulo V “The Shell Element” en la pag. 47 del archivo

SapBasic.pdf que viene con el software.

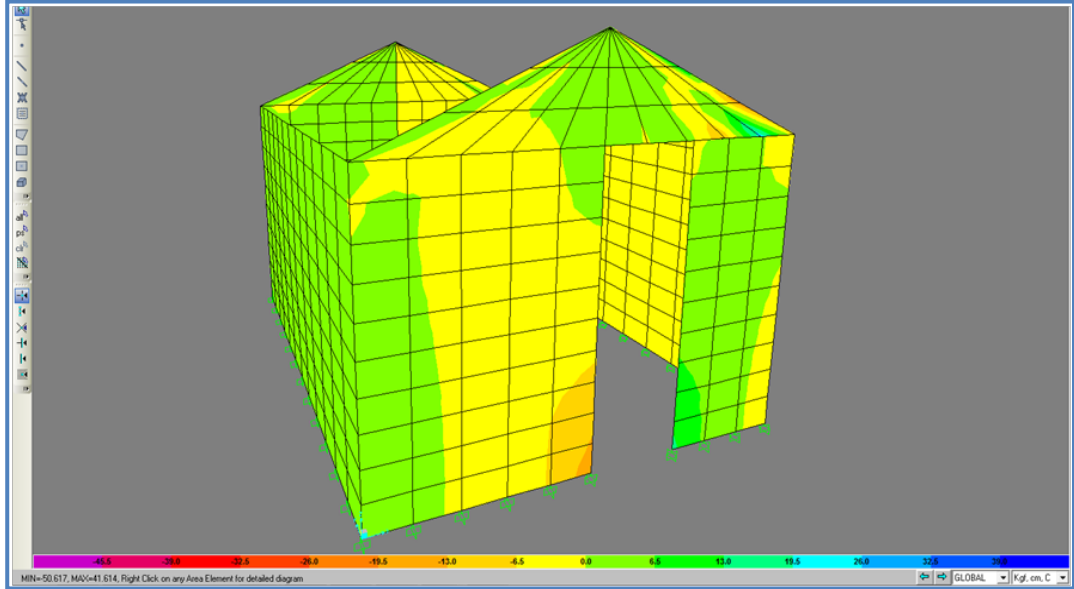
Obs: La dirección “X” considerada va en la cara correspondiente a la ubicación de la puerta frontal de la vivienda.

SX – F11



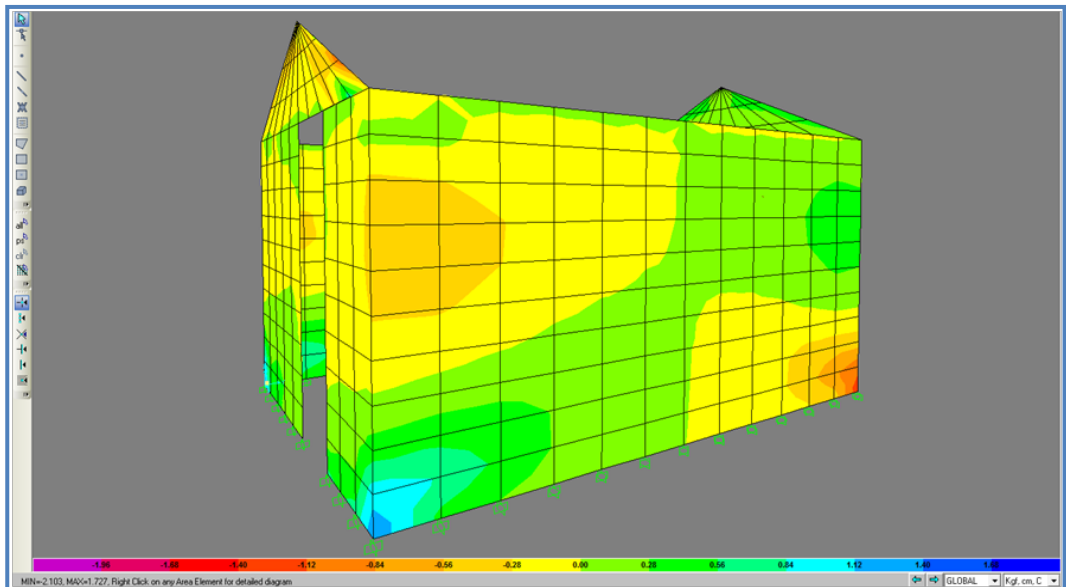
De lo mostrado el valor más significativo es: 6.59 kgf

SX – F22

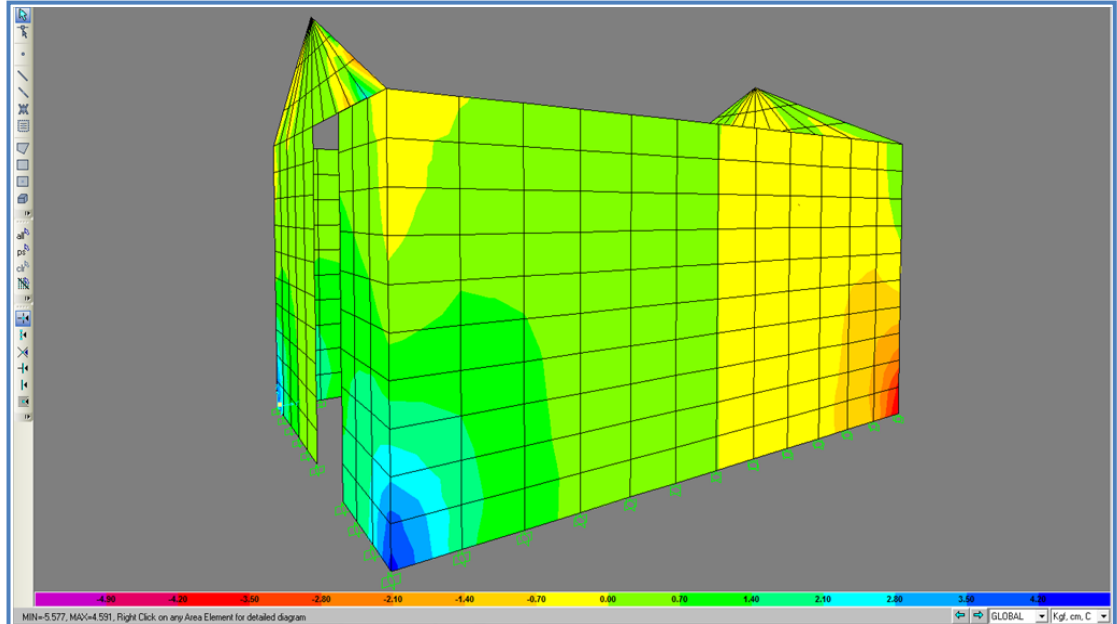


De lo mostrado el valor más significativo es: 21.76 kgf

SY – F11



De lo mostrado el valor más significativo es: 1.34 kgf

SY – F22

De lo mostrado el valor más significativo es: 4.45 kgf

5.2.4 Análisis Sísmico de una Vivienda de Adobe de 2 Piso

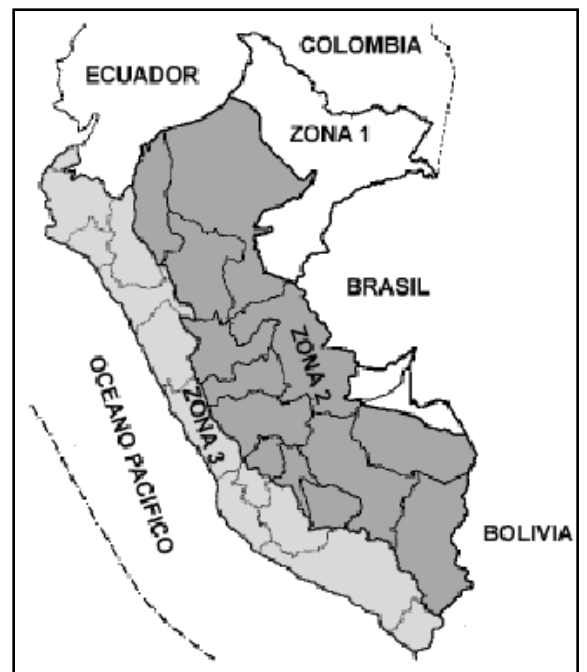
En el presente Informe se mostrarán los resultados de un análisis sísmico de una estructura de 2 niveles que se usará como “Vivienda” en la Zona 2 correspondiente a la zonificación brindada en el RNE actualmente vigente.

Parámetros Sísmicos:m) Zonificación Sísmica

Zona2 → $C = 0.15$

n) Condiciones Geotécnicas

Tipo de Suelo: S II



$$S = 1.2$$

o) Tipo de Edificación

- Uso: Vivienda
- Categoría: Vivienda y otras edificaciones Comunes

$$U = 1.0$$

Cargas a considerar:

Debido a que la edificación en estudio data de un solo piso, solo se considerará el peso del techo sobre él que consta de calamina, cuyas características generales consideraremos como 2.52kg/m^2

p) Detalles de la estructura

Material	γ (ton/m ³)	E (kg/cm ²)
Adobe	1.77	468.18

Altura = 4.50m

Periodo fundamental de la estructura = 0.075seg.

Aceleración máxima: $S_{a_{\text{máx}}} = S*U*C*g = 0.18g$

Donde: g= aceleración de la gravedad

a). Análisis Sísmico

Para el análisis de la estructura se tendrá presente la siguiente relación que proporcionará los efectos de fuerza sísmica en la base en cada dirección.

$$H = S*U*C*P$$

El peso de la vivienda será calculada automáticamente por el software empleado en el análisis.

Imagen modelada en el software SAP2000



Ya modelada la vivienda en estudio en el SAP2000 se procederá al análisis; de esta manera obtenemos lo siguiente:

- *Factores de Participación Modal*

OutputCase	StepType	StepNum	Period Sec	UX Tonf-s2	UY Tonf-s2	UZ Tonf-s2	RX Tonf-m-s2	RY Tonf-m-s2	RZ Tonf-m-s2	ModalMass Tonf-m-s2	ModalStiff Tonf-m
MODAL	Mode	1	0.3754	-1.26945	0.01705	0.02362	-0.06521	-3.74050	1.98064	1	280.102
MODAL	Mode	2	0.2668	-0.03298	-1.26349	-0.02482	3.92669	-0.04359	-1.68308	1	554.472
MODAL	Mode	3	0.2075	0.19567	-0.01078	0.01978	0.02350	0.71754	-2.87648	1	916.725
MODAL	Mode	4	0.1507	0.00248	-0.00107	0.00353	-0.01944	-0.00243	-0.00189	1	1737.653
MODAL	Mode	5	0.1361	0.45961	-0.00836	-0.00155	0.02419	0.20663	-1.04412	1	2131.036
MODAL	Mode	6	0.1253	0.02002	0.06905	0.01582	-0.26140	0.00061	0.04166	1	2514.521

De lo mostrado en la figura se pueden apreciar los periodos de los modos de vibración de la estructura teniendo el más significativo de 0.3754 seg.

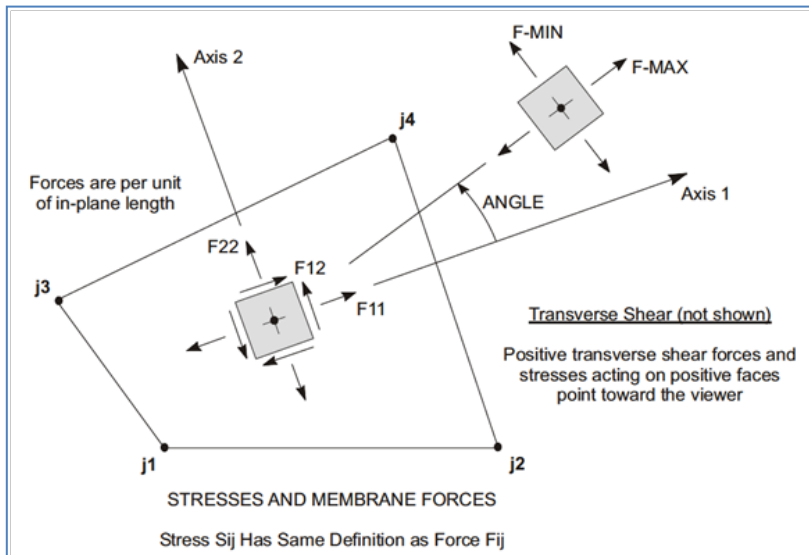
- *Periodos y Frecuencias*

OutputCase	StepType	StepNum	Period Sec	Frequency Cyc/sec	CircFreq rad/sec	Eigenvalue rad2/sec2
MODAL	Mode	1	0.3754	2.6637	16.736	280.1
MODAL	Mode	2	0.2668	3.7477	23.547	554.47
MODAL	Mode	3	0.2075	4.8188	30.277	916.73
MODAL	Mode	4	0.1507	6.6344	41.685	1737.7
MODAL	Mode	5	0.1361	7.3471	46.163	2131
MODAL	Mode	6	0.1253	7.9808	50.145	2514.5

Así mismo, el software nos brinda el esquema de las fuerzas a través de los muros de la vivienda.

Para poder revisar bien el rango de valores por cada efecto del sismo en ambas direcciones, se mostrarán los efectos F11 y F22 tanto para los sismos SX y SY, siendo estos las fuerzas sísmicas en la dirección “X” y en la dirección “Y” respectivamente.

De acuerdo con el software SAP2000 las características de fuerzas F11 y F22 se rige bajo lo siguientes:

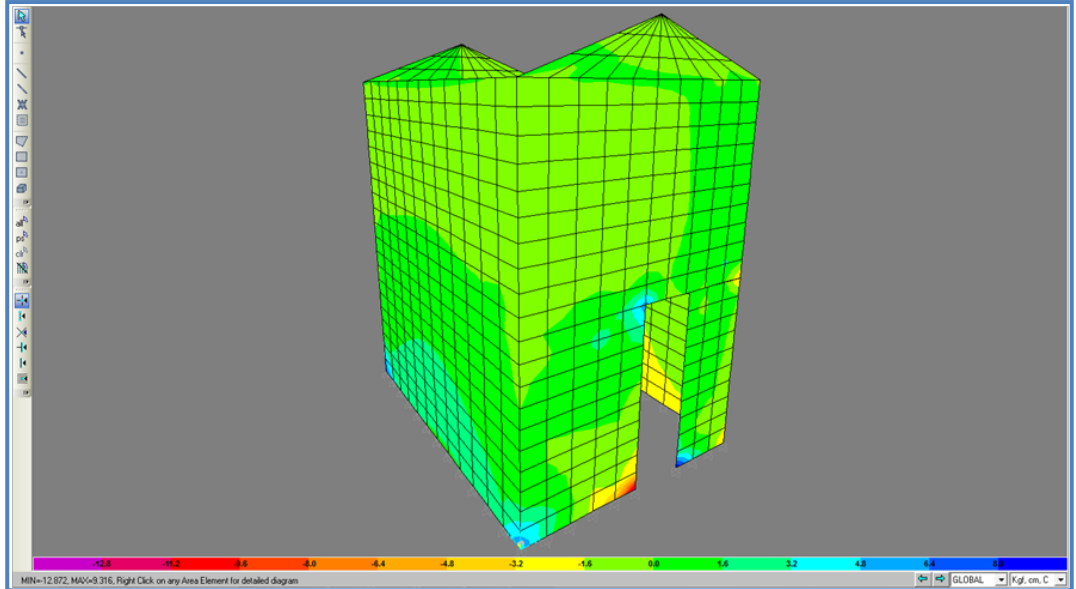


La imagen expuesta puede ser verificada en el capítulo V “The Shell Element” en la pag. 47 del archivo

SapBasic.pdf que viene con el software.

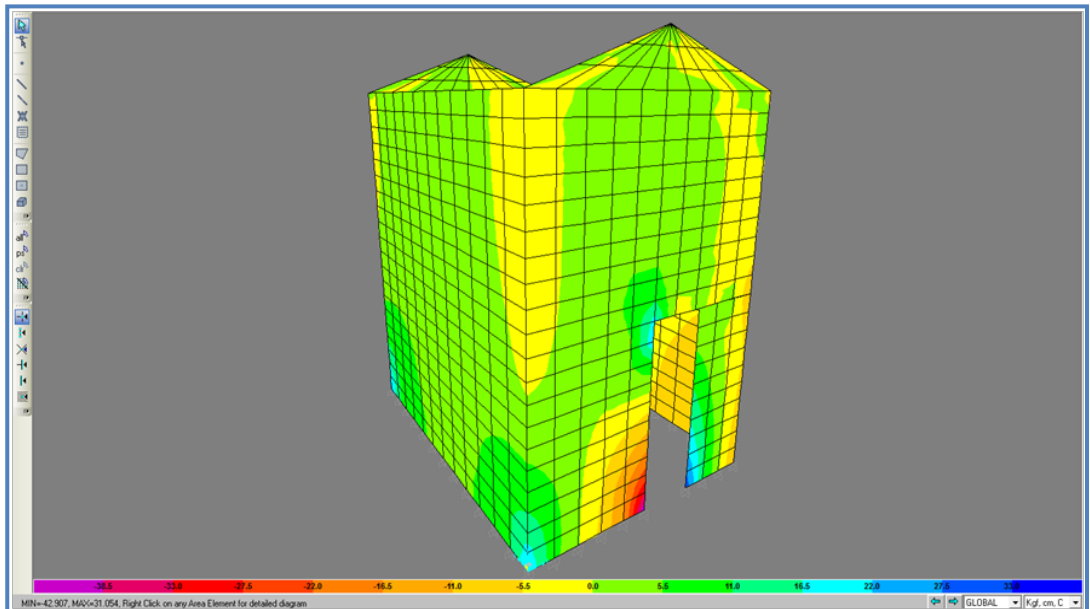
Obs: La dirección “X” considerada va en la cara correspondiente a la ubicación de la puerta frontal de la vivienda.

SX – F11



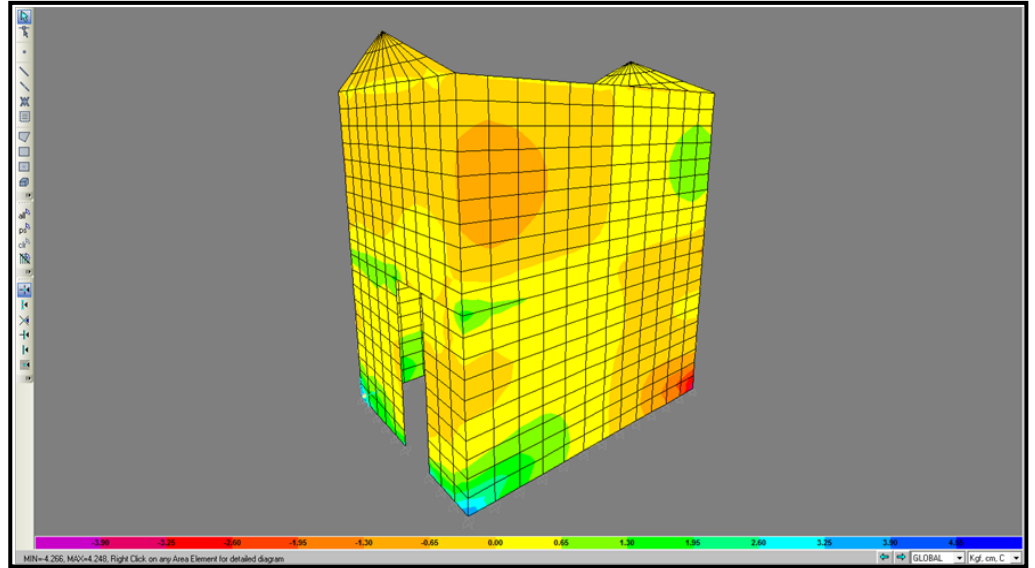
De lo mostrado el valor más significativo es: 9.32 kgf

SX – F22



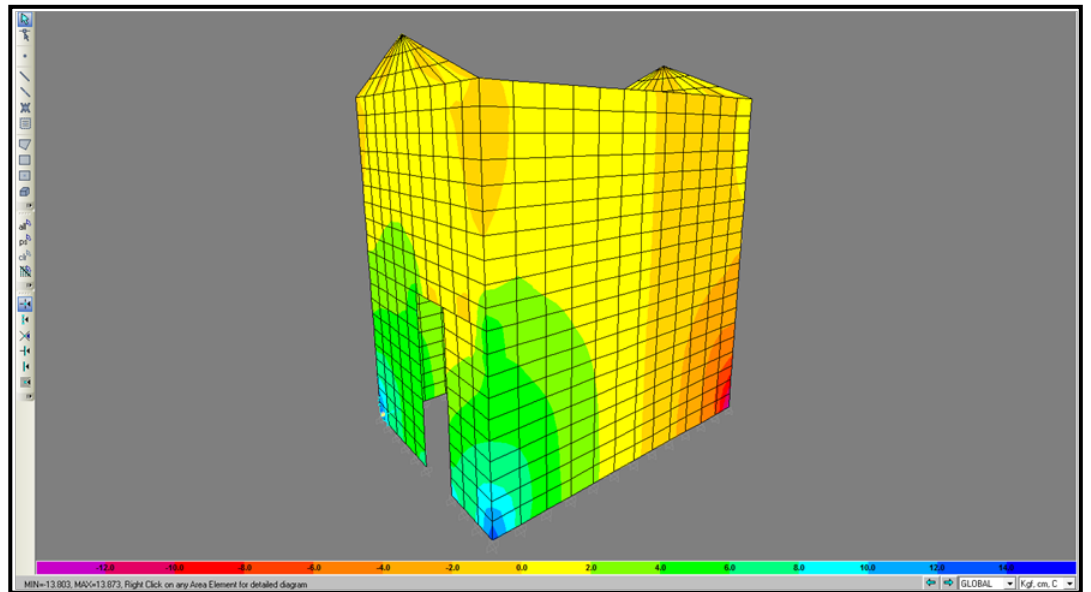
De lo mostrado el valor más significativo es: 31.05 kgf

SY – F11



De lo mostrado el valor más significativo es: 3.94 kgf

SY – F22



De lo mostrado el valor más significativo es: 13.14 kgf

Resumiendo los datos obtenidos con la Normativa de Diseño Sismo Resistente podemos ver la siguiente tabla:

TABLA 17. ANÁLISIS SÍSMICO DE INGENIERÍA CIVIL (NORMATIVA E30)

Análisis Sísmico [Normativa E30]			
Tipo de Vivienda	Periodo Fundamental [sec]	Aceleración Máxima [g]	Frecuencia [Hz]
Vivienda Tapial 1 Piso	0.042	0.18	23.8
Vivienda Tapial 2 Piso	0.075	0.18	13.3
Vivienda Adobe 1 Piso	0.042	0.18	23.8
Vivienda Adobe 2 Piso	0.075	0.18	13.3

Fuente: Tabla Excel Realizada para la presente tesis

Podemos ver que la aceleración máxima es de 0.18g y comparando con la data de la primera prueba (Universidad de Los Andes de Colombia) que indica como 0.08g la aceleración máxima y el valor de 0.18g como la de creación de pequeñas fisuras. Entonces para tener el mejor valor para la realización de la normativa usaremos el valor obtenidos de la Universidad de Los Andes, quedándonos el valor de las prueba del SAP200 y de la norma de diseño como parámetros de comparación en donde podemos observar que al tener la casas mayor número de pisos la resistencia es menor en las viviendas lo cual nos confirma que las casas de tierra solo deben tener un solo piso por el tema de que nos están diseñadas para resistir sismos.

CAPITULO VI LÍMITES PERMISIBLES DE VIBRACIONES POR VOLADURA.

Con los datos obtenidos con los análisis hechos a las estructuras podemos definir un límite para las casas de tierra apisonada (llámese tapial o adobe). Este límite será basado en los datos de análisis sísmico y de la aceleración obtenida y consideradas como dañinas para este tipo de estructuras.

Realizamos entonces una tabla en Excel con los datos obtenidos. Con estos datos podemos saber que la aceleración en donde no se presenta daños a las estructuras de tierra es de 0.08g, y por encima de este valor aparecen los daños a las estructuras.

Entonces el dato de la aceleración vamos a la formulación de una onda sinusoidal y sacamos una relación entre la aceleración crítica, la velocidad de partícula y la frecuencia, entonces dando valores a la frecuencias y teniendo como

valor la aceleración podemos hallar la velocidad de partícula crítica bajo lo cual la casa podría tener daños en su estructura.

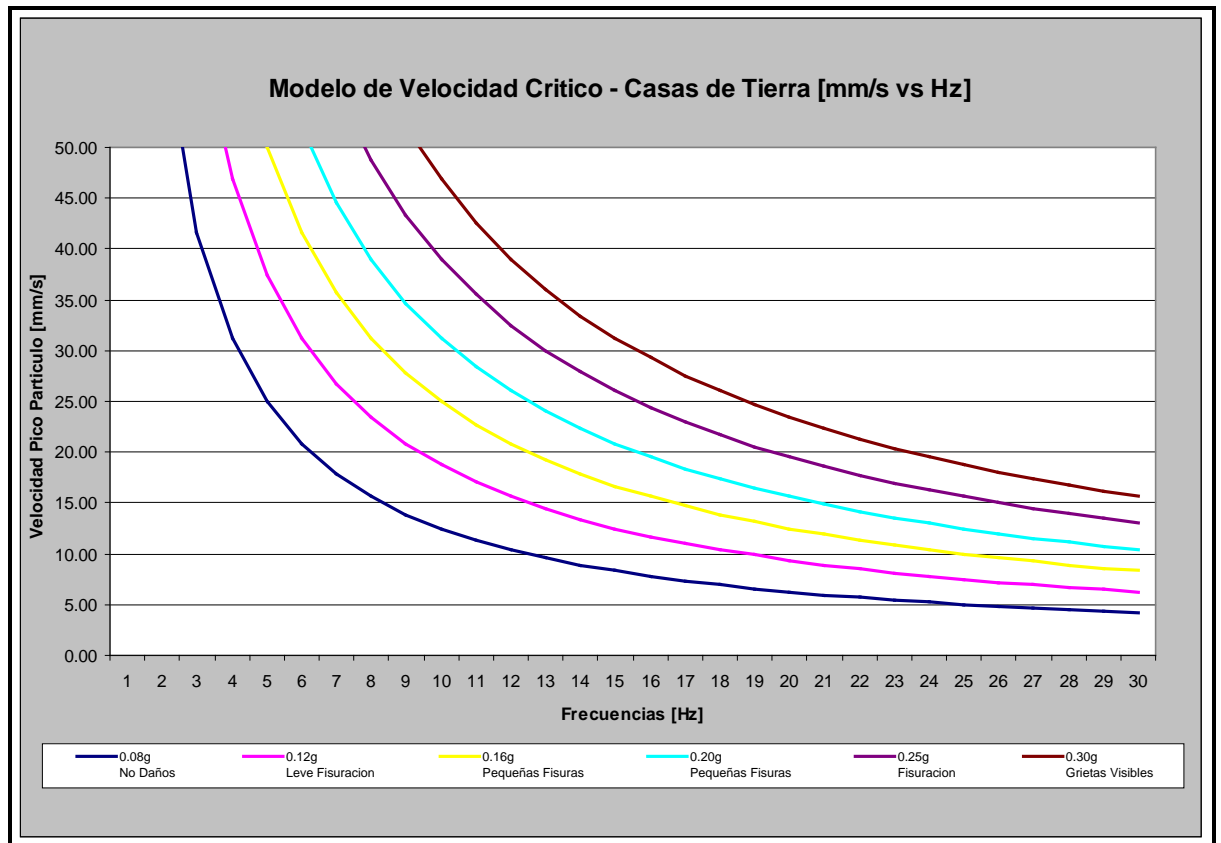
A continuación se muestra la tabla de Excel desarrollada y el gráfico correspondiente. Con estos datos podemos buscar una frecuencia dominante en las voladura de campo lejano y tomar el valor de velocidad que se tiene a esa frecuencia con una aceleración de 0.08g y así ese valor se convertiría en el límite permisible de velocidad para las casa fabricadas de adobe o tapial. Este valor sería comparado con los valores que se tienen en las normativas internacionales y nacionales para comprobarlo adecuadamente.

TABLA 18. VELOCIDADES DE PARTÍCULA CRÍTICA EN FUNCIÓN DE LA ACELERACIÓN.

Calculo de Velocidad Pico Particula Critica						
Frecuencia [Hz]	Aceleracion					
	0.08g No Daños	0.12g Leve Fisuracion	0.16g Pequeñas Fisuras	0.20g Pequeñas Fisuras	0.25g Fisuracion	0.30g Grietas Visibles
1	124.90	187.36	249.81	312.26	390.33	468.39
2	62.45	93.68	124.90	156.13	195.16	234.20
3	41.63	62.45	83.27	104.09	130.11	156.13
4	31.23	46.84	62.45	78.07	97.58	117.10
5	24.98	37.47	49.96	62.45	78.07	93.68
6	20.82	31.23	41.63	52.04	65.05	78.07
7	17.84	26.77	35.69	44.61	55.76	66.91
8	15.61	23.42	31.23	39.03	48.79	58.55
9	13.88	20.82	27.76	34.70	43.37	52.04
10	12.49	18.74	24.98	31.23	39.03	46.84
11	11.35	17.03	22.71	28.39	35.48	42.58
12	10.41	15.61	20.82	26.02	32.53	39.03
13	9.61	14.41	19.22	24.02	30.03	36.03
14	8.92	13.38	17.84	22.30	27.88	33.46
15	8.33	12.49	16.65	20.82	26.02	31.23
16	7.81	11.71	15.61	19.52	24.40	29.27
17	7.35	11.02	14.69	18.37	22.96	27.55
18	6.94	10.41	13.88	17.35	21.68	26.02
19	6.57	9.86	13.15	16.43	20.54	24.65
20	6.25	9.37	12.49	15.61	19.52	23.42
21	5.95	8.92	11.90	14.87	18.59	22.30
22	5.68	8.52	11.35	14.19	17.74	21.29
23	5.43	8.15	10.86	13.58	16.97	20.36
24	5.20	7.81	10.41	13.01	16.26	19.52
25	5.00	7.49	9.99	12.49	15.61	18.74
26	4.80	7.21	9.61	12.01	15.01	18.02
27	4.63	6.94	9.25	11.57	14.46	17.35
28	4.46	6.69	8.92	11.15	13.94	16.73
29	4.31	6.46	8.61	10.77	13.46	16.15
30	4.16	6.25	8.33	10.41	13.01	15.61

Fuente: Tabla Excel Realizada para la presente tesis

FIGURA 31. MODELO DE VELOCIDAD PICO PARTÍCULA PARA CASAS DE TIERRA.

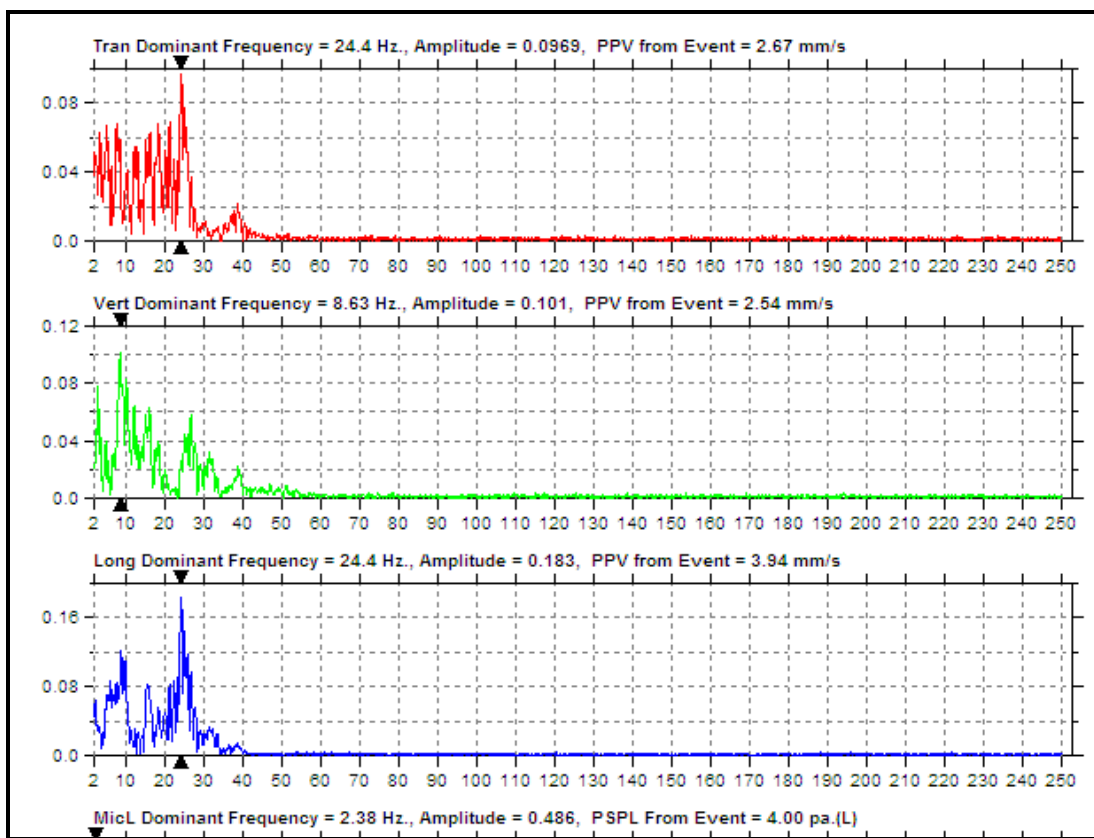


Fuente: Tabla Excel Realizada para la presente tesis

Hallado el modelo de velocidad, se tiene varias frecuencias y cada frecuencia tiene una velocidad límite de vibración, pero hay que notar que las voladuras al no ser ondas sinusoidales no tienen una única frecuencia sino tienen un rango de frecuencias que puede variar mucho. Como se puede apreciar en la grafica inferior, en unas voladuras a pesar de que hay una frecuencia dominante y una frecuencia máxima se tiene un rango muy alto de frecuencias las cuales varían bastante durante la voladura. Por lo que para hacer un límite adecuado no basta

con poner la frecuencia dominante, ni la de resonancia debido a que puede que unos milisegundos haya una frecuencia con una velocidad que esté por encima de los límites puestos por la aceleración crítico de 0'.08g,

FIGURA 32. REGISTROS DE FRECUENCIAS DE VOLADURAS EN LA QUINUA



Fuente: Registros de Voladura de La Quinua Yanacocha

En vista de eso se tiene que elegir un valor de velocidad para las voladuras de campo lejano. Esto se hará revisando la base de datos que se tiene de voladuras de campo lejano en La Quinua – Zona de Voladuras. Eligiéndose ese valor máximo para el rango de frecuencias que se tiene en la zona. Revisando la base de datos.

Podemos haciendo un promedio llegar a la conclusión de que las vibraciones en campo lejano tiene valores bajos esto es de un rango de 1 – 30 Hz en promedio por lo que para dar un valor de límite permisible para ese rango debemos revisar la tabla de modelo de velocidad realizado.

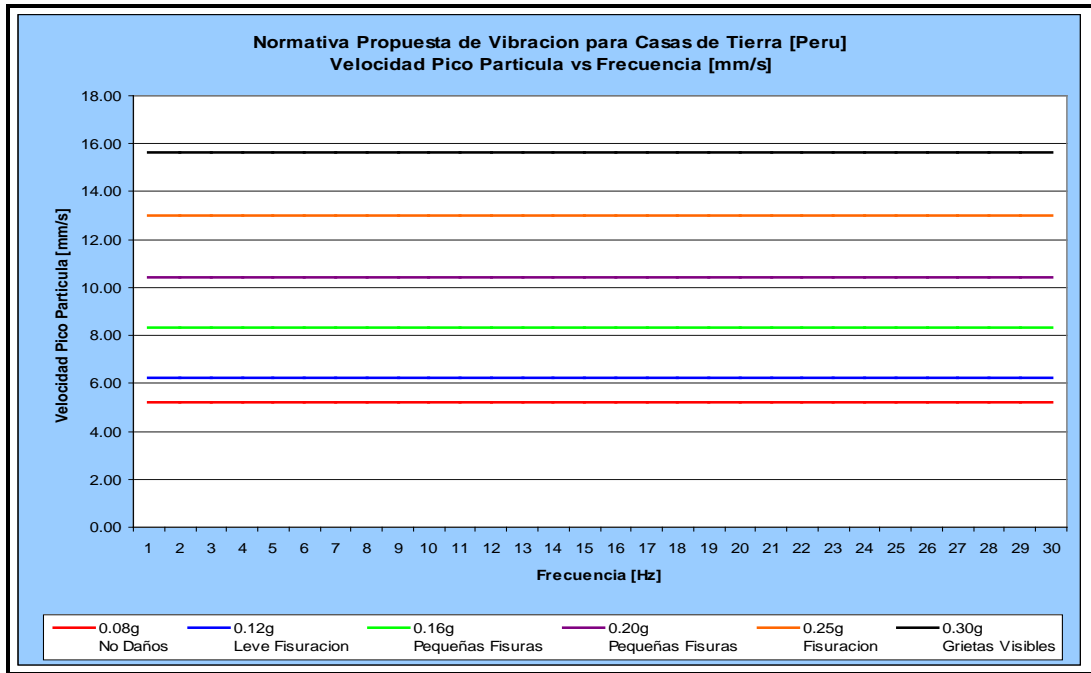
TABLA 19. CALCULO DE LA VELOCIDAD PICO PARTÍCULA MÁXIMA PARA FRECUENCIAS < 30 HZ.

Calculo de Velocidad Pico Particula Critica						
Frecuencia [Hz]	Aceleracion					
	0.08g No Daños	0.12g Leve Fisuracion	0.16g Pequeñas Fisuras	0.20g Pequeñas Fisuras	0.25g Fisuracion	0.30g Grietas Visibles
< 30 Hz	4.16	6.25	8.33	10.41	13.01	15.61

Fuente: Tabla Excel Realizada para la presente tesis

Revisando la tabla ponemos que para no causar daños en un rango de frecuencias de 0 – 30 Hz debemos tener un 0.08g de aceleración máxima por lo que nuestra velocidad pico partícula seria de unos 4.16 mm/seg promedio y menos que los 6.26 mm/seg porque a ese nivel tendríamos leve fisuracion de la casas o daño cosmético. Entonces sacando un valor promedio entre ellos para saber el límite permisible de velocidad pico partícula para una aceleración de 1 – 30 Hz que son las frecuencias en los que se maneja las vibraciones en campo lejano, resulta la siguiente normativa. Entonces el valor promedio entre esos valores es de 5.25 mm/s o 5.30 mm/s que será nuestro limite admisible para el rango de 1 – 30 Hz

FIGURA 33. NORMATIVA DE VIBRACIÓN PARA CASAS DE TIERRA (PERÚ)



Fuente: Tabla Excel Realizada para la presente tesis

La normativa diseñada es analizando las vibraciones de campo lejano de la Unidad Minera Yanacocha que varía de 1 – 30 Hz, por lo que la persona que quiera aplicar la norma a otra unidad minera debe hacer una análisis del rango de vibraciones que hay en su mina y viendo la frecuencia máxima que pueda generar buscarla en el modelo de velocidad y tomar ese valor como limite permisible para esa mina.

6.1 VALORES REPRESENTATIVOS DE LAS NORMAS NACIONALES E INTERNACIONALES

Teniendo los valores resultantes de velocidad pico partícula resultante de las pruebas realizadas en los capítulos anteriores haremos una comparación entre estos valores y los valores que se usan en las normativas internacionales y nacionales para este tipo de casa de tierra o sus equivalentes según las normativas.

De esta forma veremos si los resultados obtenidos tienen coherencia con los indicados en las normas en otros países y en el Perú.

Empezaremos con la comparación con las normas usadas por el Perú al respecto de las vibraciones producidas por las voladuras,

6.1.1 Valores Representativos de la Norma Peruana.- [19.78 mm/s a 25.4 mm/s]

La normativa peruana de vibraciones esta basada en la Guía Ambiental para Perforación y Voladura en Operaciones mineras. Dándonos la tabla inferior como nuestro limite máximos de vibración en función de la distancia.

TABLA 20. NORMATIVA PERUANA DE VIBRACIONES – GUÍA AMBIENTAL DE PERFORACIÓN Y VOLADURA

Distancia (D) desde el área de voladura en pies	Velocidad de partícula pico máxima permitida (v _{max}) para vibración de tierra en pulgadas/segundo ¹	Factor de distancia a escala por aplicación sin monitoreo sísmico ² D
0a 300	1,25	50
301 a 5000	1,00	55
5001 a más	0,75	65

Fuente; Guía Ambiental de Perforación y Voladura

Haciendo una comparación con los registros obtenidos de voladuras podemos observar que las casas se encuentran a una distancia de 1000 m por lo que la vibración no debería superar los 25.4 mm/s o si la voladura está más cerca de los 1000 m no debería pasar los 19.78 mm/s de velocidad pico partícula. Estos rango de vibración como se muestra en el Anexo 12 está siendo cumplido sin problemas.

La norma vemos que no toma en cuenta ni la frecuencia, ni el suelo donde está ubicada la casa.

6.1.2 Valores Representativos de las Normas Internacionales de Vibraciones.

a). Valores Representativos de la Norma UNE 22.381.93 - [4.0 mm/s a 9.0 mm/s (2 – 15 Hz)]

La norma española divide la estructuras en tres tipos de los cuales el indicado para las casas de tipo tierra podría ser considerado como un valor entre el Grupo II. Viviendas o el Grupo III. Monumentos y estructuras delicadas.

TABLA 21. VALORES REPRESENTATIVOS DE LA NORMA UNE 22.381.93

VALORES LÍMITES DEL CRITERIO	FRECUENCIA (Hz)		
	2...15	15...75	>75
	VELOCIDAD (mm/s)	DESPLAZ. (mm)	VELOCIDAD (mm/s)
GRUPO I	20	0.212	100
GRUPO II	9	0.095	45
GRUPO III	4	0.042	20

Fuente: Tabla de Excel de Orica

Vemos entonces que los valores que la norma española podría indicar para las casas del tipo tierra deberían estar entre los 4 mm/s y los 9 mm/s para una frecuencia de 1 – 15 Hz que son los valores más bajos que controla la normativa.

b). Valores Representativos de la Norma DIN 4150 Alemana – [3.0 mm/s a 5 mm/s (1- 15 Hz)]

La normativa alemana es considerada la más estricta en lo que respecta a vibraciones producidas por voladura, en ella podemos establecer que de buscar una aplicación de la norma a las casas de tierra debemos analizar la tabla inferior.

En la tabla y la figura se dan los valores de las velocidades máximas para la cimentación y para el plano del piso más alto de varios tipos de edificios para vibraciones de corta duración. Si se cumplen estos valores, ningún efecto dinámico debería producir daños importantes para provocar la pérdida de servicio del edificio cosa que supondría que la posible aparición de patologías tendría otras causas. En cambio, el hecho de superar dichos valores, no supone obligatoriamente la aparición de los daños descritos anteriormente.

TABLA 22. VALORES REPRESENTATIVOS DE LA NORMA DIN 4150 ALEMANA

Tipo de Edificación	FRECUENCIA (Hz)		
	< 10 Hz	10 - 50 Hz	50 - 100 Hz
	VELOCIDAD (mm/s)	VELOCIDAD (mm/s)	VELOCIDAD (mm/s)
TIPO I: Edificios públicos o industrial	20	20...40	40...50
TIPO II: Edificios de viviendas o asimilables a viviendas	5	5...15	15...20
TIPO III: Edificios históricos o por su construcción son sensibles a la vibración	3	3...8	8...10

Fuente. Tabla de Excel creada por Orica

Notamos que las casas de tierra deben de estar entre el Tipo II y el Tipo III por lo que su vibración máxima para una frecuencia menor a los 10 Hz es de 5 mm/s a 3 mm/s lo cual son valores bastante bajos de vibración y que han sido cumplidos en su mayoría por las vibraciones registradas en las cercanías a las casas de la minera Yanacocha. Pero debemos anotar que la norma alemana indica que en el hecho de superar dichos valores, no supone obligatoriamente la aparición de algún daño en la casa.

c). Valores Representativos de la Norma Sueca SN640312 – [8 mm/s (10-60 Hz)]

Podemos ver en la normativa Sueca SN640312 que las casas del tipo tierra al ser particularmente vulnerable a los movimientos sísmicos estarían ubicadas en el Grupo IV como se aprecia en la tabla inferior por lo que al ser expuestas a vibraciones del tipo voladura deberían para un rango de 10 – 60 Hz tener una velocidad máxima de pico partícula de 8 mm/s.

