

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS



T
E
S
I
S



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES

CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y LA CONSTRUCCIÓN

***CRITERIOS DE DISEÑO PARA CIMENTACION DE
MAQUINARIA***

*TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CON SALIDA EN
SEGURIDAD ESTRUCTURAL*

PRESENTA

ING. DANIEL ENRIQUE REYNA VALDIVIA

TUTOR. M. en I. ENRIQUE MENDOZA OTERO

Aguascalientes, Ags. 15 FEBRERO 2009

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

DC-D-395
ASUNTO: Autorización de
Tema de Maestría.

**ING. DANIEL ENRIQUE REYNA VALDIVIA
P R E S E N T E .**

Con base en lo que establece el Reglamento de Docencia en el artículo 173, le informo que se le autoriza el Tema de tesis: "Criterios de Diseño para Cimentación de Maquinaria". Así mismo se le designa como asesor al M. en Ing. Enrique Mendoza Otero. A fin de asignarle fecha para la verificación del Examen de Grado para la obtención del título de la Maestría en Ingeniería con salida terminal en Seguridad Estructural, deberá cumplir con lo establecido en los artículos 161, 162, 174 y 175.

Con el objeto de dar cumplimiento a este reglamento el paso siguiente será autorizar la impresión de su tesis, toda vez que presente la carta de liberación y/o acuerdo señalado en la Fracc. II del artículo 175.

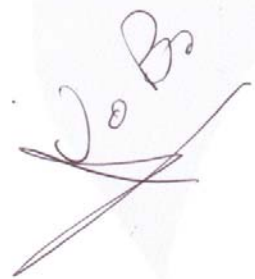
Sin más por el momento, aprovecho la oportunidad para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
" SE LUMEN PROFERRE "
Aguascalientes, Ags. /16- de octubre 2008

M. EN A. MARIO ANDRADE CERVANTES
DECANO

c.c.p. M. EN URB. HUMBERTO DURAN LOPEZ
Secretario de Investigación y Posgrados.
c.c.p. M. EN VAL JUAN JAVIER AMADOR ROMO DE VIVAR
Jefe del Depto. de Construcción y Estructuras.
c.c.p. Archivo.

JJARV/lbm



TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

**M. EN A. MARIO ANDRADE CERVANTES
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO
Y DE LA CONSTRUCCION
PRESENTE.**

Por este conducto, le informo que el Ing. Daniel Enrique Reyna Valdivia, ha concluido la tesis que lleva por nombre **"Criterios de Diseño para Cimentación de Maquinaria"**, de acuerdo a los objetivos y contenidos planteados para su autorización y en cuya tesis fungí como asesor, por lo que he autorizado al sustentante para que realice la impresión final del documento y realice los trámites pertinentes para obtener el grado de Maestría en Ingeniería con salida terminal en Seguridad Estructural, por la Universidad Autónoma de Aguascalientes.

Agradezco la atención que se sirva tener a la presente y aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Aguascalientes, Ags. a 17 de Febrero del 2009

Edmendoza
M. en Ing. ENRIQUE MENDOZA OTERO
DIRECTOR DE TESIS

c.c.p. Ing. Daniel Enrique Reyna Valdivia
c.c.p. Archivo

23/02/09

[Signature]

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi profundo agradecimiento a la Universidad Autónoma de Aguascalientes, en especial al Centro de las Ciencias del Diseño y de la Construcción, en el cual me ha tocado participar en labores docentes durante los últimos quince años de mi vida y que ahora pasan ambos a formar mi segunda alma mater al permitirme cursar esta maestría.

A todos los maestros y compañeros que, con sus consejos y comentarios me motivaron a llegar al término de los estudios.

Pero sobre todo, quiero agradecer la valiosa ayuda que recibí del M. en Ing. Enrique Mendoza Otero, por sus valiosos comentarios, dedicación y apoyo para terminar este trabajo.

DEDICATORIA

A la compañera de mi vida en estos últimos veinticinco años, por su apoyo y paciencia, los que me motivaron a llegar a la meta. Gracias Aurora.

A las otras dos dueñas de mi corazón, Laura y Sandra, esperando que esto les sirva de motivo para ser ellas.

A mis hermanos Rodolfo y Consuelo así como a mis sobrinos Abraham, Samuel, Carla y Emilia, igualmente a mis cuñados y familiares.

A mi Padre, Daniel

A la memoria de mi adorada Madre, Enriqueta, que siempre me ha acompañado.

RESUMEN

Las cimentaciones de maquinaria forman una parte importante y compleja de la actuación de la ingeniería civil, sobre todo considerando que para un buen diseño se deberá de realizar análisis dinámico, el que lleva implícito conocer las características dinámicas del suelo. Desafortunadamente, en el pasado, el diseño ha estado basado más en planteamientos empíricos y recetas, resultado de la experiencia de los diseñadores, que en procedimientos analíticos. Con el avance de los conocimientos y el tratamiento dinámico de las estructuras se han llegado a establecer criterios de diseño para diferentes grupos de maquinas, considerando las características particulares de cada una de ellas, estableciéndose entonces métodos de diseño que involucran las fuerzas desbalanceadas actuantes en la maquinaria y al mismo tiempo las características del suelo de desplante. Los modelos matemáticos planteados, son del tipo masa-resorte y masa-resorte-amortiguamiento del suelo.

En esta tesis se tratan de mostrar las diferentes metodologías que se usan en la actualidad; a manera de contar con un solo documento que involucre las características que deben tomarse en cuenta en el diseño de este tipo de estructuras, con la intención de conocer de manera más clara los problemas que involucra la operación inadecuada de la maquinaria, tales como vibraciones perjudiciales a la estructura y problemas de rendimiento en el personal que las opera, además de acarrear gastos de mantenimiento que pudieron minimizarse con un buen diseño. Se espera que este trabajo sirva para efectuar análisis más eficientes. También se trata en este trabajo de efectuar una comparación entre los resultados de la vibración transmitida al terreno de desplante por una máquina de impacto modelada analíticamente por medio del método del elemento finito y las mediciones obtenidas en campo con un acelerógrafo, esto con objeto de verificar que en el diseño de la cimentación se debe de contemplar el nivel de perturbaciones (aceleración, velocidad y desplazamiento), que induce la operación del equipo, teniendo implícitas las características de masa y geometría de la cimentación y las características del suelo de desplante.

Ligado a lo anterior, es importante mencionar que se detalla en la parte final de este trabajo, un área no muy explorada en este tipo de problemas y consiste en una metodología a usar para determinar las características de aceleración, velocidad y desplazamiento del terreno circundante de un equipo vibratorio, para esto, se utilizó un acelerógrafo Etna, propiedad de la Universidad Autónoma de Aguascalientes.