TABLA 23. VALORES REPRESENTATIVOS DE LA NORMATIVA SUECA SN640312

structural category	definition
I	reinforced-concrete and steel structures (without plaster) such as industrial buildings, bridges, masts, retaining walls, unburied pipelines; underground structures such as caverns, tunnels, galleries, lined and unlined
II	buildings with concrete floors and basement walls, above-grade walls of concrete, brick or ashlar masonry; ashlar retaining walls, buried pipelines; underground structures such as caverns, tunnels, galleries, with masonry lining
III	buildings with concrete basement floors and walls, above-grade masonry walls, timber joist floors
IV	buildings which are particularly vulnerable or worth protecting

Fuente. Manual de Tronadura de ENAEX (2002)

d) Valores Representativos de la Normativa Sueca SS 460 48 66 –[6.17 mm/s]

Esta norma está sustentada en cientos o miles de observaciones en el lecho rocoso escandinavo, donde se han podido estimar con buena certeza niveles de daño en las estructuras. Por lo que la norma muestra una tabla con varios tipos geológicos y de estructuras. Para aplicar esta norma a las casas de tipo tierra buscaremos los valores que más se aplicarían al tipo de estructuras de las casas de tierra y con un terreno o más parecido posible al que se tiene en las casas cercanas a Yanacochoa.

TABLA 24. VALORES REPRESENTATIVOS DE LA NORMATIVA SUECA SS 460 48 66

<i>Norma Sueca SS 460 48 66 del año 1991</i>				
PPV = Vo x Fb x Fm x Fd x Ft				
Vo	Velocidad peak de partícula para la componente vertical sin corregir			
Fb	Factor descriptor del tipo de Edificio según tipo de Construcción			
Fm	Factor que considera el material de la construcción			
Fd	Factor que da cuenta del cambio de frecuencia de la vibración con la distancia			
Ft	Factor del tiempo de duración de la actividad de tronadura			
TIPO DE TERRENO, Velocidad de partícula vertical sin corregir, Vo				
	Rocas Blandas, Gravas, arenas			18
	Rocas Medias			35
	Rocas duras, Granitos, cuarcita			70
	Puede también ser calculado como : Vo = Vp [m/s] / 65			
TIPO DE CONSTRUCCIÓN, Factor Fb				
	Construcc. pesadas tipo puentes, portuarios			1.7
	Edificios industriales y de oficinas			1.2
	Edificios de viviendas estandar			1
	Edificios especialmente sensibles, iglesias, museos			0.65
	Edificios históricos en mal estado y ruinas			0.5
TIPO DE MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN, Factor Fm				
	Hormigón armado, acero o madera			1.2
	Hormigón en masa, ladrillos o cemento			1
	Hormigón porosos prefabricado			0.75
	Tabiques prefabricados			0.65
FACTOR DE DISTANCIA, Factor Fd				
	Si 1<d<10	Fd =	1.91 x d ^	-0.28
	Arcilla Si 10<d<350	Fd =	1.56 x d ^	-0.19
	Morrena Si 10<d<350	Fd =	1.91 x d ^	-0.29
	Roca Si 10<d<350	Fd =	2.57 x d ^	-0.42
TIPO DE ACTIVIDAD, Factor Ft				
	Trabajos de construcción			1
	Trabajos estacionarios, tipo minería			0.75 - 1.0

Fuente. Manual de Voladura de ASP Blastronics

Usando la tabla superior, vemos que la V_0 para el tipo de terreno sería de 3800 m/s / 65 como un valor que muestra el tipo de roca que hay en las afueras de la unidad minera. Esto es debido a que el valor de Onda P para el tipo de rocas ubicadas en la zona está en el rango de 3800 m/s. En el tipo de construcción o factor F_b el valor indicado es el de edificios especialmente sensibles el cual tiene un valor de 0.65.

El factor F_m o tipo de Material de Construcción no se tiene el tipo tierra pero podemos usar el de tabiques prefabricados que nos da un valor de 0.65.

En el factor F_d debemos tomar en cuenta que al ser el tipo de terreno escandinavo no tenemos el mismo tipo de roca que en el Perú por lo que usaremos Morrena y aplicaremos la fórmula a la distancia teniendo como resultado un valor de 0.25.

El tipo de actividad presente es el de minería con un F_t de 0.75 – 1.0.

Multiplicando todos estos valores en la fórmula de la tabla sueca nos sale que la vibración producida no puede superar el valor de 6.17 mm/s de velocidad pico partícula.

e). Valores Representativos de la Directriz Alemana KDT 046/72 - [2.0 mm/s a 5 mm/s]

La directriz alemana aplicada a las casas de tierra ubicaría las casas de tierra entre el Grupo I y el Grupo II por lo que los valores de vibraciones máximo permisibles estaría entre los 2 mm/s y los 5 mm/s de rango de vibración.

**TABLA 25. VALORES REPRESENTATIVOS DE LA DIRECTRIZ
ALEMANA KDT 046/72**

	building category	$v_{z,adm}$ [mm/s]
I	historical monuments	2
II	half-timbered houses	5
III	wall construction (e.g. buildings of slab walls, blocks, masonry)	10
IV	framed construction (e.g. buildings of steel, reinforced concrete, timber)	30

Fuente. Manual de Tronadura de ENAEX (2002)

f). Valores Representativos de la Normativa ISO 4866

La ISO presenta métodos para la estandarización de normas, es muy general y no presenta valores representativos que puedan ser utilizados.

g). Valores Representativos de la Norma Suiza SN 640 312a – [6 mm/s (30Hz)]

La norma suiza como se aprecia en la tabla inferior para ser aplicada a las casas de tierra escogeríamos el tipo III de susceptibilidad normal y viendo que la frecuencia de voladura es recurrente o mayor pondríamos un valor para un rango menor de 30 Hz de 6 mm/s como vibración máxima.

**TABLA 26. VALORES REPRESENTATIVOS DE LA NORMA SUIZA SN
640 312A**

Clases de susceptibilidad	Frecuencia de solicitaciones	Valores máx. del vector de velocidad resultante (mm/s)		
		Frecuencia dominante		
		<30 Hz	30 - 60 Hz	>60 Hz
1) muy poco susceptible	Ocasional	Valores indicativos: hasta el triple de los valores correspondientes de la clase de susceptibilidad 3)		
	Frecuente			
	Permanente			
2) poco susceptible	Ocasional	Valores indicativos: hasta el doble de los valores correspondientes de la clase de susceptibilidad 3)		
	Frecuente			
	Permanente			
3) susceptibilidad normal	Ocasional	15	20	30
	Recurrente	6	8	12
	Permanente	3	4	6
4) particularmente susceptible	Ocasional	Valores indicativos: entre los valores indicativos de la clase 3) y la mitad de éstos		
	Frecuente			

Fuente. Manual de Tronadura de ENAEX (2002)

h). Valores Representativos de la Normativa Americana (USBM) – [12.5 mm/s (1 – 40 Hz)]

La normativa USBM colocaría las casas de tierra en el grupo de casas antiguas por lo que su vibración a bajas frecuencias sería de 12.5 mm/s como máximo de velocidad pico partícula a una frecuencia menor a 40 Hz.

TABLA 27. VALORES REPRESENTATIVOS DE LA NORMATIVA AMERICANA (USBM)

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		

Fuente. Tabla de Excel creada por Orica

i). Valores Representativos del Office of Surface Mining (OSM) [19 mm/s a 25 mm/s]

La normativa OSM que es la misma que aplicar el Perú en su normativa peruana indica que las vibraciones para ese tipo de casas deben estar por debajo del rango de 19 mm/s a 25 mm/s de velocidad máxima.

TABLA 28. VALORES REPRESENTATIVOS DEL OFFICE OF SURFACE MINING (OSM)

DISTANCIA AL AREA DE LA VOLADURA	VELOCIDAD MAXIMA DE PARTICULA (mm/s)	DISTANCIA REDUCIDA QUE SE ACONSEJA CUANDO NO SE DISPONE DE INSTRUMENTACION (m/kg ^{1/2})
0 a 90 m	32	22,30
90 a 1500 m	25	24,50
> 1500 m	19	29,00

Fuente. Tabla de Excel creada por Orica

6.2 ANALISIS DE LIMITES PERMISIBLES VS VALORES DE LAS NORMAS.

Haciendo tablas de comparación entre los valores obtenidos por las normativas y los valores con los análisis de sismicidad podemos apreciar que los datos tienen coherencia y los valores están dentro del mismo rango. Esto es debido a que hemos interpretado las normas de la mejor forma posible para la realidad peruana. De esta forma y tomando las casas de tierra como estructuras muy débiles y vulnerables a los eventos sísmicos se han obtenido valores bajos de vibración máximo que se aplican con mejor objetividad a nuestro medio.

A continuación mostraremos una tabla de comparación entre los valores obtenidos de las normas y los valores obtenidos con los cálculos de análisis sísmicos realizados a las estructuras de tierra (Tapial y Adobe)

TABLA 29. VALORES REPRESENTATIVOS DE LAS NORMATIVAS MUNDIALES DE ESTRUCTURAS

Valores Representativos de las Normas.(Estructuras)			
Pais	Norma	VPP [mm/s]	Frecuencia [Hz]
Peru	Norma Peruana	19.78 - 25.4 mm/s	--
España	UNE 22.381.93	4.0 - 9.0 mm/s	2 - 15 Hz
Alemania	DIN 4150	3.0 - 5.0 mm/s	1 - 15 Hz
Suecia	SN640312	8 mm/s	10 - 60 Hz
Suecia	SS 460 48 66	6.17 mm/s	--
Alemania	KDT 046/72	2.0 - 5.0 mm/s	--
Suiza	SN 640 312a	6.0 mm/s	< 30 Hz
USA	USBM	12.5 mm/s	1 - 40 Hz
USA	OSM	19.0 - 25.0 mm/s	--

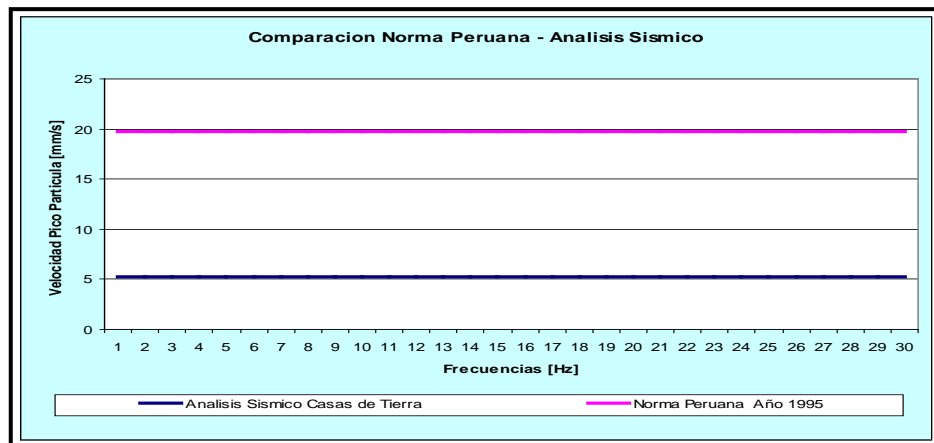
Fuente: Tabla creada para la presente tesis

Teniendo estos valores como los valores representativos de las normas nacionales e internacionales haremos una comparación con los datos obtenidos que indican que el límite para casas de tierra es de 5.25 mm/s a 6.0 mm/s para ese tipo de estructuras.

6.2.1 Análisis de la Norma Peruana con los Datos de Análisis Sísmico

Como se puede apreciar en la grafica la normativa peruana esta muy por encima de los valores obtenidos con el análisis sísmico. Pero ante ello debemos hacer hincapié que la norma que usa el estado peruano es una norma para construcciones hecha por la Office Surface Minino de Estados Unidos la cual ha sido hecha para el tipo de estructuras que hay en Estados Unidos donde no se realizan casas de tierra sino de ladrillo o madera por lo que sus rango de vulnerabilidad sísmica es muy bajo. La comparación de 5.25 mm/s de los análisis con la de 19.78 mm/s que tiene la normativa peruana demuestra que la normativa peruana no es aplicable a todas las estructuras ubicadas en el Perú.

FIGURA 31. COMPARACIÓN DE LA NORMA PERUANA CON LOS DATOS DE ANÁLISIS SÍSMICO

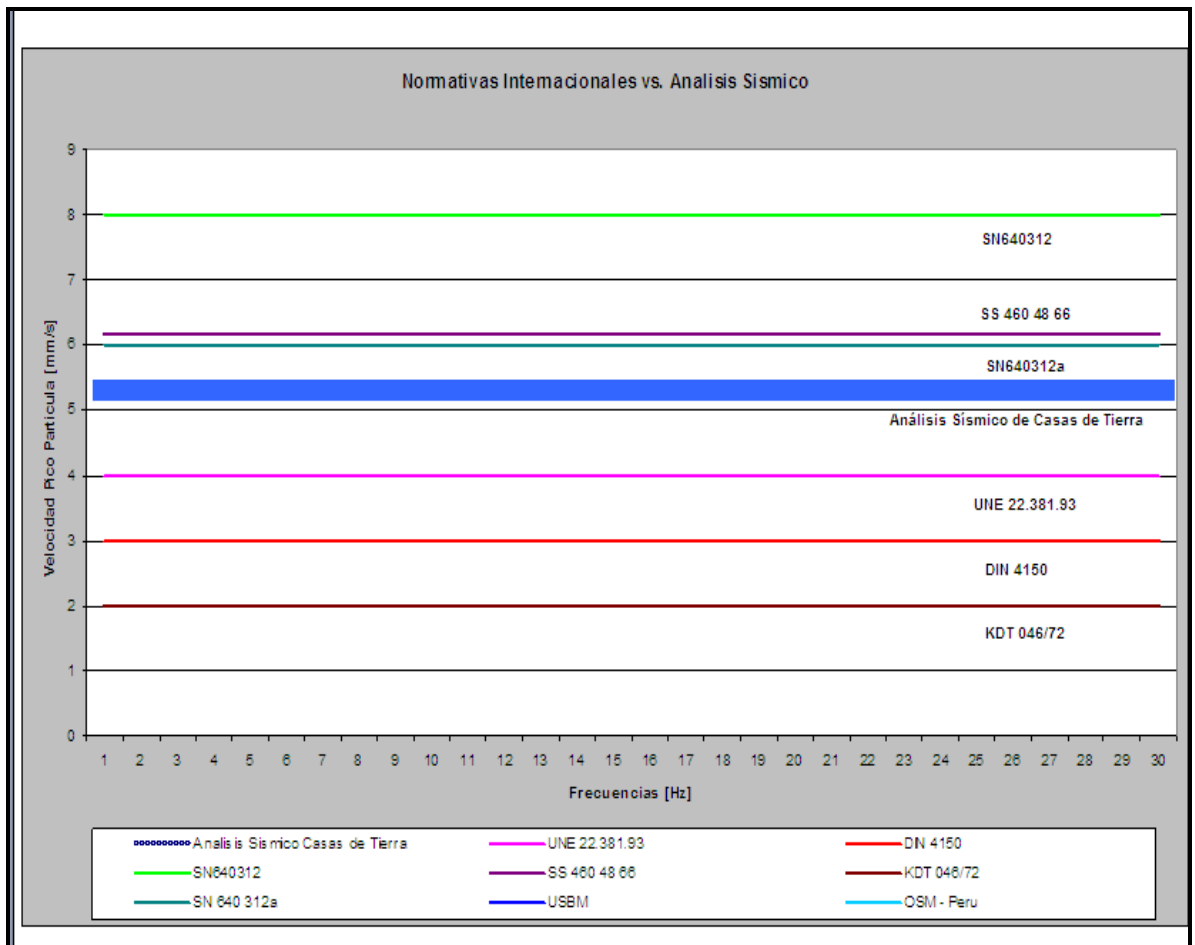


Fuente: Figura creada para la presente tesis

6.2.2 Análisis de las Normas Internacionales con los Datos de Análisis Sísmico

Las normas internacionales son de todo tipo debido a que la minería en todo el mundo es diferente. Pero lo comparación con ellas nos demostrara si nuestros análisis tienen consistencia con los niveles de vibración máximos permisibles para casas equivalentes al tipo de casa de tierra.

FIGURA 32. COMPARACIÓN DE LAS NORMAS INTERNACIONALES CON LOS DATOS DE ANÁLISIS SÍSMICO



Fuente: Figura creada para la presente tesis

En el cuadro superior podemos ver la comparación entre el análisis hecho y las principales normas internacionales que existen y que son usados en el Perú. Podemos comprobar que el análisis sísmico se encuentra con un nivel permisible de vibración a lo que estipulan las normativas Española (UNE 22.381.93), la Alemana (DIN 4150) y la Directriz Alemana de Vibraciones (KDT 048/72), estas normativas tienen sus límite de vibración permisible por debajo del límite hallado en el análisis realizado.

Los rango de las normativas internacionales Alemanas y Españoles sitúan sus niveles de vibración permisibles entre los 4.00 mm/s y los 9 mm/s en el caso español y de 2.0 mm/s a 5.0 mm/s en las normas alemanas, por lo que teniendo que el nivel permisible calculado es de 5.25 mm/s podemos decir que el valor esta dentro del rango estipulado por la española y un poco por encima de las normativas alemanas.

En cambio el análisis sísmico nos muestra un límite permisible de velocidad pico partícula que es menor (5.2 mm/s) que los registrados por las normas Suecas y Suizas que son las SN 640312a, SS 460 48 66, SN640312 y además muy por debajo que las normas americanas, USBM y la Office Surface Mining.

Estas normativas ponen rango superiores porque han sido diseñadas para un tipo de casa vivienda que es superior en estructura y materiales a los presentados en las casas de tipo tierra existentes en el Perú. Por ello las normas estipulan valores superiores al de los análisis realizados.

Así podemos apreciar que los valores calculados en los análisis de sismicidad realizados tienen valores coherentes y posibles gracias a su comparación con los valores representativos de las normativas internacionales.

Terminada la etapa de comparación podemos seguir con el manejo de los datos obtenidos por los análisis de estructuras y sismicidad. Además podemos comprobar que si bien hay normas como la alemana y española que podrían servir en el medio peruano, también es verdad que estas normas dan límites menores a los hallados en el cálculo sísmico causando una sobreprotección lo cual debemos entender que si bien podemos proteger obteniendo niveles bien bajos de vibración como 2 mm/s o incluso 1 mm/s también es verdad que esto conlleva a reducir el nivel de explosivo en cada voladura lo cual puede ir en contra de los intereses de producción de las unidades mineras causándoles pérdidas que con un análisis adecuado de vibraciones son completamente innecesarias.

Obteniendo así los patrones de control de vibraciones para las casas del tipo tierra, sabremos con cuánto de vibración y frecuencia causaríamos daño a las estructuras o incluso daños cosméticos a las viviendas construidas en las cercanías de los centros mineros. Con estos datos podemos pasar a la siguiente etapa que consiste en simular y predecir las vibraciones generadas por la unidad minera y controlarlas para llegar a estar por debajo de los límites de vibración impuestos sin perder en la producción de la mina.

Como apéndice de estos valores ponemos una tabla hecha por la compañía PyroSmart al respecto de las vibraciones detectadas por los seres humanos y los

animales. Esto nos indica que las vibraciones son detectadas por los seres humanos a niveles muy bajos mientras que el daño a las estructuras es a un mayor grado de vibración. Esto puede significar que las personas pueden creer que sus casas están sufriendo daño porque ellos sienten la vibración pero esto no es necesariamente correcto. Sino que pueden sentir la vibración las personas sin que sus viviendas sufran daño por ello. A continuación ponemos la tabla para apreciar esto.

FIGURA 33. EFECTOS DE LA VIBRACIÓN EN SERES HUMANOS.

0.1 mm/seg	No detectable
0.15 mm/seg	Casi no detectable
0.35 mm/seg	Muy bajo nivel de detección
1.00 mm/seg	Siempre detectable
2.00 mm/seg	Claramente detectable
6.00 mm/seg	Fuertemente detectable
14.00 mm/seg	Muy fuertemente detectable
17.8 mm/seg	Severamente detectable

Fuente: Reporte Presentado por la Empresa PyroSmart

Viendo que el límite permisible de vibración en casa de tierra es de 5.25 mm/seg. Vemos que a ese nivel las vibraciones son fuertemente detectables para el ser humano, siendo detectada desde los 0.35 mm/seg. Este tema es algo que se debe explicar a las personas y hacerlas entender que aunque ellos detecten la vibración no quiere decir que esta cause daño en sus propiedades.

**CAPITULO VII MONITOREO EN CAMPO DE LA FRECUENCIA DE
RESONANCIA (VIVIENDA DE TAPIAL)**

En la actualidad la mayoría de los estudios de daño producto de voladuras, están basados en el parámetro velocidad de partícula y sus esfuerzos están dirigidos principalmente al área de la Construcción Civil. Un avance importante al respecto, fue la incorporación de una nueva variable, como es la **FRECUENCIA** de la vibración.

La peligrosidad con respecto a una estructura de una vibración no está dada solamente por el valor pico de dicha vibración, sino también por la frecuencia de la misma. La peor situación se produciría cuando la frecuencia de la onda que va excitar una determinada estructura es igual a la frecuencia de resonancia de dicha estructura. En este caso se produce la máxima absorción de energía por parte de la estructura y hay mayor probabilidad de que se pueden causar daños a la misma. Es

muy importante determinar cuáles son las frecuencias predominantes de la onda generado por la voladura”

Para el cálculo de la frecuencia de resonancia de forma experimental debemos empezar con la utilización de los sismógrafos en el campo y con el permiso de las personas habitantes de los inmuebles que queramos realizar la frecuencia de resonancia.

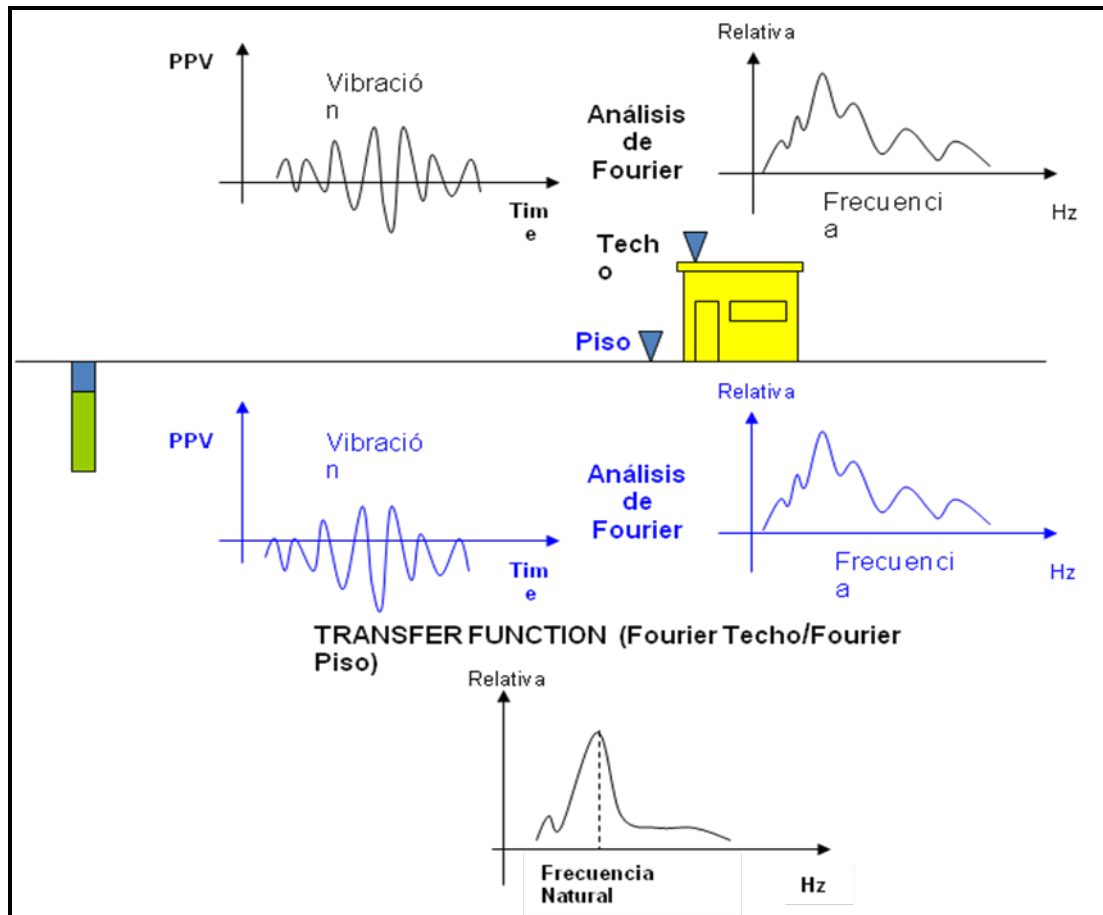
Para el caso en cuestión se utilizaron dos sismógrafos del tipo Instantel para una prueba de frecuencia de resonancia en una casa del tipo de tierra apisonada. La descripción del método como se hizo se muestra a continuación junto con los análisis para predecir el espectro de la frecuencia y sacar cual es la frecuencia natural de la casa y comprobarlo con la formula desarrollada manualmente.

**IMAGEN 11. IMAGEN DE LA CASA SELECCIONADA PARA MEDIR
FRECUENCIAS DE RESONANCIA**



Fuente: Fotografía de la Base de Datos de Orica

FIGURA 34. DIAGRAMA DE CÓMO ES LA MEDICIÓN DE FRECUENCIA DE RESONANCIA



Fuente. Archivo de Presentaciones de Orica

En el gráfico superior se muestra como es la realización del método experimental para realizar la frecuencia de resonancia de una instalación. Mediante la instalación de dos sismógrafos, un en el suelo de la vivienda y el otro en la parte de la pared o el techo de la vivienda. Se recomienda su ubicación en ambos sitios tomando en cuenta que la frecuencia de resonancia del techo y de las paredes en este tipo de estructuras podría ser diferente.

Realizada la voladura se tiene dos registros en los dos sismógrafos, el cual uno es de la estructura y el otro del nivel del piso. Así pasando los registros mediante la transformada de Fourier podemos convertirlo a un registro de frecuencia, lo cual hacemos con ambos registros. La representación gráfica de la transformada de Fourier es un diagrama, denominado espectro de Fourier, donde se representa la frecuencia y amplitud de cada una de las componentes sinusoidales determinadas. Mediante esto transformamos un modelo físico en un modelo matemático para hacer más fácil su interpretación.

Así aplicando el análisis de Fourier a ambos registros tenemos que realizar un análisis de ambos gráficos y comparándolos porque el punto donde se obtuvo el mayor registro del techo, se ve la frecuencia que se tuvo en el piso y se puede saber cuál es la frecuencia más dañina para la casa, lo cual nos muestra cual es la frecuencia de resonancia o periodo fundamental de la estructura.

La casa que se uso de prueba se encontraba en el radio de influencia de las voladuras de Yanacocha y donde se tuvo más acceso con la población en la zona del reservorio de San José. Los registros fueron analizados y puestos en el software blastware III.

**IMAGEN 12. IMAGEN DE LA CASA SELECCIONADA PARA MEDIR
FRECUENCIAS DE RESONANCIA**



Fuente: Fotografía de la Base de Datos de Orica

El monitoreo se hizo principalmente en las paredes de la casa, las cuales estaban en situación más cercana a la voladura. Las dimensiones de la casa era de unos 2.30 a 2.60 m de altura, y con unos 4.50 de ancho y 3.00 de largo. Estas dimensiones van a ser necesarias para compararlo con el modelo analítico que se realizó y ver si las formulas diseñadas serviría para análisis en otras viviendas. Debemos hacer hincapié que las relaciones con las comunidades en esas zonas es muy difícil por lo que no se pudieron hacer más análisis experimentales por estos problemas. Lo cual es un hecho lamentable porque si la empresa minera se pusiera de acuerdo con los poblados se podrían hacer estos espectros de frecuencia para todas las casas que tuvieran peligro y así se evitarían posibles futuros problemas.

7.1 COLECCIÓN Y ANALISIS DE DATA

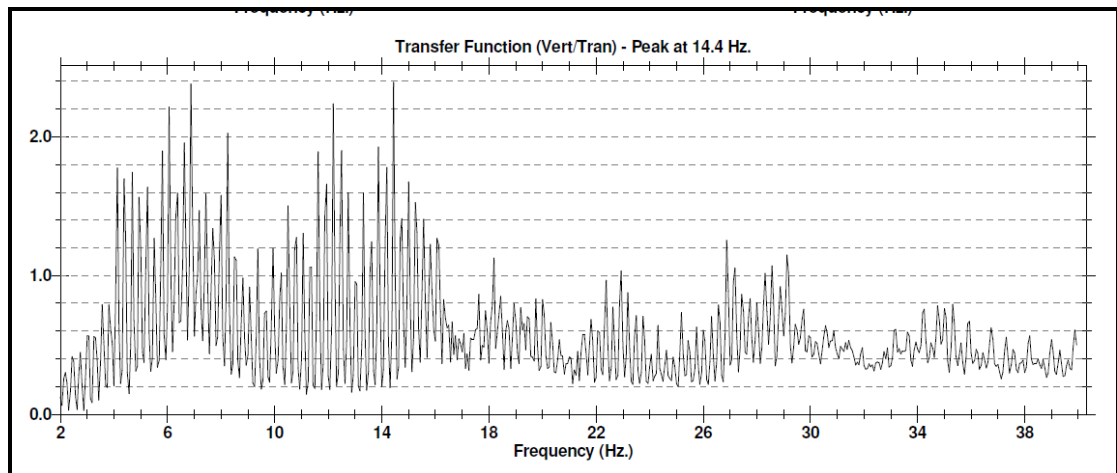
Se colocaron los sismógrafos en los lugares mostrados en la fotografía superior (Pared y piso), obteniéndose los siguientes registros.

Las pruebas puestas en el Blastware III y aplicadas a la transformada de Fourier y después puestas en la Transfer Function. Tuvieron los siguientes resultados.

Prueba 06 Mayo 2010. Frecuencia Dominante. 4 Hz a 16 Hz

FIGURA 35. REGISTRO DE FRECUENCIA DE RESONANCIA – 06

MAYO 2010



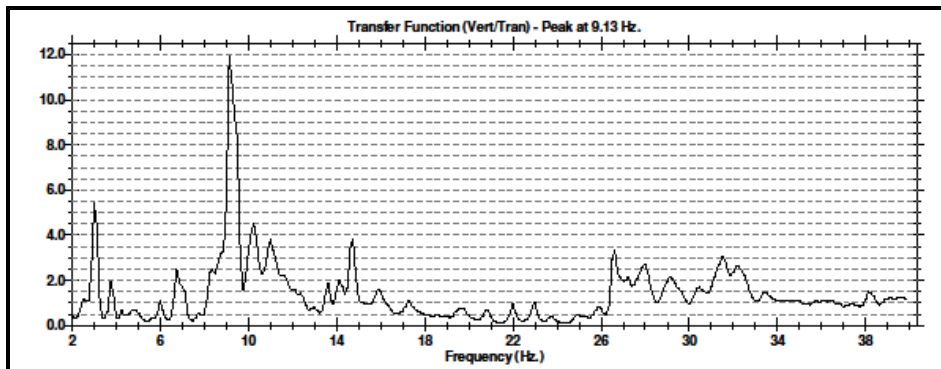
Fuente. Registro de la Base de Datos de Orica en Yanacocha

Vemos en el análisis de las frecuencias que están en un promedio de 4 Hz hasta los 16 Hz lo cual tiene coherencia con los datos que se tienen de las normativas que indican que la frecuencia de resonancia de las estructuras están en el rango de 4 a 11 Hz. El aumento de la frecuencia se puede deber principalmente a que las estructuras de tierra apisonada no poseen en su mayoría una estructura adecuada

para los sismos (pilares, cimientos, etc) lo cual es un factor que la hace débiles a las voladuras.

La siguiente medición realizada fue en la pared posterior de la casa la cual tuvo un registro más de acuerdo a las normas internacionales, encontrándose dentro del rango pero con valores más altos que el promedio. Por lo que podíamos darnos una idea de que las frecuencias en las casas tapiales estaban más arriba del promedio. Comprobando los datos obtenidos en la fase analítica.

**FIGURA 36. REGISTRO DE FRECUENCIA DE RESONANCIA – 06
MAYO 2010**



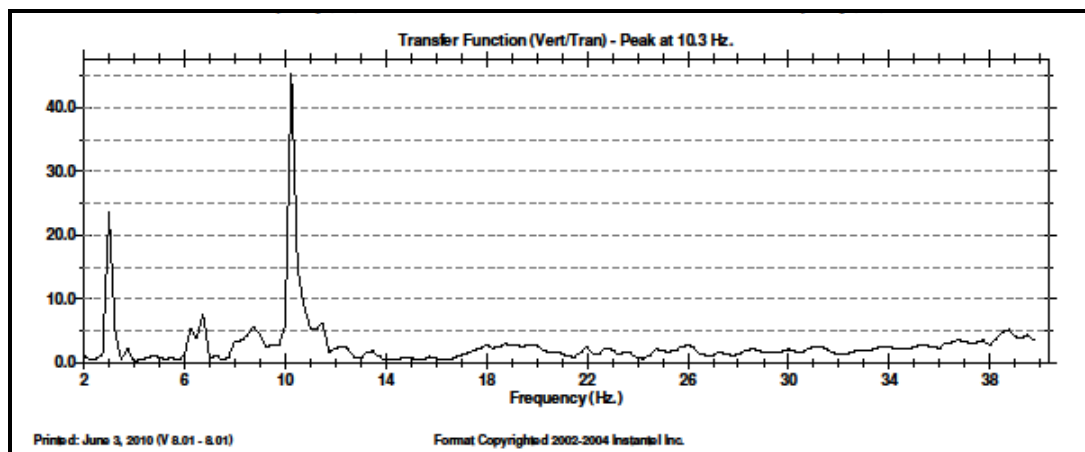
Fuente. Registro de la Base de Datos de Orica en Yanacocha

Este registro al haber sido una voladura de menor número de taladros y con los tiempos de retardos entre filas mas espaciados nos muestra un registro más limpio en donde se ven los picos de la frecuencia en valores de 9-11 Hz, debemos desestimar los picos de las frecuencia de 2 Hz a los 27 Hz debido a que los más probable que hayan sido la presencia de datos fantasmas en el registro.

El siguiente registro realizado fue en la pared opuesta a la voladura en la cual se tuvo un registro de un promedio de 8 a 12 Hz, lo cual está más parecido a los valores obtenidos en la pared anterior. Debemos acotar que estas dos últimas paredes se encontraban con apoyo de las paredes del cobertizo por lo que su frecuencia estructural pueden ser de valores mayores a los establecidos en las mediciones de campo.

FIGURA 37. REGISTRO DE FRECUENCIA DE RESONANCIA – 06

MAYO 2010



Fuente. Registro de la Base de Datos de Orica en Yanacocha

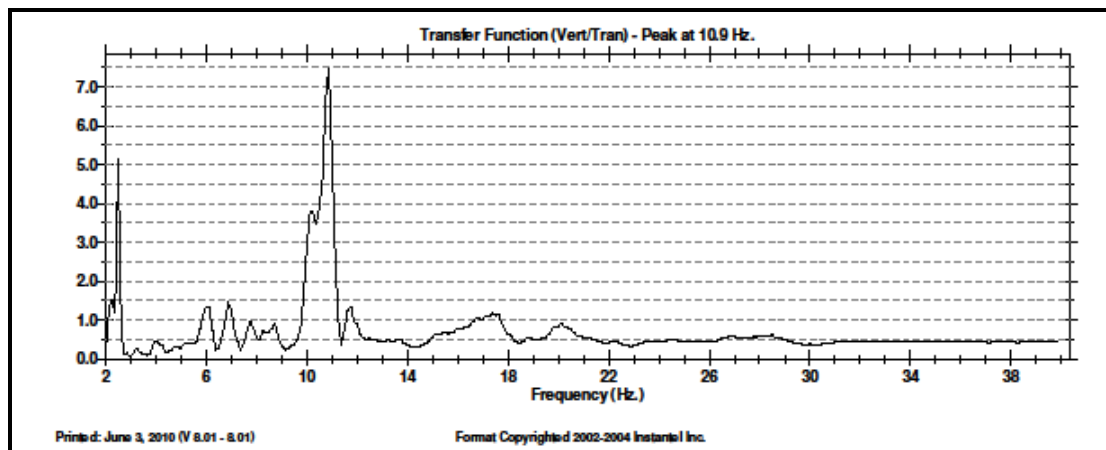
En la medición tomada podemos apreciar el pico en los 10.3 Hz como frecuencia de resonancia lo cual nos indica que esta dentro del rango puesto por las normas internacionales para las estructuras de 4 a 11 Hz.

El siguiente registro realizado en la otra pared se tuvo un registro de un promedio de 9 a 13 Hz, lo cual también está dentro del rango establecido por las normas, esta pared se encontraba con gran cantidad de grietas por lo que el

sismógrafo tuvo que ser colocado en la parte superior del muro para el análisis. Hasta el momento los espectros de frecuencia muestran valores dentro del rango establecido por datos obtenidos por la fase analítica realizada en las líneas superiores.

FIGURA 38. REGISTRO DE FRECUENCIA DE RESONANCIA – 06

MAYO 2010



Fuente. Registro de la Base de Datos de Orica en Yanacocha

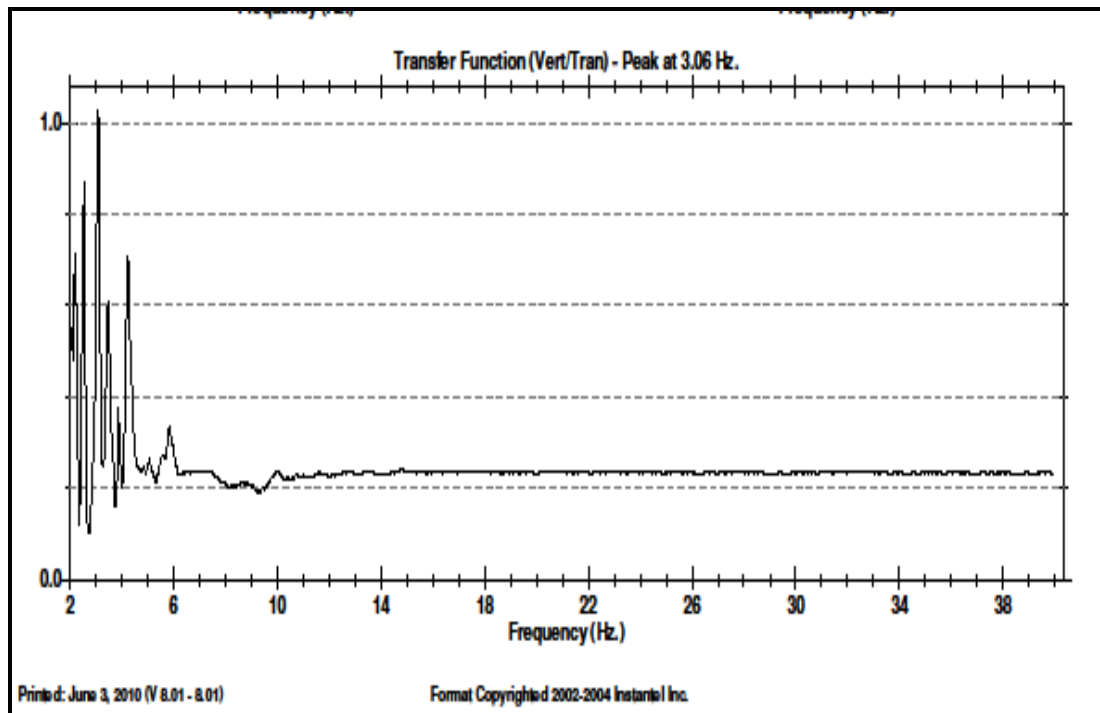
Aquí vemos un espectro de frecuencia parecido a las voladuras anteriores poniendo una frecuencia de resonancia a la casas de aproximadamente de 10.9 Hz como pico. Entonces teniendo los registros de las cuatro paredes tomadas podemos llegar a un rango de promedio de frecuencias para las casas de tierra apisonada y con estos valores podemos hacer una comparación de la formula analítica desarrollada en los capítulos superiores.

También se hicieron pruebas en las estructuras presentes en el interior de la casa para poder definir un patrón de las respuestas de la frecuencia. Se colocó los

equipos en un anaquel o armario que había en la casa teniendo como resultado el siguiente registro.

En estos registros podemos ver que en el caso de tener algún material o equipos ya se jarrones, etc. sobre armarios o anaqueles estos anaqueles respectivo obtendrán su frecuencia de resonancia a niveles bajos de 2 a 4 Hz, lo cuales pueden alarmar a los pobladores de las viviendas creyendo que la vibración puede dañar sus casas.

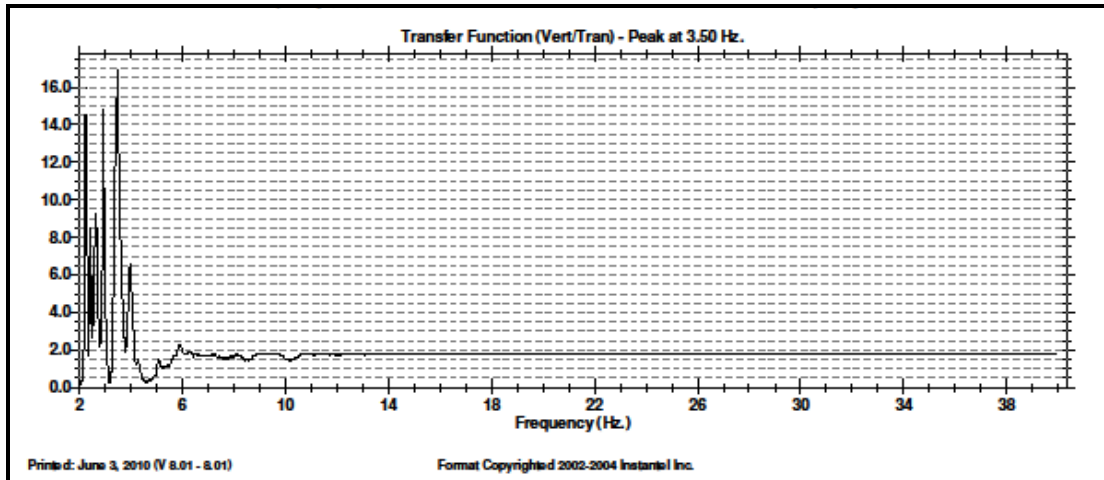
**FIGURA 39. REGISTRO DE FRECUENCIA DE RESONANCIA – 06
MAYO 2010 – ARTEFACTOS EN LA CASA**



Fuente. Registro de la Base de Datos de Orica en Yanacocha

FIGURA 40. REGISTRO DE FRECUENCIA DE RESONANCIA – 06

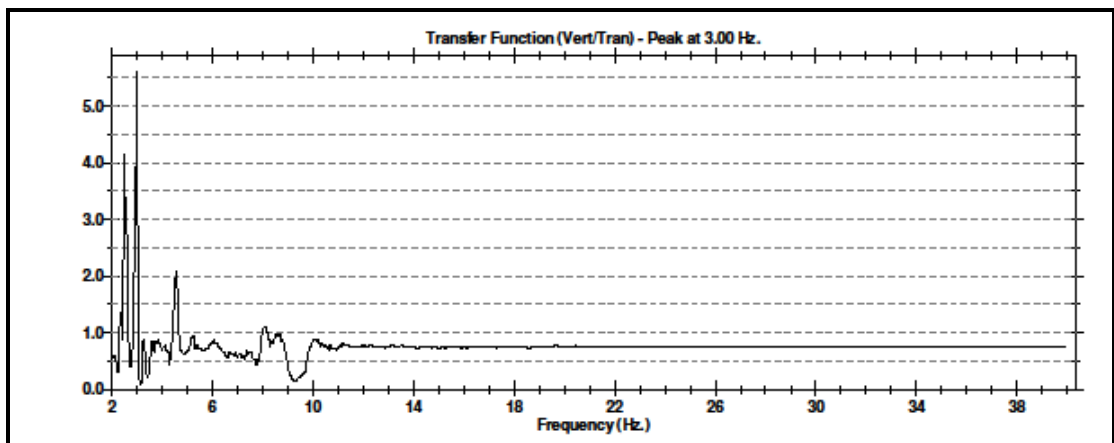
MAYO 2010 – ARTEFACTOS EN LA CASA



Fuente. Registro de la Base de Datos de Orica en Yanacocha

FIGURA 41. REGISTRO DE FRECUENCIA DE RESONANCIA – 06

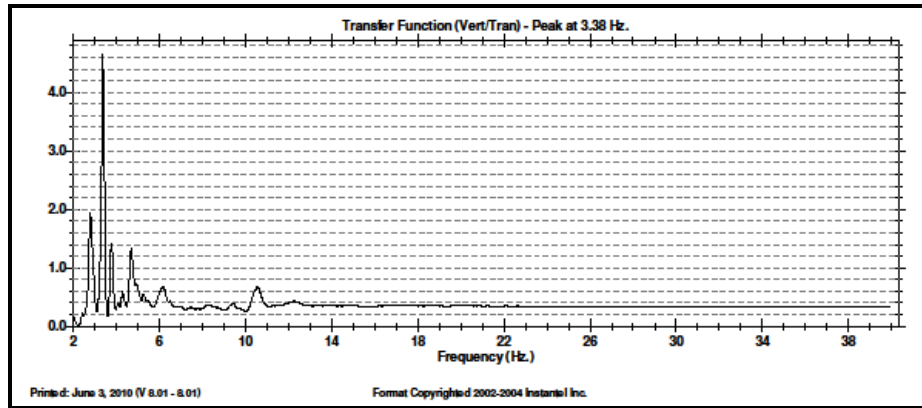
MAYO 2010 – ARTEFACTOS EN LA CASA



Fuente. Registro de la Base de Datos de Orica en Yanacocha

FIGURA 42. REGISTRO DE FRECUENCIA DE RESONANCIA – 06

MAYO 2010 – ARTEFACTOS EN LA CASA



Fuente. Registro de la Base de Datos de Orica en Yanacocha

Reuniendo los datos obtenidos en una hoja Excel podemos calcular el promedio de la frecuencia de resonancia para casas de tierra apisonada para el análisis experimental. Siendo los valores obtenidos los siguientes.