Índice

Cap. 1	Introducción.	1
1.1	Alcance del estudio.	2
1.2	Objetivos.	2
1.3	Conclusiones.	3
Cap. 2	Clasificación de tipos de maquinaria y sus cimentaciones.	5
2.1	De acuerdo al tipo de carga excitadora.	5
2.1.1	Máquinas Reciprocantes.	5
2.1.2	Máquinas Rotatorias.	7
2.1.3	Máquinas de Impacto.	9
2.1.4	Equipos Especiales.	11
2.2	De acuerdo al criterio de diseño de la cimentación.	11
2.3	De acuerdo a su frecuencia de operación.	12
2.4	Requerimientos generales para diseño de cimentaciones de maquinaria.	13
Cap. 3	Propiedades dinámicas del terreno de desplante.	15
3.1	Técnicas de Laboratorio.	16
3.1.1	Ensayes de Pulsos Ultrasónicos.	16
3.1.2	Ensayes de Columna Resonante.	17
3.1.3	Ensayes del Péndulo de Torsión.	18
3.1.4	Ensaye Triaxial Cíclico.	19
3.1.5	Ensaye de corte simple cíclico.	20
3.1.6	Ensaye en Mesa Vibradora.	21
3.2	Técnicas de Campo.	22
3.2.1	Ensaye de Ondas de Superficie.	22
3.2.2	Ensaye de Refracción Sísmica.	22
3.2.3	Ensaye de Resonancia Vertical.	24
3.2.4	Ensaye de Resonancia Horizontal.	25
3.2.5	Ensaye Up-hole y Down-hole.	25
3.2.6	Ensaye Cross-hole.	26
Cap. 4	Análisis de Vibraciones.	28
4.1	Introducción.	28
4.2	Modelos discretos.	28
4.3	Modos de vibración de una cimentación tipo bloque.	30
4.4	Métodos dinámicos para análisis de cimentaciones de maquinaria.	31
4.4.1	Métodos empíricos.	31
4.4.2	Métodos basados en considerar el suelo como un sólido Elástico Semi-infinito.	33
4.5	Consideraciones de diseño.	34
4.5.1	Condiciones estáticas.	34
4.5.2	Condiciones dinámicas.	34

4.6. Metodología de diseño del semi-espacio elástico	35
4.6.1 Cimentaciones superficiales.	35
4.6.2 Cimentaciones embebidas.	38
4.7 Criterios de aceptación.	42
4.8 Cimentaciones sujetas a máquinas de impacto.	46
4.8.1 Procedimiento de diseño.	47
4.8.2 Criterios de aceptación.	50
Cap. 5 Ejemplos de Aplicación.	51
Ejemplo 1. Diseño de la cimentación para un compresor usando el método empírico usando ayudas de diseño.	52
Ejemplo 2. Diseño de la cimentación para un compresor recíprocante usando el método del semi-espacio elástico.	58
Ejemplo 3. Diseño de una cimentación para un martillo de contragolpe. ...	70
Ejemplo 4. Análisis de vibraciones en el área circundante a una prensa de impacto, mediante análisis de elementos finitos volumen en el espacio.	74
Cap. 6 Trabajo de campo.	80
6.1 Instrumentación utilizada.	80
6.2 Tratamiento de los registros.	83
6.3 El ruido y los filtros.	84
6.4 Integración de los acelerogramas.	85
6.5 Análisis frecuencial.	86
6.5.1 Espectro de Fourier.	86
6.5.2 Espectro de respuesta.	86
6.6 Metodología para análisis de los eventos.	88
6.6.1 Equipo utilizado.	88
6.6.1.1. Registro de eventos con Etna.	88
6.6.1.2. Análisis de eventos con Dectra y Strong Motion Analyst.	93
6.6.2 Análisis de datos con Dectra.	94
6.6.3 Análisis de datos con Strong Motion Analyst.	97
Referencias	107
Anexo I	109
Anexo II	111
Anexo III	112

Símbolos y abreviaturas

a	amplitud
a_v	amplitud del yunque
a_f	amplitud de la cimentación
A_f	área de la base de la cimentación
B	acho de la cimentación
C, D, ξ	amortiguamiento
e	excentricidad de la masa rotatoria
e	excentricidad del centro de área de la base respecto al centro de gravedad.
E	Módulo de elasticidad
f_n	frecuencia natural
f_{nr}	frecuencia natural reducida
f_m	frecuencia de operación de la maquinaria
F_d	fuerza dinámica
F_1, F_2	fuerza primaria y secundaria
g	aceleración de la gravedad
G	modulo de cortante
h	altura del terreno de sustento
H	altura del bloque de cimentación
I_o	momento de inercia de la base del bloque de cimentación
I_x, I_y, I_z	momento de inercia alrededor de los ejes x, y o z
K_z	Rigidez del suelo en la dirección vertical
L	Longitud de la cimentación
m	masa
M_d	momento dinámico
P	carga concentrada en la cimentación
r_o	radio de una cimentación circular equivalente
$r.p.m.$	revoluciones por minuto
T	transmisibilidad
μ	relación de poisson
V	velocidad de vibración después del impacto
v	velocidad antes del impacto
W	Peso de la máquina y la cimentación
x, y, z	coordenadas del centro de gravedad
z	medida vertical de oscilación

CAPITULO 1

INTRODUCCION

Las cimentaciones de maquinaria requieren atención especial del ingeniero diseñador, ya que la operación del equipo genera fuerzas y momentos dinámicos desbalanceados, la cimentación transmite cargas dinámicas al suelo de desplante y éstas se adicionan a las cargas estáticas debidas a la combinación del peso propio de la maquinaria y del bloque de soporte. Ésta es la consideración que distingue a las cimentaciones de máquinas de otras ordinarias y hace necesarios procedimientos especiales de diseño.

La estática trabaja con fuerzas y desplazamientos invariables con el tiempo. La dinámica considera que estas varían con el tiempo en un porcentaje que puede producir fuerzas de inercia importantes, por lo tanto no se puede considerar que haciendo solo algunos ajustes en el diseño estático, la cimentación funcione de manera adecuada dinámicamente.

El comportamiento del suelo de desplante es considerado generalmente elástico, esto es razonable para el intervalo de niveles de vibración asociados con un buen diseño de la cimentación, siendo los parámetros más importantes que deben ser determinados en el diseño dinámico de una cimentación, la frecuencia natural y la amplitud de vibración del sistema maquinaria-cimentación-suelo, en condiciones normales de operación.

La importancia de un buen diseño de la cimentación estriba en que el costo inicial de la construcción de la cimentación, es generalmente una pequeña fracción del costo de la máquina, de los accesorios y de la instalación. Sin embargo, la falla de la cimentación, por causa de un diseño incorrecto o una defectuosa construcción, pueden interrumpir la operación del equipo y ocasionar importantes pérdidas económicas.

El estudio de las cimentaciones para maquinaria está basado en que toda la estructura y cada una de sus partes deberán de diseñarse para cumplir los siguientes requisitos, de acuerdo a la normatividad¹:

a) Estados límite de falla.

a.1) Estado límite de falla del suelo. El terreno de desplante, no deberá de presentar ningún estado de falla al estar sujeto a las sollicitaciones estáticas o dinámicas.

a.2) Estado límite de falla de la cimentación. Al igual que el terreno de desplante, la estructura de la cimentación deberá ser capaz comportarse adecuadamente ante las sollicitaciones estáticas y dinámicas.

b) Estados límite de servicio.

b.1) Estado límite por la vibración de la máquina. La maquinaria no deberá presentar en ningún momento, en condiciones de servicio, movimientos mayores a los especificados por el fabricante.

b.2) Estado límite por resonancia. Ninguna de las frecuencias de operación deberá coincidir con alguna de las frecuencias naturales del sistema máquina-cimentación-suelo.

b.3) Estado límite por transmisión de vibraciones. Ninguna de las frecuencias de operación deberá coincidir con las frecuencias naturales del sistema máquina-cimentación-suelo, con objeto de no afectar a otras máquinas, edificios o personas.

De acuerdo a lo anterior, un criterio usado en el diseño y construcción de cimentaciones para maquinaria ha sido la de proporcionar grandes masas de concreto para controlar las amplitudes de vibración, aunque esto ha sido la práctica común durante algún tiempo, actualmente se buscan soluciones más eficientes y económicas, sobre todo considerando que el suelo disipa la energía por dos mecanismos; la propagación de ondas elásticas lejos de la fuente, a la cual se le conoce como radiación o amortiguamiento geométrico, que es dependiente de la frecuencia y como deformación elástica del suelo, conocido como amortiguamiento del material, que es independiente de la frecuencia.

Para condiciones uniformes del suelo, los métodos dependientes de la frecuencia e independientes, deben de dar resultados muy similares. Para condiciones del suelo no uniformes y para frecuencias más altas de excitación los criterios dependientes de la frecuencia son más aplicables.

1.1 Alcance del Estudio

El presente estudio pretende reunir en un solo documento los criterios existentes a la fecha de las diferentes alternativas para diseñar la cimentación de una maquinaria, partiendo de las recomendaciones empíricas para terminar con las soluciones analíticas que presentan los modelos discretos de sistemas bajo efectos dinámicos, conocidos como masa-resorte, así mismo se pretende efectuar comparaciones entre los resultados teóricos y los valores reales, medidos en una cimentación existente; con el objeto de encontrar un patrón de comportamiento entre lo real y lo teórico. En lo referente a los modelos matemáticos, se consideran las vibraciones verticales, horizontales y por cabeceo, las cuales pueden ser acopladas o desacopladas.

1.2 Objetivos

Objetivo General.- Determinar y cuantificar el estado del arte de los criterios para diseño de cimentaciones de maquinaria sujeta a efectos dinámicos.

Objetivo Particular.- Evaluar analíticamente los modelos dinámicos de cimentaciones para maquinaria y compararlo contra los resultados del mismo modificando algunas de las características de diseño, con objeto de encontrar una relación que nos ayude a encontrar de forma más rápida las dimensiones iniciales del bloque de cimentación, de las que habrá de partir, ya que al igual que otras estructuras, el diseño de una cimentación es un proceso iterativo en el que se plantean las dimensiones de la cimentación y se revisa que no se sobrepasen los estados límite de falla y de servicio.

Otro de los objetivos es tratar de relacionar si conociendo las características de vibración del terreno circundante a la maquinaria, se pueden corregir los problemas que pudiera tener el equipo sujeto a vibración.

1.3 Conclusiones.

En el diseño de cimentaciones sujetas a fuerzas dinámicas, existe suficiente teoría que explica de manera detallada la forma de conceptualizarlas y resolverlas, generalmente se parte de hipótesis de diseño que tienen que ver principalmente con las condiciones de amortiguamiento que proporcione el terreno de desplante.

Los métodos empíricos sugeridos por Tschebotariof y Alan² pueden ser usados para diseños preliminares, si las condiciones de vibración caen dentro de alguna de las siguientes categorías (Fig. 1.1). En estos métodos, el suelo es considerado como un medio elástico semi-infinito.

Las suposiciones hechas en estas teorías consideran al suelo como un material homogéneo y elástico, y la presión de contacto uniforme en la base, aunque en la mayoría de los casos, solo da resultados válidos para cierto tipo de maquinaria.

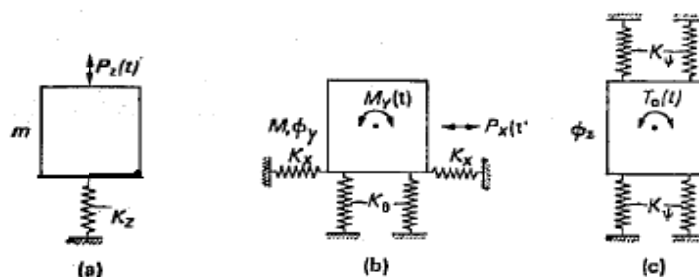


Fig. 1.1 Modos de vibración a) Vertical, b) Horizontal y cabeceo, c) Torsión

Los métodos del semi-espacio elástico, iniciados por Besides², toman en cuenta la vibración en cada uno de los seis modos de manera independiente. Estas consideraciones limitan la aplicación de este método en algunos casos prácticos para el diseño de maquinaria, ya que es usual que se presenten modos de vibración acoplados de 2 o más modos.

El método planteado por Pauw³ and Balakrishna Rao⁴ están basados en la suposición que una parte de la masa del suelo participa en la vibración junto con la cimentación, aunque la forma de determinar exactamente como obtener ese coeficiente de participación no está bien definido todavía.

El método propuesto por Barkan⁵, el cual está basado en resortes elásticos, tomando en cuenta los efectos del amortiguamiento y la participación del suelo, parece ser el que se acerca más al comportamiento real del problema.

También se concluye que apoyados en el uso de paquetes de computadora, se pueden resolver problemas de diseño de cimentaciones de maquinaria, variando algunas de las características iniciales y con ello tratar de obtener alguna ayuda en forma de gráfica o expresión matemática que nos lleve a encontrar más rápidamente las dimensiones iniciales de la cimentación. En este trabajo se realizó parte de este planteamiento y la conclusión a la que se llegó es que en una cimentación tipo bloque, la relación de frecuencias entre la frecuencia de operación de la máquina y la cimentación debe de estar en un rango por encima de 0.3. Se presenta una grafica en la que conociendo esa relación de frecuencias puede determinar el espesor del bloque.

En la última parte de este trabajo, se presenta una evaluación que queda todavía a nivel preliminar, donde se trató de validar el modelo del sistema máquina-cimiento usando la teoría de elementos finitos volumen, con las mediciones efectuadas en campo con el equipo Etna comparando transmisión de las vibraciones en el contorno de la maquinaria.

Es importante resaltar que se trata al final de este trabajo de detallar la metodología a seguir, para obtener el registro de aceleraciones, velocidades y desplazamientos del terreno (en este caso provocadas por maquinaria) y su posterior tratamiento para que después de corregirlos filtrarlos e integrarlos se llegue a obtener los espectros de aceleraciones, velocidades y desplazamientos, lo que ayudará a calibrar los modelos planteados con elementos finitos, para resolver problemas de cimentaciones de maquinaria que se vayan a diseñar o para corregir efectos de vibraciones nocivas en cimentaciones existentes.

CAPITULO 2

CLASIFICACION DE TIPOS DE MAQUINARIA Y SUS CIMENTACIONES.

El tipo, la configuración e instalaciones de una cimentación para equipo dinámico depende principalmente de los siguientes factores⁶:

- 1.- Las condiciones del terreno de soporte, la topografía, la sismicidad, el clima y otros efectos.
- 2.- La configuración del equipo, como tamaño, tipo de soporte de los cilindros, mecanismos de operación, ductos, etc.
- 3.- Requerimientos de proceso, como elevación del equipo, requerimientos de conexión con otros equipos así como tuberías, etc.
- 4.- Peso del equipo, cargas durante el montaje, puesta en marcha, operación, paro y mantenimiento.
- 5.- Requerimientos de operación como accesibilidad, asentamientos permisibles, efectos de temperatura, drenaje, etc.
- 6.- Requerimientos de mantenimiento, como acceso temporal, espacio suficiente para reparaciones o cambio de piezas.
- 7.- Factores de diseño implícitos en códigos para considerar los efectos del sismo o capacidad de carga del terreno de desplante.
- 8.- Factores económicos como el costo, uso y vida útil y costo de mantenimiento ó reparaciones.

De acuerdo a lo anterior, antes de proceder al diseño de la cimentación, habrá que identificar la más recomendada de acuerdo al tipo de máquina, por lo que se describen a continuación las clasificaciones más comunes.

2.1 De acuerdo al tipo de carga excitadora.

Existen muchos tipos de máquinas y cada uno puede requerir diferente tipo de cimentación. Se describe a continuación los diferentes parámetros que han llevado a usar uno de ellos de manera particular.

Las maquinas son excitadas normalmente por cargas desbalanceadas; en general, pueden clasificarse de acuerdo a este criterio, dentro de las siguientes categorías:

- a) Máquinas Reciprocantes
- b) Máquinas Rotatorias
- c) Máquinas de Impacto
- d) Equipos Especiales

2.1.1 Máquinas Reciprocantes

Las máquinas reciprocantes son probablemente las máquinas más antiguamente usadas, siendo este un ejemplo clásico del mecanismo de manivela, el cual se usa para convertir un movimiento translatorio en un movimiento rotatorio y viceversa. Ejemplos típicos de máquinas reciprocantes son las máquinas de vapor Fig. 2.1, máquinas de combustión interna Fig. 2.2 (por ejemplo de gasolina, diesel y petróleo), bobinas y compresores.