Tabla de Frecuencias de Resonancia Obtenidas de los datos experimentales.

TABLA 30. TABLA DE FRECUENCIAS DE RESONANCIA OBTENIDAS DE LOS DATOS EXPERIMENTALES.

Tabla de Frecuencias	
Tipo	[Hz]
Pared 1	10.9
Pared 2	10.3
Pared 3	9.13
Pared 4	14.4

Fuente. Registro de la Base de Datos de Orica en Yanacocha

Revisando los datos de altura de la pared de 2.60 y los anchos de la pared de 3.00 m y 4.50 m, pasamos los datos a una fórmula para el cálculo del periodo fundamental de la vibración, esta fórmula ha sido aplicada en el modelo analítico y se han obtenido buenos resultados por lo que lo aplicamos en los datos obtenidos para una mejor comprobación. La formula es la misma que la usado en el análisis sísmico realizado, siendo una modificación de la usada en la E30. El valor modificado se debe a que se trata de una casa de tierra la estudiada que es diferente a una de concreto.

$$T = 0.05 H / \sqrt{D}$$

Viendo los resultados podemos ver que solo en el caso de la pared 4 tiene cierta falta de correlación, mientras que en los otros resultados se tienen valores parecidos dentro del rango que se supuso en un comienzo.

TABLA 31. TABLA DE CORRELACIÓN ENTRE LOS DATOS EXPERIMENTALES Y TEÓRICOS.

Tipo	Prueba Experimental [Hz]	Formula [Hz]
Pared 1	10.9	11.65
Pared 2	10.3	9.51
Pared 3	9.13	9.51
Pared 4	14.4	11.65

Fuente. Registro de la Base de Datos de Orica en Yanacocha

**IMAGEN 13. IMAGEN DE LA CASA SELECCIONADA PARA MEDIR
FRECUENCIAS DE RESONANCIA**



Fuente. Registro de la Base de Datos de Orica en Yanacocha

Las paredes del 1 al 3 han mostrado más exactitud tanto en el modelo experimental como en el modelo analítico por lo que nos basaremos en los valores de esas paredes y tomando en cuenta que los techos tienen una frecuencia de resonancia mayor a las paredes podríamos estar de acuerdo en predecir que la frecuencia de resonancia para las casas de tierra apisonada puede estar de un valor de 8 a 15 Hz como rango de tolerancia, lo cual nos muestra valores diferentes a los de 4 a 11 Hz establecido por las normas internacionales.

Después de estos cálculos recién podemos empezar con el Modelamiento de Vibraciones de la mina para poder determinar primero, si alguna voladura podría

hacer daño a las viviendas de tierra apisonada y después comenzar el Modelamiento para mitigar ese daño usando primero el Modelamiento de campo lejano de Devine y después el Modelamiento de onda elemental.

CAPITULO VIII LUGAR DE PRUEBAS

La mina donde se realizados los análisis de vibraciones ha sido en el Tajo La Quinoa perteneciente a la mina Yanacocha ubicada en Cajamarca. De esta mina es donde los modelos serán desarrollados Debido a que en su zona de influencia hay gran cantidad de casas del tipo tapial por lo que los modelos desarrollados a continuación servirán para la protección de esas viviendas. Empezaremos con ver un poco sobre la mina y sus principales geologías y políticas de desarrollo. De esta forma veremos la importancia que ha adquirido el control de vibraciones para evitar los problemas con las comunidades cercanas.

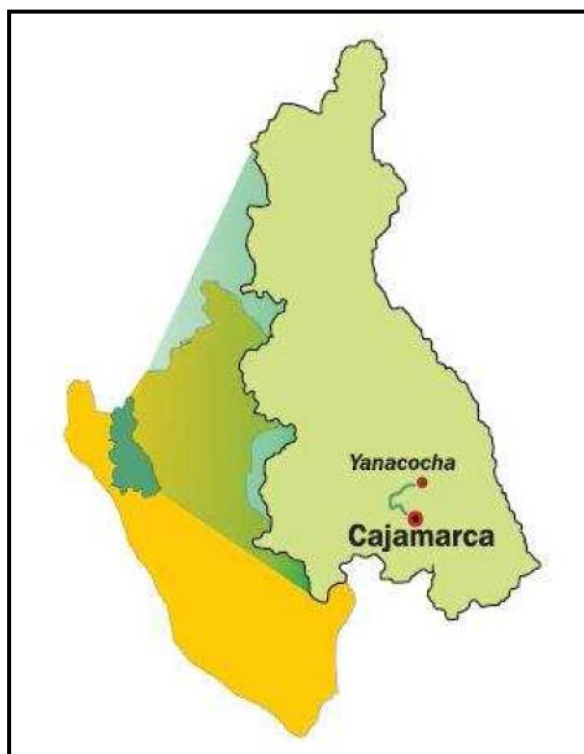
8.1 UBICACIÓN Y GENERALIDAD YANACOCHA.

Minera Yanacocha SRL. (Minera Yanacocha) se ubica en la Provincia y Departamento de Cajamarca (ver la Figura 1.1, Mapa de Ubicación), sobre la Cordillera de Los Andes, al norte del Perú, con una localización aproximada de 7° Latitud Sur y 78°30' Longitud Oeste, aproximadamente a 32 kilómetros al norte

de la ciudad de Cajamarca, por carretera. Toda la propiedad comprende un área de más de 175 000 hectáreas. con elevaciones que van desde los 3,700 hasta los 4,100 msnm. El acceso a la mina desde la ciudad de Cajamarca es a través de una vía asfaltada y toma aproximadamente una hora.

El distrito está ubicado en la línea divisoria continental, separando arroyos que drenan hacia el este dentro de la Cuenca del Amazonas y luego al Océano Atlántico (en las cuencas de Porcón, Chonta y Honda) de aquellas que drenan hacia el oeste al Océano Pacífico (en la cuenca Rejo).

FIGURA 45. MAPA DE LOCALIZACIÓN



Fuente. Mina Yanacocha

8.2 GEOLOGÍA

8.2.1 Geología Regional

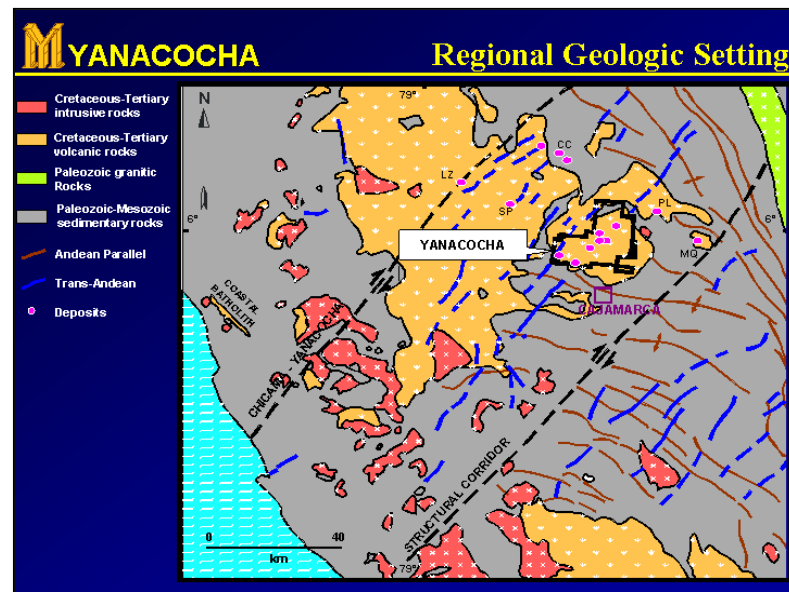
El distrito Yanacocha se localiza en los andes volcánicos terciarios del norte del Perú, aproximadamente a 20 KM al norte de la ciudad de Cajamarca (figura 2.1). El Mercurio era minado históricamente en algunas partes del distrito. La exploración moderna de cobre y plata empezó al inicio de 1960s y continuó hasta inicios de los 1980s. Un joint venture entre Newmont Mining Corporation y Buenaventura Mining Company descubrió la mineralización superficial de oro en Yanacocha en 1984. Los primeros trabajos fueron el muestreo geoquímico usando el método rock-chip, lo que resultó en la identificación de 14 anomalías superficiales de oro separadas. La perforación empezó en 1985 y concluyó en 1992; las reservas iniciales de todo el distrito fueron de 1.28 millones de onzas. La producción comenzó en el yacimiento Carachugo en 1993. A finales del 2005 más de 20 millones de onzas han sido recuperadas y es hasta la actualidad la operación minera de oro más grande de Sudamérica.

8.2.2 Geología Estructural

El distrito Yanacocha forma hacia el NE un cinturón de alta sulfuración epitermal de yacimientos de oro con secuencia volcánica, referido como el Complejo Volcánico de Yanacocha (CVY). El CVY es generalmente confinado dentro de una longitud de (24KM de diámetro) con tendencia hacia el NE, y una depresión volcánico tectónica. El distrito está en el Centro de la intersección regional de las fallas del nor oeste de los andes, y el corredor estructural de

tendencia trans-andina Chicama- Yanacocha noreste (figura 2.2). Esta falla dominante NE-NO es reflejada como control interno de la mineralización de oro de la mayoría de yacimientos.

FIGURA 48. DISTRIBUCIÓN GEOLÓGICA REGIONAL

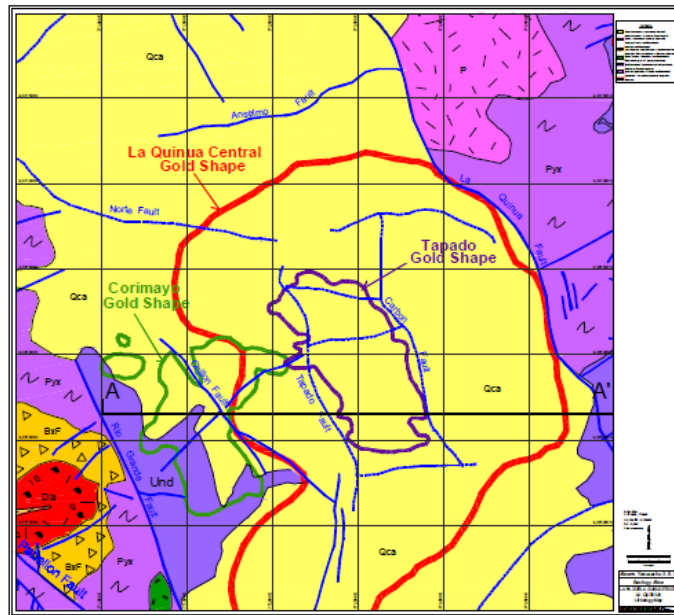


8.2.3 Geología Local – La Quinoa

El complejo de La Quinoa se compone de la Quinoa, La Quinoa y La Central Quinoa Sur grava los depósitos y la sede de El Tapado y Oeste Tapado (Corimayo) los depósitos de alta sulfuración. El de La Quinoa Norte y La Quinoa Sur depósitos suelen agruparse con el depósito de La Quinoa. Un plan geológico del complejo se muestra en la Figura inferior. La figura muestra una sección geológica transversal a través de los depósitos. La Quinoa y La Quinoa Sur

El depósito de La Quinua es los más importantes que se sabe de grava alojado en el depósito distrito. La mineralización de oro en la Quinua, La Quinua Norte y La Quinua depósitos Sur se interpreta como origen de la erosión glacial de las partes superiore del Norte Yanacocha, Yanacocha Sur y depósitos Encajon.

FIGURA 49. GEOLOGÍA LOCAL – LA QUINUA



Fuente. Mina Yanacocha

Nota: El esquema de la mineralización de La Quinua grava anfitrión se muestra en rojo, el Tapado mineralización de oro, de color morado, y la mineralización Tapado Oeste, (también conocido como la mineralización de Corimayo) se muestra en el esquema de color verde. La mineralización se describe a 0,15 g / t Au. La grava se muestra en amarillo, Porfirio en ligero morado, ignimbrita e indiferenciados piroclásticos son de color morado, medios y oscuros. La brecha diatremas y brechas son freático en rojo y naranja, respectivamente. Conocido e interpretadas fallas están en azul. Espacios de la parilla es de 500m.

Este material mineralizado fue re-depositados como no consolidados glacial y sedimentos fluvio-glacial de una cuenca a fallos controlados, que se encuentra al suroeste de Cerro Yanacocha. Las gravas no consolidadas no afloramientos forma y la superficie pre-mina fue cubierta de hierba. Rock tipos definidos en el yacimiento son:

Alta de secuencia. Sin clasificar, masiva a débilmente estratificada adoquinado grava. Lentes de limo y arena se producen en todo. Grava fragmentos silicificados consisten fundamentalmente de fragmentos volcánicos. Puede contener hasta un 50% de barro (arcilla + limo) y contiene por lo general mayor de 25% de arena. El oro está presente en todas las fracciones de tamaño, pero calificaciones tienden a ser más alta en las fracciones más finas. Puede contener lentes y entre capas de arcilla, limo y arena. Estas unidades son generalmente menos de 5 m de espesor, y el rango horizontal de 10s para 100s de metros;

Medio de secuencia. Hierro y depósitos orgánicos o hiato Secuencia, incluyendo Ferricretas. El óxido de hierro, por lo general hematita, en parte para cementos completamente la grava de forma Los cortes transversales de las camas que original. Ferricretas parecen haber formado en los límites de redox en la mesa de paleo-agua. El más alto de grado medio de oro (0,99 g / t Au) se produce en Ferricretas;

Pantano de Hierro. Gossan representa casi pura, óxido de hierro secundaria depósitos de oro de menor importancia. Gossan capas son de hasta 35 m de espesor, pero son lateralmente discontinuos;

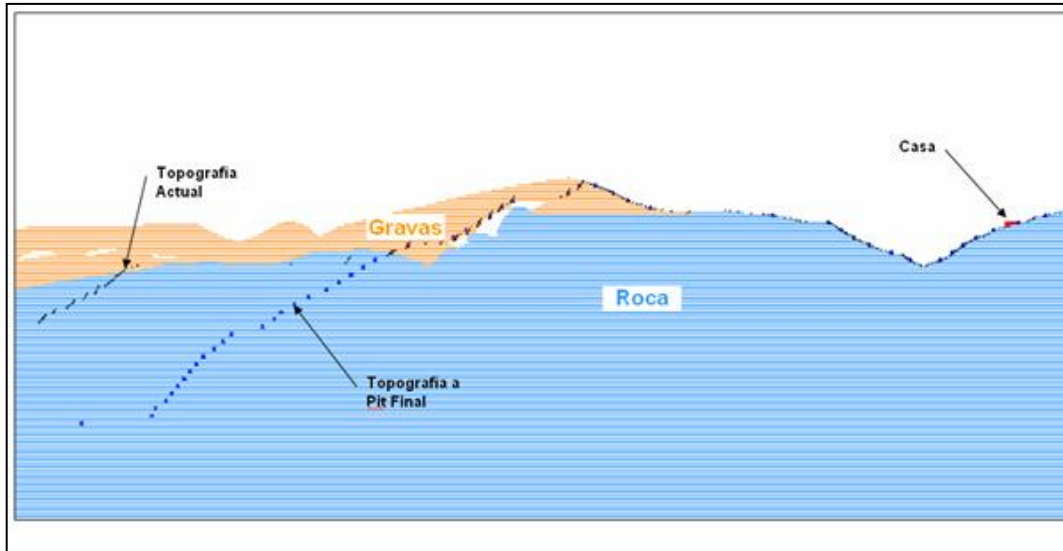
Turba y los sedimentos orgánicos, paleosuelos;

Secuencia Inferior. Sin clasificar, masiva a débilmente estratificada adoquinado grava. Grava consisten en fragmentos silicificados, sílice, arcilla y alunita sílice fragmentos volcánicos alterados. Contiene un poco mayor porcentaje de arcilla y alunita de la secuencia superior. La distribución de los productos de alteración mantienen dentro de la sección estratigráfica de La Quinoa Central es generalmente inversa a la de la alteración de alta sulfuración y la mineralización en el Cerro Yanacocha. Característica de los niveles superiores de Cerro Yanacocha, ensambles de alteración de calidad inferior, alunita y la arcilla son ricos preservados en los sedimentos basales de La Quinoa Central, mientras que residuos de las auríferas, niveles más profundos más silíceas en el Cerro Yanacocha se producen en la parte superior de la Central de La Quinoa sección estratigráfica.

8.2.4 Análisis Geológico y Estructural de la Zona de Quishuar.

En el análisis geológico de las zonas de Quishuar, debemos analizar la geología de la casa debemos anotar que la inspección se realizó de forma somera debido a las restricciones que puso la familia presente, pudiéndose observar que gran parte de las casas existentes se encuentran fundadas sobre roca, existiendo en algunas zonas capas de suelo de 50 centímetros, tal como se puede apreciar en el grafico siguiente que es extraído del modelo geológico.

FIGURA 50. ANÁLISIS GEOLÓGICO Y ESTRUCTURAL DE LA ZONA DE QUISHUAR



Fuente. Área de Geología de Minera Yanacocha

FIGURA 51. FOTOGRAFÍA DE LA ZONA DE QUISHUAR.



Fuente. Área de Geología de Minera Yanacocha

Además las casas no presentan ningún tipo de cimentación que pueda dar el soporte necesario, como se aprecia en la imagen inferior.

FIGURA 52. FOTOGRAFÍA DE LOS CIMIENTOS DE LAS CASAS DE TAPIAL



Fuente. Área de Ingeniería de Minera Yanacocha

Se ha identificado una zona de deformación muy lenta de una ladera entre los dos conjuntos de casas debido a las filtraciones presentes y la calidad de material de cobertura, que no afecta la estabilidad de la zona donde se encuentran ubicadas las casas.

FIGURA 53. VISTA GEOLÓGICA DE QUISHUAR



Fuente. Área de Geología de Minera Yanacocha

Por lo que se puede determinar que no existen condiciones geotécnicas adversas que hayan producido el derrumbe de la pared, por lo que se debe identificar otras causas. Esta información nos demuestra que a pesar de las vibraciones efectuadas por debajo de las normativas actuales las casas ubicadas en la zona de Quishuar sufrieron daños. Además está el hecho de la falta de cimentación en las casas de las zonas lo cual influye en el debilitamiento de las casas por efecto de las continuas voladuras en la zona. Esto tenemos que analizar porque así tengamos el registro de 5.25 mm/s como limite permisible la falta de cimentación en las casas podría provocar que a una vibración menor y más constantes podría provocar derrumbamiento de las casas.

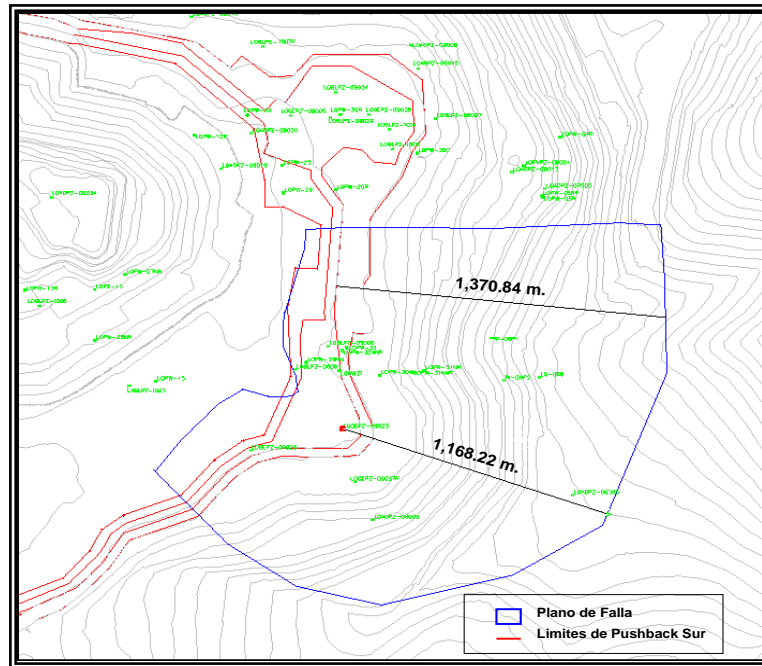
CAPITULO IX MONITOREO DE VIBRACIONES EN LA QUINUA

El tajo escogido para el monitoreo de vibración y el modelamiento de la onda ha sido el Tajo La Quinoa perteneciente a la unidad Minera Yanacocha. Este tajo fue escogido debido a que en sus límites se encuentra el poblado de Quishuar que cuenta con casas del tipo Tapial en una quebrada llamada Quishuar a una distancia de 800 a 1100 metros del área de Operaciones de La Quinoa.

9.1 PLAN DE MONITOREO DE VOLADURAS DEL TAJO LA QUINUA

Al tener definida la zona que necesitaríamos monitorear, podemos decir que las voladuras realizadas en el Pushback Sur (PBS) son las que se deben monitorear ya que son las más cercanas a la zona de LQ2C.

FIGURA 54. PLANO DE UBICACIÓN DE FALLAS Y LÍMITES DE PUSHBACK SUR.



Fuente. Área de P&V de Minera Yanacocha

Según la Figura Superior se tiene que las distancias promedio de los límites de Pushback Sur hasta los poblados de la zona este del movimiento de LQ2C están entre 1,168 y 1,370 m.

9.2 CALCULO DE VELOCIDAD DE ONDA P - TEÓRICA

Al tener identificada la zona de movimiento de LQ2C, tenemos que el tipo de material predominante en la zona de movimiento son de tipo gravas, según consta en la Figura.

$$V_{\text{onda P}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1-2\nu)(1+\nu)}} \dots\dots\dots (2)$$

Donde:

Modulo de Elasticidad (E) 78.54 KN/m²

Densidad (ρ) 0.3

Coefficiente de Poisson (ν) 1972 kg/m³

Resistencia a Tracción (σ_t) 0.5 – 2.0 Mpa.

Aplicando los datos sobre (2), tenemos el siguiente valor:

$$V_{\text{onda p}} = 1,714.9 \text{ m/s} \dots\dots\dots (3)$$

Aplicando (3) en (1) tenemos el siguiente rango de valores.

TABLA 33. RANGO DE VALORES DE PPVCRTICO

σ_t <i>(Mpa)</i>	PPVc <i>(mm/s)</i>
0.50	10.93
0.75	16.39
1.00	21.86
1.25	27.32
1.50	32.79
1.75	38.25
2.00	43.72

Fuente. Memo de Vibraciones en La Quinua- 2010

Estos valores están en función al rango de valores de la Resistencia a Tracción (σ_t). En función a ello tenemos que el PPVcrit. se encuentra entre 10.93 a 43.72 mm/s.

Los niveles de Velocidad Partícula Critica entregados en la Tabla 1 pueden diferir de los mencionados habitualmente en la literatura técnica al respecto (por ello se trabajo sobre un rango de valores). Estas diferencias reflejan la gran importancia que tiene establecer para cada tipo de macizo rocoso en particular los límites de daño, los que están directamente relacionados con sus propiedades geomecánicas y por tanto deben ser estimados en forma independiente no solo en cada mina sino en cada dominio geomecánico de la misma.

Los valores de Velocidad de Partícula Critica aquí calculados, tienen solo el carácter referencial deben ajustarse con mediciones mas detalladas que permitan establecer con mayor precisión in-situ la capacidad del macizo rocoso para soportar niveles de vibración en el rango estimado.

TABLA 34. RANGO DE VALORES DE PPVCRIT SEGÚN TIPO DE DAÑO

σ_t (Mpa)	RANGOS DE VIBRACION		
	4PPVc	PPVc	1/4PPVc
0.50	43.72	10.93	2.73
0.75	65.58	16.39	4.10
1.00	87.44	21.86	5.46
1.25	109.30	27.32	6.83
1.50	131.16	32.79	8.20
1.75	153.02	38.25	9.56
2.00	174.88	43.72	10.93

Fuente. Memo de Vibraciones en La Quinoa- 2010

Donde:

*Mayor que $4*PPV_{crit}$ Intenso Fracturamiento*

*Mayor que $1*PPV_{crit}$ Creación de Nuevas Fracturas*

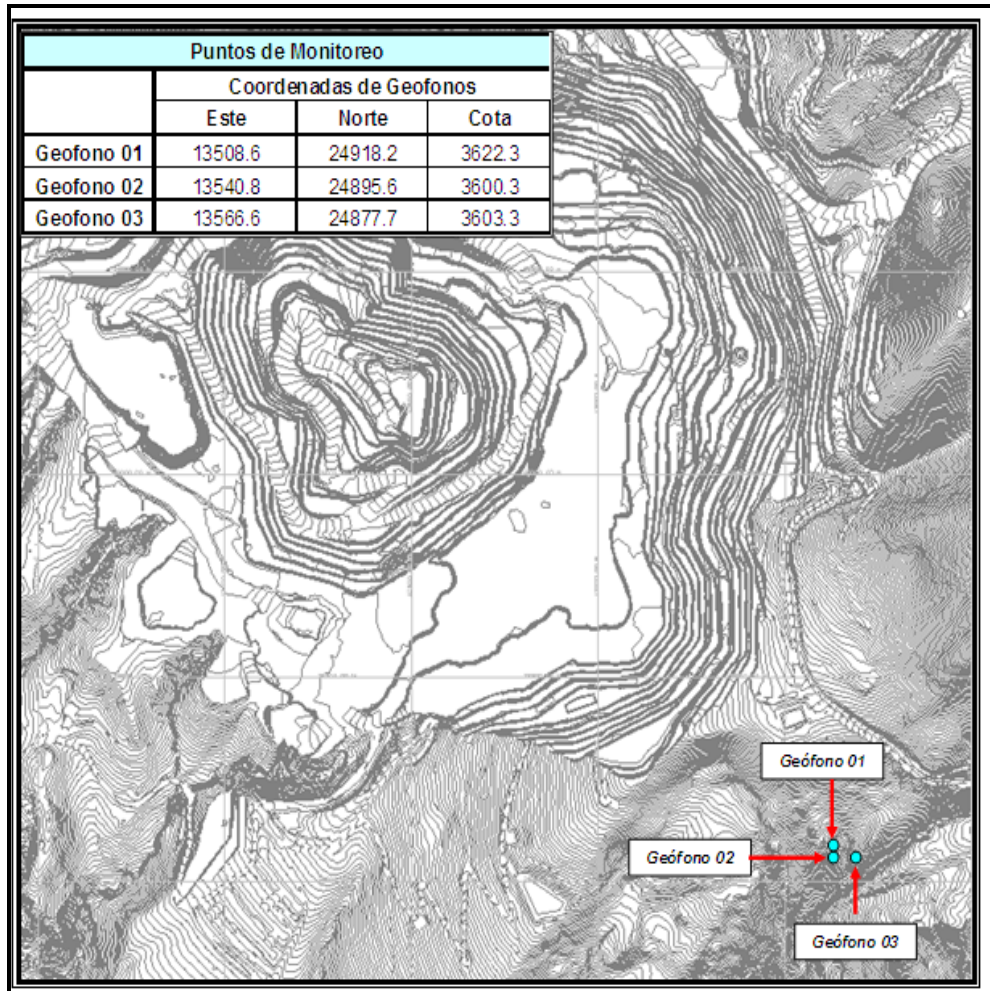
*Mayor que $1/4*PPV_{crit}$ Extensión de Fracturas Pre-existentes*

La Tabla Superior muestra los valores de Rangos de Vibración según el Tipo de Daño para la zona de Falla en LQ2C. Estos valores servirán como referencias para establecer límites máximos permisibles y compararlos con nuestros monitoreos de vibraciones para las distancias establecidas anteriormente.

9.3 RECOPIACIÓN DE DATOS – UBICACIÓN DE GEÓFONOS

Se escogieron tres puntos de monitoreo dentro de los límites de Yanacocha debido a los problemas que se tenían con las comunidades. Estos tres puntos se encontraban en la quebrada de Quishuar a 1000 m de las voladuras del Tajo. En la tabla inferior se muestran las coordenadas de los puntos de monitoreo.

**FIGURA 56. PLANO DE UBICACIÓN DE LOS GEÓFONOS COLOCADOS
EN QUISHUAR**



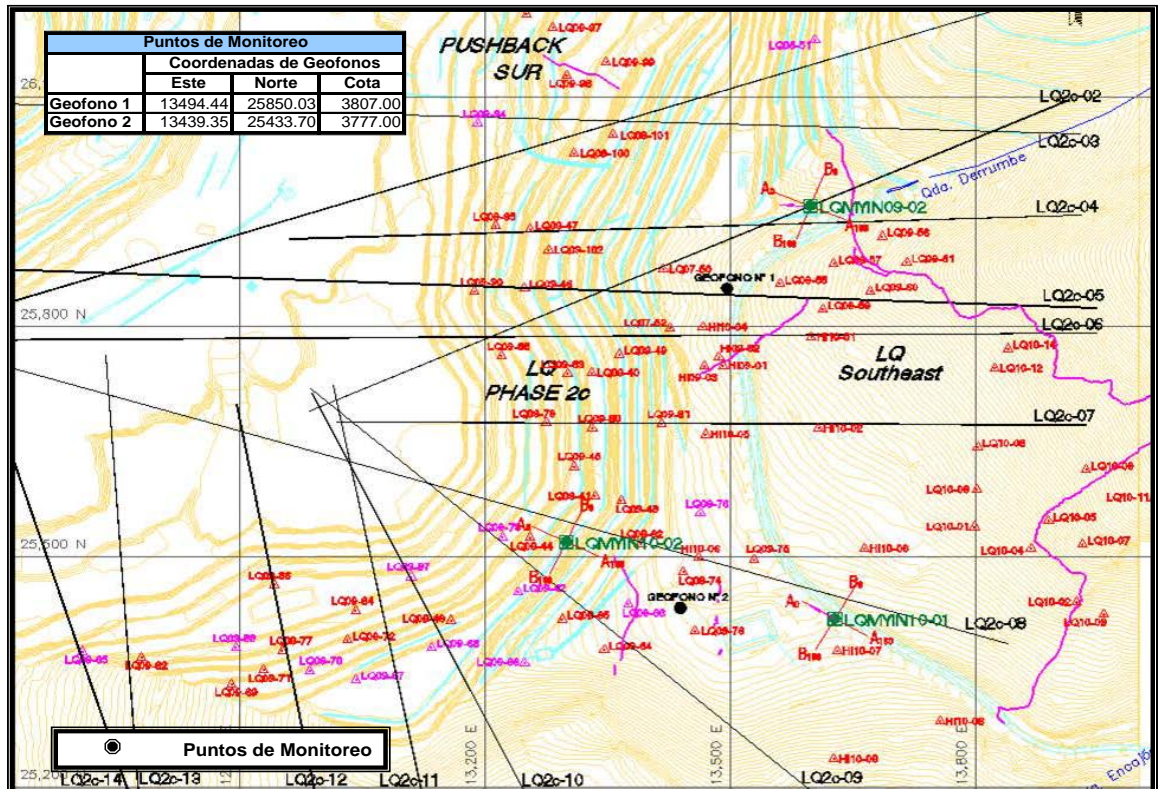
Fuente. Memo de Vibraciones en La Quinua- 2010

Estos puntos de monitoreo tuvieron una duración de tres meses desde Octubre del 2009 a Diciembre 2009, Siendo cambiados a pedido del Área de Geotecnia cuando se detecto la presencia de una falla unos cientos de metros más adelante.

Los nuevos puntos de monitoreo se encontraba más cerca al tajo pero en la misma dirección de la ubicación de los anteriores puntos, por lo que mostraron su

utilidad tanto para el control de vibración de los poblados como para el control de la falla.

FIGURA 57. PLANO DE FALLAS Y DIACLASAS DE LA QUINUA



Fuente. Memo de Vibraciones en La Quinua- 2010

El monitoreo para determinar el movimiento de la zona de LQ2C por efecto de las vibraciones por voladura en la zona de LQ2C se inicio en Enero 2010 hasta el mes de Marzo, sin embargo, ya se tenían registros desde la zona de Quishuar desde el mes de Octubre 2009 hasta Diciembre 2,010, esto a solicitud del Área de Asuntos Externos.

Para el efecto del análisis general se utilizaran todos los valores desde Octubre 2,009 hasta Marzo 2,010. Los puntos de monitoreo desde Octubre 2,009 hasta Diciembre 2,009 se encuentran cerca de la Falla La Quinoa en la zona de Quishuar, mientras que los puntos de monitoreo desde Enero 2,010 hasta Marzo 2,010 se encuentran a distancias mas cercanas de la zona de voladura, algunos puntos de monitoreo fueron ubicados inclusive en el mismo nivel de la voladura con el fin de tener un rango mas amplio de datos en función a la distancia.

Cabe mencionar que los Puntos de Monitoreo de la Figura fueron elegidos aleatoriamente según cercanías a la zona de Quishuar, teniendo como referencia un sector definido por el Área de Asuntos Externos, mientras que los últimos puntos de monitoreo fueron a solicitud del Área de Geotecnia. Para el monitoreo en ambos sectores se utilizaron geófonos de estándar de superficie. INSTANTEL.

Los registros de vibraciones obtenidos se tienen en el anexo 12 desde Octubre del 2009 hasta Julio 2010 y con los datos se realizar el modelo de vibraciones.

9.4 RESULTADOS MONITOREO DE VIBRACIONES

La base del análisis la constituye el registro de vibraciones propiamente tal. En él se observa con exactitud los tiempos de detonación de las cargas en el eje de las abscisas (ms) y su amplitud relativa en el eje de coordenadas (mm/s), que da cuenta del nivel de vibración (PPV).

Los registros están constituidos por tres componentes ortogonales correspondientes a cada uno de los geófonos que conforman el arreglo triaxial (Radial, Transversal y Vertical). El anexo 12 del presente informe da cuenta de los

registros de vibraciones obtenido del monitoreo de las voladuras sujeto de evaluación, incluyendo el análisis correspondiente (identificación de valores peak)

Como ya se sabe, la capacidad de una onda para generar daño a una estructura se debe a dos variables críticas: la velocidad pico partícula y la frecuencia. Como resultado, instituciones como el Bureau of Mines de los Estados Unidos han realizado un gran número de estudios para poder controlar los efectos negativos de las vibraciones. Uno de dichos estudios derivó en la creación de un cuadro de control de vibraciones (Normativa USBM). Lamentablemente, la gráfica no predice el comportamiento de una onda, sólo es una herramienta de gestión que permite monitorear las vibraciones para que estas se encuentren en valores aceptados y libres de riesgo. Sin embargo, otros estudios realizados crearon modelos orientados a predecir el comportamiento de una onda para condiciones específicas y estándares. A pesar de los resultados aceptables que se puedan obtener, se aconseja desarrollar un modelo a partir de información real de campo para los diferentes casos en estudio.

Para ello empezaremos analizando los datos de la velocidad pico partícula y la frecuencia, buscamos encontrar una relación entre ellas por lo que realizaremos lo que llamamos diagrama de correlación para ver esa relación.

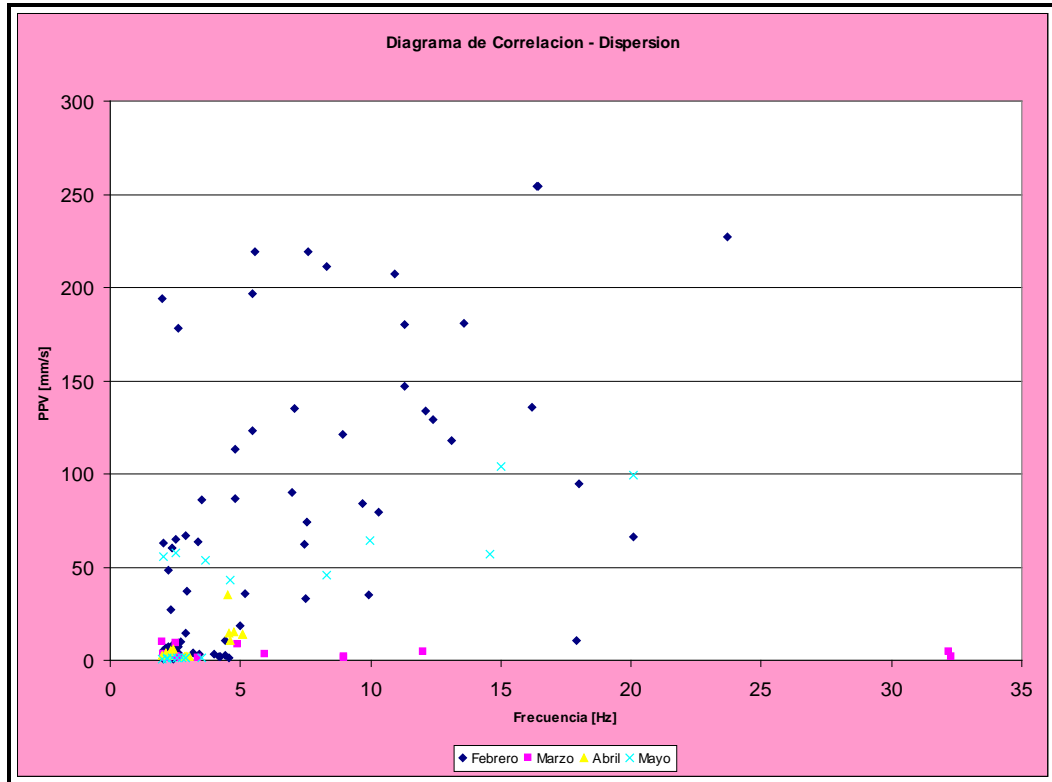
CAPITULO X. ANALISIS DE VIBRACION

10.1 DIAGRAMA DE CORRELACIÓN - DISPERSIÓN

El diagrama de correlación es una herramienta grafica que nos permite demostrar la relación que existe entre dos clases de datos y cuantificar la intensidad de dicha relación. De esta forma podemos ver si la velocidad de la partícula guarda relación con la frecuencia y si efectivamente hay correlación entre estas dos magnitudes y, en caso positivo, de que tipo es la correlación.

Analizando los datos del Anexo 12 tenemos la siguiente grafica. La cual nos muestra que no existe una formula de correlación entre los datos. Pero si existe una tendencia a que si la frecuencia aumenta también aumentara el valor de la velocidad pico partícula.

FIGURA 58. DIAGRAMA DE CORRELACIÓN - DISPERSIÓN



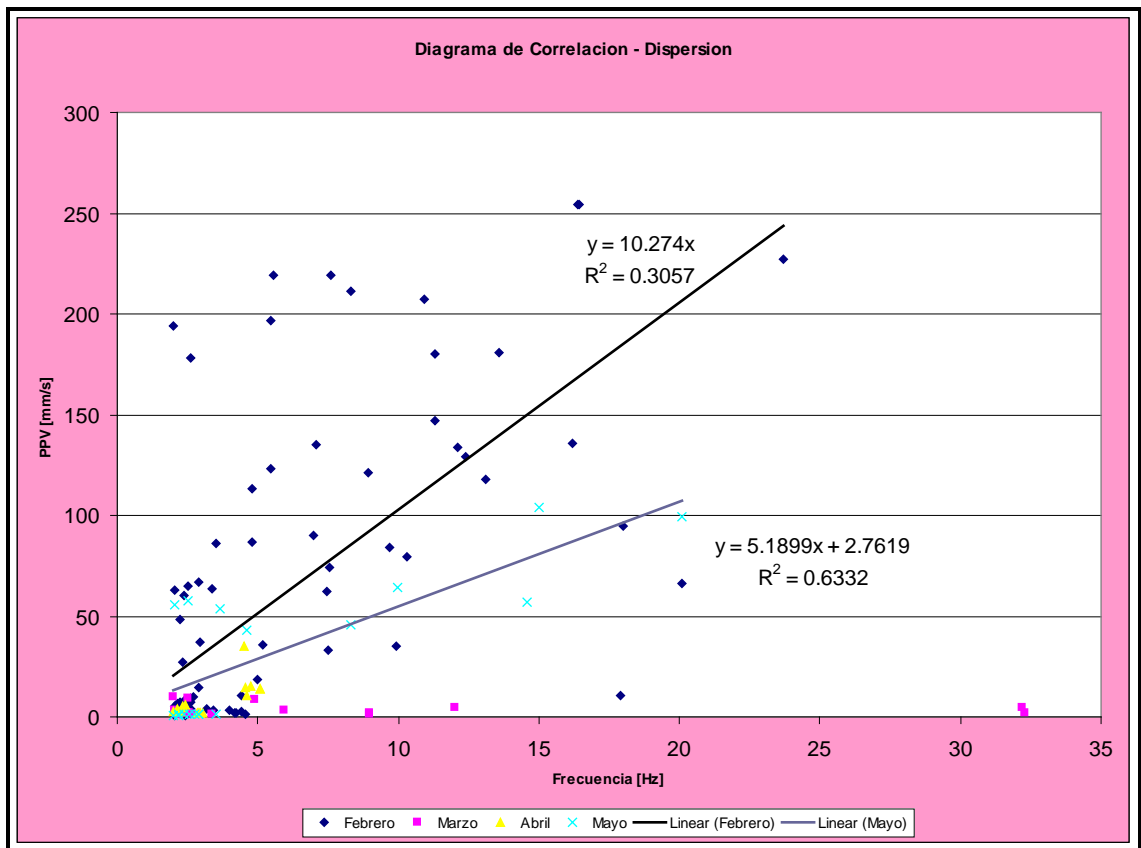
Fuente. Figura realizada para la presente tesis

Una vez construido el diagrama se analiza la forma que tiene la nube de puntos obtenida, para así determinar las relaciones entre los dos tipos de datos. Este análisis puede efectuarse por técnicas estadísticas que permitan determinar si existe o no relación, y el grado de existencia en su caso. Las herramientas utilizadas son

- La **recta de regresión**, y
- El **coeficiente de correlación lineal**.

La recta de regresión es la línea que mejor representa a un conjunto de puntos. En estos casos la funciones que aproximan a las rectas no son iguales para las tomas de puntos y a pesar que muestran una tendencia positiva, la nube de puntos es muy desordenada y no muestra una correlación de datos que pueda ser representada en una ecuación lineal. Si apreciamos el coeficiente de correlación podemos apreciar que la relación en las regresiones tiene valores menores a 0.60 lo cual nos da un valor de correlación demasiado bajo para ser confiable.

FIGURA 59. DIAGRAMA DE CORRELACIÓN – DISPERSIÓN – LÍNEAS DE TENDENCIA



Fuente. Figura realizada para la presente tesis

Mediante el diagrama de correlación – dispersión hemos podido observar que a pesar que existe una relación entre la frecuencia y la velocidad pico partícula. La relación de estos valores no se puede expresar en una ecuación porque su correlación positiva es muy débil. Por lo que tendremos que aplicar otros factores para poder realizar un modelo de predicción de las vibraciones. Este valor aplicar es el escalador que toma valores de distancia y Kgs de Explosivo.

10.2 CREACIÓN DEL MODELO DE VIBRACIONES DE CAMPO LEJANO (DEVINE – DUVALL)

Recopilados los datos necesarios se paso a realizar un modelo de vibraciones de campo lejano debido a la distancia de la voladura a los puntos monitoreados.

Debido a la diferencia de considerar la carga explosiva distribuida (Modelo Cercano) y la carga concentrada en un punto (Modelo Lejano), es que ambos modelos difieren fuertemente en el área más cercana a la carga explosiva.

El análisis de los registros de vibraciones, permite conocer la velocidad de partícula generada por cada carga o grupos de carga en el punto de interés o medición. Una vez obtenidos los valores de velocidad de partícula, distancia y carga se pueden ajustar a la ecuación del modelo propuesto por Devine. E este modelo predictivo de vibraciones para campo lejano da cuenta del comportamiento de las vibraciones en función de las distancia. El modelo obtenido, generalmente es ajustado, a objeto de establecer un modelo más representativo y confiable, el ajuste en cuestión consiste en desplazar paralelamente el modelo originalmente obtenido (50% de confianza), de modo

que cubra un número mayor de puntos obtenidos en terreno, A este modelo se denomina “modelo ajustado”

10.3 GENERACIÓN DEL MODELO DE PREDICTIVO

El modelo predictivo para predecir la vibración de las voladuras en campo lejano se basa usando el escalador como una de las variables junto con la velocidad pico partícula. Estos dos datos forman una regresión lineal con un coeficiente de correlación que de ser mayor a 0.80 nos dará valores aceptables y nos permitirá tener un modelo de vibraciones para campo lejano.

10.4 EL ESCALADOR

Para poder generar un modelo matemático que predecirá la velocidad pico partícula en una voladura es importante definir las variables que intervendrán en este. Como se explicó anteriormente, la VPP depende de dos factores, la distancia en metros entre la carga explosiva y el punto de medición (D) y el peso de la carga explosiva en kilogramos (Q).

Intuitivamente se puede explicar la relación que existe entre dichas variables. Si D aumenta, la onda se atenúa y por ende VPP disminuye; si D decrece ocurrirá lo contrario. Por otro lado, si Q aumenta, la energía liberada será mayor y como consecuencia VPP también aumentará; si Q disminuye, lo opuesto se cumplirá.

Las tres variable juegan un papel importante en el modelo predictivo. La velocidad pico partícula es obviamente la variable dependiente, mientras que Q y D son ambas las variables independientes. El trabajar con tres variables dificulta

la generación de un modelo. Para evitar este tipo de complicaciones se opta por usar una herramienta bastante conocida, denominada escalador.

Este escalador puede definirse como la relación existente entre las dos variables independientes (D y Q). Gracias al aporte de diferentes estudios este ratio puede describirse como $\sqrt{Q/D}$.

Al comprimir la información de las dos variables independientes a un escalador, podemos pasar de un escenario de tres variables a uno de dos.

Según la teoría de DEVINE se usara la siguiente formula VPP/Escalador para hallar el modelo de predicción de vibraciones.

FIGURA 60. FORMULA DE LA ECUACIÓN DE DEVINE

Ecuación de Devine

$$PPV = K \left[\frac{d}{\sqrt{W}} \right]^\alpha$$

Diagram illustrating the Devine equation: $PPV = K \left[\frac{d}{\sqrt{W}} \right]^\alpha$. The variables are defined as follows:

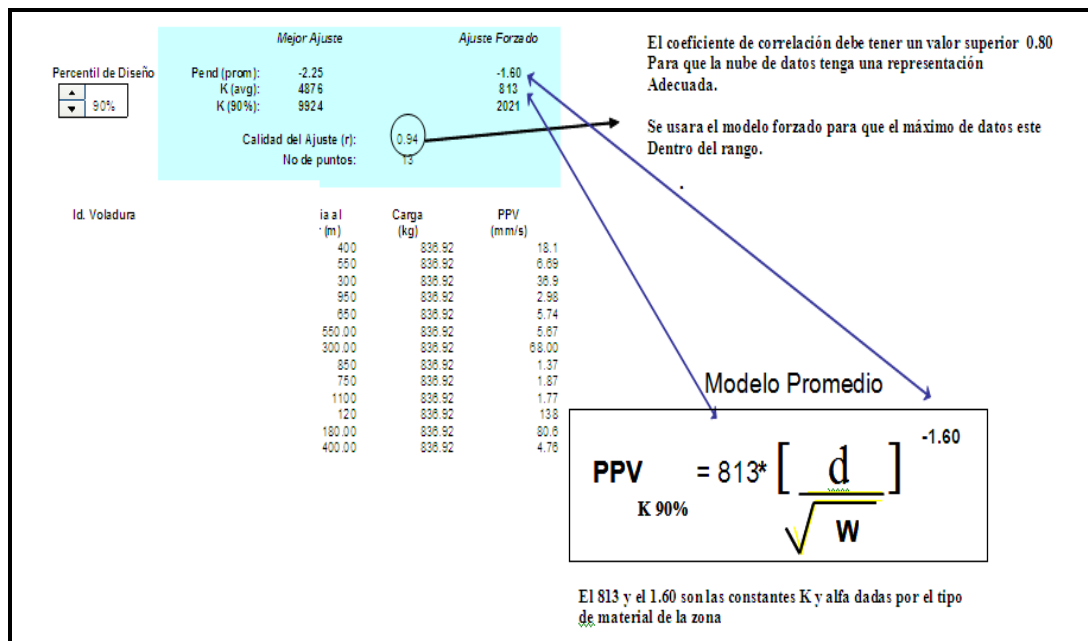
- PPV: Velocidad Pico Partícula
- K: Constante de Propagación del Medio
- d: Distancia entre la carga explosiva y el detector.
- W: Peso de la Carga Explosiva
- α : Constante de Atenuación del Medio

Fuente. Presentación de Asistencia Técnica de Orica

Los datos obtenidos de los monitoreos de vibraciones y almacenados en nuestra Base de Datos serán ingresados a nuestra hoja de cálculo Excel para determinar

los modelos de Criterio de Daño, cabe mencionar que para ello deberemos llevar todos los kilogramos de explosivo usados (HA 30/70, HA 65/35 & HA 60/40) al estándar de kg ANFO, esto con el fin de uniformizar valores y unidades, asimismo, se irán depurando valores que afecten los mejores ajustes obtenidos por la hoja de cálculo Excel.

FIGURA 61. MODELO DE VIBRACIONES DE CAMPO LEJANO PARA LA QUINUA



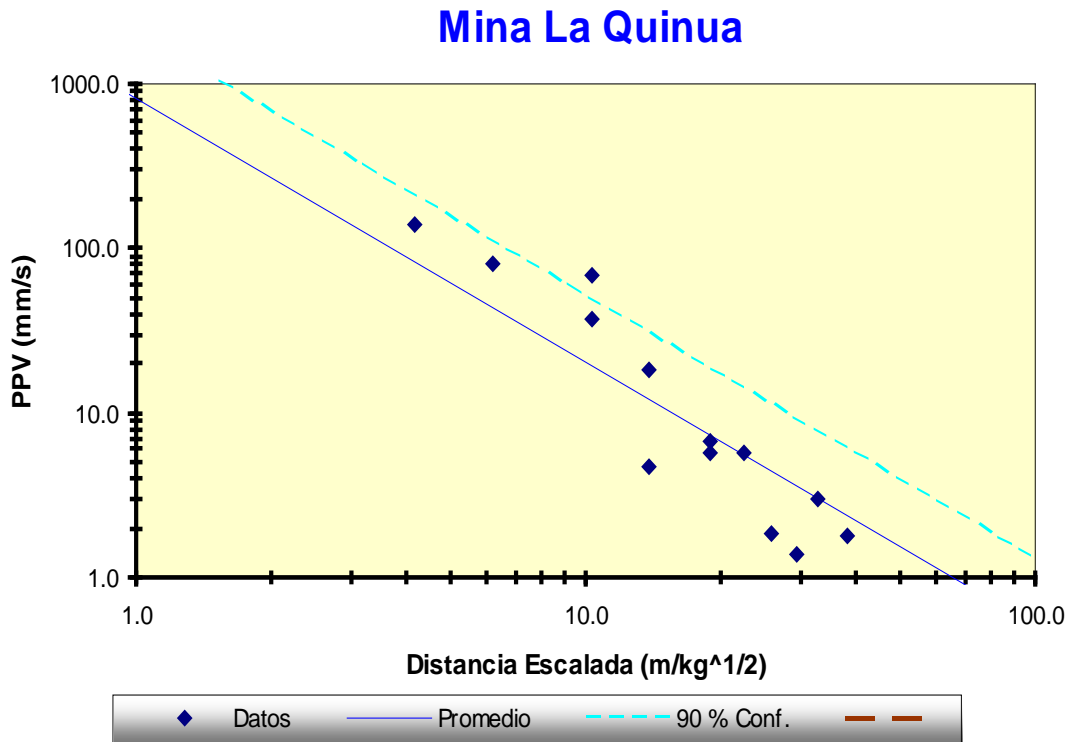
Fuente. Modelo de Vibraciones creado para la presente tesis

Se ha determinado los valores de K = 813 y $\alpha = -1.60$ para un modelo promedio de los datos.

Se realizó el ábaco de daño de los monitoreos realizados en los últimos meses para tener mejor confiabilidad con los datos obtenidos. Así podemos ver que tenemos un alto rango de correlación de 0.94, lo cual está por encima de lo 0.80

requeridos para que el modelo de Devine sea confiable. También utilizamos el modelo forzado para lograr ingresar el mayor número de registros dentro de la curva del ábaco y así tener un mejor rango de cercanía con la realidad. Así se aprecia en la Figura inferior en donde se ve que usando los valores forzados todos los monitoreos registrados están debajo de la curva.

FIGURA 62. MODELO DE VIBRACIONES DE CAMPO LEJANO PARA LA QUINUA

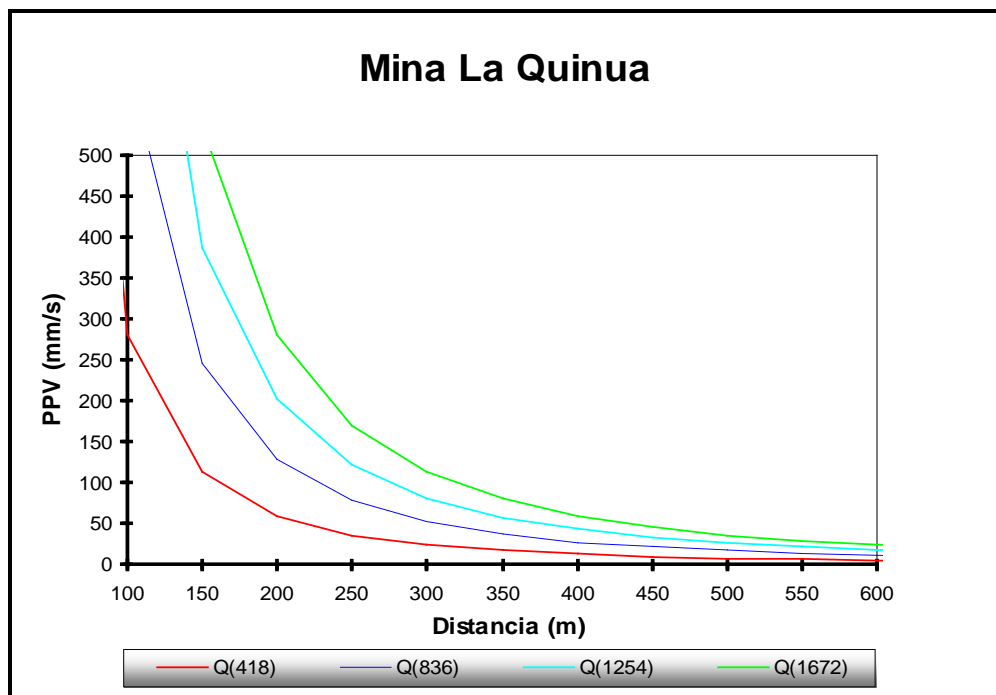


Fuente. Modelo de Vibraciones creado para la presente tesis

La Figura inferior muestra el Ábaco para Criterio de Daño en el Rango de 80 a 600 m., bajo los ejes PPV (mm/s) vs Distancia y los valores estimados por la hoja Excel para la generación del ábaco.

La Figura muestra el Ábaco para Criterio de Daño en el Rango de hasta 600 m, pero en la tabla inferior podemos apreciar los datos a una distancia hasta de 1000 metros. Después las cargas colocadas son las consideradas cargas de acoplamiento. Esto es el número de taladros que se acoplan por salir dentro de la misma ventana de tiempo. Podemos apreciar que de acoplarse tres taladros los niveles de vibraciones causarían daño a las viviendas de tierra ubicadas a 1000 metros de distancia.

FIGURA 63. MODELO DE VIBRACIONES DE CAMPO LEJANO PARA LA QUINUA EN FUNCIÓN DE KGS EXPLOSIVO



Fuente. Modelo de Vibraciones creado para la presente tesis

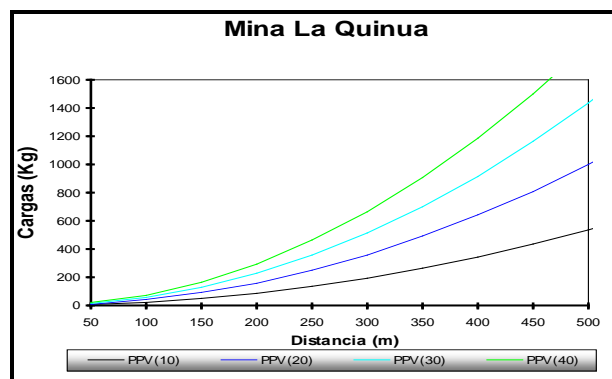
TABLA 35. TABLA DE DISTANCIA VS VIBRACIONES

Distancia al Monitor (m)	PPV1 (mm/s)	PPV2 (mm/s)	PPV3 (mm/s)	PPV4 (mm/s)
50.0	1329.34	2897.21	4569.82	6314.28
100.0	279.87	609.95	962.08	1329.34
150.0	112.49	245.16	386.70	534.32
200.0	58.92	128.41	202.55	279.87
250.0	35.68	77.76	122.65	169.48
300.0	23.68	51.61	81.41	112.49
350.0	16.75	36.50	57.57	79.55
400.0	12.40	27.03	42.64	58.92
450.0	9.52	20.75	32.72	45.21
500.0	7.51	16.37	25.82	35.68
550.0	6.06	13.21	20.84	28.80
600.0	4.99	10.87	17.14	23.68
650.0	4.16	9.08	14.32	19.78
700.0	3.53	7.68	12.12	16.75
750.0	3.02	6.58	10.38	14.34
800.0	2.61	5.69	8.98	12.40
850.0	2.28	4.97	7.83	10.82
900.0	2.00	4.37	6.89	9.52
950.0	1.77	3.87	6.10	8.43
1000.0	1.58	3.45	5.44	7.51

Fuente. Modelo de Vibraciones creado para la presente tesis

La grafica inferior nos muestra la relación entre las cargas de los taladros, distancia y la vibración generada por estos factores. Así podemos observar que se generarían una vibración de 10 mm/s tendríamos que detonar 2157 Kg. de Explosivo de ANFO a una distancia de 1000 m.

FIGURA 64. ABACO DE DAÑO DE CARGAS EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA



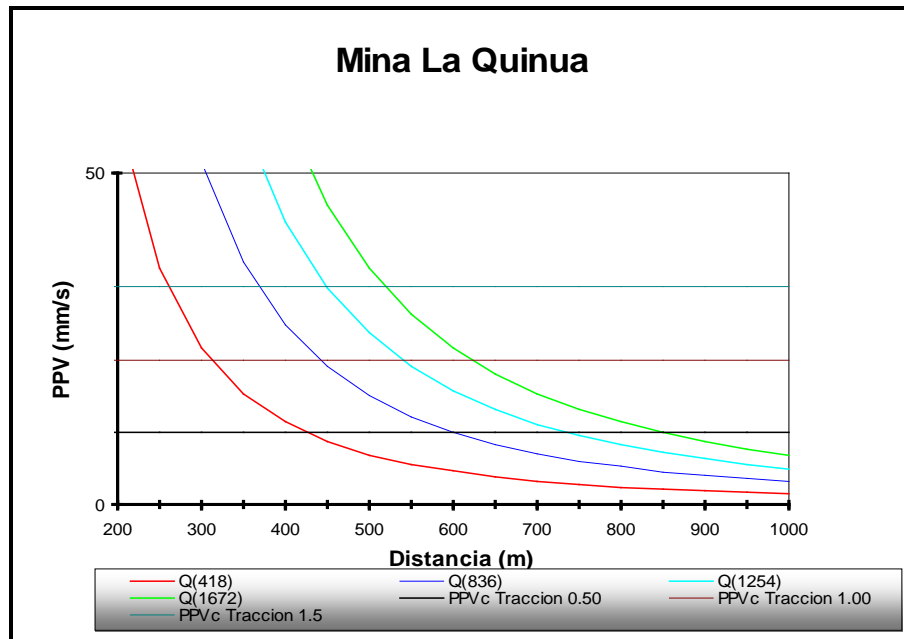
Fuente. Modelo de Vibraciones creado para la presente tesis

TABLA 36. TABLA DE DISTANCIA VS VIBRACIONES

Distancia al Monitor (m)	PPV1 (mm/s)	PPV2 (mm/s)	PPV3 (mm/s)	PPV4 (mm/s)
50.0	1329.34	2897.21	4569.82	6314.28
100.0	279.87	609.95	962.08	1329.34
150.0	112.49	245.16	386.70	534.32
200.0	58.92	128.41	202.55	279.87
250.0	35.68	77.76	122.65	169.48
300.0	23.68	51.61	81.41	112.49
350.0	16.75	36.50	57.57	79.55
400.0	12.40	27.03	42.64	58.92
450.0	9.52	20.75	32.72	45.21
500.0	7.51	16.37	25.82	35.68
550.0	6.06	13.21	20.84	28.80
600.0	4.99	10.87	17.14	23.68
650.0	4.16	9.08	14.32	19.78
700.0	3.53	7.68	12.12	16.75
750.0	3.02	6.58	10.38	14.34
800.0	2.61	5.69	8.98	12.40
850.0	2.28	4.97	7.83	10.82
900.0	2.00	4.37	6.89	9.52
950.0	1.77	3.87	6.10	8.43
1000.0	1.58	3.45	5.44	7.51

Fuente. Modelo de Vibraciones creado para la presente tesis

FIGURA 65. ABACO DE DAÑO DE CARGAS Y RELACIÓN CON EL PPVC



Fuente. Modelo de Vibraciones creado para la presente tesis

En la tabla superior podemos ver la relación entre el número de acoplamiento de cargas y la distancia y el PPV, así podemos apreciar como nuestro valor más crítico el generado por una Resistencia a la Tracción de 0.50, así podemos ver que teniendo solo una carga acoplada se puede disparar sin generar el PPV crítico a la pared ($PPV_c = 10.93 \text{ mm/s}$) a unos 400 m, a una distancia menor se generaría siempre una vibración mayor a la crítica. En el acoplamiento de dos taladros recién a partir de los 600 m se generaría un PPV menor al crítico. Estos valores podrían ser más cortos de perforarse un pre corte adecuado para la pared lo cual podría mitigar la vibración considerablemente. Debemos notar que estos es referido a la pared del talud cercana, viendo el modelo podemos ver que a distancias mayores a los 1000 m. los valores de vibración con el acople de 3 taladros esta en 5.44 mm/s que es un valor mayor a los 5.25 mm/s que se establece como la velocidad pico partícula límite de las vibraciones en casas de tierra apisonada.

La cantidad de taladros depende del número de taladros que se acoplen durante la simulación de la voladura (simulaciones de Montecarlo), mediante datos genéricos podemos ver que a más de 200 taladros siempre se ha tenido un acople de siquiera dos taladros, por lo que la curva roja Q(418) corresponde a una sola carga por ventana de tiempo, la azul Q(836) corresponde a dos taladros saliendo en la misma ventana de tiempo, la celeste Q(1254) en a tres taladros en la misma ventana de tiempo y la verde Q (1672) es a cuatro taladros en la misma ventana de tiempo. Por lo que vemos entonces en el caso de La Quinua se debe evitar el acoplamiento de taladros en una misma ventana de tiempo de tres taladros o más.

CAPITULO XI: OPTIMIZACIÓN DE MODELO PREDICTIVO

11.1 PRUEBAS DE VIBRACIONES.

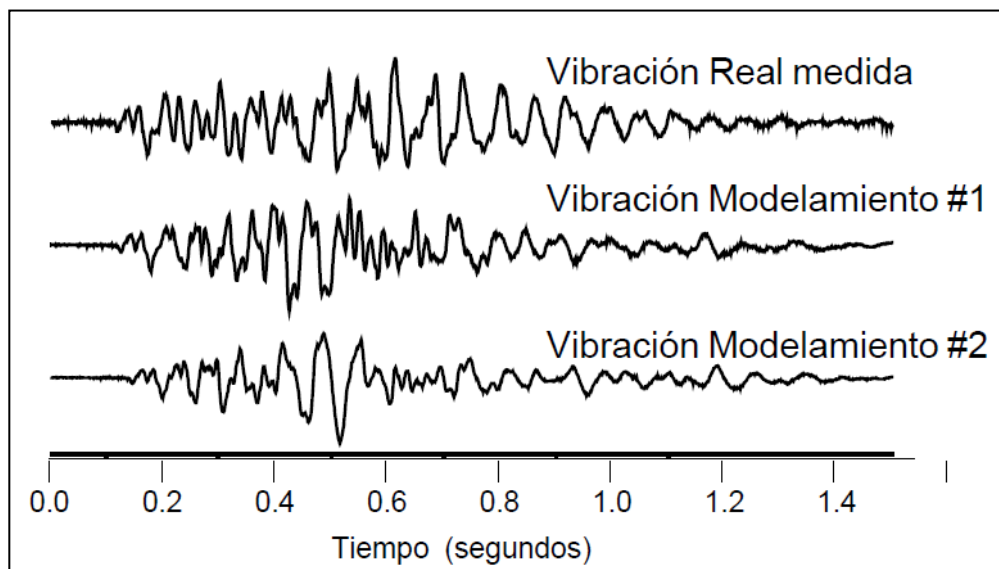
Para el mejor control de vibraciones se empezó con el análisis de cargas individuales de las voladuras para ver el comportamiento vibratorio de un solo taladro. Estas pruebas llamadas análisis de onda elemental consistieron en un total de una prueba que se basaron principalmente en sacar un taladro separado del resto de la voladura para ver la forma de onda que produce y mediante el principio de superposición poder reproducir la voladura antes que se produzca y así elegir el tiempo de retardo mas optimo para ella.

Se recomendaría el disparar tres voladuras con detonadores electrónicos en los cuales se retrasarían algunos taladros y el resto se dispararía con varios segundos de diferencia esto es para ver la onda generada por estos taladros y poder reproducir la voladura con estos taladros. El resto de la voladura al tener tiempos exactos (0 dispersión) nos permitirá compararla con la simulación creada.

Hallado el retardo óptimo se podrá comparar con el retardo más parecido en lo que es pirotécnico y mediante monitoreos tanto en campo lejano como en cercanos permitirá ver si se puede aplicar pirotécnico o electrónico para obtener los tiempos necesarios.

Los taladros volados antes nos permitirán generar un modelo de vibraciones para cargas individuales y comparar el factor de amplificación con las voladuras con varios taladros y también permitirá el cálculo del PPV crítico como si fuera CROSS-HOLE. (Carga definida con sismógrafos distantes una distancia conocida)

FIGURA 66. VIBRACIÓN REAL MEDIDA VS VIBRACIÓN DE MODELAMIENTO.



Fuente: Manual de Vibraciones de ASP Blastronics.

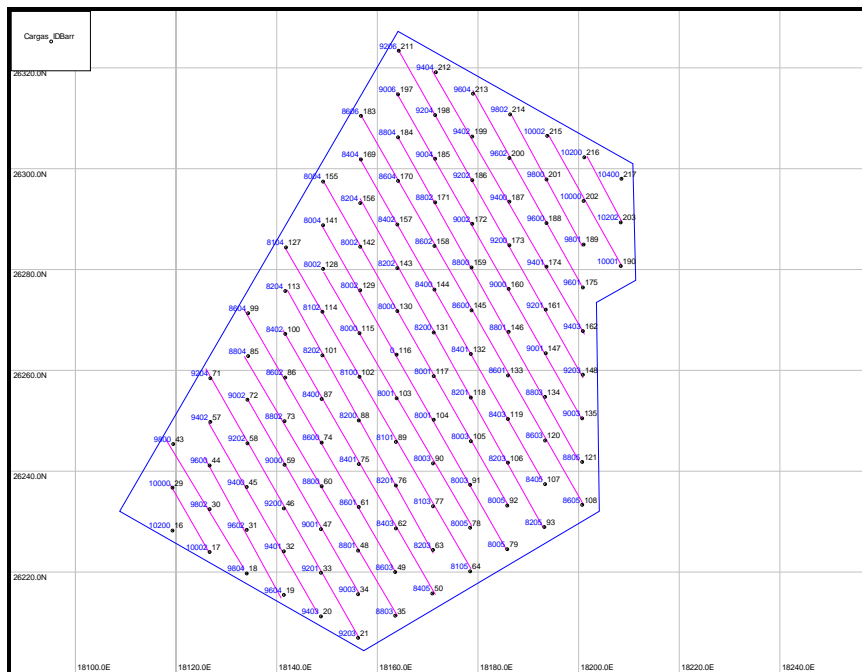
11.2 PRUEBA 01. DETONACIÓN DE CARGA INDIVIDUAL.

La primera prueba se realizo el 23 de julio 2010 en la voladura de las 08:00 horas detonándose un taladro en el medio de la malla de zambullida del nuevo banco. Este taladro fue detonado a los 0 ms. y el resto de la voladura salió a partir de los 8000 ms.

11.3 DISEÑO DE VOLADURA DE PRODUCCIÓN

El diseño de la zambullida fue el siguiente, estos tiempos de retardo nos servirán para analizar las ondas generadas.

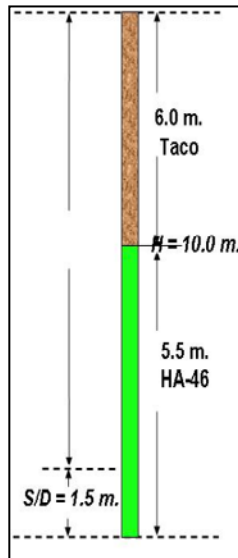
FIGURA 67. SECUENCIAS DE SALIDOS – ISOTIEMPOS.



Fuente: Base de Datos de Orica en Yanacocha.

11.4 DISEÑO DE CARGUÍO

FIGURA 68. DISEÑO DE CARGUÍO.

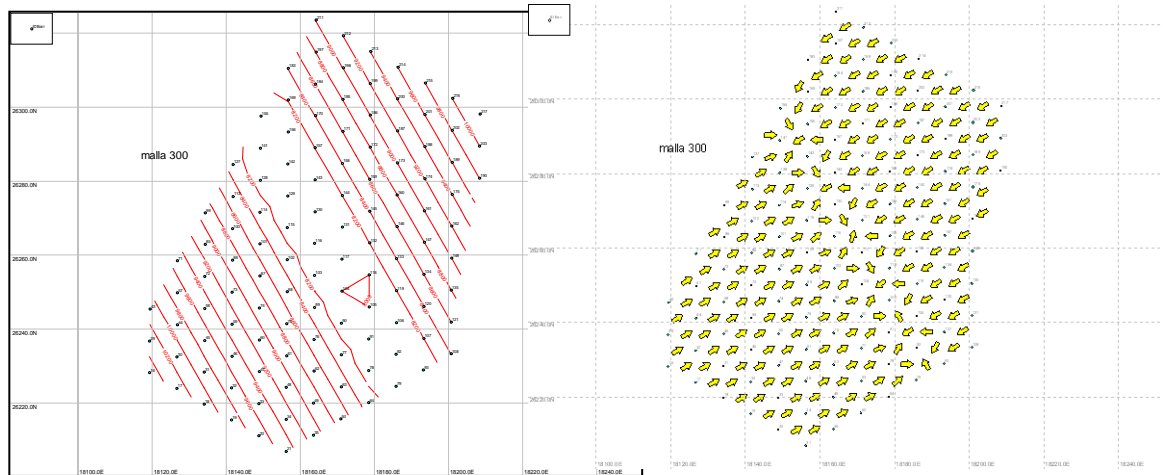


Mallas	Produccion Duro Mallas (7.5*8.5) Roca 2.4 g/cc
Carga (m)	5.5
Carga (kg)	365
Explosivo	HA-46
Taco (m)	6
F.Carga (Kg/tn)	0.238
# Total de Taladros Volados	123

Fuente: Base de Datos de Orica en Yanacocha

Podemos ver que el taladro de inicio tiene 0 ms. por lo que los 8 segundos de diferencia permitirá captar la onda individual completa sin el menor problema. Al ser un proyecto de zambullida se inicio sin cara libre y con el inicio en medio de la voladura. Esto nos dará una vibración superior que la que se tendría con cara libre pero que servirá para ver en el caso de voladuras confinadas (caso mas problemática) que tiempo de retardo es optimo.

**FIGURA 69. SECUENCIAS DE SALIDOS – ISOTIEMPOS Y
MOVIMIENTO DE MATERIAL**

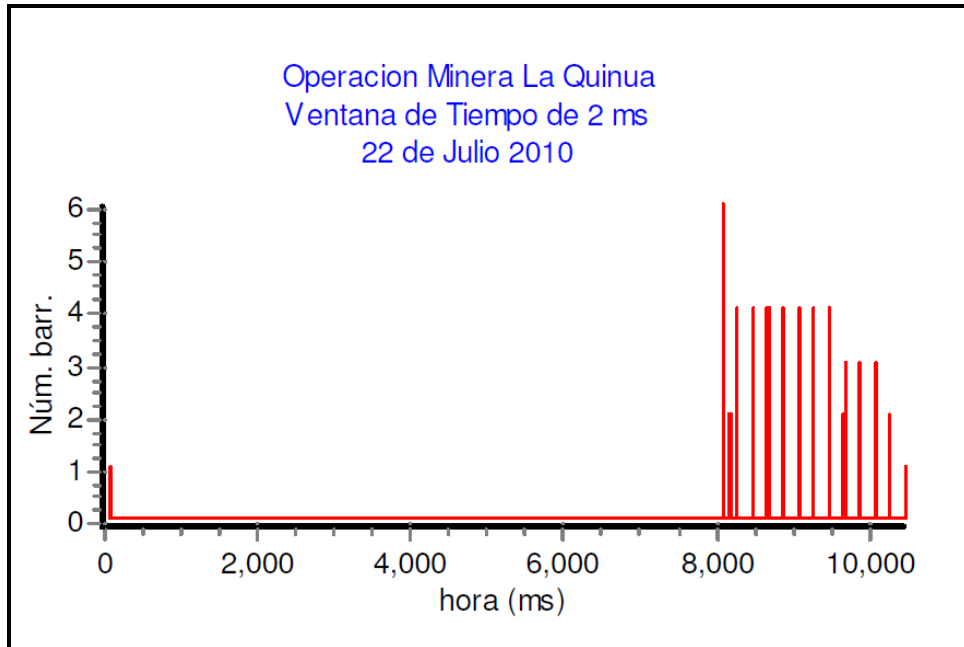


Fuente: Base de Datos de Orica en Yanacocha

Se colocaron sismógrafos en una misma dirección apuntando a Pushback Sur a distancias de 50 m, 80 m, y a 800 metros para poder apreciar cómo cambian las amplitudes y las frecuencias de las voladuras según la distancia del punto de monitoreo.

Podemos ver que en el análisis de oficina y con ventana de acoplamiento, no se efectúa muchos acoplamientos a excepción de la zambullida. Lo cual queda comprobado viendo la filmación, hay que anotar que la voladura por ser realizada con detonadores electrónicos tienen una dispersión de 0.001 % lo cual hace que no haya dispersión y acoplamiento a cortas distancias.

FIGURA 70. CUADRO DE VENTANAS DE TIEMPO (2MS)



Fuente: Base de Datos de Orica en Yanacocha

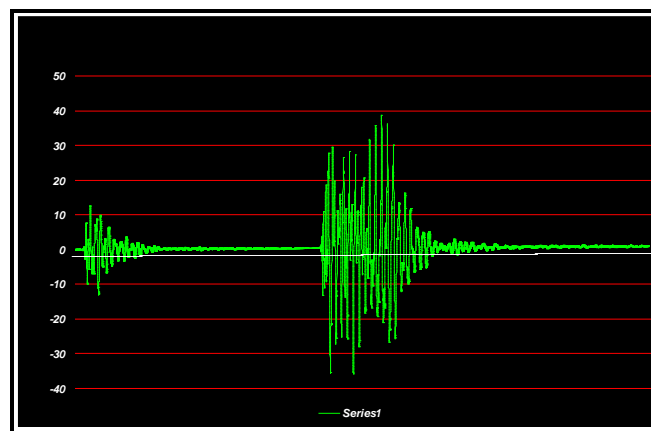
Las vibraciones obtenidas se grafican a continuación, para cada una de estas distancias.

11.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

11.5.1 Distancia de 50 m. Sismógrafo 01.

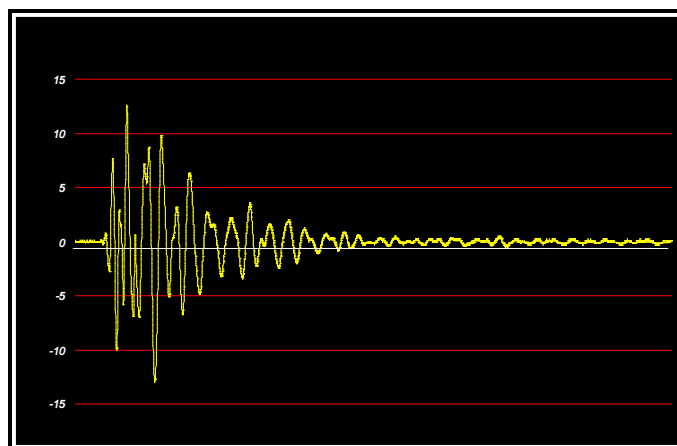
a). Eje Transversal

FIGURA 71. REGISTRO DE VIBRACIONES DE LA PRUEBA EN EL EJE TRANSVERSAL



Fuente: Base de Datos de Orica en Yanacocha

FIGURA 72. REGISTRO DE VIBRACIONES DE LA ONDA ELEMENTAL – EJE TRANSVERSAL

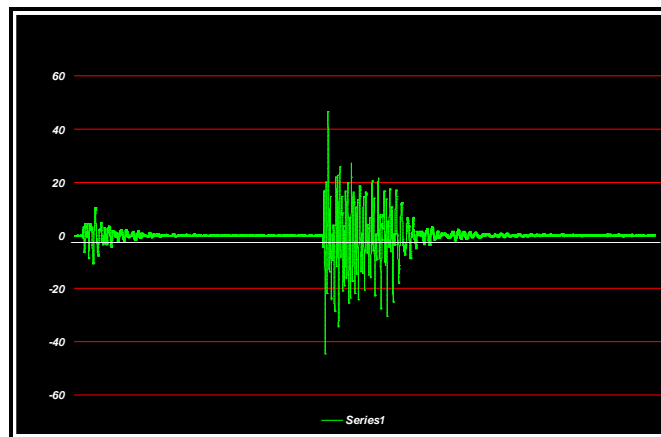


Fuente: Base de Datos de Orica en Yanacocha

Podemos apreciar que la vibraciones generada por una carga individual están en el rango de amplitud máxima de 10-11 mm/s a 50 metros de distancia, en el eje transversal para el carguío con HA-46

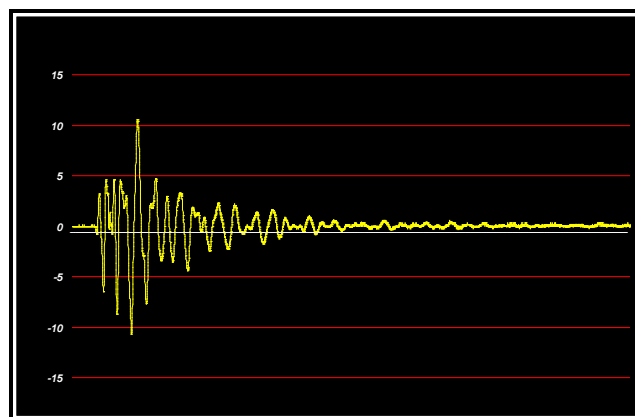
b). Eje Vertical

FIGURA 73 REGISTRO DE VIBRACIONES DE LA PRUEBA EN EL EJE VERTICAL



Fuente: Base de Datos de Orica en Yanacocha

FIGURA 74. REGISTRO DE VIBRACIONES DE LA ONDA ELEMENTAL – EJE VERTICAL

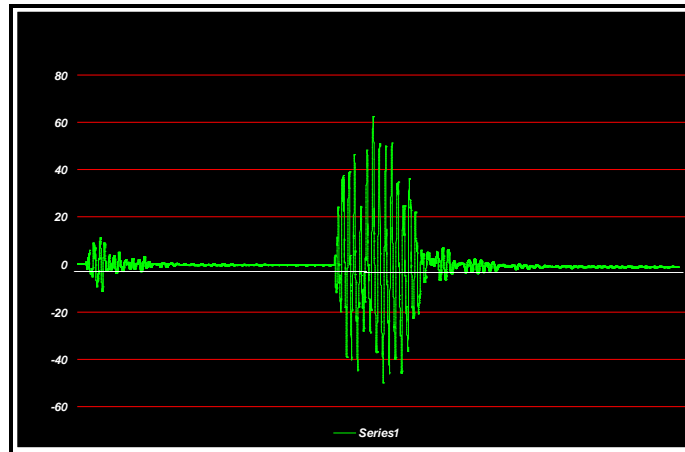


Fuente: Base de Datos de Orica en Yanacocha

Podemos apreciar que la vibraciones generada por una carga individual están en el rango de amplitud máxima de 7.0 – 8.0 mm/s a 50 metros de distancia, en el eje vertical para el carguío con HA-46.

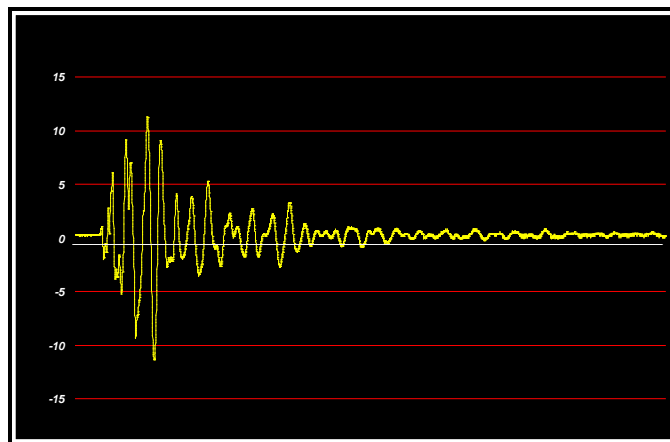
c). Eje Longitudinal

FIGURA 74. REGISTRO DE VIBRACIONES DE LA PRUEBA EN EL EJE LONGITUDINAL



Fuente: Base de Datos de Orica en Yanacocha

FIGURA 75. REGISTRO DE VIBRACIONES DE LA ONDA ELEMENTAL – EJE LONGITUDINAL

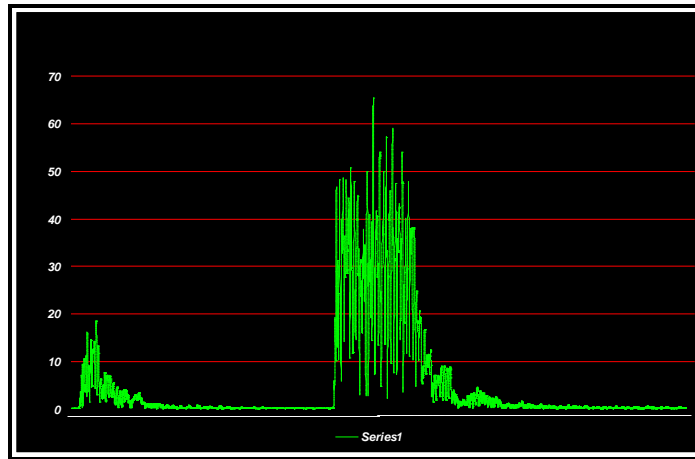


Fuente: Base de Datos de Orica en Yanacocha

Podemos apreciar que las vibraciones generadas por una carga individual están en el rango de amplitud máxima de 9.0 – 10.0 mm/s a 50 metros de distancia, en el eje longitudinal para el carguío con HA-46.

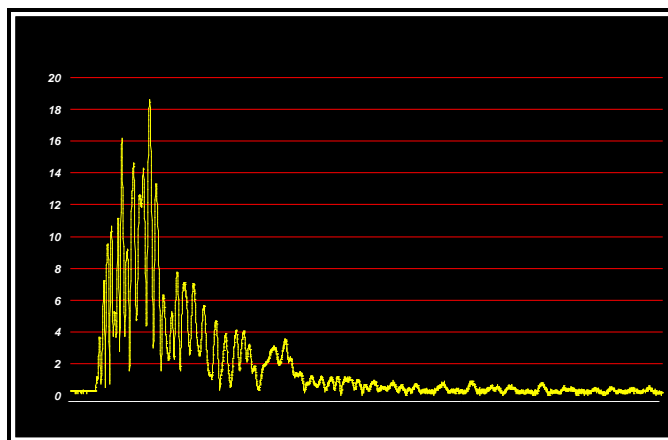
d). Vector Suma de Vibraciones

FIGURA 76. REGISTRO DE VIBRACIONES DE LA VOLADURA – VECTOR SUMA



Fuente: Base de Datos de Orica en Yanacocha

FIGURA 77. REGISTRO DE VIBRACIONES DE ONDA ELEMENTAL – VECTOR SUMA



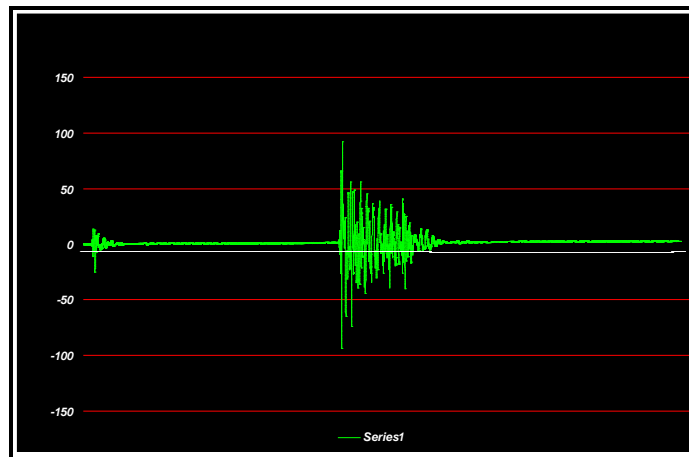
Fuente: Base de Datos de Orica en Yanacocha

El vector suma de vibraciones es la suma de las vibraciones de los tres ejes mayormente por lo que sus picos se pueden ver más altas que la de los ejes individuales. Se aprecia picos de 18 mm/s de velocidad pico partícula.