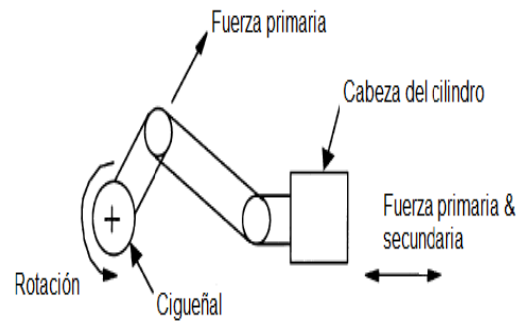


Fig. 2.1 Máquinas de Vapor

Estas máquinas pueden consistir en un cilindro simple y un pistón, con una acción simple o con una doble acción, también puede ser de múltiples cilindros, con pistones operando en un patrón regular y montado en una manivela común.

Un motor de un cilindro está inherentemente desbalanceado, sin embargo, en motores multicilindros y compresores, es posible fijar el número de cilindros y arreglarlos de manera que las fuerzas desbalanceadas resultantes tengan el menor valor posible, aunque además de la fuerza primaria, las fuerzas vertical u horizontal y pares, pueden generar una frecuencia secundaria que depende de la orientación de la máquina.

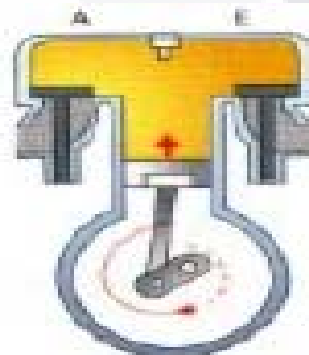
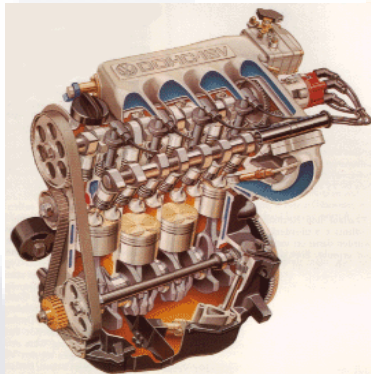


Fig. 2.2 Máquinas de Combustión Interna

Un mecanismo simple de manivela para una máquina de un solo cilindro se muestra en la Fig. 2.3.

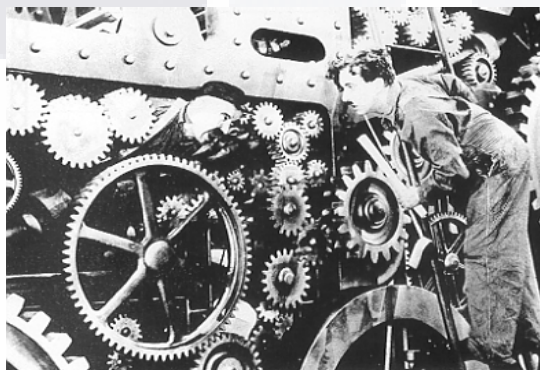


Fig. 2.3 Mecanismo de Manivela

Las bombas y los compresores pertenecen a la categoría de máquinas reciprocantes, que pueden ser de grado simple o grados múltiples, dependiendo si el total de la compresión es desarrollada en una o más de una operación. El arreglo de múltiples grados puede formarse de varios cilindros-pistones operados por una máquina común o por diferentes máquinas. La dirección del movimiento del pistón puede ser horizontal o vertical.

La cimentación para las máquinas reciprocantes generalmente consiste en un bloque de concreto rígido, que tiene preparaciones para montar la maquinaria. Las máquinas pueden ser colocadas directamente en el bloque de concreto o en un cojinete elástico diseñado adecuadamente. En algunas ocasiones se utilizan cimentaciones en bloque, apoyadas sobre resortes.

2.1.2 Máquinas Rotatorias

El tipo de excitación que generalmente desarrollan las máquinas rotatorias es del tipo senoidal, donde para determinar esta fuerza es necesario conocer la masa rotatoria y la excentricidad entre el centro de rotación y el centro de gravedad de la masa rotatoria.

Para este tipo de máquinas es posible, teóricamente, balancear las partes móviles que producen las fuerzas desbalanceadas durante la rotación; sin embargo, en la práctica, es difícil eliminar totalmente el desbalanceo, ya que éste se ve afectado por los procedimientos del diseño, la fabricación, la instalación y el mantenimiento.

Algunos aspectos que contribuyen al desbalanceo de máquinas rotatorias son: el desalineamiento durante la instalación, el daño o corrosión de las partes móviles y también las deflexiones por gravedad del eje de rotación de la máquina.

En términos prácticos, las máquinas rotatorias se clasifican de la siguiente manera:

- a) De baja velocidad
- b) De alta velocidad

Las máquinas rotatorias de baja velocidad son aquellas que operan a menos de 1500 r.p.m., como por ejemplo, los motores generadores, las bombas centrífugas y de vacío Fig. 2.4, los ventiladores, las devanadoras, etc.

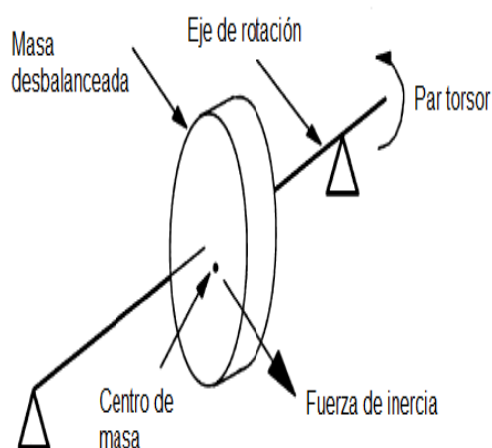


Fig. 2.4 Bombas centrífugas

Para estas máquinas, las cimentaciones usadas son: las de tipo bloque rígido y las de tipo marco. En algunos casos, si esto es necesario la cimentación deberá estar soportada por pilas.

Las máquinas rotatorias de alta velocidad, como son las turbinas de gasolina o vapor, Fig. 2.5 los generadores, los compresores Fig. 2.6 y los turboventiladores Fig. 2.7, tienen velocidades de operación generalmente de 3,000 r.p.m. a 3,600 r.p.m. pudiendo llegar en algunos casos hasta 10,000 r.p.m.

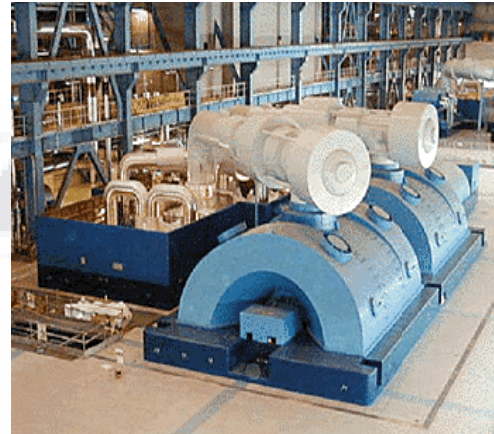


Fig. 2.5 Turbinas



Fig. 2.6 Compresores industriales

La instalación de un turbogenerador representa la colocación de equipos auxiliares, tales como condensadores, líneas de tuberías de vapor que soportan grandes temperaturas, ductos y ventilas de aire, etc.; de tal manera que toda la unidad, incluyendo la cimentación de la maquinaria y su equipo auxiliar, debe estar totalmente accesible para su inspección.



Fig. 2.7 Ventiladores

Conociendo estos requerimientos, las cimentaciones de tipo marco son las utilizadas generalmente para las unidades de turbogeneradores. Se prefiere este tipo de cimentación a la de tipo bloque rígido, tomando en cuenta aspectos como el funcionamiento y la economía.