11.5.2 Distancia de 80 m. Sismógrafo 02.

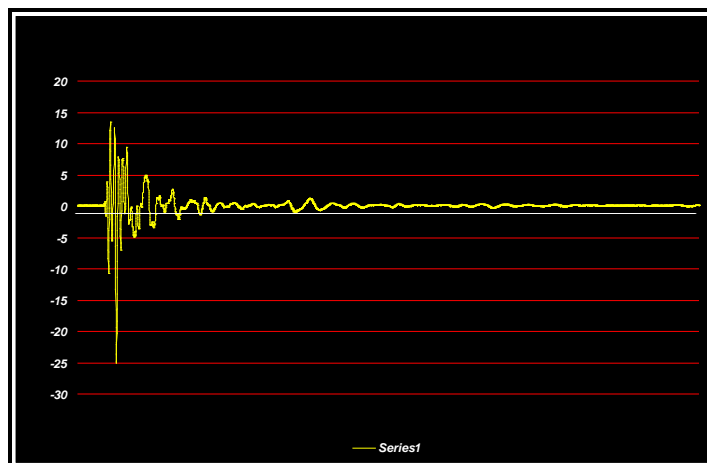
a). Eje Transversal

FIGURA 78. REGISTRO DE VIBRACIONES DE LA PRUEBA EN EL EJE TRANSVERSAL



Fuente: Base de Datos de Orica en Yanacocha

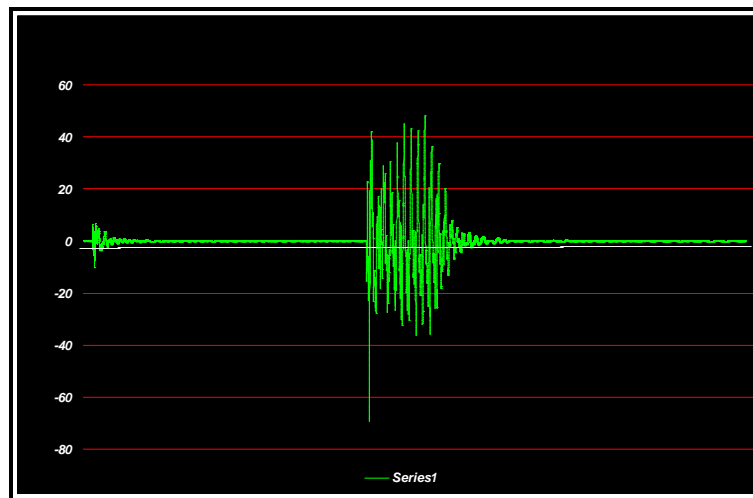
FIGURA 79. REGISTRO DE VIBRACIONES DE ONDA ELEMENTAL DE LA PRUEBA EN EL EJE TRANSVERSAL



Podemos apreciar que la vibraciones generada por una carga individual están en el rango de amplitud máxima de 13-14 mm/s a 80 metros de distancia, en el eje transversal para el carguío con HA-46.

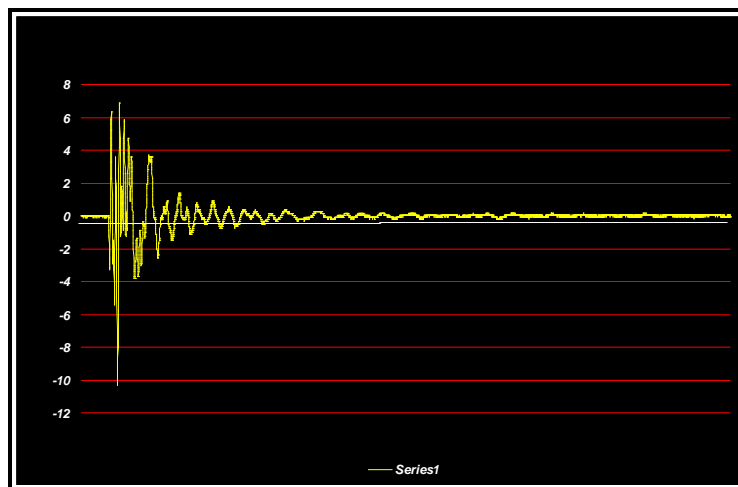
b). Eje Vertical

FIGURA 80. REGISTRO DE VIBRACIONES DE LA PRUEBA EN EL EJE VERTICAL



Fuente: Base de Datos de Orica en Yanacocha

FIGURA 81. REGISTRO DE VIBRACIONES DE LA PRUEBA ONDA ELEMENTAL EN EL EJE VERTICAL

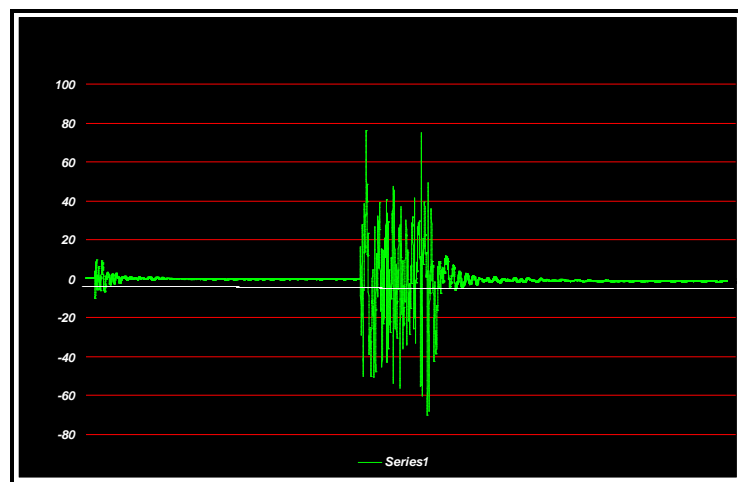


Fuente: Base de Datos de Orica en Yanacocha

Podemos apreciar que la vibraciones generada por una carga individual están en el rango de amplitud máxima de 7.0 – 8.0 mm/s a 80 metros de distancia, en el eje vertical para el carguío con HA-46.

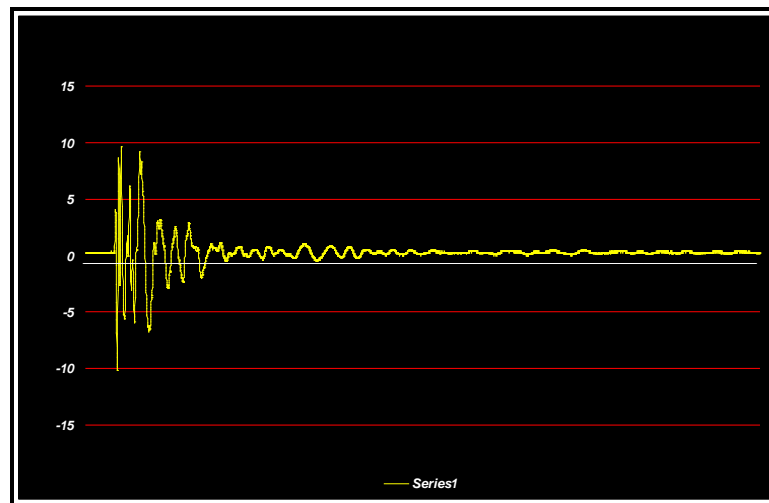
c).. Eje Longitudinal

FIGURA 82. REGISTRO DE VIBRACIONES DE LA PRUEBA EN EL EJE LONGITUDINAL



Fuente: Base de Datos de Orica en Yanacocha

FIGURA 83. REGISTRO DE VIBRACIONES DE LA PRUEBA ONDA ELEMENTAL EN EL EJE LONGITUDINAL

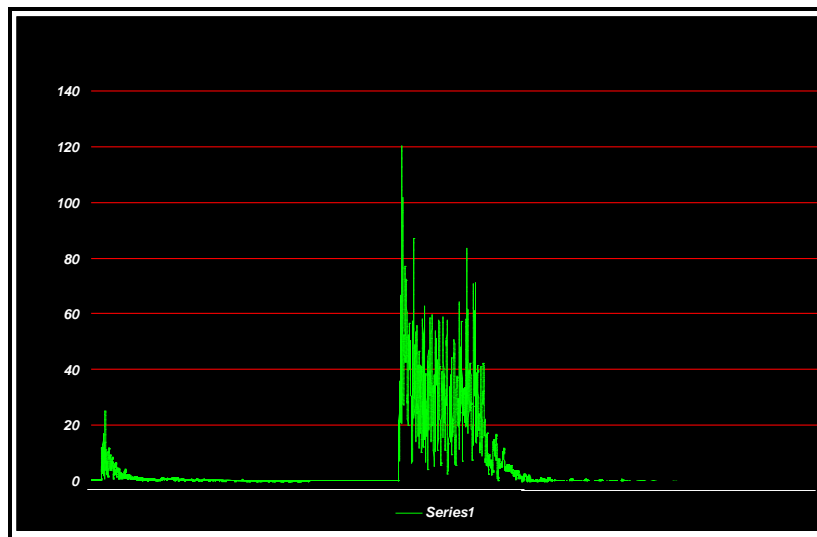


Fuente: Base de Datos de Orica en

Podemos apreciar que las vibraciones generadas por una carga individual están en el rango de amplitud máxima de 9.0 – 10.0 mm/s a 80 metros de distancia, en el eje longitudinal para el carguío con HA-46.

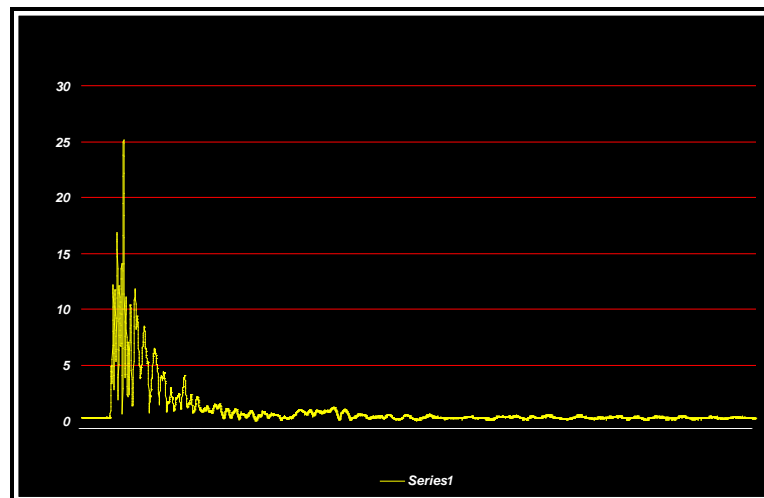
d). Vector Suma de Vibraciones

FIGURA 84. REGISTRO DE VIBRACIONES DE LA VOLADURA – VECTOR SUMA



Fuente: Base de Datos de Orica en Yanacocha

FIGURA 85. REGISTRO DE VIBRACIONES DE LA ONDA ELEMENTAL – VECTOR SUMA..



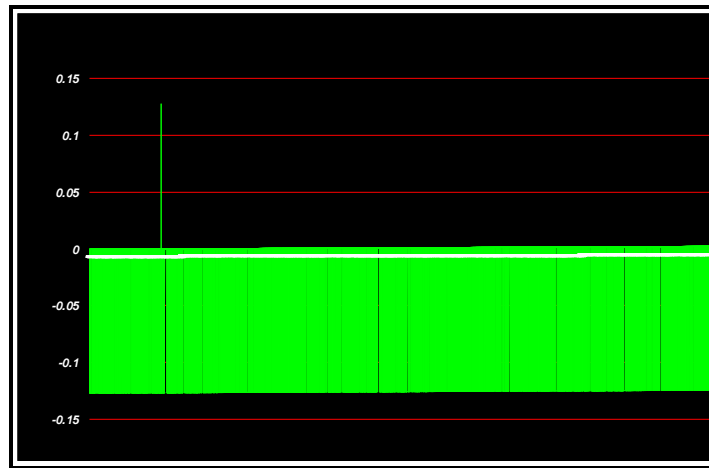
Fuente: Base de Datos de Orica en Yanacocha

El vector suma de vibraciones es la suma de las vibraciones de los tres ejes mayormente por lo que sus picos se pueden ver más altas que la de los ejes individuales. Se aprecia picos de 25 mm/s de velocidad pico partícula.

11.5.3 Distancia de 800 m. Sismógrafo 03.

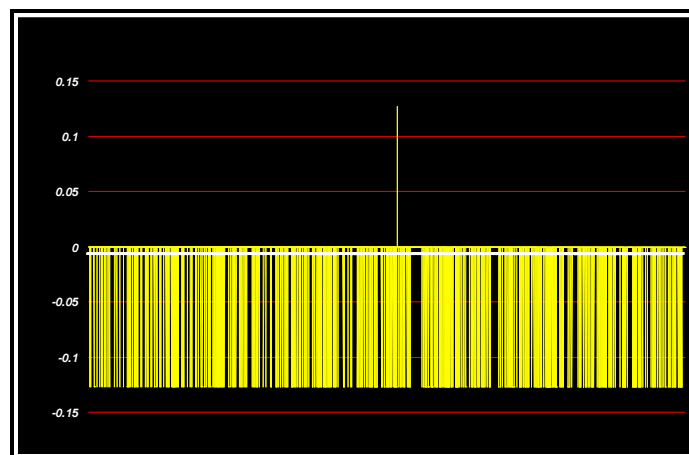
a).. Eje Transversal

FIGURA 86. REGISTRO DE VIBRACIONES DE LA VOLADURA – EJE TRANSVERSAL



Fuente: Base de Datos de Orica en Yanacocha

FIGURA 87. REGISTRO DE VIBRACIONES DE LA ONDA ELEMENTAL – EJE TRANSVERSAL

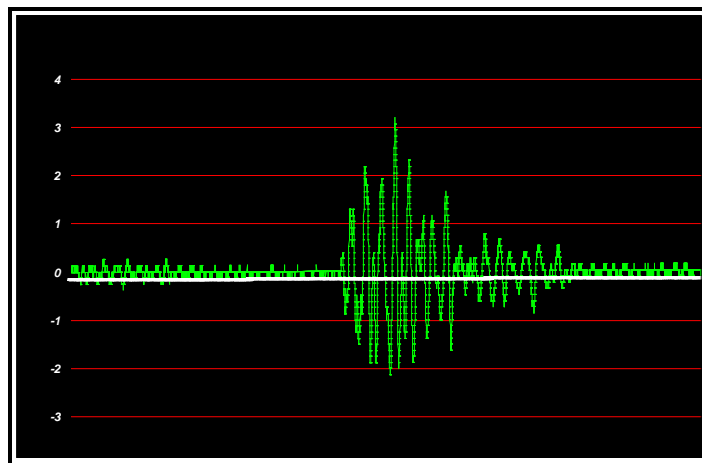


Fuente: Base de Datos de Orica en Yanacoch

Podemos apreciar que la vibraciones generada por una carga individual están en el rango de amplitud máxima de 0 – 0.1 mm/s a 800 metros de distancia, en el eje transversal para el carguío con HA-46.

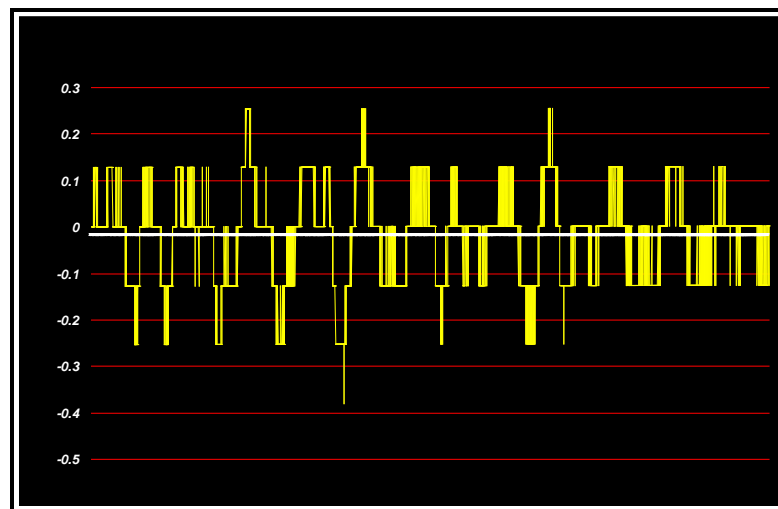
b). Eje Vertical

FIGURA 88. REGISTRO DE VIBRACIONES DE LA VOLADURA – EJE VERTICAL



Fuente: Base de Datos de Orica en Yanacocha

FIGURA 89. REGISTRO DE VIBRACIONES DE LA ONDA ELEMENTAL – EJE VERTICAL

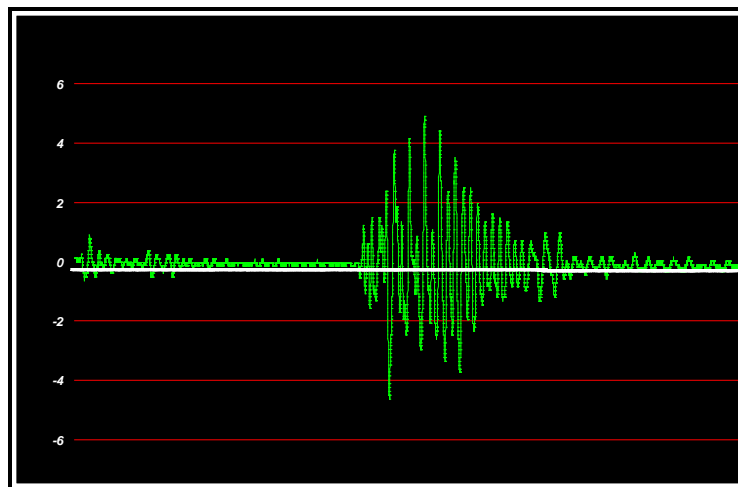


Fuente: Base de Datos de Orica en Yanacocha

Podemos apreciar que la vibraciones generada por una carga individual están en el rango de amplitud máxima de 0.2 – 0.3 mm/s a 800 metros de distancia, en el eje vertical para el carguío con HA-46.

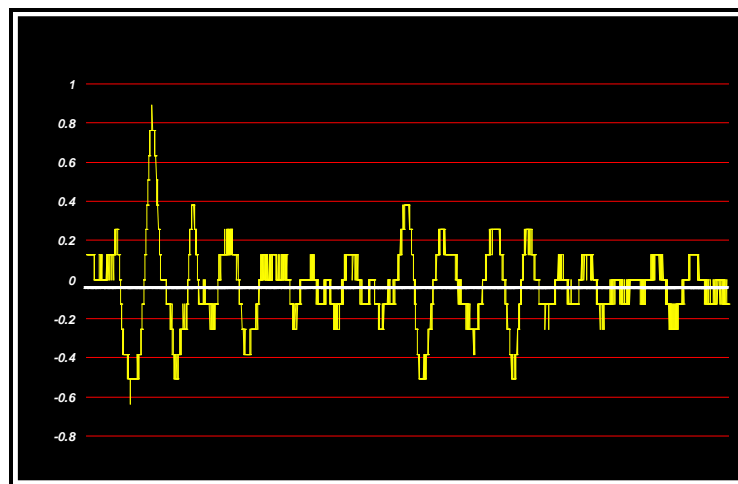
c). Eje Longitudinal

FIGURA 90. REGISTRO DE VIBRACIONES DE LA VOLADURA – EJE LONGITUDINAL



Fuente: Base de Datos de Orica en Yanacocha

FIGURA 91. REGISTRO DE VIBRACIONES DE LA ONDA ELEMENTAL – EJE LONGITUDINAL

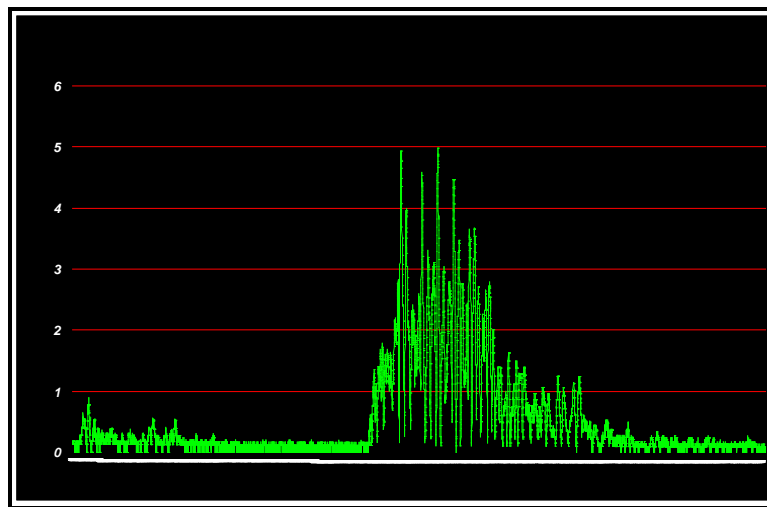


Fuente: Base de Datos de Orica en Yanacocha

Podemos apreciar que las vibraciones generadas por una carga individual están en el rango de amplitud máxima de 0.7 – 0.8 mm/s a 800 metros de distancia, en el eje longitudinal para el carguío con HA-46.

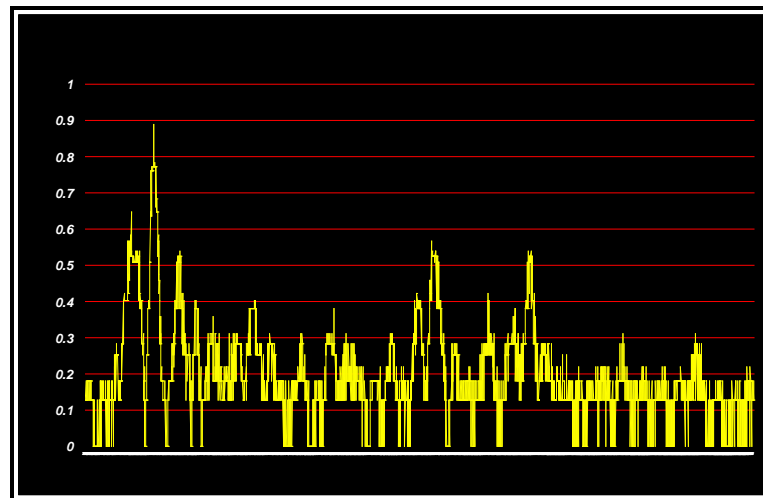
d). Vector Suma de Vibraciones

FIGURA 92. REGISTRO DE VIBRACIONES DE LA VOLADURA – VECTOR SUMA



Fuente: Base de Datos de Orica en Yanacocha

FIGURA 93. REGISTRO DE VIBRACIONES DE LA ONDA ELEMENTAL – VECTOR SUMA



Fuente: Base de Datos de Orica en Yanacocha

El vector suma de vibraciones es la suma de las vibraciones de los tres ejes mayormente por lo que sus picos se pueden ver más altas que la de los ejes individuales. Se aprecia picos de 0.9 mm/s de velocidad pico partícula.

11.6 MODELO DE DEVINE DE CARGAS INDIVIDUALES.

Mediante los registros de vibraciones tomadas de las voladuras se realizó un modelo de campo lejano que nos brinda los ábacos de daño para el control de las paredes y de las viviendas de ese sector del Tajo La Quinoa, sin embargo para estar de acuerdo con la efectividad de ese modelo se buscara compararse con un modelo de solo una carga de taladro, el cual será un modelo de prueba. De esta forma podremos apreciar el Factor de Amplificación que hay debido a la voladura (Acumulación de Taladros).

Esto es debido a que a mayor cantidad de taladros hay mayor superposición de estos los cual amplifica la voladura en el acoplamiento de taladros.

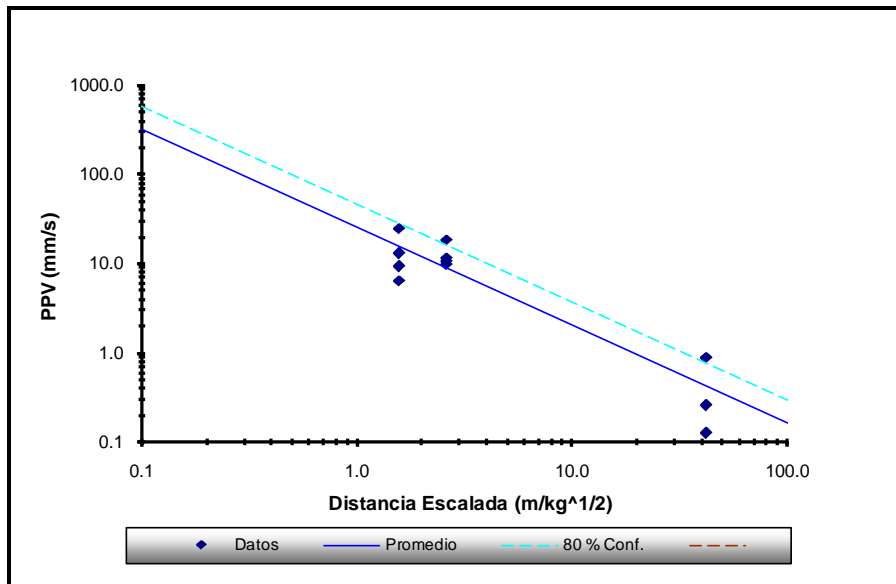
Después de hecho el modelo de DEVINE con estos taladros pasamos a examinar la onda de esta prueba y aplicando el principio de superposición de taladros y con los tiempos de detonación podemos simular las voladuras de la zona de La Quinoa viendo los retardos óptimos para evitar el acoplamiento de taladros antes de que suceda las voladuras.

A continuación vemos los modelos de vibraciones realizados con los taladros sacados a diferentes tiempos con lo que podemos ver la vibración generada por un solo taladro y sin tener en cuenta la superposición de taladros.

FIGURA 94. MODELO DE VIBRACIONES DE CAMPO LEJANO DE CARGAS INDIVIDUALES.

Percentil de Diseño		Mejor Ajuste		Ajuste Forzado
		Pend (prom):	-1.10	-1.60
80%		K (avg):	26	61
		K (80%):	46	147
		Calidad del Ajuste (r):	0.93	
		No de puntos:	12	

Id. Voladura	Fecha	Distancia al Monitor (m)	Carga (kg)	PPV (mm/s)
		30	362	13.10
		30	362	6.48
		30	362	9.27
		30	362	24.96
		50.00	362	11.80
		50.00	362	9.91
		50.00	362	10.7
		50.00	362	18.64
		800.00	362	0.127
		800.00	362	0.25
		800.00	362	0.889
		800.00	362	0.889



$$\text{PPV} = 147 \left[\frac{d}{\sqrt{W}} \right]^{-1.60}$$

Fuente: Modelo Creado para la presente tesis

11.7 PREDICCIÓN DEL NIVEL DE VIBRACIÓN POR VOLADURAS.

El análisis de vibraciones por voladura realizado anteriormente, establece una relación entre PPV y distancia que no es función de la carga explosiva. A fin de generar una herramienta que permita diseñar la carga por retardo a volar, se estableció una relación entre los modelos de la Prueba de Onda Elemental y de Voladuras que permiten definir un Factor de Amplificación. Dicho factor puede utilizarse para predecir los niveles de vibración de una voladura para distintas cargas a partir de aquellos obtenidos del modelo de onda elemental, para distintos límites de confianza

La figura inferior compara en función de la distancia los resultados del Modelo de Devine obtenido a partir de la prueba especial (línea de color azul), con el modelo constituido por lo datos de vibración generados por las voladuras (línea de color rojo), ilustrándose también la línea correspondiente al límite de confianza del 90%, representada en color rojo punteado.

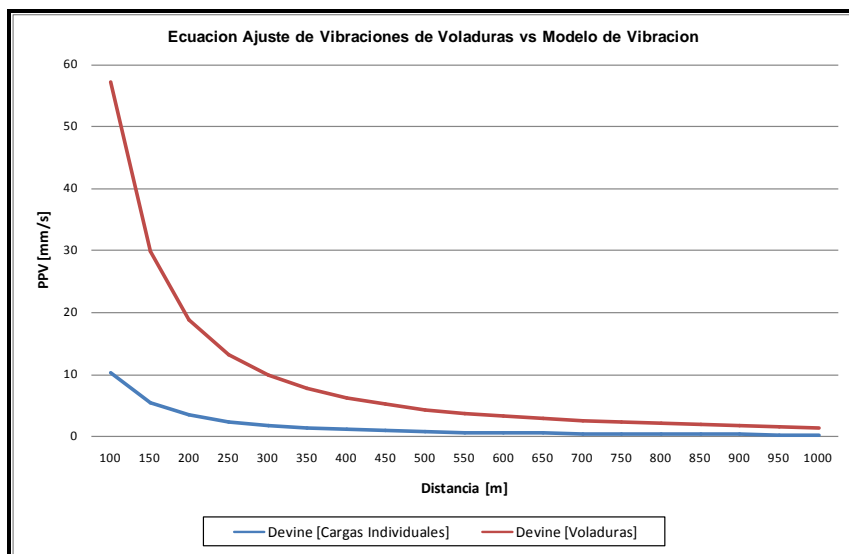
FIGURA 95. COMPARACIÓN DE LOS MODELOS DE DEVINE (DEVINE DE VOLADURAS VS DEVINE DE CARGAS INDIVIDUALES).

$PPV = 813 \left[\frac{d}{\sqrt{W}} \right]^{-1.60}$ <p>Modelo de Devine (Voladuras).</p>	$PPV = 147 \left[\frac{d}{\sqrt{W}} \right]^{-1.60}$ <p>Modelo de Devine (Cargas Individuales).</p>
--	--

Fuente: Modelo Creado para la presente tesis.

Vemos que el factor de amplificación es de 5.53, por lo que las vibraciones esperadas para las voladuras es de 5.53 veces mayores a lo que serian si no hubiera superposición de taladros, esto es una demostración de que se debe realizar el análisis de onda elemental para reducir este factor de amplificación.

FIGURA 96. COMPARACIÓN DE LOS MODELOS DE DEVINE (DEVINE DE VOLADURAS VS DEVINE DE CARGAS INDIVIDUALES).



Fuente: Modelo Creado para la presente tesis.

La separación entre ambas líneas define el llamado Factor de Amplificación, el cual es representado por el cociente entre los parámetros (kt) y (kpe) correspondientes a la Voladura y la Prueba de Onda Elemental respectivamente puesto que la pendiente dada por el parámetro “ α ” es prácticamente la misma para ambas ecuaciones.

Definiendo ecuaciones de ajuste por voladura para varios límites de confiabilidad (i.e 50% a 95%), representadas por sus respectivos parámetros (kt), se puede establecer cocientes con el valor (kpe) correspondientes a la Prueba de Onda Elemental y definir así distintos factores de Amplificación que permiten predecir los niveles de vibración de una voladura a partir de aquellos obtenidos del Modelo de Prueba de Onda para distintos niveles de confianza.

La relevancia de esta metodología está en el hecho de que permite incorporar la variable “kilos de explosivos” (W) a la predicción a partir de la Prueba de Onda Elemental.

De la tabla anterior se deduce que con las prácticas actuales de voladura, se supera en promedio en 5.53 veces el valor de vibración esperado de la detonación de los taladros individuales de la voladura de onda elemental.

11.8 SELECCIÓN DE RETARDOS POR ONDA ELEMENTAL

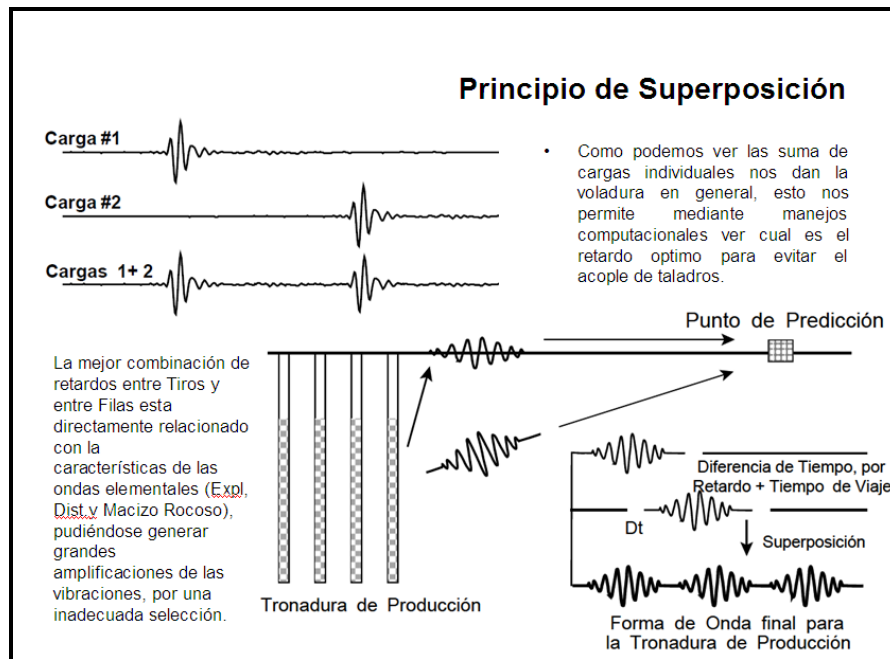
Más allá del modelo predictivo de comportamiento vibracional, la Prueba de Onda Elemental, permite analizar las señales de carga elemental originadas por cada pozo mediante una simple suma algebraica, ajustando sus tiempos de llegada

al punto de interés según sea su retardo y tiempo de viaje, simulando así la señal de vibración de grupos de taladros de una fila o bien de varias filas, iterando hasta simular la voladura completa.

Dado que la duración de la onda de un pozo individual es marcadamente superior a los tiempos de retardo utilizados entre pozos, es prácticamente inevitable que se produzca un cierto grado de acoplamiento o superposición de vibraciones que resulten en la amplificación de la onda resultante. Por tal razón, un modelo predictivo desarrollado a partir de ondas elementales subestimarán los niveles de vibración producidos por una voladura de múltiples filas, aunque los pozos de ésta última tengan la misma carga y sean iniciados tiro a tiro.

Se observa claramente que ciertos intervalos de tiempos de retardo tienden a aumentar y otros a disminuir la vibración resultante debido al efecto constructivo o destructivo respectivamente, generado por la superposición de ondas. Los resultados indican la conveniencia de seleccionar retardos entre taladros de una misma fila dentro del rango 40- 70ms, donde se genera una menor amplificación de las vibraciones. De manera similar, se podría seleccionar, en una primera aproximación, retardos entre filas dentro del rango 95- 120ms, preferentemente 100ms.

FIGURA 97. PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN



Fuente: Manual de Vibraciones de ASP Blastronics (2008)

11.9 CALCULO DE ONDA P PRÁCTICA.

Tenemos el cálculo de Onda P Teórica que da un valor de 1719.00 m/s que es el indicado para un tipo de roca media a suave muy fracturada. Para ello se realizo un Cross Hole para campo cercano en la zona de la voladura.

El Cross Hole permite el cálculo de la Onda P en el campo para el tipo de roca presente en esa zona de La Quinua, porque si se logra controlar las vibraciones en el campo lejano y reducir lo que es la amplificación de las ondas y el acoplamiento de los taladros. Se reducirá también la vibración en el campo lejano si bajamos la vibración en el campo cercano.

Para ello necesitamos realizar un Cross Hole en ese tipo de roca. A continuación mostramos la metodología de la realización del Cross Hole.

11.9.1 Técnica de Cross Hole.

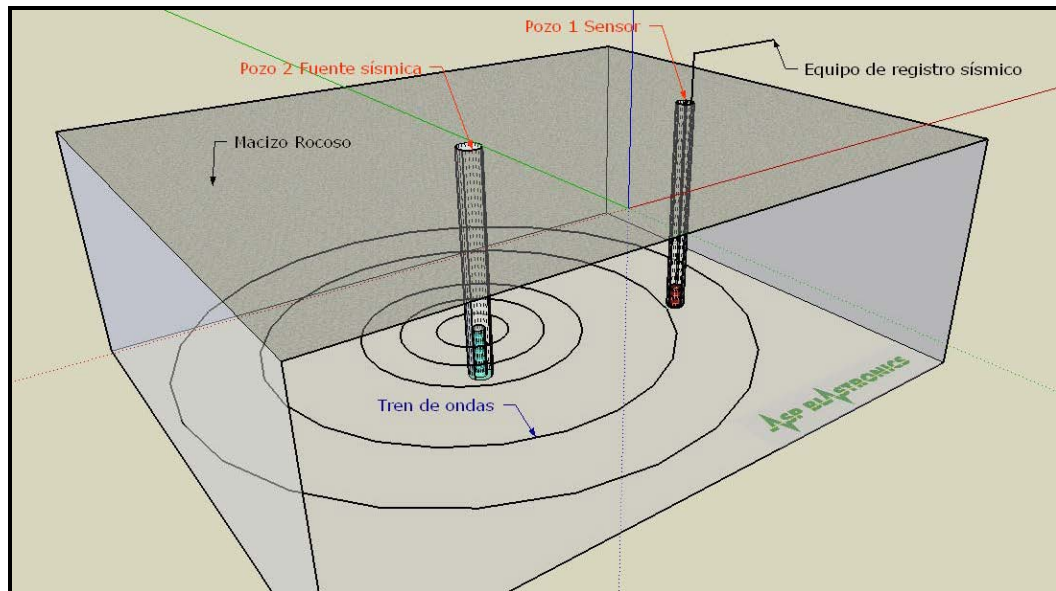
La velocidad de propagación de las ondas sísmicas en un medio rocoso está asociada directamente con la calidad geomecánica de la misma. En efecto, la velocidad de las Ondas-P que atraviesan un volumen de roca o suelo está determinada por las características geomecánicas, geométricas y estructurales del medio.

La técnica sísmica que permite realizar una evaluación cuantitativa de la condición in situ de la roca a través de la medición de los cambios que sufre una onda de características conocidas a medida que viaja por el macizo rocoso se denomina Cross Hole.

Los cambios en la onda considerados son variación en la velocidad de Onda-P, cambios en la frecuencia y atenuación de la amplitud.

La instrumentación implica la perforación de a lo menos dos taladros, uno para la ubicación del sensor y otro para la fuente sísmica. La distancia lineal entre ellos debe ser tal que, según la velocidad de Onda-P estimada en el macizo, permita una clara interpretación de las variaciones

FIGURA 98. PRINCIPIO DE ONDA SÍSMICA Y RECEPCIÓN DE GEÓFONO



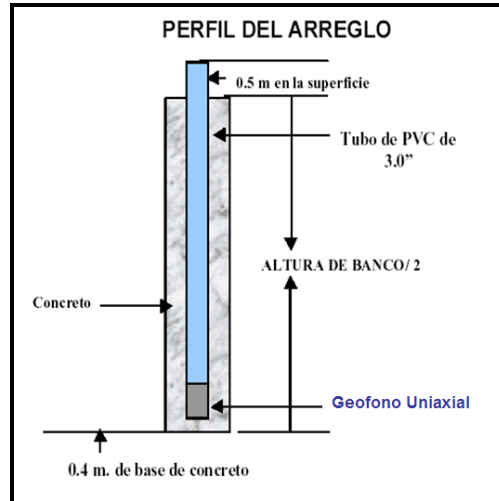
Fuente: Informe de Vibraciones de ASP Blastronics

11.9.2 Aplicación de la Técnica de Cross Hole

La técnica del Cross Hole se aplica con la perforación de 04 taladros de los cuales los taladros de los extremos son cargados con 1 Booster de 1 lb. Para la generación de la onda sísmica, y en el medio se instalan los dos geofonos de los cuales uno es un arreglo triaxial y el otro un arreglo uniaxial.

Para la instalación de los geofonos se usa la metodología de instalarlo en tubos de PVC de 3.5 pulg. Además se rellena el taladro con cemento en su totalidad o en unos 3 m aproximadamente. El resto se llena con el detrito del cono de perforación. A continuación se muestra una imagen de la instalación de uno de los geófonos.

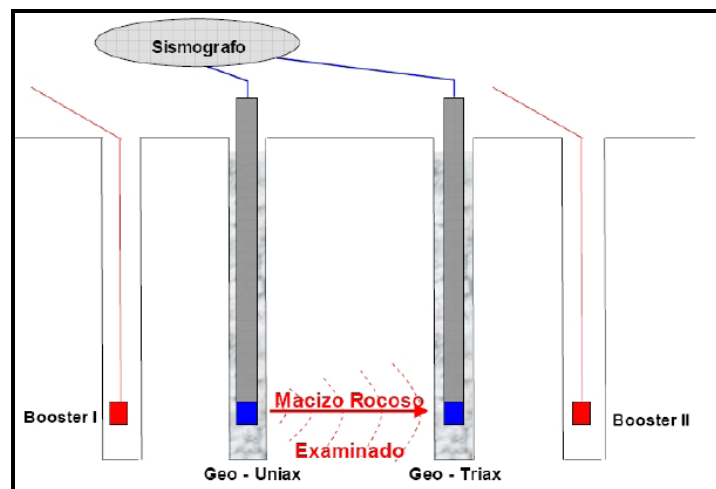
FIGURA 99. PERFIL DE ARREGLO E INSTALACIÓN DE UN GEÓFONO.



Fuente: Informe de Vibraciones de ASP Blastronics

La distancia entre los geófonos es de 3.5 m, esta distancia debemos de conocerla para poder estimar la velocidad de Onda P. Que sería la distancia entre los geófonos entre el tiempo que demora en registrar en unos geófonos y en el otro. Y al tener dos cargas tenemos dos mediciones de Onda P.

FIGURA 100. CROSS HOLE – PERFIL DE INSTALACIÓN DE SISMÓGRAFOS Y LAS CARGAS.



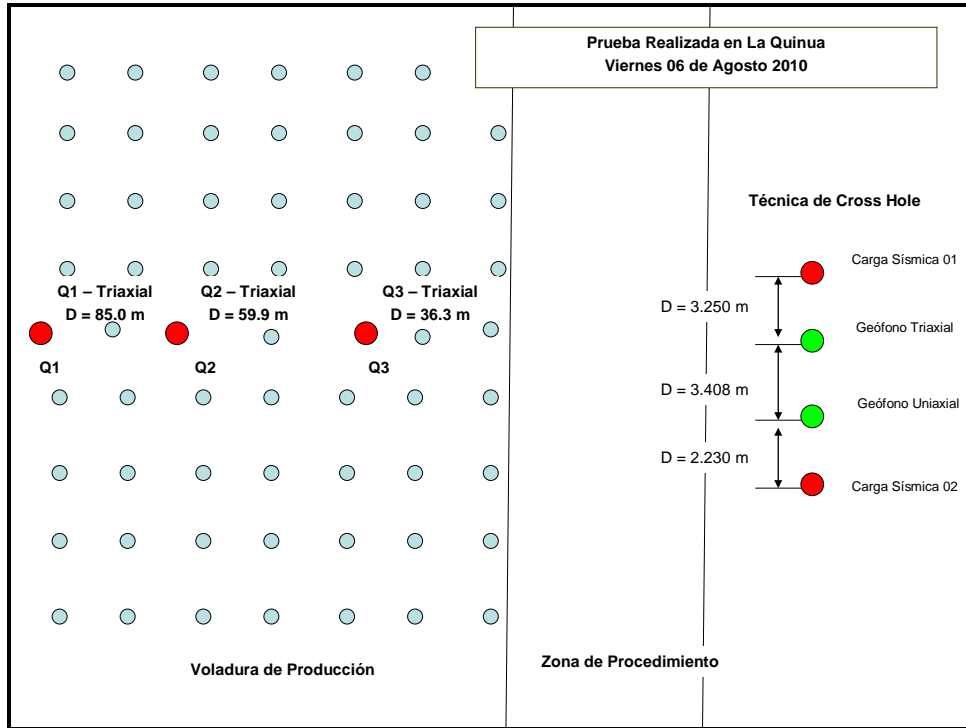
Fuente: Informe de Vibraciones de ASP Blastronics

A continuación veremos los datos obtenidos de la prueba de Cross Hole realizada en la zona de La Quinoa para el tipo de roca de Gravas. La prueba fue realizada a dos cargas por lo que se obtuvo dos tipos de Onda P, la primera que se podría decir que es la prueba en roca intacta y la segunda es la prueba en roca fracturada. Así tenemos dos registros de Onda P. La Onda P final será el promedio de las dos ondas halladas.

A continuación vemos en una vista de planta los taladros, y sus posiciones con respecto a los geófonos, de esta forma podemos ver los tres taladros de prueba para registrar la onda elemental de estos en sus posiciones con respecto a la malla y a las distancias que estaban de los geófonos triaxial que fue el que registro la onda. Podemos ver que estuvieron a 36.3 m, 59.9 m y 85.0 m del geófonos. Además se colocaron dos cargas sísmicas para producir la onda (Antes de la voladura) necesaria para realizar el cross hole y tener la Velocidad de Onda P de la zona.

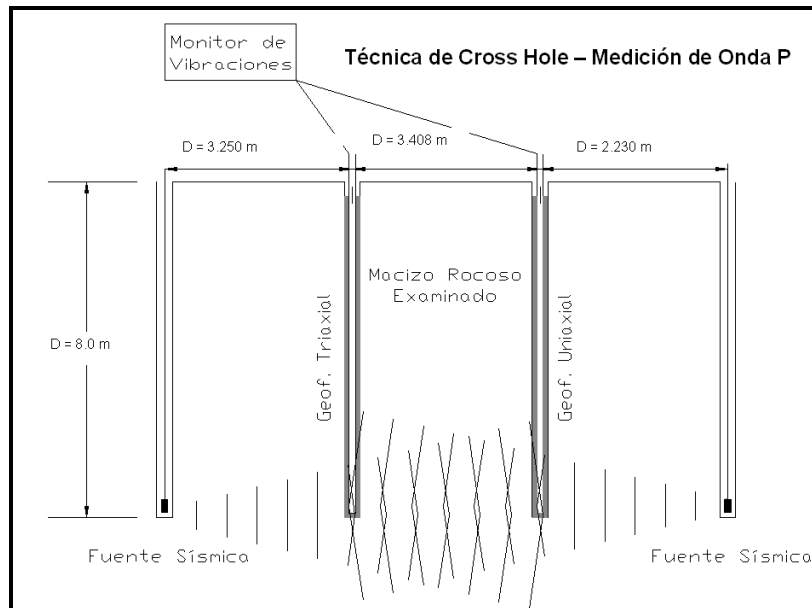
La prueba de Cross Hole en vista de perfil nos muestra la distancia que había entre geófonos (Importante para la medición de Onda P) y la forma en que salió la secuencia dando un tiempo de 1 seg. Entre cada una de las cargas del cross hole.

FIGURA 101. VISTA DE PLANTA DE LA INSTALACIÓN DEL CROSS HOLE Y DE LAS CARGAS INDIVIDUALES.



Fuente: Reporte de Primera Prueba de Geófonos y Cross Hole (Orica 2010)

FIGURA 102. CROSS HOLE – PERFIL DE INSTALACIÓN DE SISMÓGRAFOS Y LAS CARGAS.

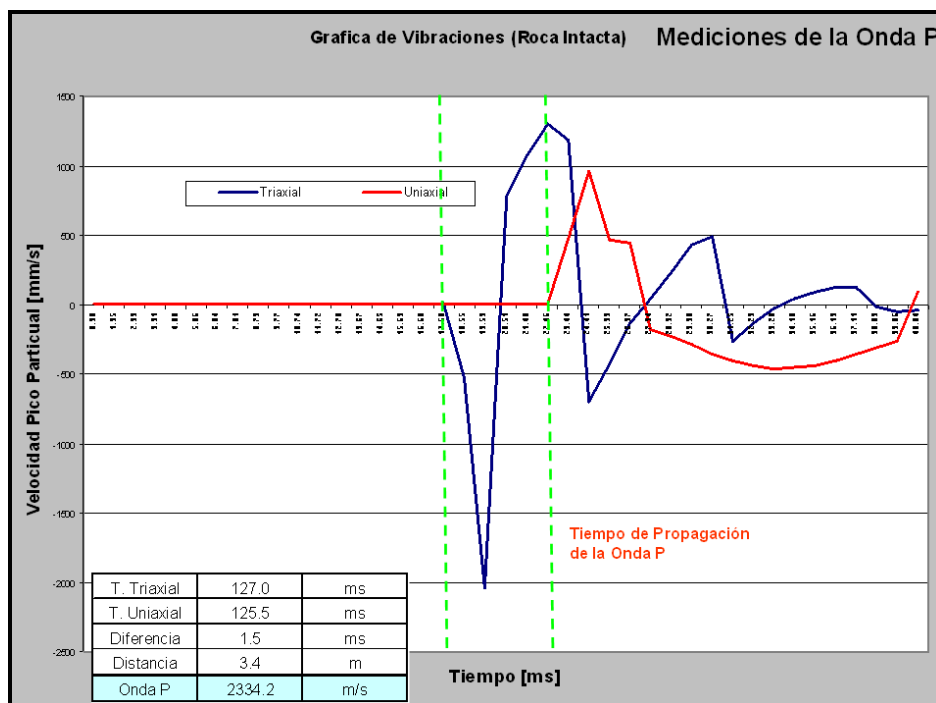


Fuente: Informe de Vibraciones de Orica

Los resultados obtenidos nos muestran unos valores bastante bajos en la zona Pushback Sur con una Velocidad de Onda P en el suelo de 2334 m/s en la primera medición y otro de 1747.8 m/s en la segunda medición, calculando una promedio de las dos mediciones obtenemos que en esa zona la velocidad de Onda P tiene un valor aproximado de 2040.5 m/s.

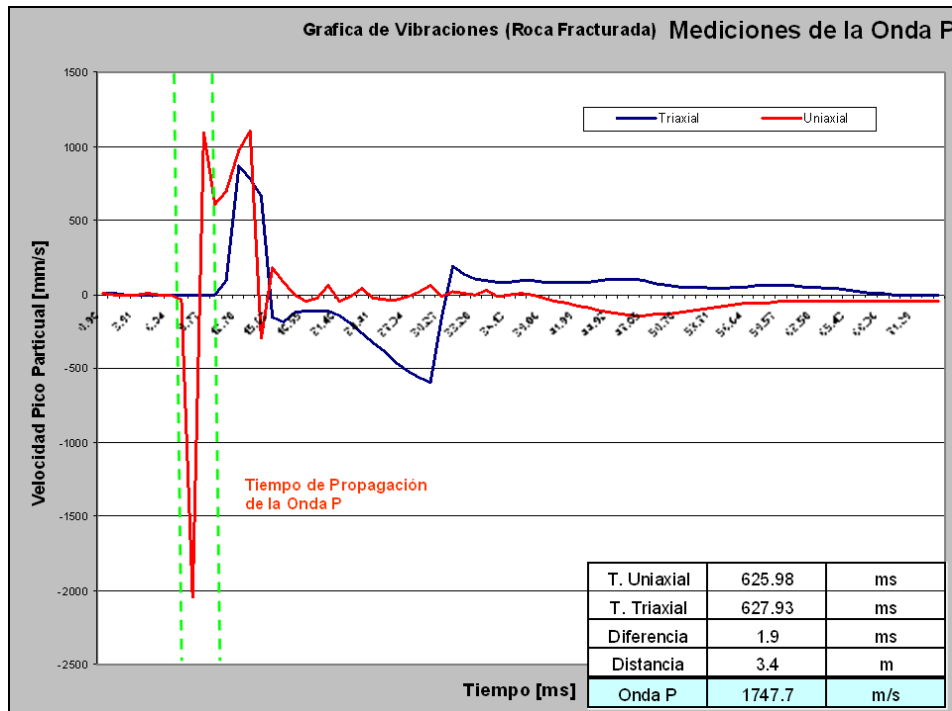
Por lo que obtenemos como resultado un valor de 2040.5 m/s, lo cual comparado con la velocidad de Onda Teórica que es de 1714.9 m/s lo cual nos muestra que el valor obtenido en el campo guarda concordancia con los resultados teóricos.

FIGURA 103. CROSS HOLE – MEDICIÓN DE LA ONDA P – PRIMER ANÁLISIS



Fuente: Reporte de Primera Prueba de Geófonos y Cross Hole (Orica 2010)

FIGURA 104. CROSS HOLE – MEDICIÓN DE LA ONDA P – SEGUNDO ANÁLISIS



Fuente: Reporte de Primera Prueba de Geófonos y Cross Hole (Orica 2010)

A continuación con los datos de los taladros sacados a destiempo para analizar su Onda Elemental, hacemos el análisis de selección de retardos óptimos.

11.10 SIMULACIÓN DE LA VOLADURA POR ONDA ELEMENTAL

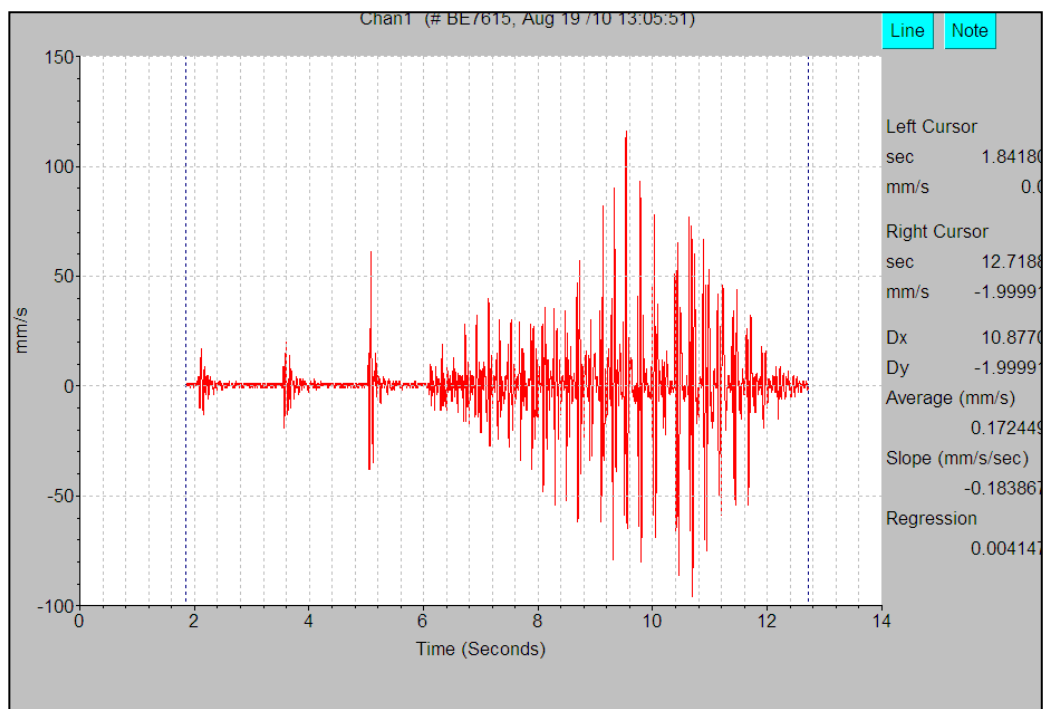
Acabada la primera prueba con un solo taladro, realizamos una segunda prueba con más taladros desacoplados del resto de la voladura. Con la prueba veremos la superposición de los taladros y podremos simular la voladura para diferentes retardos además de hallar el retardo óptimo.

La voladura fue un diseño de producción, realizada el día 06 de Agosto 2010, a las 08:00 horas, el diseño de carguío fue con el explosivo más usado en La Quinua que es de HA-37 con Taco 6.0 m y carga de 8.0 m de carga (Malla 6.5 x 7.5 m), la secuencia fue realizada con detonadores electrónicos. El factor de carga de la voladura fue de 0.308 Kg. /ton.

A continuación mostramos en el software blastware el registro de la voladura en donde se aprecia claramente la salida de los tres taladros para el análisis.

Canal 01. Eje Longitudinal

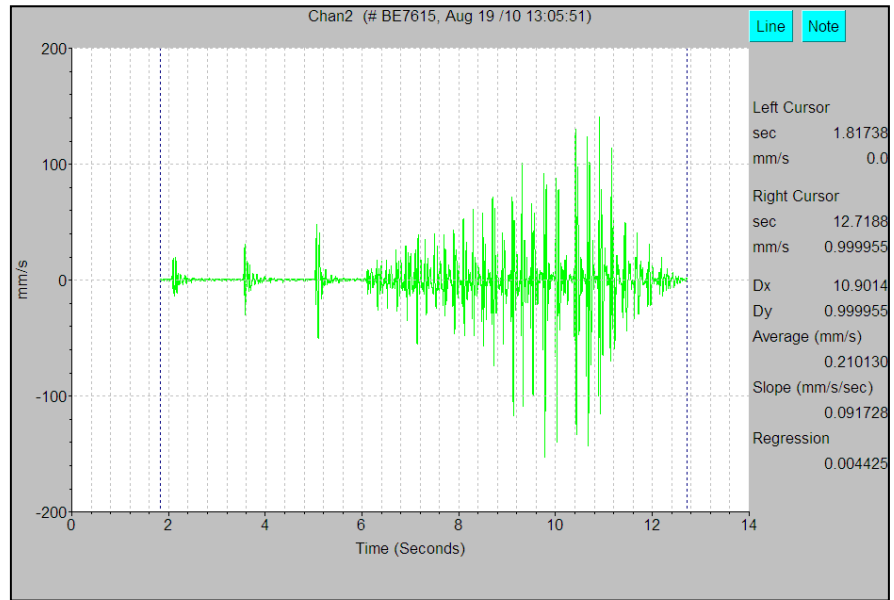
FIGURA 105. SIMULACIÓN DE LA VOLADURA - EJE LONGITUDINAL



Fuente: Reporte de Primera Prueba de Geófonos y Cross Hole (Orica 2010)

Canal 02. Eje Transversal

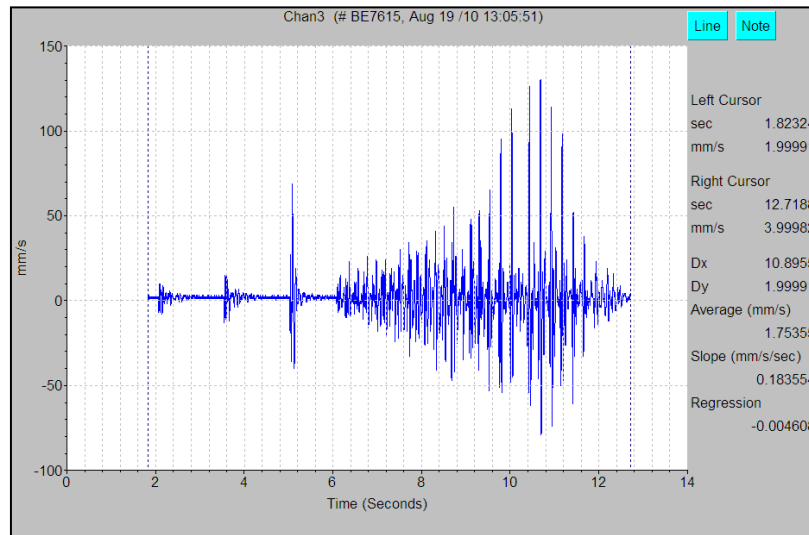
FIGURA 106. SIMULACIÓN DE LA VOLADURA - EJE TRANSVERSAL



Fuente: Reporte de Primera Prueba de Geófonos y Cross Hole (Orica 2010)

Canal 03. Eje Vertical

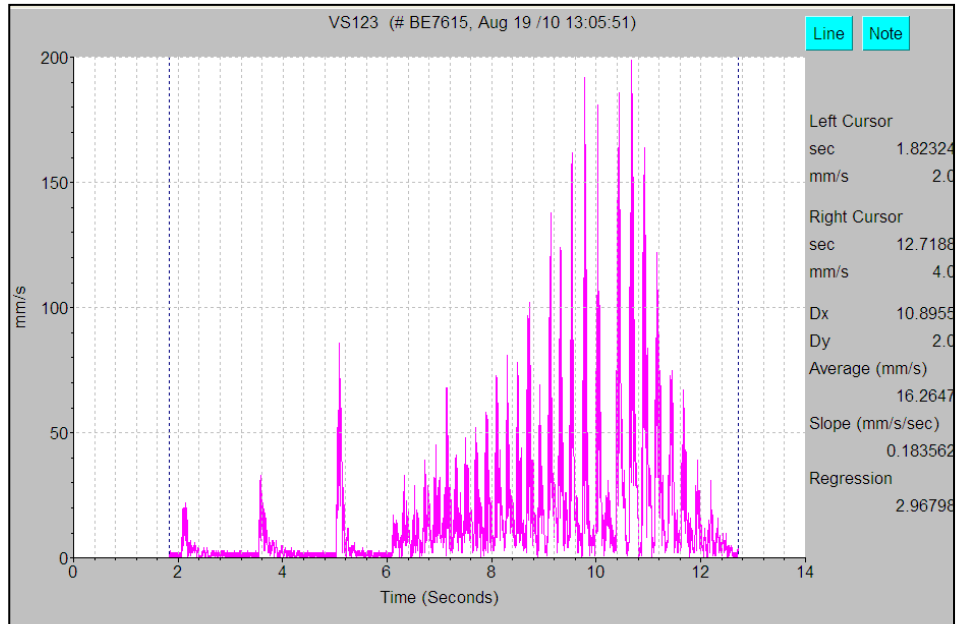
Figura 107. Simulación de la Voladura - Eje Vertical



Fuente: Reporte de Primera Prueba de Geófonos y Cross Hole (Orica 2010)

Vector Suma

FIGURA 108. SIMULACIÓN DE LA VOLADURA – VECTOR SUMA.



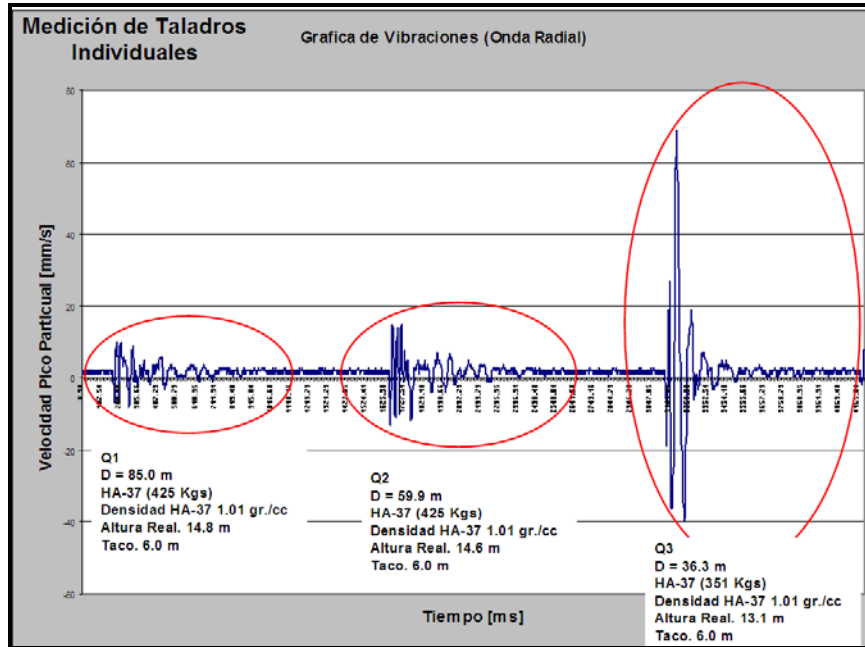
Fuente: Reporte de Primera Prueba de Geófonos y Cross Hole (Orica 2010)

Analizando las Onda Obtenidas podemos ver un parecido entre las dos primera onda que son casi idénticos mientras que la tercera onda muestra una amplitud mayor que no guarda correlación con el resto de las ondas, lo cual puede deberse a que salió medio empotrada por lo que tuvo mayor nivel de vibración en la zona.

Entonces basándome en estos registros podemos decir que los análisis de las dos primeras ondas elementales son para calcular el retardo óptimo de voladuras con cara libre y en el último registro sería para calcular los retardos óptimos en voladuras empotradas o sin cara libre.

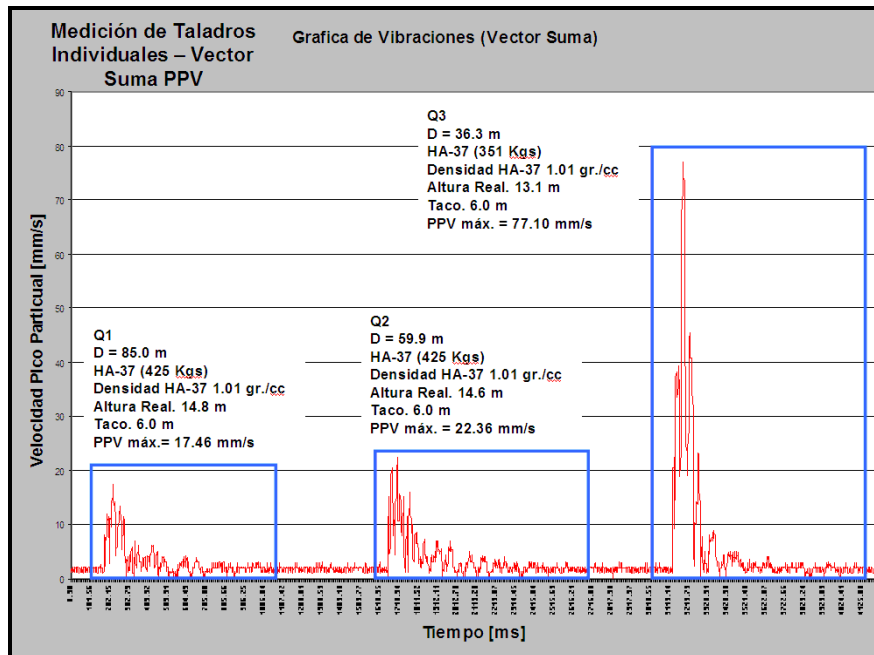
En las graficas inferiores podemos ver una mejor imagen de los registros de vibraciones de los taladros, pudiendo observar

FIGURA 109. MEDICIÓN DE TALADROS INDIVIDUALES - EJE TRANSVERSAL.



Fuente: Reporte de Primera Prueba de Geófonos y Cross Hole (Orica 2010)

FIGURA 110. MEDICIÓN DE TALADROS INDIVIDUALES - VECTOR SUMA.

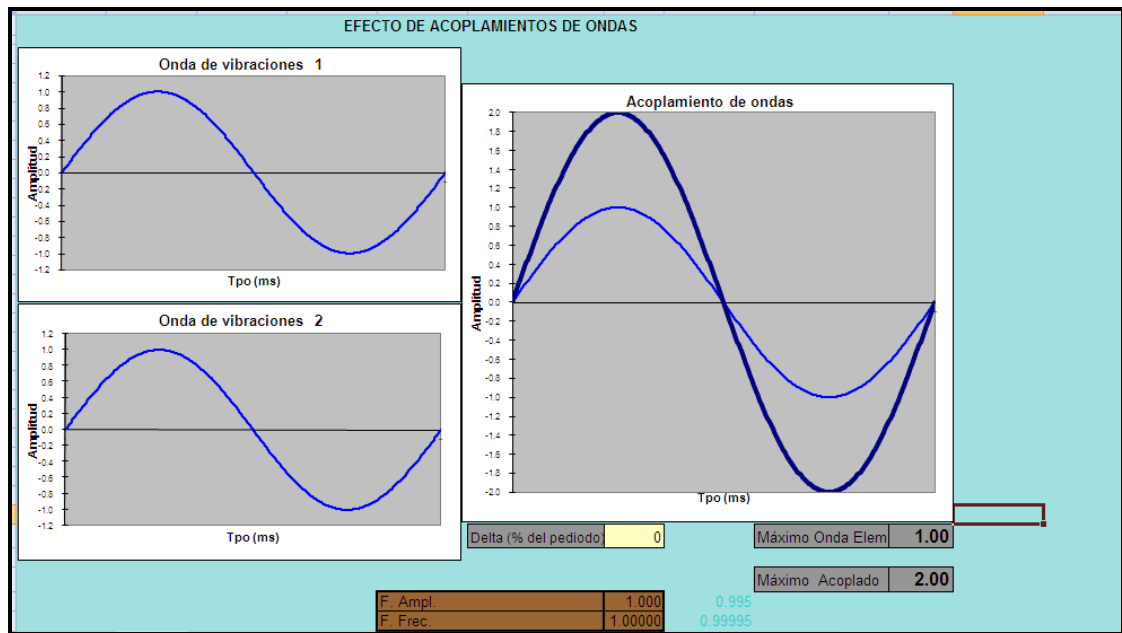


Fuente: Reporte de Primera Prueba de Geófonos y Cross Hole (Orica 2010)

11.10.1 Tiempos Críticos de Acoplamiento

Pasamos a analizar cada uno de los taladros detonados y analizamos los tiempos de duración de la onda, para analizar el tiempo crítico de acoplamiento. Visualizando una onda sinusoidal perfecta podemos descubrir que el acoplamiento mínimo de ondas es a los 33 % del Periodo total de la onda como observamos en las graficas inferiores.

FIGURA 111. EFECTO DE ACOPLAMIENTO CON 0 % DE PERIODO.

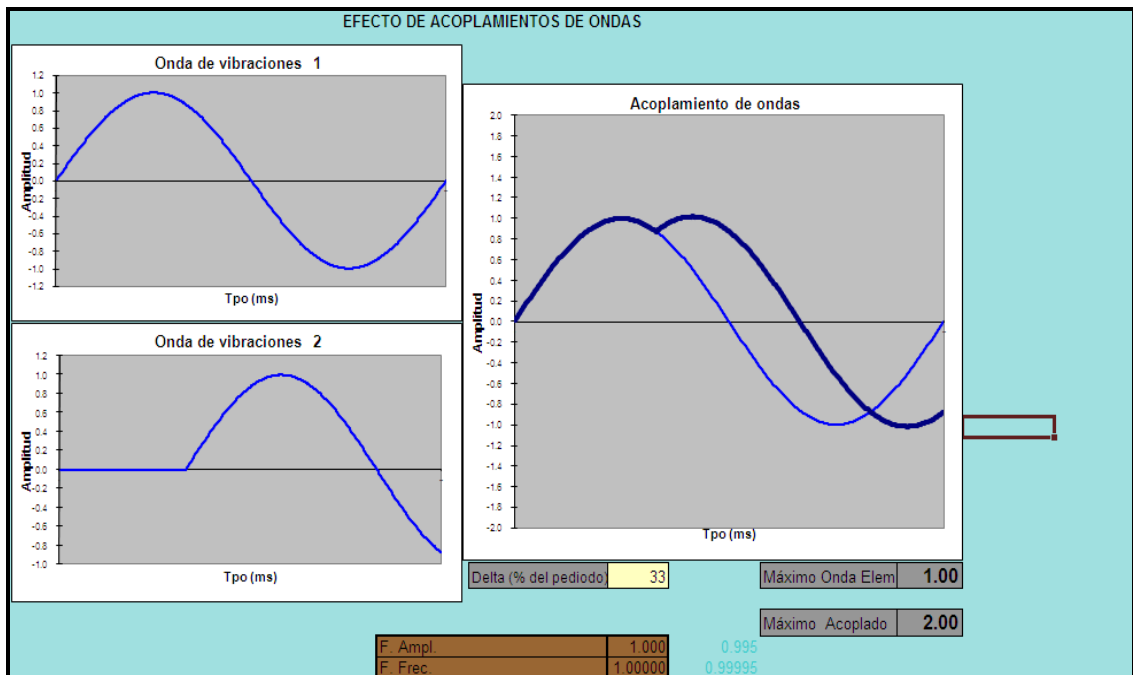


Fuente: Reporte de Primera Prueba de Geófonos y Cross Hole (Orica 2010)

En la grafica superior podemos observar que cuando las ondas parten al mismo tiempo tienen un acoplamiento máximo mientras que en la grafica inferior, vemos que con un 33% el acoplamiento de las ondas es mínimo por lo que de la prueba 02 que se realizó debemos descomponer las ondas elementales obtenidas y calcular el tiempo de duración de las ondas (Periodo de la Onda) y el 33% de este

valor será el tiempo con menor acoplamiento, y este tiempo colocado en los retardos nos dará el menor valor de vibración que se puede obtener manteniendo el diseño de carguío actual.

FIGURA 112. EFECTO DE ACOPLAMIENTO CON 33 % DE PERIODO.

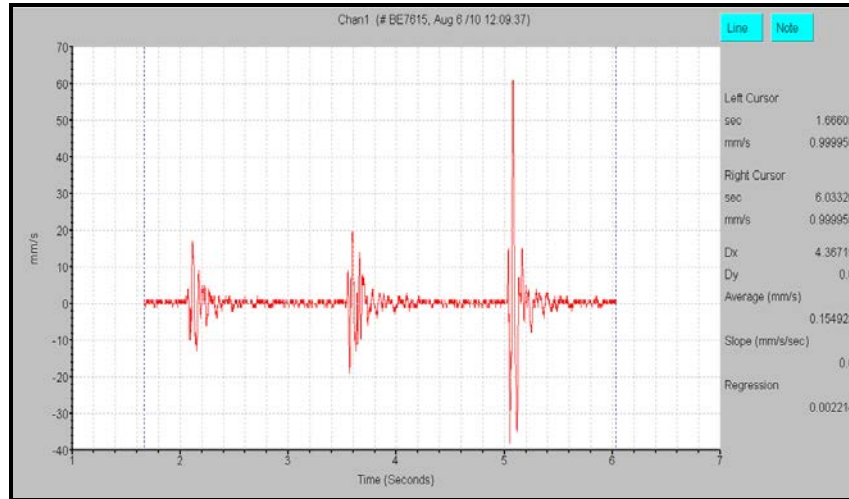


Fuente: Reporte de Primera Prueba de Geófonos y Cross Hole (Orica 2010)

Viendo las ondas elementales obtenidas vemos sus periodos y los tiempos críticos de acoplamiento. EL análisis se hará por ejes (Transversal, Vertical y Longitudinal) del arreglo triaxial.

a). Eje Transversal

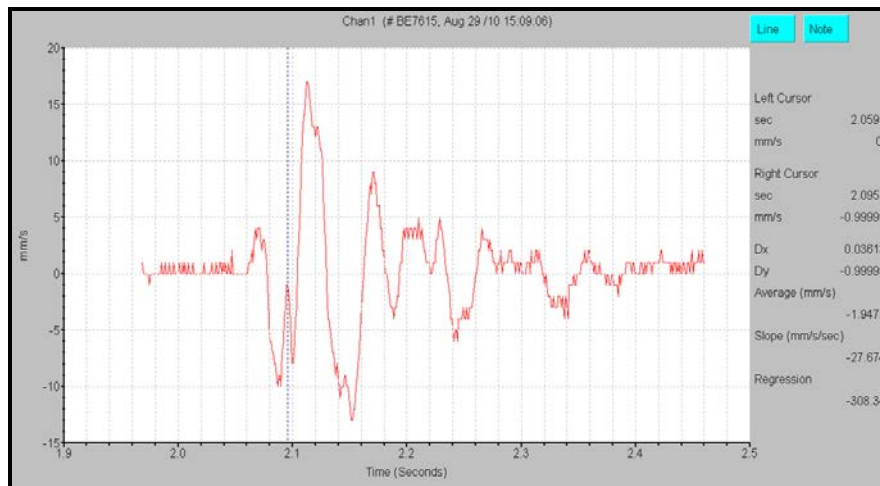
FIGURA 113. REGISTRO DE LAS CARGAS INDIVIDUALES DEL EJE TRANSVERSAL.



Fuente: Reporte de Primera Prueba de Geófonos y Cross Hole (Orica 2010)

Análisis de la Primera Onda.

FIGURA 114. REGISTRO DE LA PRIMERA CARGA INDIVIDUAL DEL EJE TRANSVERSAL.

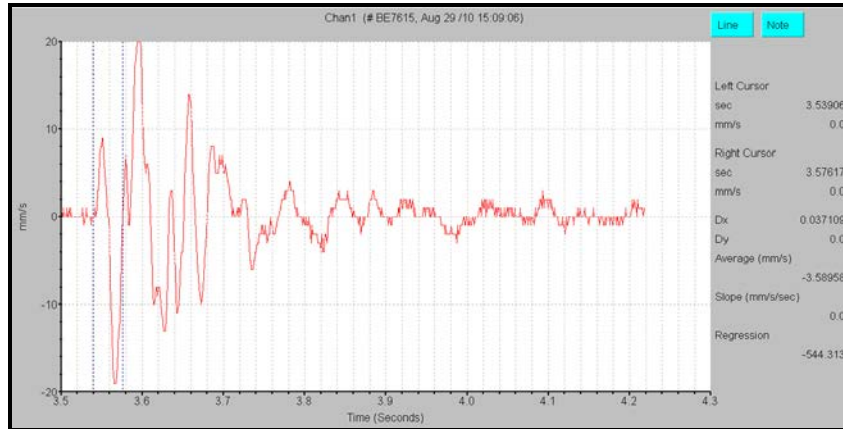


Fuente: Reporte de Primera Prueba de Geófonos y Cross Hole (Orica 2010)

Periodo de la Onda: 36 ms
 Tiempo Critico de Acoplamiento: 12 ms

Análisis de la Segunda Onda.

FIGURA 115. REGISTRO DE LA SEGUNDA CARGA INDIVIDUAL DEL EJE TRANSVERSAL.

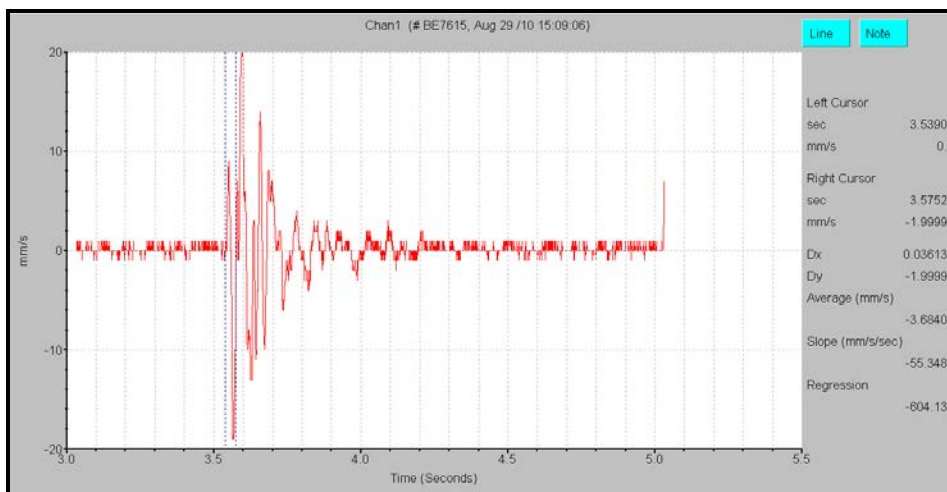


Fuente: Reporte de Primera Prueba de Geófonos y Cross Hole (Orica 2010)

Periodo de la Onda: 37 ms
Tiempo Critico de Acoplamiento: 13 ms

Análisis de la Tercera Onda.

FIGURA 116. REGISTRO DE LA TERCERA CARGA INDIVIDUAL DEL EJE TRANSVERSAL.



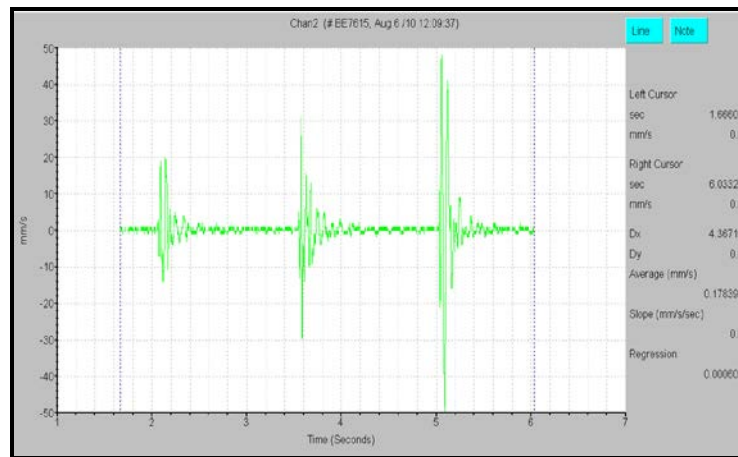
Fuente: Reporte de Primera Prueba de Geófonos y Cross Hole (Orica 2010)

Periodo de la Onda: 37 ms
Tiempo Critico de Acoplamiento: 12 ms

El tiempo crítico de Acoplamiento de la Ondas Elementales en el eje transversal es de 12-13 ms con periodos de onda de 36-37 ms

b). Eje Vertical

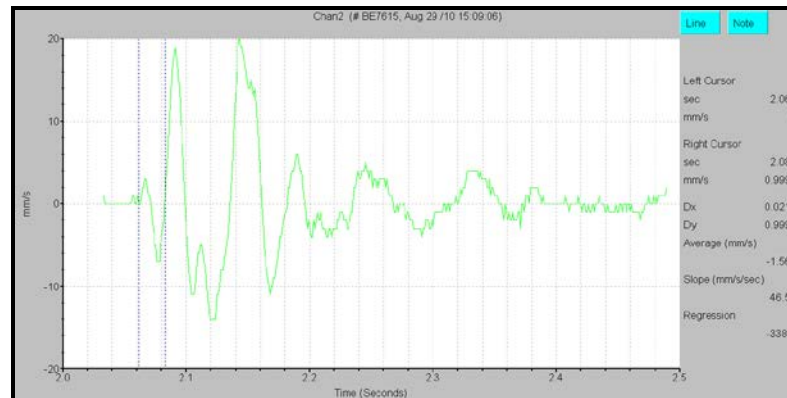
FIGURA 117. REGISTRO DE LAS CARGAS INDIVIDUALES DEL EJE VERTICAL.



Fuente: Reporte de Primera Prueba de Geófonos y Cross Hole (Orica 2010)

Análisis de la Primera Onda.

FIGURA 118. REGISTRO DE LA PRIMERA CARGA INDIVIDUAL DEL EJE VERTICAL.

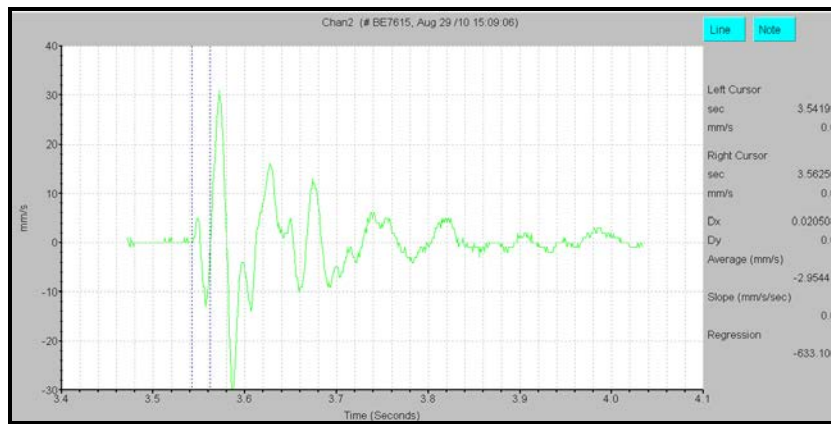


Fuente: Reporte de Primera Prueba de Geófonos y Cross Hole (Orica 2010)

Periodo de la Onda: 22 ms
 Tiempo Critico de Acoplamiento: 8 ms

Análisis de la Segunda Onda.

FIGURA 119. REGISTRO DE LA SEGUNDA CARGA INDIVIDUAL DEL EJE VERTICAL

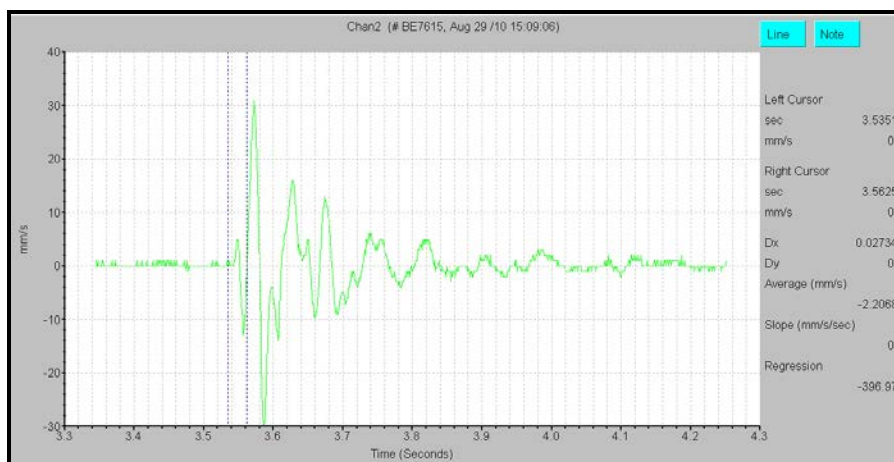


Fuente: Reporte de Primera Prueba de Geófonos y Cross Hole (Orica 2010)

Periodo de la Onda: 21 ms
 Tiempo Critico de Acoplamiento: 7 ms

Análisis de la Tercera Onda.

FIGURA 120. REGISTRO DE LA TERCERA CARGA INDIVIDUAL DEL EJE VERTICAL



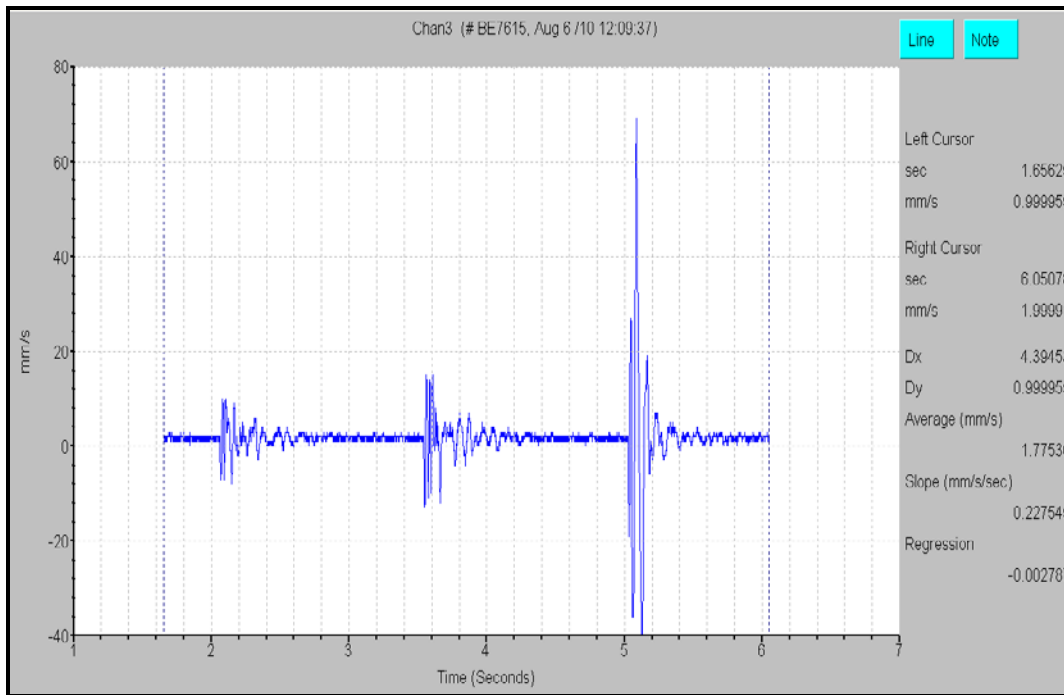
Fuente: Reporte de Primera Prueba de Geófonos y Cross Hole (Orica 2010)

Periodo de la Onda: 27 ms
 Tiempo Critico de Acoplamiento: 9 ms

El tiempo crítico de Acoplamiento de la Ondas Elementales en el eje Vertical es de 7-9 ms con periodos de onda de 21-27 ms

c). Eje Longitudinal

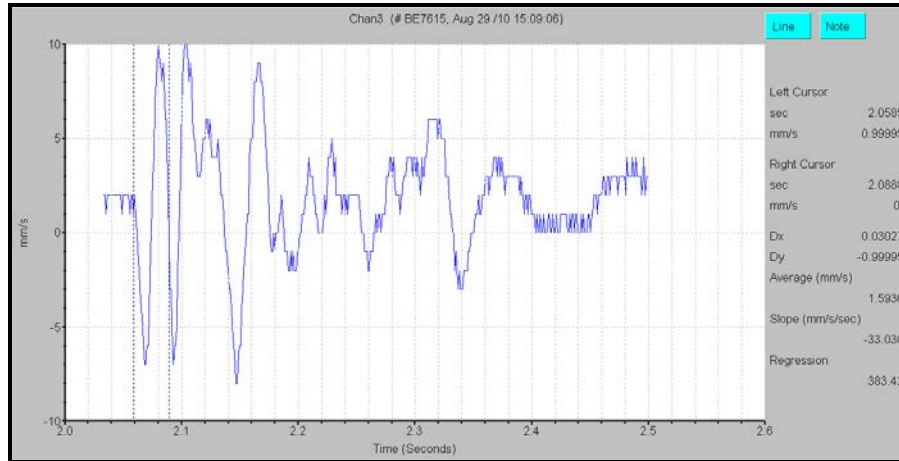
FIGURA 121. REGISTRO DE LAS CARGAS INDIVIDUALES DEL EJE LONGITUDINAL



Fuente: Reporte de Primera Prueba de Geófonos y Cross Hole (Orica 2010)

Análisis de la Primera Onda.

FIGURA 122. REGISTRO DE LA PRIMERA CARGA INDIVIDUAL DEL EJE LONGITUDINAL

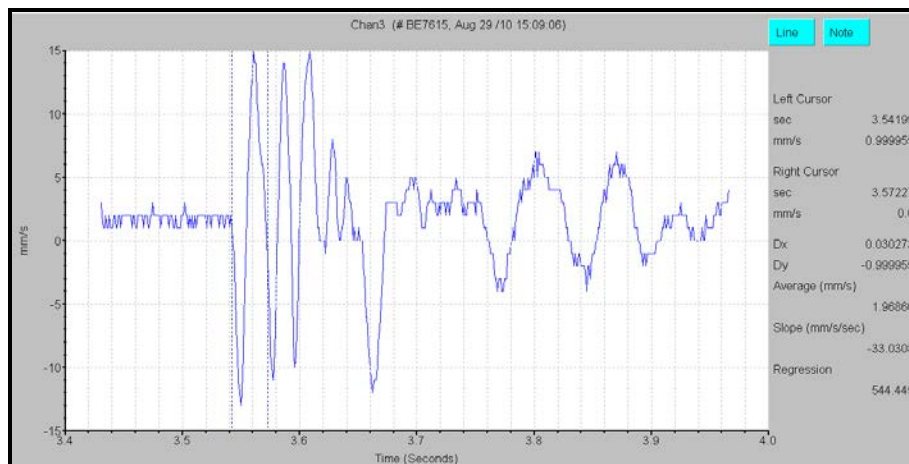


Fuente: Reporte de Primera Prueba de Geófonos y Cross Hole (Orica 2010)

Periodo de la Onda: 31 ms
 Tiempo Critico de Acoplamiento: 11 ms

Análisis de la Segunda Onda.