Las cimentaciones de tipo marco pueden construirse con concreto reforzado o acero, siendo las de concreto reforzado las más comúnmente usadas.

2.1.3 Máquinas de Impacto

No existe mucha información respecto a cargas transitorias o de impacto, las que se generan por operaciones intermitentes de maquinaria. Las prensas hidráulicas y neumáticas Fig. 2.8, de martillos para forja, de martinets Fig. 2.9 y troqueladoras Fig. 2.10, por ejemplo, producen cargas de impacto que pueden ser consideradas como una pulsación simple, ya que el efecto de un impacto termina antes de que ocurra el siguiente.

El diseño de la cimentación para este tipo de maquinaria deberá ser el adecuado para evitar cualquier efecto perjudicial en la cimentación, debido a la misma operación de la maquinaria, así como también en estructuras adyacentes o en máquinas y personas que se encuentren cerca.

La cimentación para una máquina de impacto, generalmente, se basa en un bloque de concreto reforzado. En el caso de pequeños martillos, el yunque puede estar montado directamente en el bloque de cimentación, para reducir la transmisión de los esfuerzos por el impacto en el bloque de concreto y en el marco de la máquina se coloca un cojinete elástico de neopreno, fieltro, corcho o madera, entre el yunque y la cimentación.

En caso de martillos con gran capacidad, se pueden utilizar algunos aisladores especiales, tales como: resortes y amortiguadores, en lugar de los cojinetes elásticos.

El bloque de cimentación generalmente se diseña para apoyarse directamente en el suelo. Cuando las condiciones del suelo de desplante no son las deseadas, el bloque de cimentación puede ser soportado por pilas. También la cimentación puede apoyarse en cojinetes elásticos o sobre resortes, en el caso de desear reducir la transmisión de las vibraciones.



Fig. 2.8 Prensa Hidráulica



Fig. 2.9 Martillo



Fig. 2.10 Máquinas Troqueladoras

2.1.4 Equipos Especiales.

Algunas máquinas o equipos especiales, que pueden originar vibraciones en sus soportes y que no fueron consideradas en la selecciones anteriores, son por ejemplo, las antenas de radar Fig. 2.11



Fig. 2.11 Antena de radar

La estructura de soporte para una antena de radar debe tener una respuesta dinámica que no interfiera con la operación del equipo electrónico. El disco del radar debe ser lo suficiente rígido para que no se afecte indebidamente el mecanismo que controla la elevación y el azimut, la torre vertical debe ser rígida y no permitir la resonancia de la estructura y, finalmente, la cimentación no debe permitir grandes movimientos en toda la estructura.

Las rotaciones permisibles de una antena de radar son a menudo del orden de 0.00005 rad., la rotación del radar, con respecto a su eje horizontal, introduce un balanceo transitorio en la antena. Lo que puede causar que la torre oscile en su frecuencia natural. Esto debido a la conexión flexible entre la cimentación y el suelo de desplante, o debido a la flexibilidad del sistema estructural.

2.2 De acuerdo al criterio de diseño de la cimentación.

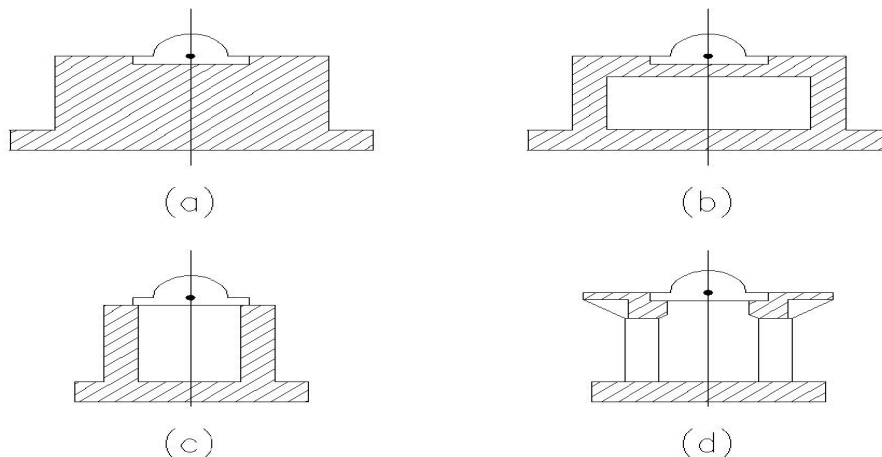
Una vez identificada el tipo de fuerza, de impacto (como martillos y prensas), periódica (como los compresores), de alta velocidad (como las turbinas), o especiales, la cimentación puede clasificarse atendiendo a su tipo estructural, de la siguiente manera:

Cimentaciones tipo bloque, Fig. 2.12a, que consiste de un pedestal de concreto que soporta la maquinaria.

Cimentación tipo cajón, Fig. 2.12. b, consiste en un bloque de concreto hueco que soporta la maquinaria en su parte superior.

Cimentación de tipo muro, Fig. 2.12. c, formada por un par de muros que dan soporte a la maquinaria.

Cimentación de tipo marco, Fig. 2.12. d, con base en columnas verticales que soportan en parte superior una plataforma horizontal, la cual sirve de asiento a la maquinaria.



2.12 Tipos de cimentación de acuerdo a su tipo estructural

La maquinaria que produce impactos y fuerzas periódicas de baja velocidad es generalmente montada sobre cimentaciones tipo bloque (a), aquellas que trabajan a altas velocidades como la maquinaria tipo rotatorio, se coloca sobre cimentaciones de marco (b); aunque, sin embargo, para ciertas condiciones particulares, lo anterior puede modificarse; en tal caso, se puede proponer un tipo alternativo de cimentación. Por ejemplo los tornos que inducen muy poca fuerza dinámica, pueden ser atornillados directamente al firme, sin necesidad de una cimentación especial.

2.3 De acuerdo a su frecuencia de operación.

Por otra parte, basándose en sus frecuencias de operación, la maquinaria puede ser dividida dentro de tres categorías:

- a) Grupo 1.- Frecuencia de bajas a medias, con valores de 0-500 r.p.m.
- b) Grupo 2.- Frecuencias de medias a altas, con valores de 500-1000 r.p.m.
- c) Grupo 3.- Frecuencias muy altas con valores mayores de 1,000 r.p.m.

El grupo 1: Comprende grandes máquinas reciprocantes, compresores y ventiladores grandes. Las máquinas reciprocantes generalmente operan en un intervalo de frecuencias, entre 50-500 r.p.m. Para este grupo, las cimentaciones de tipo bloque, con grandes áreas de contacto con el suelo de desplante son las que se utilizan generalmente. Para este tipo de máquinas, se debe usar una cimentación de alta frecuencia, siendo la primera frecuencia natural del sistema un 40 a 50% mayor que la frecuencia de operación de la máquina.

El grupo 2: Incluye máquinas reciprocantes de tamaño medio, como son las máquinas de gasolina y diesel. Con intervalos de frecuencias que oscilan entre 500 a 1000 rpm, se usan generalmente las cimentaciones de tipo bloque, desplantadas sobre amortiguadores tipo resorte, aire, o placas elásticas como el neopreno, Fig. 2.13, ya que mantienen la frecuencia natural de la cimentación considerablemente menor que la frecuencia de operación.

El grupo 3: Incluye máquinas de combustión interna de baja velocidad, motores eléctricos y turbogeneradores. Son recomendables las cimentaciones tipo bloque, con poca superficie de contacto, aisladas con placas elásticas para baja frecuencia natural. Las turbo máquinas requieren de cimentación tipo marco para

acomodar entre las columnas los equipos auxiliares necesarios. Es recomendable un cimientamiento de baja frecuencia.



Fig. 2.13 Amortiguadores

2.4 Requerimientos generales para diseño de cimentaciones de maquinaria.

Los siguientes requerimientos generales deberán ser satisfechos desde el punto de vista de diseño, en base al cual, la cimentación deberá ser capaz de soportar las cargas impuestas, sin tener fallas de corte o de aplastamiento. Se deberá revisar que los asentamientos estén dentro de los límites permisibles.