FIGURA 123. REGISTRO DE LA SEGUNDA CARGA INDIVIDUAL DEL EJE LONGITUDINAL

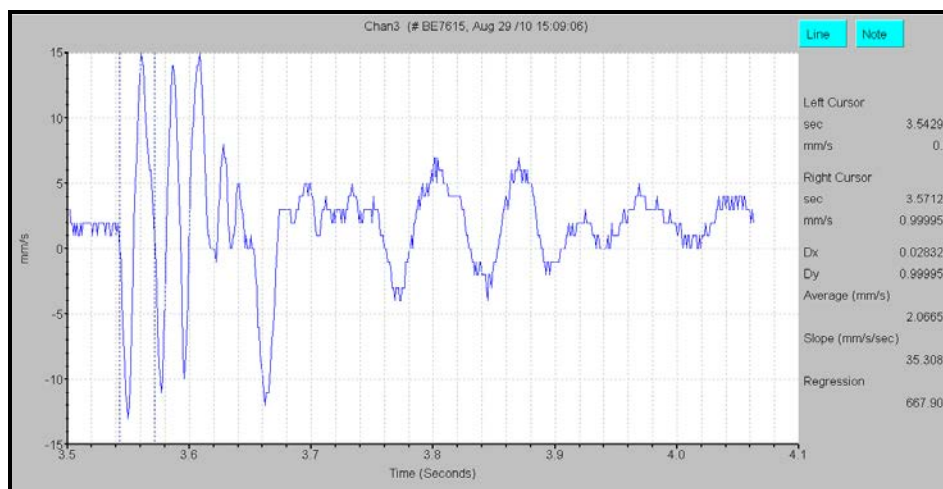


Fuente: Reporte de Primera Prueba de Geófonos y Cross Hole (Orica 2010)

Periodo de la Onda: 31 ms
 Tiempo Critico de Acoplamiento: 11 ms

Análisis de la Tercera Onda.

FIGURA 124. REGISTRO DE LA TERCERA CARGA INDIVIDUAL DEL EJE LONGITUDINAL



Fuente: Reporte de Primera Prueba de Geófonos y Cross Hole (Orica 2010)

Periodo de la Onda: 29 ms
 Tiempo Critico de Acoplamiento: 10 ms

El tiempo crítico de Acoplamiento de la Ondas Elementales en el eje Vertical es de 10-11 ms con periodos de onda de 29-31 ms

En total los tiempos de los periodos de onda están en el rango de 29 ms a 32 ms por lo que los tiempos de acoplamiento menores seria del rango de 12 ms a 13 ms.

Estos tiempos son los que deben ser usados para los tiempos entre taladros de una misma fila.

CAPITULO XII CONCLUSIONES

- El potencial de efectos perjudiciales de una voladura depende de diversas características de las vibraciones, o de su conjugación: amplitud, frecuencia, duración, cantidad de ocurrencias, etc. vs. Las propiedades de comportamiento dinámico de los sistemas que excitan (frecuencia de resonancia y resistencia, principalmente). En suma, es el sistema con las componentes fuente-suelo transmisor-estructura el que determina en conjunto el efecto del fenómeno vibratorio.
- Las voladuras de campo lejano de rangos de 700 a 1500 metros no registran frecuencias mayores a los 25Hz por lo que los rangos de velocidades de pico partículas en función de la frecuencia serán a este rango. Obteniéndose una velocidad limite permisible de 5.25 mm/s.
- La frecuencia de resonancia obtenida en las mediciones de campo nos da un rango de valores que oscila entre los 10 y 17 Hz, lo cual está un poco

por encima de los 4 – 11 Hz considerada mundialmente para protección de estructuras. La frecuencia de resonancia está en función de las propiedades de los materiales que construyen la estructura y también de acuerdo a dimensiones de la estructura que se pretende cautelar.

- La normativa peruana de vibraciones es un conversión de la normativa americana de la Office Surface Mining, la cual ha sido diseñada para otro tipo de realidad y otros tipos de estructuras por lo que su aplicación en la zona peruana, debe tener modificaciones. Las normativas alemanas y suecas son más conservadoras que las americanas y debido al tipo de estructuras presentes en nuestro territorio son más útiles para las casas del tipo tierra.
- La velocidad de Onda P calculada de forma teórica y practica (rango de 1700 m/s a 2100 m/s) nos muestra que la zona de La Quinua es una zona de roca entre suave a media y con gran numero de fallas y fracturas que nos indica que la vibración se mitiga bastante por el paso por todos esos lados.
- En los registros obtenidos en las casas podemos ver que en el caso de tener algún material o equipos ya se jarrones, etc. sobre armarios o anaqueles estos anaqueles respectivo obtendrán su frecuencia de resonancia a niveles bajos de 2 a 4 Hz, lo cuales pueden alarmar a los pobladores de las viviendas creyendo que la vibración puede dañar sus casas.

- Se han obtenido los valores de $K = 813$ y $\alpha = -1.60$ para un modelo de Devine de campo lejano para la zona de La Quinua en Pushback Sur, el modelo fue realizado con más de 15 datos y con un grado de confianza de 94%.
- Realizado el modelo de cargas individuales y comparándolo con el Devine para voladuras demostramos que el factor de amplificación es de 5.53, por lo que las vibraciones esperadas para las voladuras es de 5.53 veces mayores a lo que serian si no hubiera superposición de taladros, esto es una demostración de que se debe realizar el análisis de onda elemental para reducir este factor de amplificación. Esto nos indica que debemos pasar a calcular el retardo optimo debido a que hay probabilidades que con el acoplamiento de 3 taladros se pueda tener daños a las casas.
- Dado que la duración de la onda de un pozo individual es marcadamente superior a los tiempos de retardo utilizados entre pozos, es prácticamente inevitable que se produzca un cierto grado de acoplamiento o superposición de vibraciones que resulten en la amplificación de la onda resultante. Por tal razón, un modelo predictivo desarrollado a partir de ondas elementales subestimarán los niveles de vibración producidos por una voladura de múltiples filas, aunque los pozos de ésta última tengan la misma carga y sean iniciados tiro a tiro.

- Visualizando una onda sinusoidal perfecta podemos descubrir que el acoplamiento mínimo de ondas es a los 33 % del Periodo total de la onda como observamos en las graficas inferiores.
- En total los tiempos de los periodos de onda están en el rango de 29 ms a 32 ms por lo que los tiempos de acoplamiento menores seria del rango de 12 ms a 13 ms. Estos tiempos son los que deben ser usados para los tiempos entre taladros de una misma fila. Para deducir los tiempos que deberían ser usados entre filas, sumamos el periodo total de la onda que es de 29 ms a 32 ms y lo sumamos a los tiempos críticos de acoplamiento sacando que el tiempo entre filas debe de ser de 42 ms a 45 ms o múltiplos de este.

CAPITULO XIII RECOMENDACIONES

- Las casas del tipo tierra (Adobe y Tapial) tienen problemas en el tema de control de sismos y voladuras. Por lo que en el tema de vibraciones se debe actuar con mucho cuidado y seguridad para evitar la fisuración de estas.
- Las minas que tengan en sus inmediaciones casas o estructuras que quieran cautelares, deberán realizar análisis de diseño sísmo resistente de estas estructuras para saber los límites permisibles de velocidad y frecuencia que admitirán sin sufrir de fisuración. Además este análisis permitirá verificar si las estructuras están en condiciones de soportar las voladuras y en caso contrario se podrán usar métodos para mejorar su resistencia a la sismicidad de estas estructuras.
- Trabaje en cambiar las frecuencias de las voladuras mediante el movimiento de la banda de frecuencia que afectan a la casa por decir de 10

a 28 hz hacia una banda más ancha de más de 35 hz. Normalmente la meta de 40 hz es más segura para estar fuera de la zona de daño a las casas.

- El análisis de vibraciones es lo mejor que puede ser usado cuando los niveles de vibraciones son altos (pero que normalmente no están sobre el límite) y hay residentes que se quejan por el tema de vibraciones (no es recomendado para lugares con solo airblast y poca vibraciones).
- Los trabajos de voladura usando detonadores electrónicos con un tiempo exacto que naturalmente crea las frecuencias que usted necesita.
- Es una simple idea que trabaja mejor ordenadamente con pequeños disparos para empezar. Tres o cuatro filas sobre 60 taladros es el mejor punto de partida. Puede ser expandida a 10 filas con disparo de 400 taladros con experiencia. No trabaja bien con grandes disparos delimitados desarregladamente.
- También es difícil usar en voladuras muy largas como la mayoría de los casos se requiere que el disparo sea quemado más lento que lo normal, para mantener mas constante el tiempo entre cada taladro quemado independiente de cualquier otro.
- Generalmente la componente vertical de la vibración es el vector más importante.
- Mientras más constante es la secuencia del tiempo es mayor el efecto (los taladros quemados en intervalos regulares).

- Si la secuencia del tiempo está basada en solo un intervalo constante de tiempo una frecuencia de $1000/\text{intervalo}$, será producida.
- Si el intervalo constante se encuentra en el rango de 18 a 25 ms entonces la frecuencia indicada arriba puede ser la frecuencia dominante y en ocasiones ser la única frecuencia significativa producida (rango determinado a través de ensayos de campo limitados, mecanismos actuales de porque es esto no están bien entendidos por Orica).
- Si el intervalo constante se sitúa en el rango de 8 a 15 ms luego el retardo efectivo de la fila tendrá más influencia que la frecuencia producida en el total del intervalo constante. La frecuencia producida tenderán hacer múltiplo de $1000/$ el control de la frecuencia de la fila. A menudo, la primera, segunda y terceros múltiplos están de forma extraña ausente que es una buena cosa porque normalmente ellos están en un rango de banda de las casas que requieren un terreno consistente. Los cambios en los estratos puede influir en la atenuación.
- El uso de un tiempo constante entre 18 a 25 ms tiene frecuencia dominante mayores a 40 hz..
- Los tiempos constantes menores que, digamos 12 ms es dificultoso de aplicar. Las voladuras parecen tener su frecuencia dominante por el tiempo entre filas, por ejemplo si tú tienes un constante de 8 ms, 4 filas un retardo echelon de 72 ms, ud esperaría 31 hz, 62, 93 etc, y solo una parte pequeña de 125 hz ($1000/8$).

CAPITULO XIV BIBLIOGRAFIA

1. ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA, *Manual Para La Rehabilitación De Viviendas Construidas De Adobe Y Tapia Pisada. 1995*
2. CARLOS HUMBERTO HERRERA *Curso De Manejo Programa Sap 2000 - Diseño Y Analisis Por Medio De Elemento Finito.,2000*
3. C. SCHERPENISSE, G. SILVA, A. MUSIC & I. HUMERES , *N° 08 Estrategia A La Problemática Ambiental.*
4. C. SCHERPENISSE, *Curso De Perforación Y Voladura Para Exsa.*
5. **D.S. N° 046-2001-EM.- Aprueba Reglamento De Seguridad E Higiene Minera. (25.07.01).**
6. EMPRESA ENAEX DE CHILE, *II Curso De Tronadura De Enaex A Cielo Abierto.*
7. F. GIRALDO, J. POMA, M. MENDOZA, *Memo Im-I-M-152-Determinacion Del Abaco Para Criterio De Daño Por Efectos De Voladuras En Lq2c.*
8. HOLMBERG, JOHANSSON, *“Control De Daño En Tronaduras En Minería Civil Y Construcción”, Viña Del Mar, Chile 1999*
9. JESÚS A. PASCUAL DE BLAS – JEFE DE SERVICIO AL CLIENTE UNIÓN ESPAÑOLA DE EXPLOSIVOS, S.A, *Problemática De Las Vibraciones En Las Voladuras, Medición, Control Y Regulación Legal.*
10. JKMRC MONOGRAPHY SERIES IN MINING AND MINERAL PROCESING I, *Open Pit Blast Design Analysis And Optimisation.*
11. JOSÉ RÍOS VARGAS GERENCIA INNOVACIÓN, TECNOLOGÍA & MARKETING, ORICA MINING SERVICES. *Aplicación Del Modelamiento*

De Vibraciones En Campo Lejano Orientado A La Protección De Instalaciones.

12. JUAN ORTIZ SAN, *TIPOLOGÍA Estructural De Los Corrales Tradicionales De Barro En El Páramo De León*
13. K. DÍAZ & J. RÍOS, UNIVERSIDAD DE LOS ANDES, BOGOTÁ, COLOMBIA, *Alternativas De Rehabilitación De Adobe Y Tapia Pisada.*
14. KONYA, *MANUAL DE KONYA.*
15. LÓPEZ JIMENO, *“Manuel De Perforación Y Voladuras De Roca”*
16. LOREN LORIG, PH.D., P.E. *Fundamentos De Geodinámica Aplicada A La Minería.*
17. MARCO ANTONIO ALFARO SIRONVALLE, *Estadística*
18. NICOLÁS A. VIÑAS, MICHELOTTI E HIJOS S.R.L., *Control De Vibraciones Y Onda Aérea Generadas Por Voladuras Canteras Malagueño, Provincia De Córdoba, Argentina.*
19. SCOTT A. *“Open Pit Design”, 1996*
20. SISKIND, D.E., STAGG, M.S., KOPP, J.W., & DOWDING, C.H., 1980 (B). *"Structure Response Anddamage Produced By Ground Vibration From Surface Mine Blasting", Usbm Report Of Investigations 8507.*
21. STEFANIE MARYBELL ORIHUELA CASTILLO, JOSÉ RAÚL DAPELLO VIZCARRA, *Diseño De Un Modelo Predictivo A Partir De Un Estudio De Vibraciones En Una Voladura En Una Mina Modelo.*
22. SUB SECTOR DE MINERA DIRECCIÓN GENERAL DE ASUNTOS AMBIENTALES- *Guía Ambiental Para La Perforación Y Voladura En Operaciones Mineras. Setiembre, 1995.*
23. ORICA MINING SERVICES, *“Antecedentes En Vibraciones”, Oms.*
24. VIDAL NAVARRO TORRES, PH.D, PEDRO MARQUES BERNARDO, M.SC, *El “Blastware Iii” E “Mlinreg.Bas” Como Herramientas Para La Prevención Y Control Ambientalde Vibraciones En Voladura*

ANEXOS

ANEXO II

CASAS ANALIZADAS MEDIANTE LA SIMULACION SISMICA.

CASAS ANALIZADAS MEDIANTE LA SIMULACION SISMICA.

Haciendo un sondeo visual de las casas ubicadas en las cercanías de las minas Yanacocha y Goldfields. Se ha tomado

Casa Tapial – Tipo I

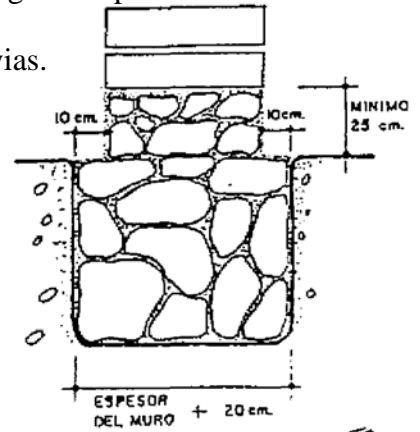
La primera casa escogida para el análisis sísmico una casa de un solo piso del tipo tapial, la cual es la más común en la zona norte del Perú. La casa escogida se encontraba en un terreno inclinado cercano a la minera Yanacocha – Tajo La Quinua siendo una casa de pequeñas dimensiones.

La zanja para el cimiento ha tenido un aproximado de 50 cm y tienen un espesor de muro de 50 cm. Los cimientos se hacen con una mezcla de barro con la mayor cantidad posible de piedra grande, que normalmente constituye la tercera parte del volumen del cimiento.

FIGURA 141. CASA DE TAPIAL.



El sobrecimiento es hecho con el mismo material que el de cemento, y tiene una altura de 25 cm, esta sobre el nivel del suelo para proteger las primeras hiladas de la tierra apisonada de la erosión provocada por las lluvias.



De esta forma la construcción se realiza los muros en tapias por bloques como se muestra en la figura, cada bloque es un tapial es de 2.60 m x 0.50 m, de esta forma se va armando la casa por bloques. Esta forma de construcción hace que mientras más alta sea la construcción hay más riesgo de la aparición de fracturas en la parte superior de las casas. La unión de los tapias se realiza con piedras y barro armado.

El techo es principalmente construido con madera y con tejados de calamina para la protección de la lluvia. Los tejados son sostenidos con piedras puestas en la parte superior para impedir que el viento pueda llevarse las calaminas.

FIGURA 142. CASA DE TAPIAL.

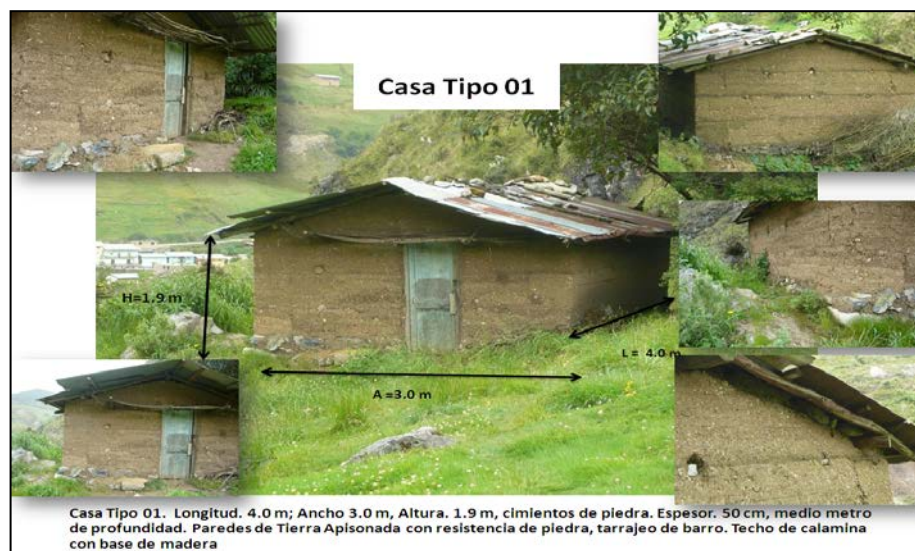




Las dimensiones de la casa son de una longitud de 4.0 m, y un ancho de 3.0 m, la altura de la casa es de 1.9 m, el espesor de las paredes es de 0.50 m.

Los cimientos cuentan con un altura de 0.50 metros de profundidad de roca con barro, las paredes están formada con tapiales de 2.60 x 0.50 m unidos por barro y piedra. El techo está hecho con pilares de madera con el tejado cubierto de calamina.

FIGURA 143. CASA DE TAPIAL.



Casa Adobe – Tipo II.

La casa que se piensa analizar es de 01 piso y una sola crujía y el techo es inclinado, de una o dos aguas. La planta baja tiene una altura media de 4.50 m. En la parte más alta del tejado la casa puede alcanzar unos 5.0 m en promedio.

Los cimientos Su profundidad varía entre 0,50 y 0,80 m y su anchura se determina en unos 0.50 m.

Están hechos de ladrillos de adobe (tierra y paja) de dimensiones variables (50 x 24 x 15 cm ó 40 x 19 x 10 cm), pegados con tierra. Se observa un desconocimiento casi total de los criterios elementales de concepción de estructuras. No existe ningún refuerzo vertical ni horizontal y el aparejo de la mampostería de adobe es deficiente.

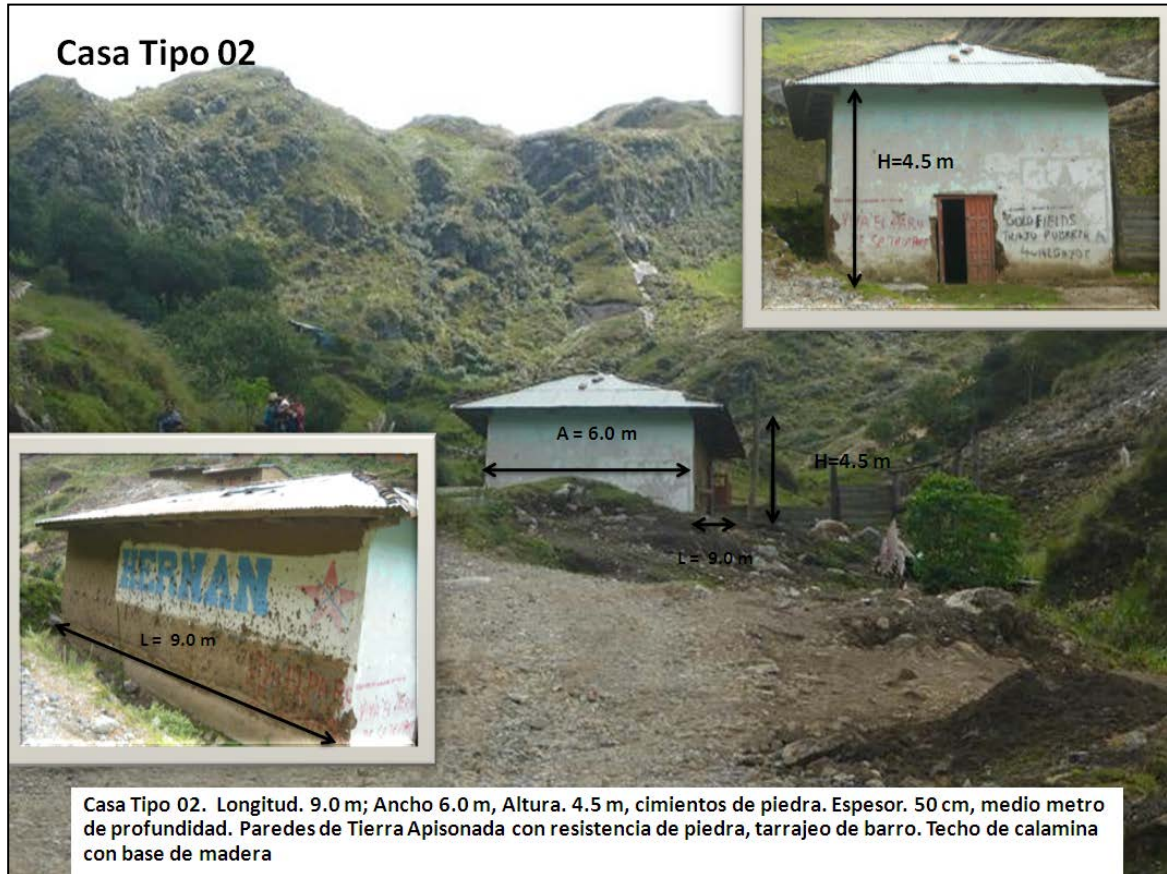
Dinteles, puertas y ventanas

Son de eucalipto, de 15 a 18 cm de diámetro. Los apoyos en cada extremo son de 50 cm como máximo. Existe una tendencia acentuada a hacer aperturas muy largas con apoyos cortos, lo que termina por sobrecargar el muro. Las puertas y ventanas son de madera de mediana calidad. Para montar las puertas se utiliza la técnica del “encajonado”.

El techo es en pendiente de 15 a 18°, y de 23° cuando es de dos aguas. La cubierta es de tejas acanaladas de arcilla cocida, colocadas sobre un mortero de tierra y paja, sostenido a su vez por una capa de cañas unidas (variedad de gramíneas) y clavadas a la estructura de madera. El armazón es de concepción

sencilla con vigas separadas unas de otras por 80 cm a 1 m y colocadas directamente en la pared.

FIGURA 144. CASA DE ADOBE.

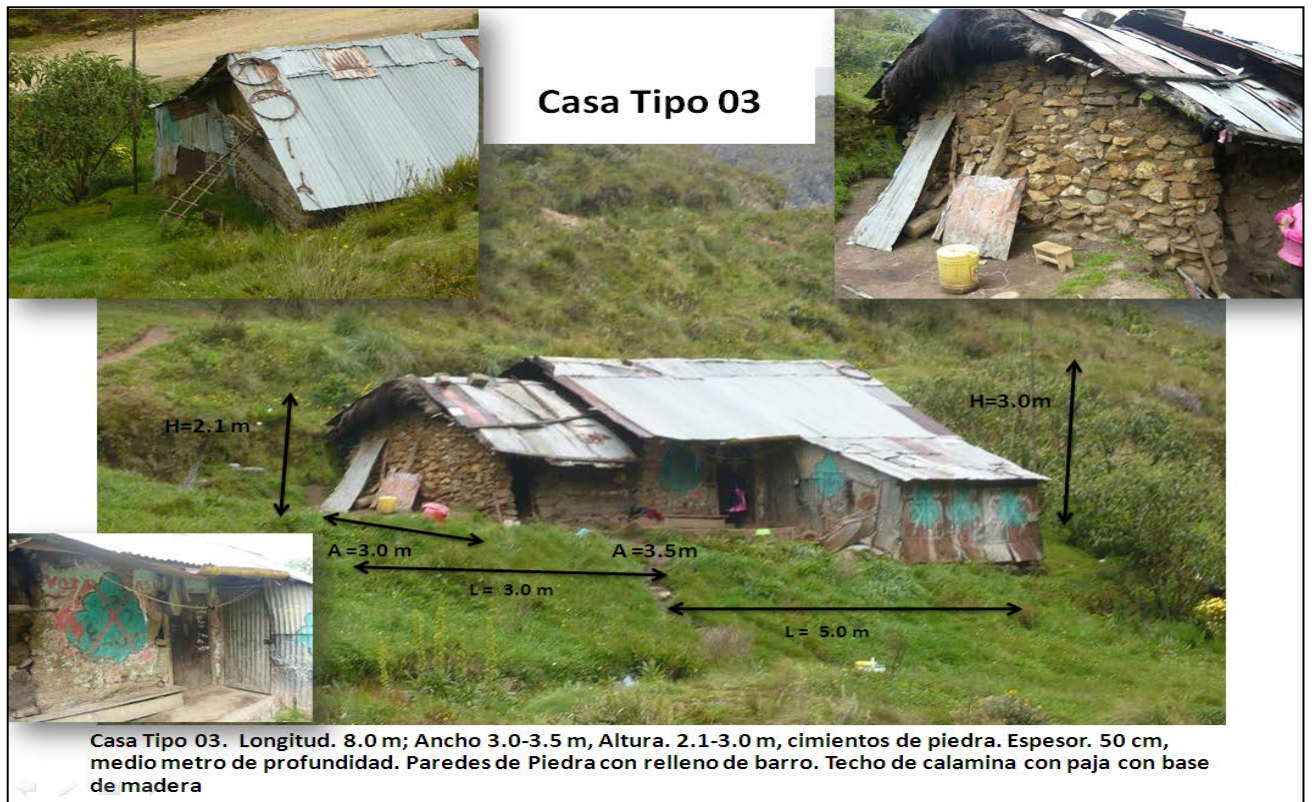


Casa de Piedra – Tipo III

El tercer grupo es de construcción de piedra, y como se puede apreciar en las fotos tomadas a la casa seleccionada, son las casas hechas de la forma más pobre, han sido fabricadas con una altura máxima de 3.0 m, con piedra mezclada con barro. Los cimientos tienen una profundidad de 0.50 m y con vigas de madera para sostener el techo de paja con calamina. Las dimensiones de la casa son de 8.0




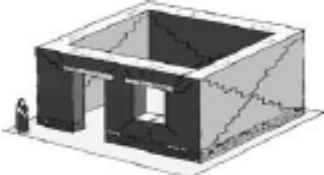

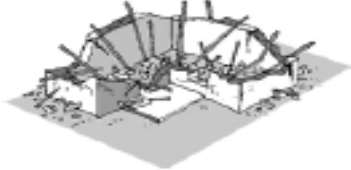

m de Longitud, Ancho de 3.0 – 3.5 m, la altura de 2.1 – 3.0 m, cimientos de piedra. Espesor de los muros 50 cm, medio metro de profundidad. Paredes con relleno de barro. Techo de calamina con paja en base de maderas.

FIGURA 145. CASA DE PIEDRA.



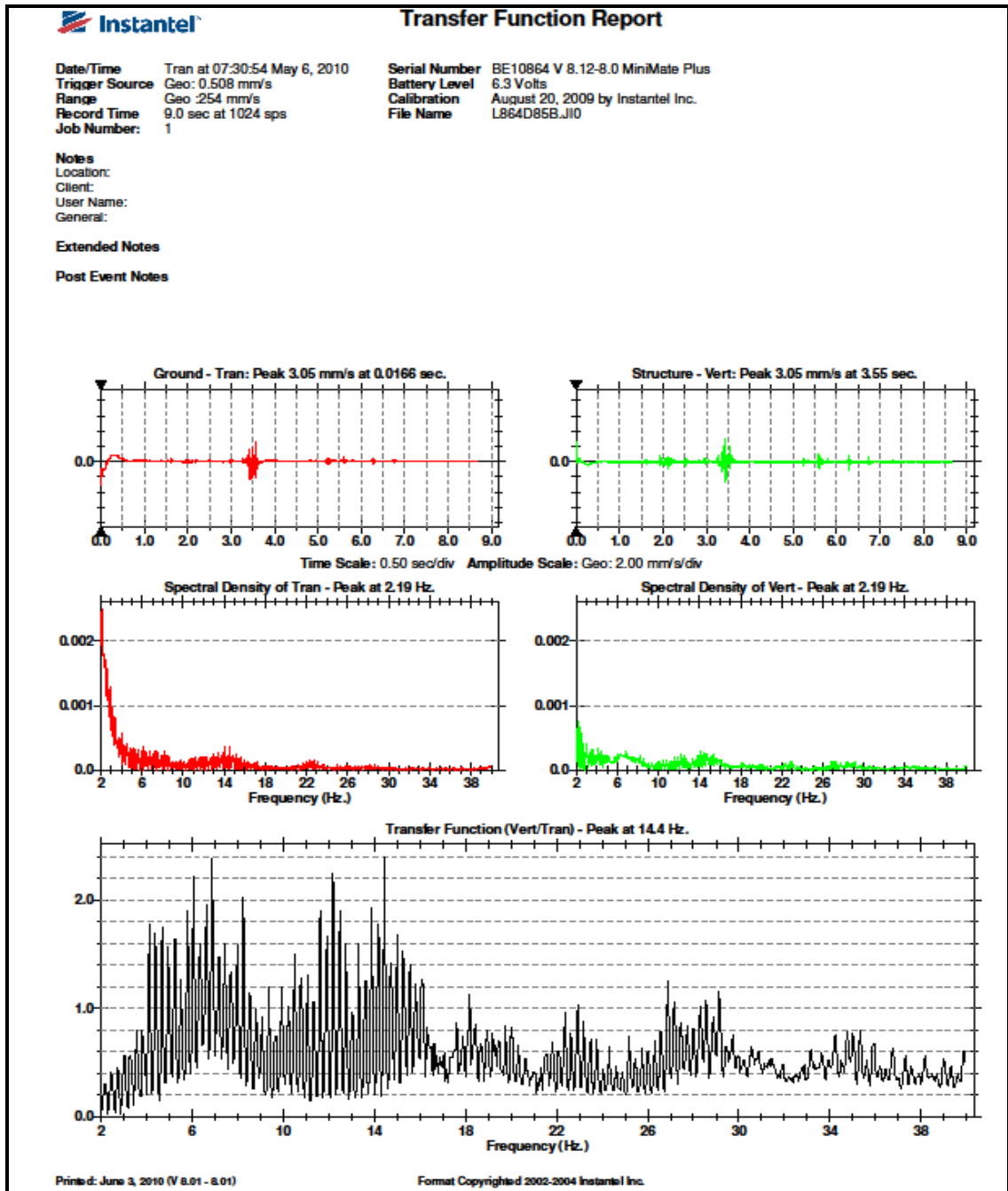
ANEXO III

TIPOS DE FALLA Y AGRIETAMIENTO POR EVENTOS DE VOLADURAS – DESCRIPCION

TIPO DE FALLA	ESQUEMA
<p>Flexión perpendicular al plano del muro. Agrietamiento horizontal en la base o a una altura intermedia y agrietamientos verticales adicionales. Esto se presenta frecuentemente en muros largos.</p>	
<p>Falla por flexión perpendicular al plano del muro con agrietamiento vertical en la zona central. Agrietamiento diagonal que constituye el mecanismo de falla y fisuración en la parte superior.</p>	
<p>Falla por flexión perpendicular al plano en las esquinas no confinadas de muros sueltos, o en esquinas no conectadas efectivamente con los muros transversales.</p>	
<p>Falla por cortante en el plano del muro asociada a altos empujes horizontales. En muchos casos estos agrietamientos están asociados a entrepisos o cubiertas muy pesadas y se ven magnificados con las aberturas correspondientes a las puertas y ventanas en los muros.</p>	
<p>Caída de la cubierta hacia el interior de la vivienda, por encontrarse mal apoyada sobre los muros. Se genera una falla en la zona superior de los muros.</p>	
<p>Falla generalizada de la cubierta por ausencia de un apoyo adecuado o por mala estructuración de ella. Este tipo de mecanismo de falla es frecuente en edificaciones con cubiertas muy pesadas, mal concebidas estructuralmente o con alto grado de deterioro</p>	
<p>Falla que se presenta por mala conexión de los muros del primer piso con los del segundo. En este mecanismo de falla el entrepiso rompe los muros principales en forma casi horizontal, generando la inestabilidad del segundo piso</p>	

ANEXO IV

REGISTRO DEL BLASTWARE DE LOS MONITOREOS DE
FRECUENCIA DE RESONANCIA REALIZADOS EN CASAS DE TAPIAL





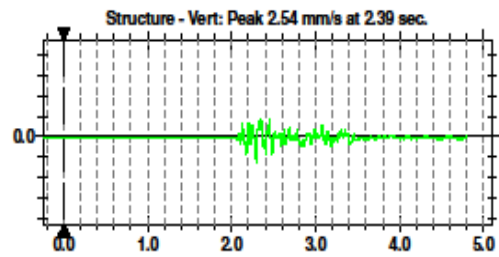
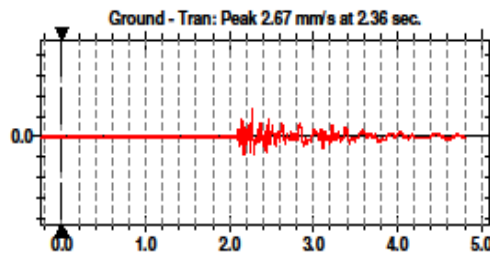
Transfer Function Report

Date/Time	MicL at 08:07:11 October 6, 2009	Serial Number	BE10864 V 8.12-8.0 MiniMate Plus
Trigger Source	Geo: 0.510 mm/s	Battery Level	6.2 Volts
	Mic: 2.00 pa.(L)	Calibration	August 20, 2009 by InstanTel Inc.
Range	Geo: .254 mm/s	File Name	L864CX8R.VZ0
Record Time	5.0 sec at 1024 sps		
Job Number:	3		

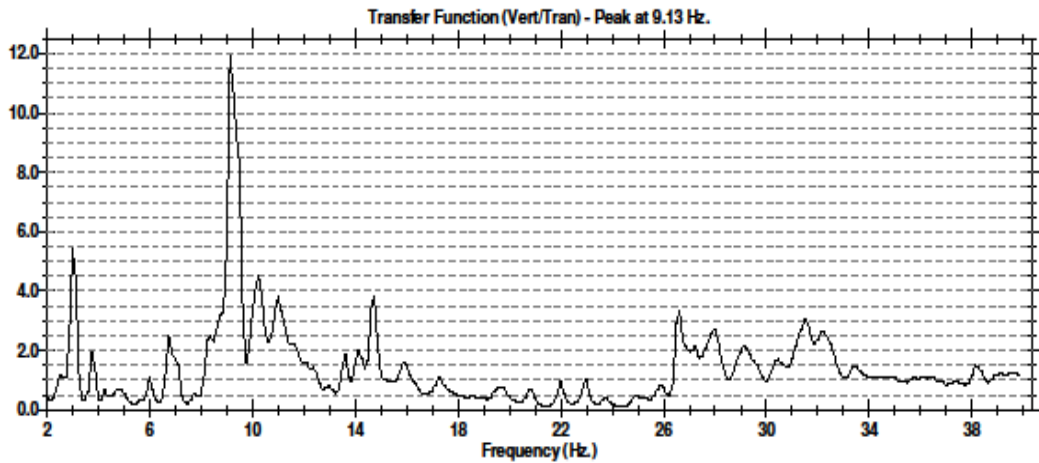
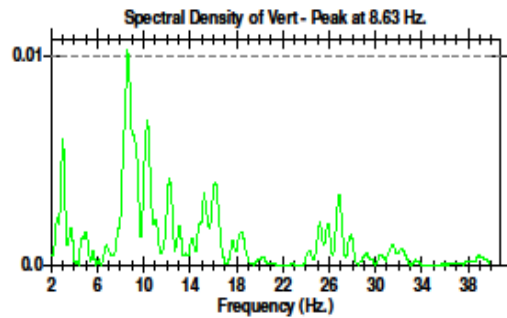
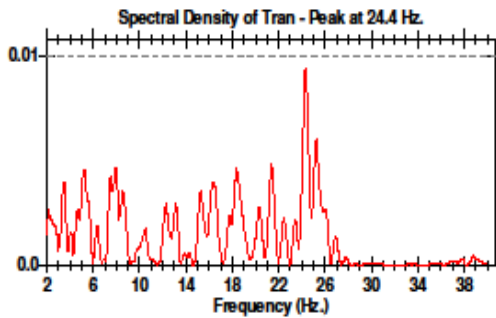
Notes
 Location:
 Client:
 User Name:
 General:

Extended Notes

Post Event Notes



Time Scale: 0.20 sec/div Amplitude Scale: Geo: 2.00 mm/s/div





Transfer Function Report

Date/Time Long at 08:06:50 October 6, 2009
 Trigger Source Geo: 0.510 mm/s
 Range Geo :254 mm/s
 Record Time 3.0 sec at 1024 sps
 Job Number: 1

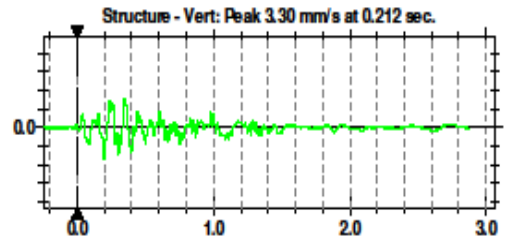
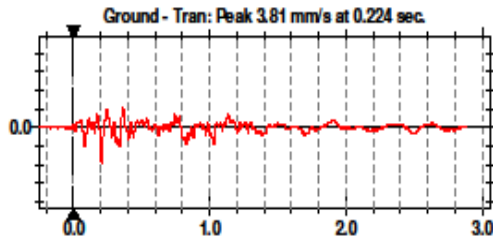
Serial Number BE7411 V 8.12-8.0 MiniMate Plus
 Battery Level 5.9 Volts (Battery Low)
 Calibration April 5, 2007 by InstanTel Inc.
 File Name I411CX8R.VE0

Notes

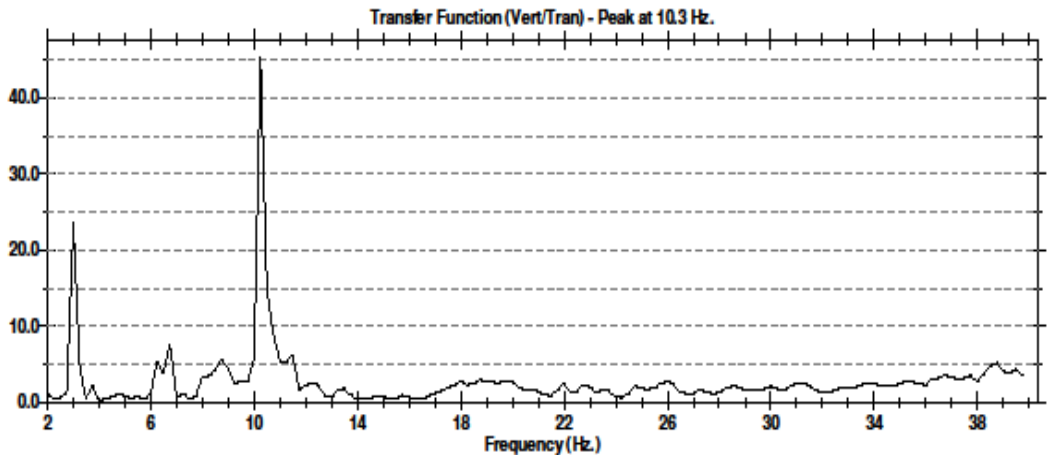
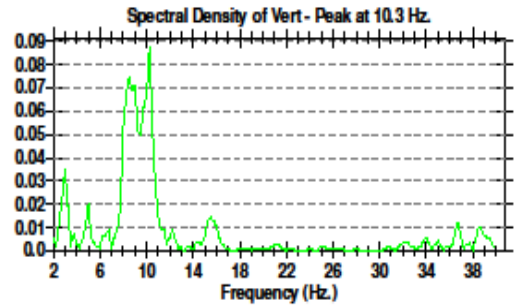
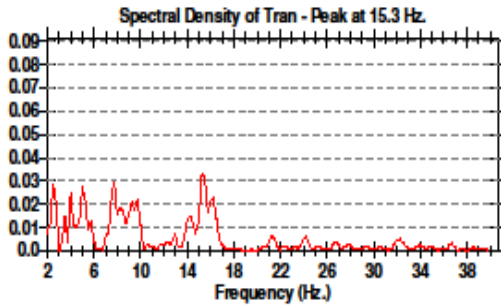
Location: Geofono 01
 Client: Orica Peru SA
 User Name: Team Orica
 General: Control Falla Norte

Extended Notes

Post Event Notes



Time Scale: 0.20 sec/div Amplitude Scale: Geo: 2.00 mm/s/div





Transfer Function Report

Date/Time Long at 08:06:50 October 6, 2009
 Trigger Source Geo: 0.510 mm/s
 Range Geo :254 mm/s
 Record Time 3.0 sec at 1024 sps
 Job Number: 1

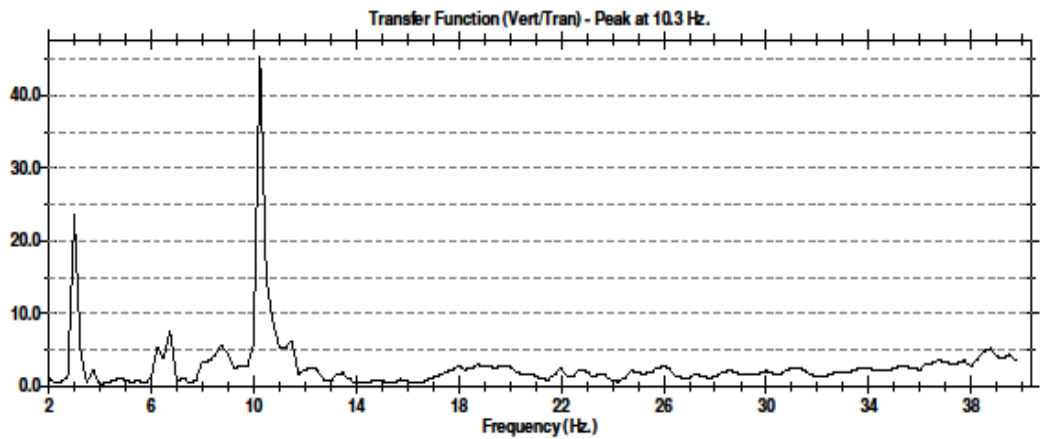
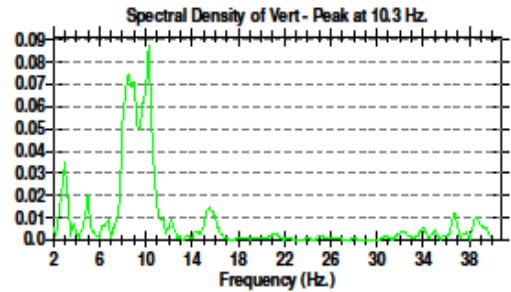
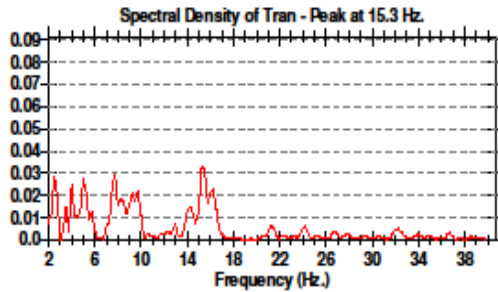
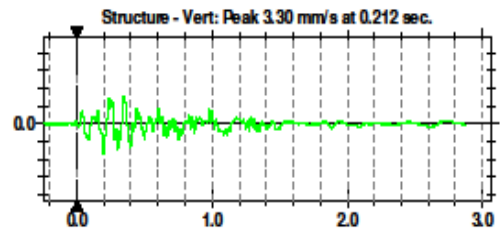
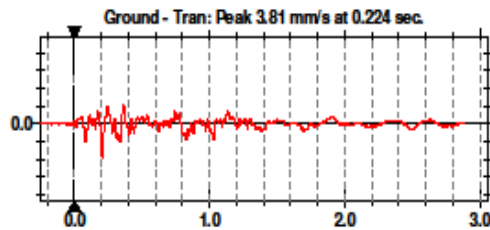
Serial Number BE7411 V 8.12-8.0 MiniMate Plus
 Battery Level 5.9 Volts (Battery Low)
 Calibration April 5, 2007 by InstanTel Inc.
 File Name I411CX8R.VE0

Notes

Location: Geofono 01
 Client: Orica Peru SA
 User Name: Team Orica
 General: Control Falla Norte

Extended Notes

Post Event Notes





Transfer Function Report

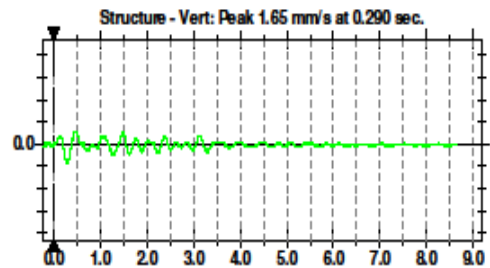
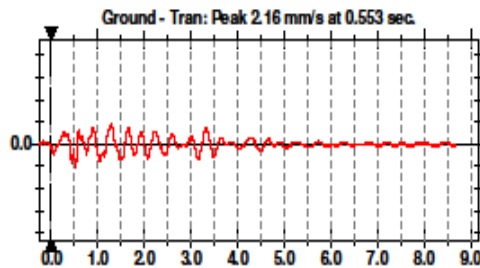
Date/Time	Long at 08:41:24 April 17, 2010	Serial Number	BE7411 V 8.12-8.0 MiniMate Plus
Trigger Source	Geo: 0.510 mm/s	Battery Level	6.0 Volts
Range	Geo :254 mm/s	Calibration	April 5, 2007 by InstanTel Inc.
Record Time	9.0 sec at 1024 sps	File Name	W110768.500

Notes

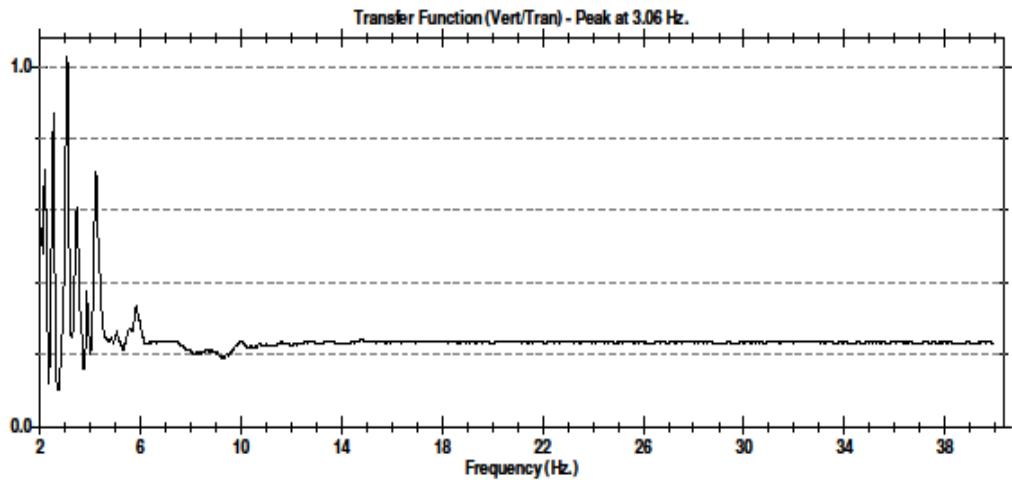
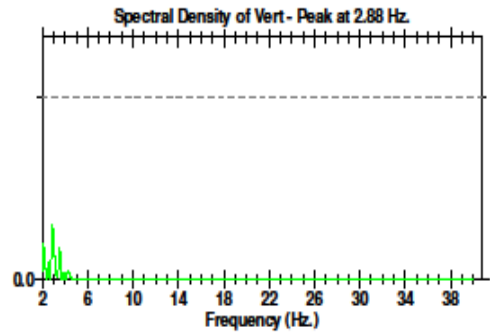
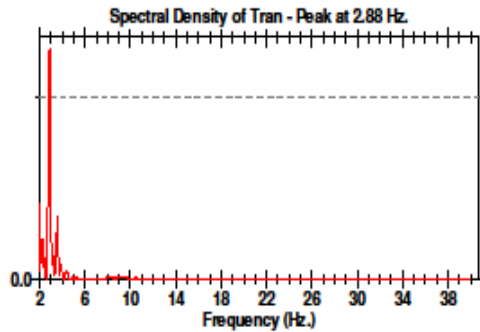
Location:
Client:
User Name:
General:

Extended Notes

Post Event Notes



Time Scale: 0.50 sec/div Amplitude Scale: Geo: 2.00 mm/s/div





Transfer Function Report

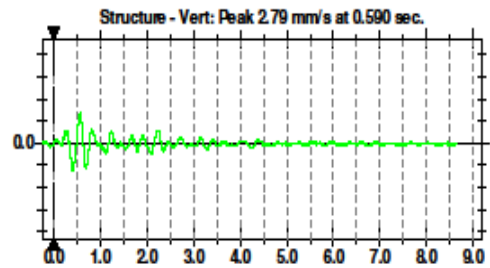
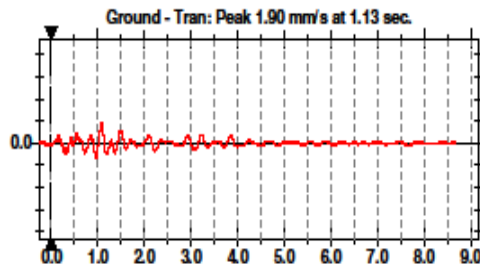
Date/Time	Long at 07:49:28 April 19, 2010	Serial Number	BE7411 V 8.12-8.0 MiniMate Plus
Trigger Source	Geo: 0.510 mm/s	Battery Level	6.1 Volts
Range	Geo :254 mm/s	Calibration	April 5, 2007 by InstanTel Inc.
Record Time	9.0 sec at 1024 sps	File Name	I411079V.2G0

Notes

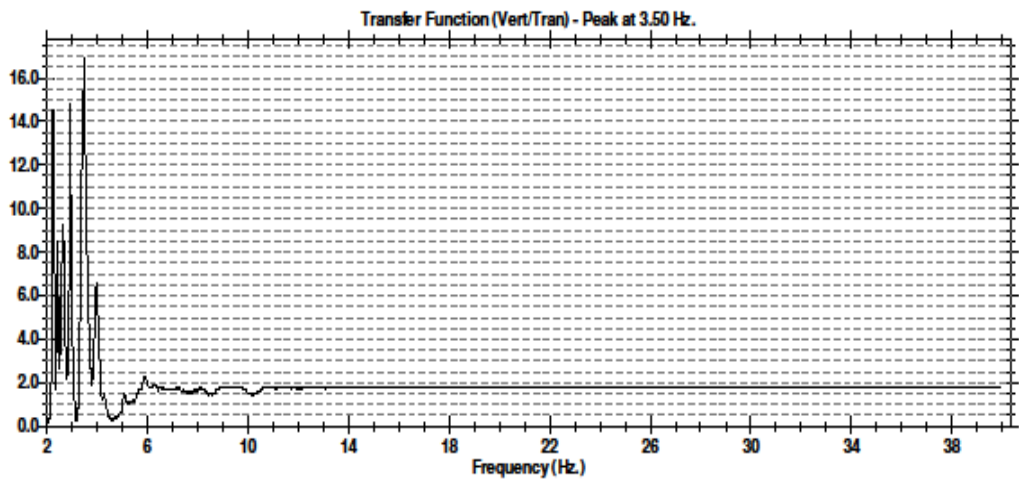
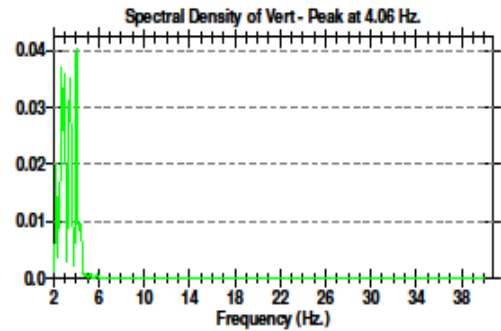
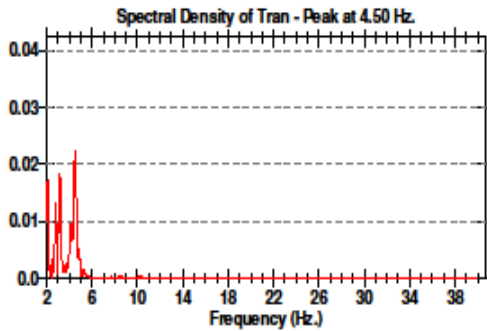
Location:
Client:
User Name:
General:

Extended Notes

Post Event Notes



Time Scale: 0.50 sec/div Amplitude Scale: Geo: 2.00 mm/s/div





Transfer Function Report

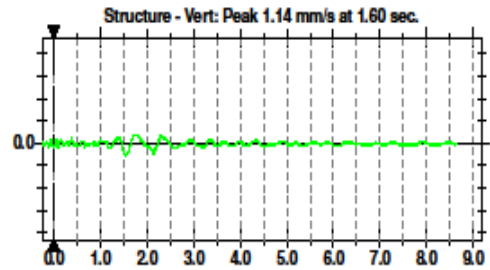
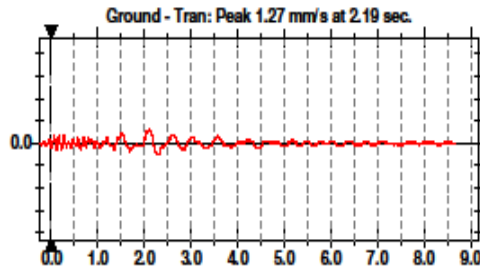
Date/Time	Tran at 07:53:04 April 19, 2010	Serial Number	BE7411 V 8.12-8.0 MiniMate Plus
Trigger Source	Geo: 0.510 mm/s	Battery Level	6.1 Volts
Range	Geo :254 mm/s	Calibration	April 5, 2007 by InstanTel Inc.
Record Time	9.0 sec at 1024 sps	File Name	I411D79V.8G0

Notes

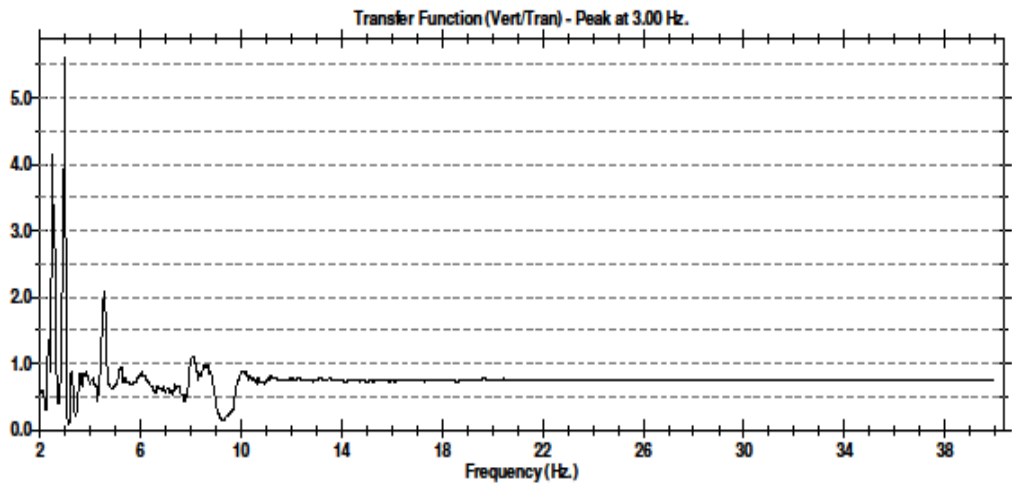
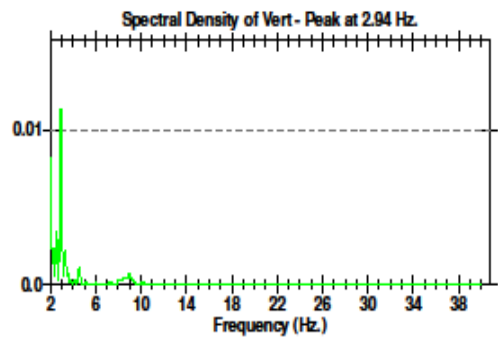
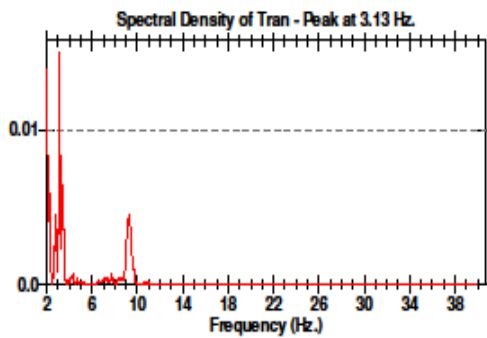
Location:
Client:
User Name:
General:

Extended Notes

Post Event Notes



Time Scale: 0.50 sec/div Amplitude Scale: Geo: 2.00 mm/s/div





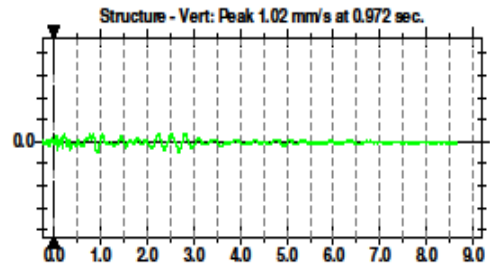
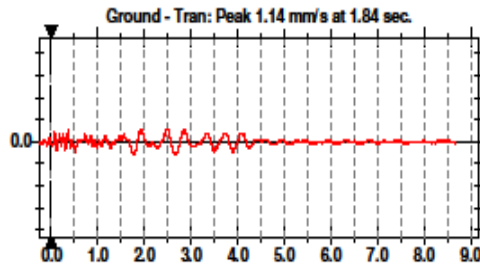
Transfer Function Report

Date/Time	Long at 11:32:20 March 31, 2010	Serial Number	BE7411 V 8.12-8.0 MiniMate Plus
Trigger Source	Geo: 0.510 mm/s	Battery Level	6.1 Volts
Range	Geo :254 mm/s	Calibration	April 5, 2007 by InstanTel Inc.
Record Time	9.0 sec at 1024 sps	File Name	I411D6AY.PW0

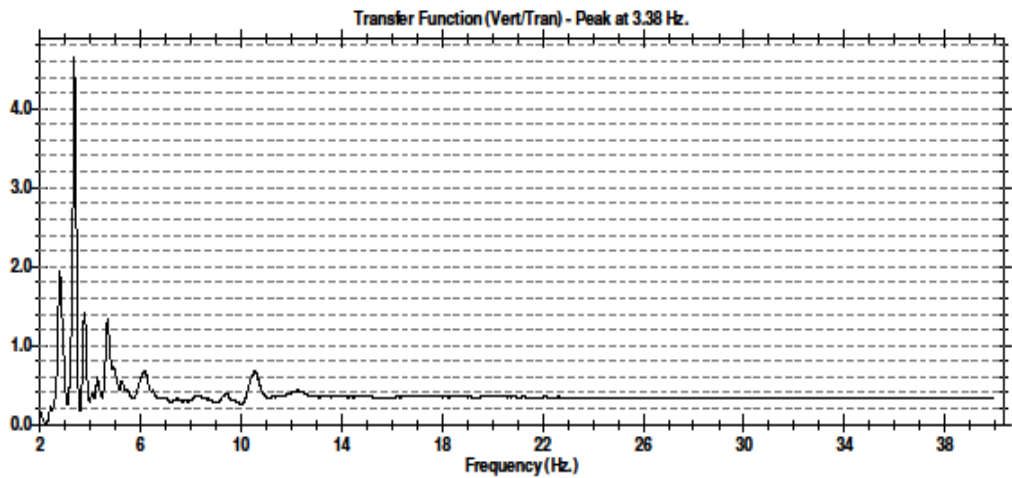
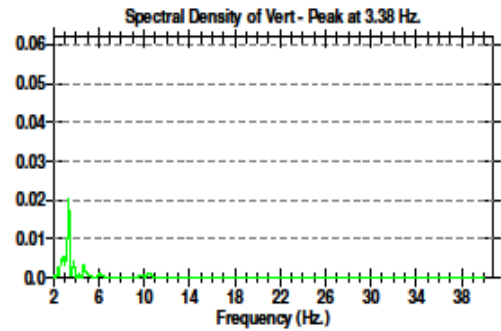
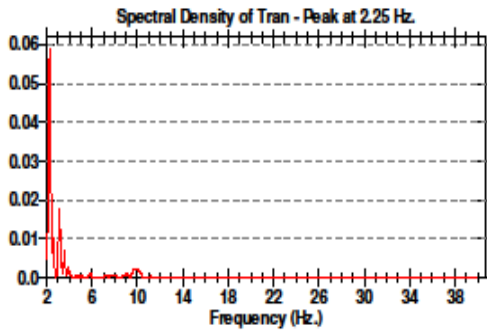
Notes
 Location:
 Client:
 User Name:
 General:

Extended Notes

Post Event Notes



Time Scale: 0.50 sec/div Amplitude Scale: Geo: 2.00 mm/s/div



ANEXO V

REGISTROS DE VIBRACIONES DE LAS VOLADURAS EN CAMPO

LEJANO – YANACOCCHA – LA QUINUA.

Fecha	Mina	Disparo	Mezcla Usada	Kilos/Tal ANFO	Numero de Taladros	Zona	Geofono Superficial										Onda Aerea [dB]	Distancia al Proyecto
							PPV				Tiempo	Frecuency (Hz)			L			
							T	V	L	Vector Suma		T	V	L				
25-Sep	La Quinua	3800	HA-65/35	937.75	217	PBS	1.90	3.17	2.41	3.53	2.00	8.7	7.4	6.0		715		
06-Oct	La Quinua	3612	HA-65/35	937.75	80	PBS	2.03	2.87	2.41	4.13	0.89	2.6	3.1	3.1		671		
06-Oct	La Quinua	3612	HA-65/35	937.75	80	PBS	3.81	3.30	2.92	5.83	1.21	15.3	10.3	3.0	105	665		
06-Oct	La Quinua	3612	HA-65/35	937.75	80	PBS	2.67	2.54	3.94	5.39	1.10	24.4	8.6	24.4		735		
07-Oct	La Quinua	3600	HA-65/35	937.75	256	PBS	4.57	6.86	6.60	7.83	0.89	11.0	9.8	13.0		806		
07-Oct	La Quinua	3600	HA-65/35	937.75	256	PBS	4.40	5.71	5.97	8.14	0.78	27.0	12.0	12.0		880		
09-Oct	La Quinua	3688	HA-65/35	937.75	430	PBS	1.40	2.29	1.90	2.85	1.58	21.0	8.1	14.0		1,072		
09-Oct	La Quinua	3688	HA-65/35	937.75	430	PBS	1.40	1.52	0.13	1.81	0.93	10.0	20.0	10.0		1,148		
11-Oct	La Quinua	3688	HA-65/35	937.75	170	PBS	2.16	1.82	0.25	2.29	1.02	13.0	20.0	13.0		717		
11-Oct	La Quinua	3688	HA-65/35	937.75	170	PBS	2.41	2.67	0.25	3.21	0.64	12.0	11.0	12.0		788		
12-Oct	La Quinua	3688	HA-65/35	937.75	224	PBS	2.54	3.05	2.92	3.54	0.12	12.0	14.0	13.0		1,006		
13-Oct	La Quinua	3688	HA-65/35	937.75	280	PBS	2.16	2.29	2.41	3.01	0.43	15.0	12.0	20.0		900		
14-Oct	La Quinua	3688	HA-65/35	937.75	101	PBS	1.78	2.54	1.90	2.62	0.23	13.0	13.0	13.0		1,090		
14-Oct	La Quinua	3688	HA-65/35	937.75	101	PBS	2.67	2.79	3.56	3.86	0.39	16.0	12.0	14.0		1,157		
15-Oct	La Quinua	3688	HA-65/35	937.75	145	PBS	3.05	2.79	3.81	4.69	0.75	13.0	9.7	20.0		1,053		
16-Oct	La Quinua	3688	HA-65/35	937.75	100	PBS	2.16	1.90	1.65	2.81	1.27	14.0	19.0	6.7		893		
20-Oct	La Quinua	3688	HA-65/35	937.75	475	PBS	2.16	2.67	2.29	3.29	0.23	3.0	12.0	12.0		866		
20-Oct	La Quinua	3688	HA-65/35	937.75	475	PBS	2.03	2.87	2.29	3.50	0.29	13.0	12.0	9.7		935		
20-Oct	La Quinua	3688	HA-65/35	937.75	475	PBS	2.29	3.30	6.86	6.96	0.96	13.0	13.0	32.0		972		
26-Oct	La Quinua	3688	HA-65/35	937.75	258	PBS	1.78	2.29	2.16	2.86	0.87	21.0	8.8	11.5		758		
26-Oct	La Quinua	3688	HA-65/35	937.75	258	PBS	1.52	2.16	1.78	2.60	0.78	3.9	7.9	11.9	109	753		
27-Oct	La Quinua	3688	HA-65/35	937.75	257	PBS	3.17	2.92	5.71	5.72	0.99	22.0	24.0	13.8		825		
27-Oct	La Quinua	3688	HA-65/35	937.75	257	PBS	1.78	3.05	3.05	3.77	2.69	3.2	17.7	13.7	113	800		
30-Oct	La Quinua	3676	HA-65/35	937.75	47	PBS	0.89	2.29	1.78	2.63	0.24	13.3	13.5	13.0		1,088		
30-Oct	La Quinua	3676	HA-65/35	937.75	47	PBS	1.02	1.90	1.78	2.08	0.26	12.2	13.7	13.1		1,098		
04-Nov	La Quinua	3600	HA-65/35	937.75	157	PBS	1.65	2.03	2.67	2.74	0.90	18.0	13.0	13.0	108	876		
04-Nov	La Quinua	3600	HA-65/35	937.75	157	PBS	1.90	2.03	2.29	2.70	2.06	2.1	6.9	14.6		877		
06-Nov	La Quinua	3688	HA-65/35	937.75	134	PBS	1.78	2.79	2.67	3.59	0.51	16.0	21.0	16.8		707		
06-Nov	La Quinua	3688	HA-65/35	937.75	134	PBS	2.79	3.30	2.79	3.51	0.48	14.0	15.0	14.0	104	712		
10-Nov	La Quinua	3672	HA-65/35	937.75	254	PBS	0.51	0.76	0.64	0.78	0.80	34.0	32.0	26.0		1,546		
10-Nov	La Quinua	3672	HA-65/35	937.75	254	PBS	0.38	0.64	0.51	0.68	0.23	28.0	17.0	17.0		1,551		
17-Nov	La Quinua	3676/122/133/134	HA-65/35	937.75	489	PBS	2.54	2.67	2.03	3.14	0.27	32.0	16.0	24.0		1,177		
17-Nov	La Quinua	3676/122/133/134	HA-65/35	937.75	489	PBS	0.89	1.14	0.76	1.26	0.19	4.7	14.0	21.0		1,106		
17-Nov	La Quinua	3676/122/133/134	HA-65/35	937.75	489	PBS	0.89	1.27	1.40	1.82	0.32	2.9	2.6	2.7		1,213		
18-Nov	La Quinua	3688/367/390	HA-65/35	937.75	489	PBS	0.51	0.38	0.64	0.70	0.91	3.9	26.0	3.1		1,190		

Geófono Superficial															
Fecha	Mina	Disparo	Mezcla Usada	Kilos/Tal ANFO	Numero de Taladros	Zona	PPV				Frequency (Hz)			Onda Aerea [dB]	Distancia al Proyecto
							T	V	L	Vector Suma	Tiempo	T	V		
20-Nov	La Quinua	3588-287-380	HA-65/35	937.75	214	PBS	2.48	1.78	1.65	2.90	0.13	37	28	34	918
20-Nov	La Quinua	3588-287-380	HA-65/35	937.75	214	PBS	0.89	0.64	0.77	1.23	1.82	2.6	16	2.7	994
20-Nov	La Quinua	3588-287-380	HA-65/35	937.75	214	PBS	1.02	1.52	2.67	2.82	0.57	22	23	22	1,033
23-Nov	La Quinua	3588	HA-65/35	937.75	185	PBS	1.79	2.10	1.56	3.17	0.24	7.6	10.8	5.4	1,160
23-Nov	La Quinua	3588	HA-65/35	937.75	185	PBS	1.76	2.05	1.65	3.17	0.31	5.4	7.5	6.5	1,159
23-Nov	La Quinua	3588	HA-65/35	937.75	185	PBS	1.84	2.24	1.76	3.39	0.54	3.2	4.3	3.6	1,190
26-Nov	La Quinua	3588	HA-65/35	937.75	60	PBS	6.22	5.97	3.30	8.510	0.06	20.9	14.9	32	1,078.3
01-Dic	La Quinua	3576	HA-65/35	937.75	256	PBS	1.48	1.86	1.24	2.68	0.50	11.15	18	18	1,182.0
01-Dic	La Quinua	3576	HA-65/35	937.75	256	PBS	1.03	1.52	1.67	2.48	0.41	5.6	13	6	1,220.9
01-Dic	La Quinua	3576	HA-65/35	937.75	256	PBS	1.12	1.34	1.10	2.06	0.30	6	13	10.8	1,252.2
04-Dic	La Quinua	3576	HA-65/35	937.75	87	PBS	2.00	2.64	2.38	4.05	0.99	2.6	3.1	3.1	830.619
04-Dic	La Quinua	3576	HA-65/35	937.75	87	PBS	3.81	3.30	2.92	5.83	1.21	15.3	10.3	3.0	868.085
04-Dic	La Quinua	3576	HA-65/35	937.75	87	PBS	2.50	2.44	3.56	4.99	1.00	5.9	8.6	6.0	898.446
06-Dic	La Quinua	3576	HA-65/35	937.75	310	PBS	0.89	1.90	1.52	2.600	0.20	3.1	3	2.98	1,085.7
06-Dic	La Quinua	3576	HA-65/35	937.75	310	PBS	0.51	2.03	1.27	2.400	0.31	2.94	2.06	12.4	1,124.3
06-Dic	La Quinua	3576	HA-65/35	937.75	310	PBS	0.38	1.40	0.25	1.470	0.41	2.06	2.06	2.06	1,155.5
08-Dic	La Quinua	3576	HA-65/35	937.75	218	PBS	1.03	1.59	1.22	1.780	0.434	2	11	2.25	1,094.4
08-Dic	La Quinua	3576	HA-65/35	937.75	218	PBS	0.34	0.56	0.44	0.600	0	25.5	22.5	17.8	1,127.7
12-Dic	La Quinua	3576	HA-65/35	937.75	276	PBS	2.25	3.24	2.00	2.35	0.45	2.06	2.3	2.06	1,215.5
12-Dic	La Quinua	3576	HA-65/35	937.75	276	PBS	2.00	2.45	2.00	2.10	0.54	2.35	2.56	2.35	1,254.2
12-Dic	La Quinua	3576	HA-65/35	937.75	276	PBS	1.77	2.15	1.89	1.98	0.85	3.1	3.23	3.1	1,285.3
13-Dic	La Quinua	3576	HA-65/35	937.75	120	PBS	1.20	1.40	0.80	1.100	0.2	2.8	3.11	2.54	1,060.0
13-Dic	La Quinua	3577	HA-65/36	937.75	120	PBS	1.35	1.58	1.10	1.230	0.21	2.6	5.4	2.7	1,106.1
13-Dic	La Quinua	3578	HA-65/37	937.75	120	PBS	0.56	0.78	0.56	0.690	0.5	12	10	12	1,136.8
15-Dic	La Quinua	3576	HA-65/35	937.75	164	PBS	1.14	1.78	1.14	1.850	0.52	12	20	12	986.6
15-Dic	La Quinua	3576	HA-65/35	937.75	164	PBS	0.76	1.02	1.14	1.300	0.53	7.3	9.7	24	1,129.6

Tabla de Monitoreo Vibraciones Abril (La Quinua - Pushback Sur)											
Fecha	Explosivo HA-65/35	Coordenadas de Geofonos				Distancia [m]	PPV				
		Este	Norte	Cota	T		V	L	Vector Sum	Tiempo	T
07-Abr-10	10702	13141.1	25627.5	3576	400	14	15	13.6	18.1	1.448	5.06
15-Abr-10	6860	13505.4	25563.8	3816	550	2.29	2.41	6.22	6.69	0.908	3.06
		13141.1	25627.5	3576	300	14.9	10.9	34.9	36.9	0.578	4.56
17-Abr-10	24010	13505.4	25563.8	3816	950	1.9	1.9	2.54	2.98	0.667	2.84
23-Abr-10	13034	13636	25967.4	3780	650	3.68	2.92	4.57	5.74	2.22	2.13
25-Abr-10	7134	13636	25967.4	3780	550	2.03	1.9	5.46	5.67	1.132	2.94

Tabla de Monitoreo Vibraciones Mayo (La Quinua - Pushback Sur)													
Fecha	Explosivo HA-65/35	Coordenadas de Geofonos				Distancia [m]	PPV				Frecuencia [Hz]		
		Este	Norte	Cota	T		V	L	Vector Sum	Tiempo	T	V	L
La Quinua	03-May-10	13141.1	25627.5	3576	300	56.9	45.7	42.8	0.087	68	14.6	8.31	4.63
La Quinua	09-May-10	13636	25967.4	3780	850	1.02	0.889	1.27	1.37	1.361	3.5	2.19	2.19
La Quinua	11-May-10	13505.4	25563.8	3816	750	1.52	1.02	0.889	1.87	0.619	2.56	2.88	2
La Quinua	17-May-10	13505.4	25563.8	3816	1100	1.4	1.02	1.52	1.77	1.413	2.38	2.88	2.75
Chaquicocha	19-May-10	18225.7	26424.5	3870	120	64.3	99.4	104	138	6.854	9.97	20.1	15
La Quinua	20-May-10	13141.1	25627.5	3576	180	55.4	53.7	57.7	80.6	0.766	2.06	3.66	2.53

Tabla de Monitoreo Vibraciones Mayo (La Quinua - Pushback Sur)													
Tajo	Fecha	Explosivo Kg/ANFO	Explosivo HA-37	Explosivo HA-46	Explosivo HA-65/35	Coordenadas de Geofonos			Distancia [m]	PPV			
						Este	Norte	Cota		T	V	L	Vector Sum
La Quinua	17-Jun-10		9050	64224		13141	25628	3576	400	3.68	3.43	3.56	4.76

ANEXO VI

INFORME GEOLOGICO – CASA SEÑOR JUAN VILLANUEVA –

QUISHUAR

INFORME GEOLOGICO – CASA SEÑOR JUAN VILLANUEVA – QUISHUAR

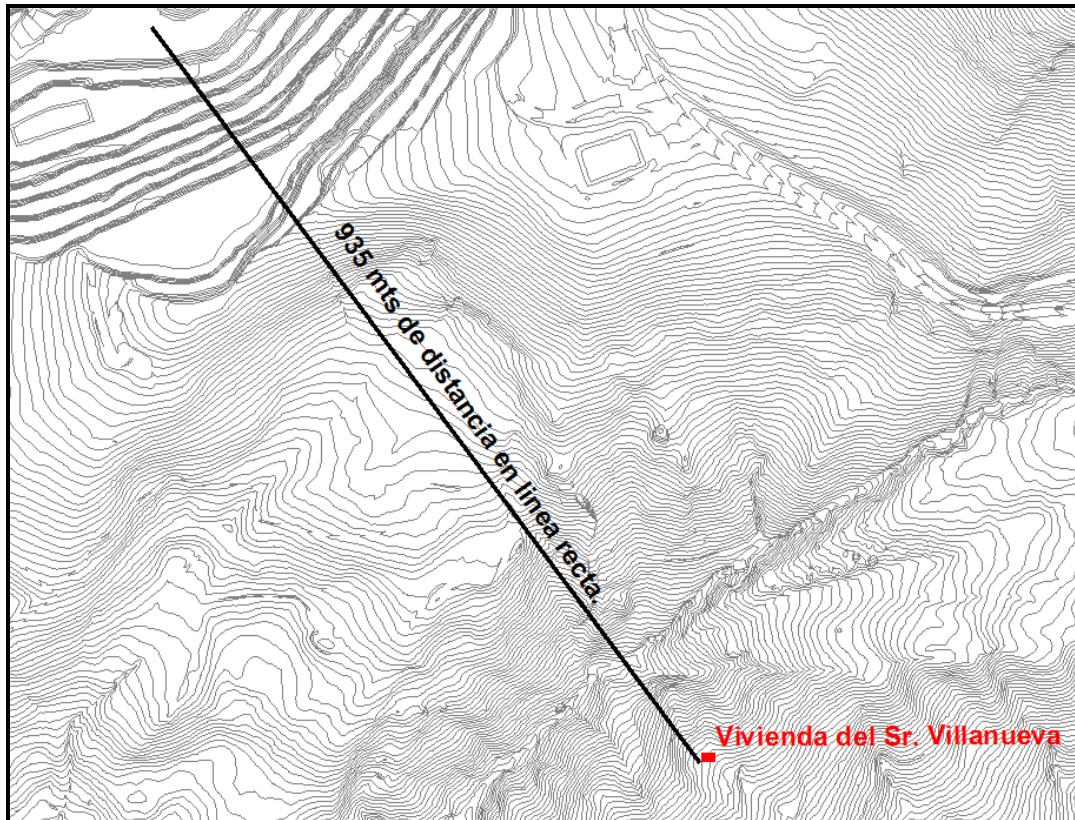
El día 07 de de Octubre aproximadamente a las 9: 45 am se realizo una visita técnica a la casa del Sr. Villanueva ubicada en los alrededores de la Mina (Pit de La Quinoa) con la finalidad de brindar nuestra apreciación geológica de área donde se ubica la vivienda afectada conjuntamente con personal de geotecnia y otros.

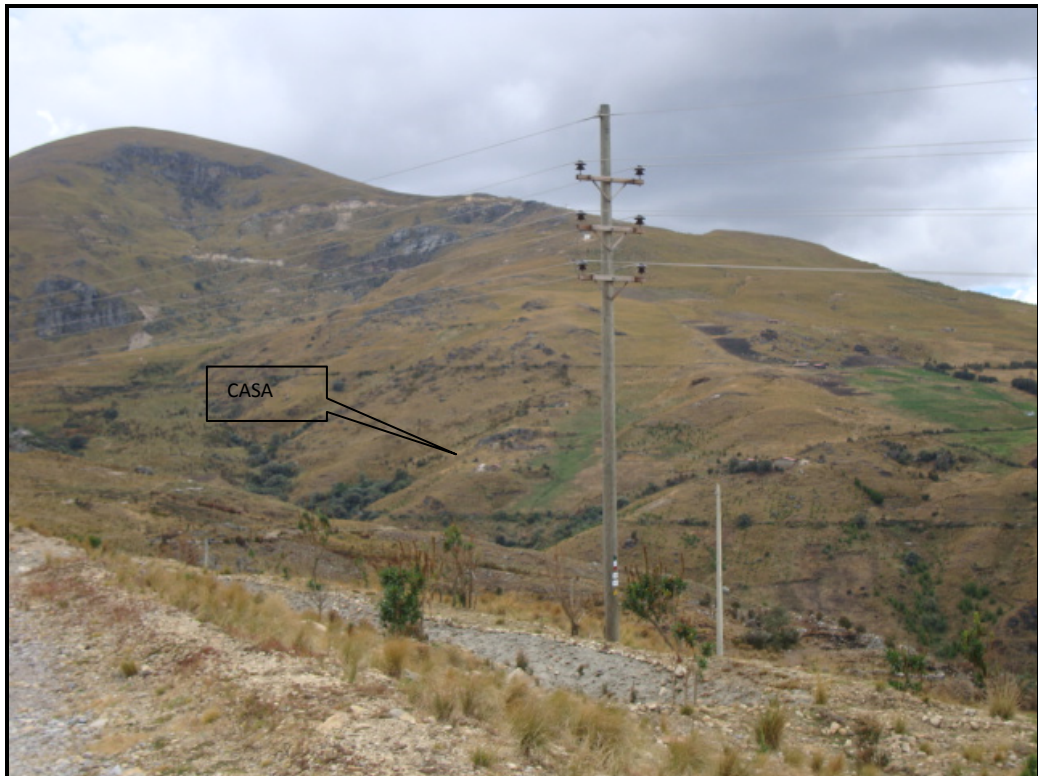
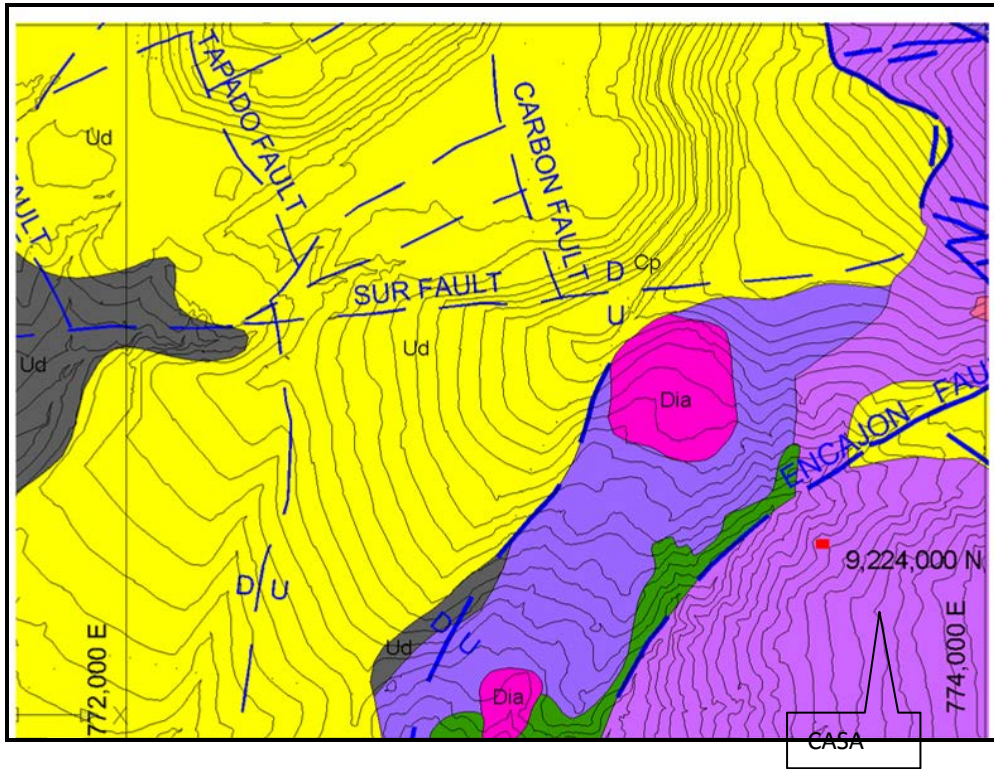
En el área se encontraron los propietarios de la vivienda, los que se inicialmente se opusieron a que se efectuó algún tipo de evaluación por parte geología.

Concedida la autorización del caso se procedió a evaluar el área.

- Las vivienda afectada (derrumbada) se encuentran ubicada aproximadamente a 935 mts de la operación, (Figura 01) sobre un suelo rocoso compacto, geológicamente inalterado (roca fresca a ligeramente propilitizada) y estable.
- Corroborando los mapeos de la zona se ha identificado cercana a la vivienda la existencia de fallas geológicas (Falla Encajon) de carácter regional como se muestra en la figura 2. por otro lado no se observa evidencia de que estas fallas se encuentren activas y hayan influido en el derrumbamiento de la casa.

- En los alrededores de la vivienda (5 - 10mts aprox.) se pueden observar afloramientos rocosos, geológicamente con alteraciones de tipo silíceo (Sílice Masiva a Argilico. avanzado)(Foto 2 y 3)
- Mas hacia el sur en un segundo grupo de viviendas supuestamente afectadas se pudo apreciar también afloramientos rocosos con características similares a al grupo anterior. (Foto 4)









Apreciación Geológica del Problema para una mayor información:

Es sabido que las voladuras en una Mina son una forma de producir sismos de forma artificial y al igual que los naturales se generan ondas sísmicas que dependiendo de la magnitud podrían generar daños a estructuras.

En el mundo de la Geología la magnitud del sismo se puede obtener de los sismogramas generados por los sismógrafos, por lo que sería necesario un sismo de más de 5.5 grados según la escala de Richter, para ocasionar daños a edificaciones.


Una buena manera de imaginarse la energía disipada por un terremoto o sismo según la escala de Richter es compararlo con la energía de la detonación de TNT. Notar que por cada grado que aumenta la magnitud, la energía aumenta hasta 30 veces. (Información teórica obtenido de la Web. para consulta)

Magnitud Richter	Equivalencia en TNT	Ejemplo
-1.5	1 gr	Romper una piedra
1	6 onz	barreno pequeño
1.5	2 libras	
2	13 libras	
2.5	63 libras	
3	397 libras	
3.5	1000 libras	Mina
4	6 tn	
4.5	32 tn	Tornado
5	199 tn	
5.5	500 tn	Terremotos
6	1270 tn	
6.5	31550 tn	
7	199000 tn	
7.5	1 Megatón	
8	3.27 Megatones	
8.5	31.55 Megatones	
9	200 Megatones	
10	6300 Megatones	Falla de San Andrés
12	1 Gigatón	Romper la tierra en 2

ANEXO VII

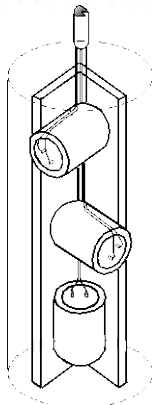
CARACTERÍSTICAS DE LOS GEOFONOS DE CAMPO CERCANO Y

CAMPO LEJANO



DIGITAL ENERGY CONTROL

**Características Técnicas
Geófono Triaxial (Campo Cercano)**




Componente Radial

Componente Transversal


Componente Vertical

**Detalles Placa de Identificación
(Características Técnicas)**


Resistencia [Ohm]	: 35.5/ 35.9
Sensibilidad [V/mm/s]	: 0.0008057
Nº Serie	: 736-01-14




Arreglo Triaxial con Placa de Identificación
(Nro Serie, Resistencia, Sensibilidad)



Arreglo Triaxial en Tubo de PVC de 50mm,
placa de Identificación y 15 m de Cable
Multifilar.

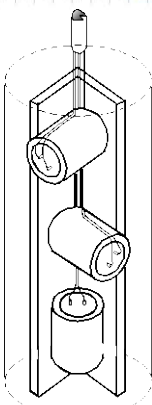


Disposición Ortogonal sensores para configurar un Geófono Triaxial (Recubierta de Resina para protección)



DIGITAL ENERGY CONTROL

**Características Técnicas
Geófono Triaxial (Campo Lejano)**




Componente Radial

Componente Transversal


Componente Vertical

**Detalles Placa de Identificación
(Características Técnicas)**


Resistencia [Ohm]	: 334.6
Sensibilidad [V/mm/s]	: 0.006445
Nº Serie	: 736-01-14



Arreglo Triaxial con Placa de Identificación
(Nro Serie, Resistencia, Sensibilidad)



Arreglo Triaxial en Tubo de PVC de 50mm,
placa de Identificación y 15 m de Cable
Multifilar.



Disposición Ortogonal sensores para configurar un Geófono Triaxial (Recubierta de Resina para protección)