El centro de gravedad de la maquinaria y el de la cimentación deberán estar en la medida de lo posible, alineados verticalmente con el centro de gravedad de la base. Deberá evitarse la resonancia; por lo tanto, la frecuencia natural del sistema suelo-cimentación deberá ser mayor o menor que la frecuencia de operación de la maquinaria. Para maquinaria de baja velocidad, la frecuencia natural deberá ser alta y viceversa.

Las amplitudes de vibración, en las condiciones de servicio, deberán estar dentro de los límites permisibles. Estos límites son generalmente dados por el fabricante de la maquinaria. Todas las partes rotatorias y reciprocantes de una maquinaria deberán estar bien balanceadas, de modo que minimicen las fuerzas y los momentos desbalanceados.

En lo posible, la cimentación deberá estar proyectada de manera que permita una subsecuente alteración a la frecuencia natural, realizando cambios en el área de la base o en la masa de la cimentación si esto se piensa necesario posteriormente.

Desde el punto de vista práctico, deberán cubrirse los siguientes requerimientos:

El nivel freático, en caso de existir, deberá estar abajo como sea posible, por lo menos una cuarta parte del espesor de la cimentación a partir del plano de base, esto limita la propagación de la vibración, ya que el agua subterránea es una buena conductora de ondas de vibración.

La cimentación para maquinaria deberá estar separada en construcciones adyacentes, por medio de juntas de expansión.

Cualquier tubo de vapor o de aire caliente, embebido en la cimentación deberá estar propiamente aislado.

La cimentación deberá estar protegida del aceite de la maquinaria, por medio de una capa resistente al ácido o por un adecuado tratamiento químico.

Es recomendable que las cimentaciones de maquinarias estén desplantadas en un nivel inferior del desplante de las cimentaciones de construcciones contiguas.

Las dimensiones de la cimentación de la maquinaria estarán de acuerdo con los requerimientos de la maquinaria, los paños de la misma generalmente son

proporcionados por el fabricante, y deberán ser revisadas por el diseñador, tomando en cuenta las condiciones particulares del sitio donde se instalará el equipo, conociendo la frecuencia del sistema cimentación-suelo y las amplitudes del movimiento con la maquinaria en operación.

Las especificaciones que se requieren para el diseño varían, dependiendo del tipo de maquinaria, siendo los mínimos necesarios, los siguientes:

Diagrama de cargas indicando la magnitud, la posición de las cargas estáticas y dinámicas inducidas de la maquinaria a la cimentación.

La potencia de la máquina y su velocidad de operación, planos mostrando los anclajes, las aberturas, trincheras, etc., propiedades de los suelos, estáticas y dinámicas, para diseño.

Los parámetros relacionados con la maquinaria y que normalmente son dados por el fabricante son: La colocación en el bloque de cimentación de las anclas y los espacios necesarios para lubricación, paso de ductos y conexiones, etc.

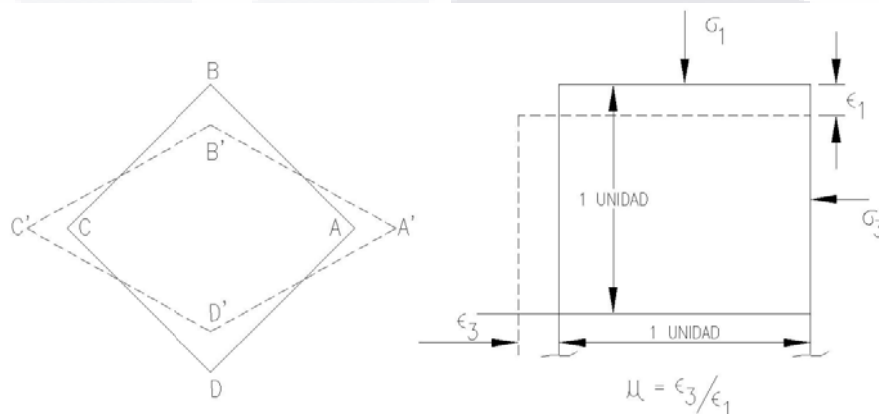
CAPITULO 3

PROPIEDADES DINAMICAS DEL TERRENO DE DESPLANTE.

Otro aspecto a considerar en el diseño dinámico de cimentaciones de maquinaria son los parámetros que intervienen en el análisis y diseño, donde los más importantes son:

Densidad de masa ρ . Es el cociente del peso volumétrico en estado natural entre la aceleración de la gravedad, tomando en consideración los huecos del suelo que pueden contener la fase líquida y la fase gaseosa del mismo.

Relación de Poisson μ . Es la relación entre la deformación longitudinal y transversal a la dirección de la carga, Fig. 3.1, esta relación puede calcularse mediante la medición de la velocidad de propagación de ondas a través del suelo, aunque es un procedimiento muy complicado. Si no se tienen esos datos pueden usarse los siguientes valores recomendados⁸.



3.1 Relación de Poisson

Módulo de elasticidad		
Tipo de suelo	Kg/cm ²	Relación de Poisson, μ
Arena suelta	105-240	0.20-0.40
Arena densa media	172.5-276	0.25-0.40
Arena densa	345-552	0.30-0.45
Arena limosa	103.5-172.5	0.20-0.40
Arena y grava	690-1725	0.15-0.35
Arcilla suave	41-207	0.20-0.50
Arcilla media	207-414	
Arcilla firme	414-966	

En fechas recientes, se han realizado grandes avances en el desarrollo de procedimientos analíticos para calcular la respuesta del terreno sujeto a vibraciones dinámicas, por lo que se requiere el conocimiento de estas propiedades para llegar a soluciones satisfactorias.

Las técnicas que se aplican a la fecha para conocer las propiedades dinámicas de los suelos, toman en cuenta el valor de las deformaciones aceptables de acuerdo al tipo de maquinaria a cimentar, ya que mientras un sismo puede desarrollar deformaciones del 10%, la cimentación de un microscopio electrónico puede ser sensible a una deformación de $10^{-4} \%$.

Por lo que, las propiedades dinámicas que se requieren conocer son:

El módulo dinámico equivalente de Young, E_{eq} .

El módulo dinámico al esfuerzo cortante, G

El módulo dinámico de deformación volumétrica, K

La relación de Poisson, ν

Las propiedades esfuerzo-deformación

Los parámetros de licuación

La resistencia al esfuerzo cortante, en función de la velocidad de aplicación de la carga.

Debido a la dificultad de obtener los datos anteriores, generalmente se desprecian las características dinámicas y de amortiguamiento de los suelos, pues se supone un comportamiento lineal elástico; por lo que para obtener una buena aproximación considerando estos efectos, existen ensayos de suelos sometidos a carga dinámica, los que pueden realizarse mediante técnicas de laboratorio o mediante técnicas de campo.

3.1 Técnicas de Laboratorio

Los procedimientos de laboratorio son considerados menos exactos que la mediciones en campo, utilizándose a veces para validar resultados y sirven para determinar las propiedades esfuerzo-deformación y la resistencia del suelo bajo carga dinámica, tienen las siguientes variables: La medición precisa de la carga, la deformación y la presión de poro, para finalmente obtener el valor del módulo dinámico al esfuerzo cortante G . Dentro de las técnicas más usuales se encuentran⁹:

3.1.1 Ensayes de Pulsos Ultrasónicos.

Este ensaye consiste en generar mediante cristales piezoeléctricos ondas ultrasónicas longitudinales o de torsión y medir el tiempo necesario t , para la propagación del pulso elástico generado a través del espécimen de suelo de longitud L . Ver Fig. 3.2

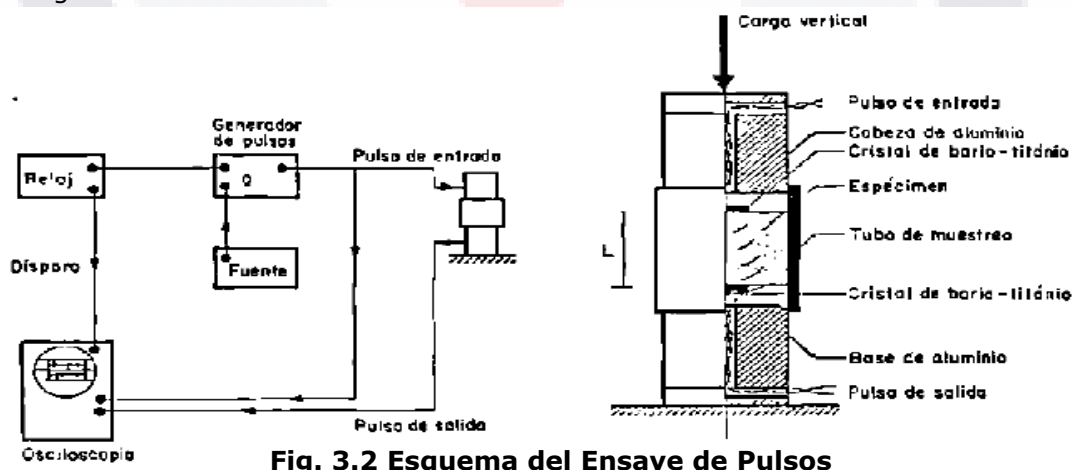


Fig. 3.2 Esquema del Ensaye de Pulsos

Si el pulso es de compresión, la velocidad V_c , se obtiene mediante:

$$V_c = \frac{L}{t_c} \text{ y el módulo de Young equivalente } E_{eq}.$$

$$E_{eq} = \rho V_c^2 = \frac{\rho L^2}{t_c^2}$$

Si el pulso es de torsión, la velocidad V_t , se obtiene mediante:

$$V_t = \frac{L}{t_s}$$

Y el módulo al esfuerzo Cortante G , se obtiene mediante:

$$G = \rho V_t^2 = \frac{\rho L^2}{t_t^2}$$

3.1.2 Ensayes de columna resonante.

En este ensaye se somete un espécimen cilíndrico de suelo a un estado de vibración forzada longitudinalmente o a torsión, variando la frecuencia de excitación hasta lograr la resonancia. El módulo correspondiente, se calcula con los datos de la frecuencia de resonancia f_n , la geometría del espécimen y las características del equipo. Fig. 3.3

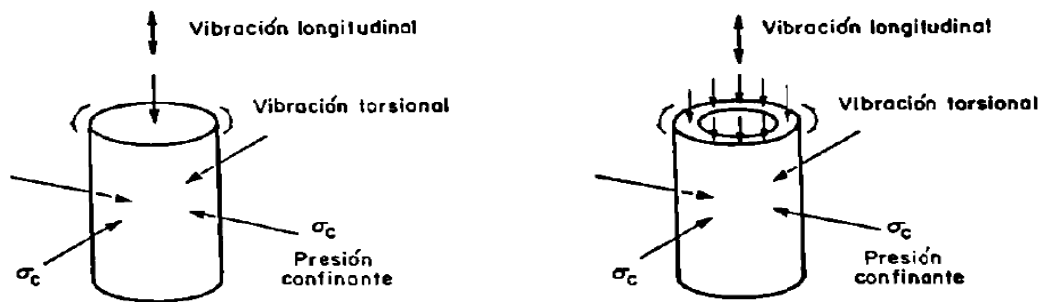


Fig. 3.3 Ensaye de columna resonante

La ecuación que relaciona la velocidad de propagación de ondas de esfuerzo cortante V_t con la f_n se obtiene por:

$$V_s = \frac{2\pi \cdot f_n L}{\psi_s}$$

En donde L es la longitud del espécimen y ψ_s es la raíz de la ecuación de frecuencias.

$$\psi_s \tan \psi_s = \frac{J}{J_o}$$

En donde J es el momento de inercia del espécimen y J_o es el momento de inercia de la cabeza del sistema, y finalmente:

$$G = \rho V_s^2$$

3.1.3 Ensayes del péndulo de torsión.

Este ensaye consiste en someter un espécimen cilíndrico de suelo a un impulso que le provoque una vibración torsional libre. Este aparato fue desarrollado por L. Zeevaert¹⁰ y consiste en una cámara triaxial modificada, que permite someter la muestra a diferentes presiones de confinamiento σ_c , llevando al conocimiento de la variación del módulo G , con la presión de confinamiento. Fig. 3.4

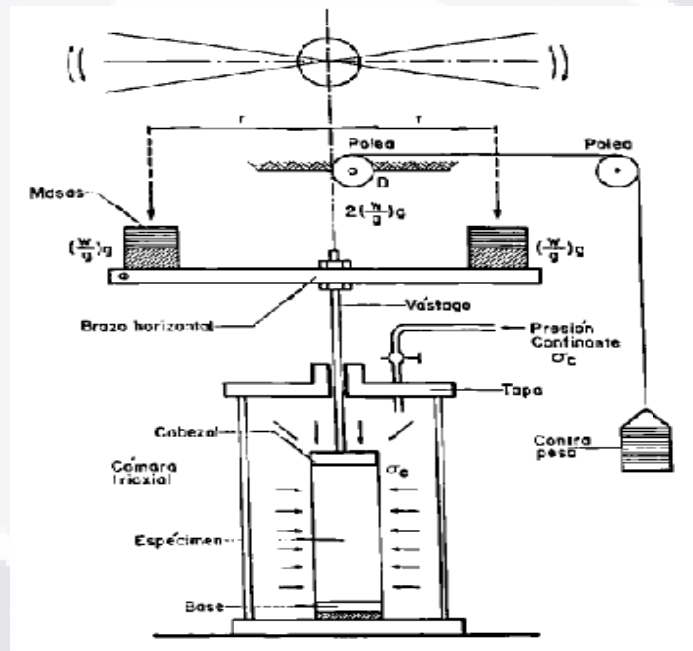


Fig. 3.4 Péndulo de torsión de vibración libre (Zeevaert, 1967).

De los registros fig. 3.5 para diferentes tipos de suelos, se obtiene la amplitud, el periodo y el decremento logarítmico de la vibración libre amortiguada del sistema aparato-suelo, a partir de esta información, se calcula G .

$$G = \frac{\omega_{sd}^2 C}{(1 - \xi_s^2) - (1 - \xi_a^2) \left(\frac{\omega_{sd}}{\omega_{ad}} \right)^2}$$

Donde:

$$C = J_a h / I_p$$

h = altura del espécimen

$$I_p = \beta D^4 / 32$$

D = diámetro del espécimen

ω_{sd} = frecuencia circular amortiguada del sistema

ω_{ad} = frecuencia circular amortiguada de calibración

ξ_s y ξ_a = relaciones de amortiguamiento del sistema y del instrumento

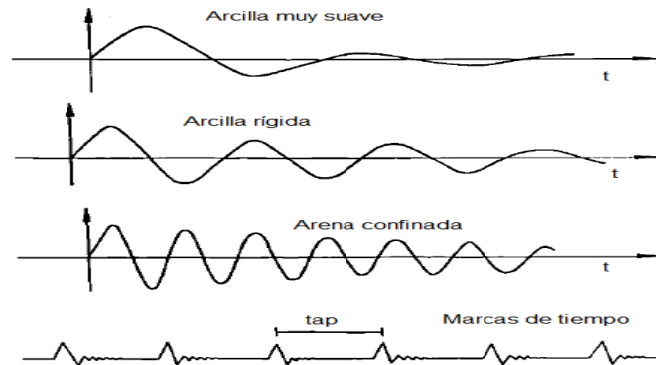


Fig. 3.5 Registros obtenidos con el Péndulo de Torsión

3.1.4 Ensayo Triaxial Cíclico.

El ensayo triaxial cíclico tiene como finalidad investigar el comportamiento esfuerzo-deformación y la resistencia al esfuerzo cortante de un espécimen cilíndrico de suelo, sometido a cargas cíclicas fig. 3.6.

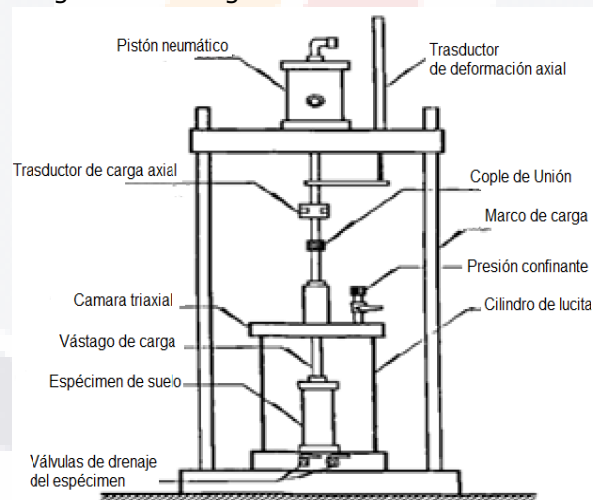


Fig. 3.6 Cámara triaxial Cíclica

El ensayo triaxial cíclico consiste en someter un espécimen de suelo a un esfuerzo de confinamiento σ_{3c} hasta lograr su consolidación, y posteriormente aplicarle un esfuerzo axial cíclico de magnitud conocida σ_d a una frecuencia determinada. Fig. 3.7.

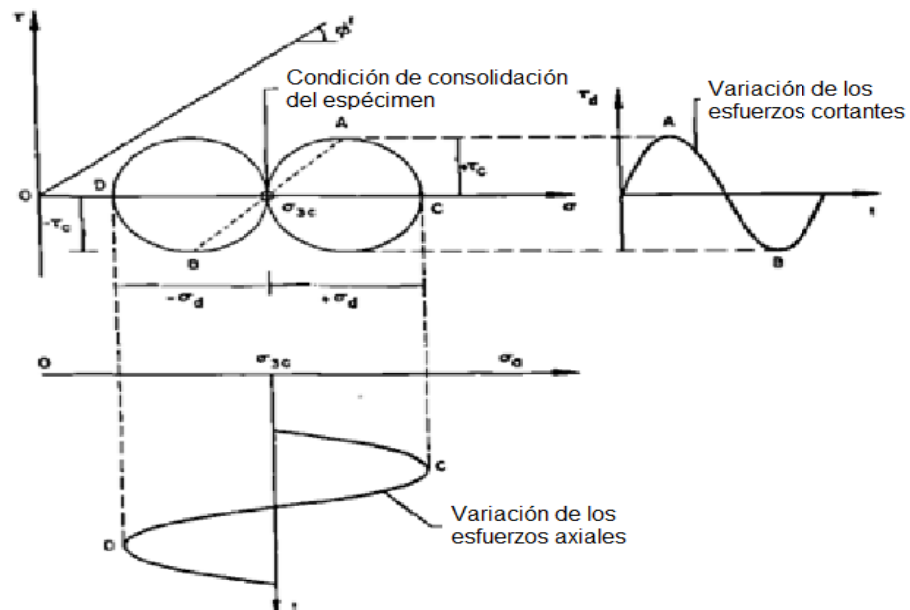


Fig. 3.7 Ensaye triaxial Cíclico Convencional para espécimen isotrópicamente consolidado.

A partir de los datos del ensaye, se pueden obtener, entre otros, el módulo equivalente de Young E_{eq} , el cual se determina a partir de la pendiente de la línea que une los puntos extremos del lazo de histéresis. Además se pueden obtener otros parámetros de licuación de un suelo granular y los parámetros para los modelos de degradación de suelos cohesivos.

3.1.5 Ensaye de corte simple cíclico.

El ensaye de corte simple cíclico, Fig. 3.8 se usa para investigar el comportamiento esfuerzo-deformación y la resistencia al esfuerzo cortante de una muestra de suelos sometida a corte simple. Las condiciones de corte simple teóricas, que debe cumplir un elemento de suelo en un equipo de corte son:

- Estático. Simula el estado de esfuerzos iniciales
- Cíclico. Impone las condiciones de corte simple.

En la actualidad, se pueden encontrar dos tipos de aparatos de corte simple, uno de paredes rígidas y forma prismática de aprox. 5x5x2.9 cm y otro de forma cilíndrica, con dimensiones de 7.1 cm de diámetro y 2 cm de altura.

El equipo ofrece las siguientes características:

Simula el efecto de la presión de sobrecarga y de fuerzas de inercia, impone a la muestra condiciones de deformación de corte simple, mide la presión de poro generada en diferentes puntos de la muestra.

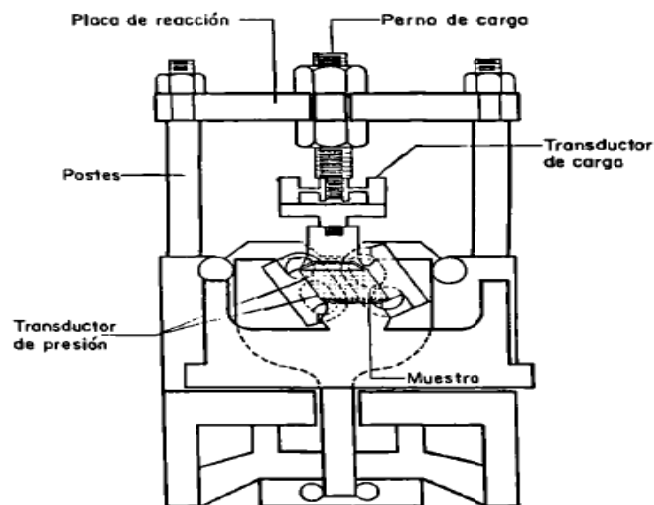


Fig. 3.8 Aparato de corte simple cíclico de volumen constante.

3.1.6 Ensayo en mesa vibradora.

La mesa vibradora Fig. 3.9 permite efectuar ensayos dinámicos de sistemas o componentes, a escala natural o reducida, pudiendo obtenerse entre otros datos, las frecuencias naturales de vibración, la fracción del amortiguamiento crítico, Esfuerzos, etc.

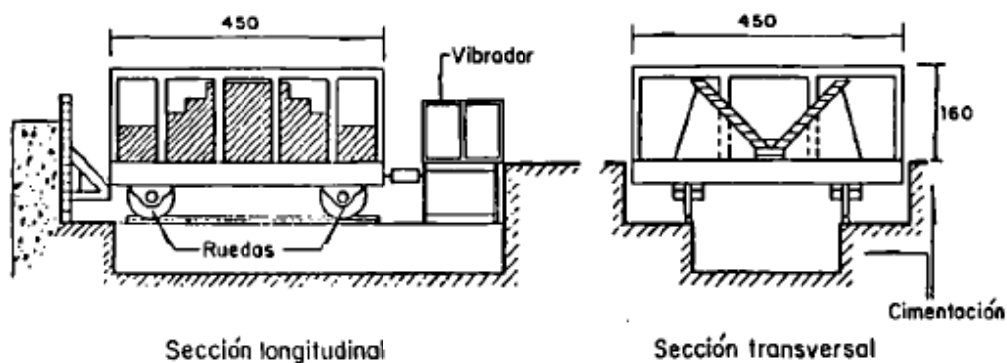


Fig. 3.9 Esquema mesa vibradora.

La mesa vibradora consta principalmente de:

- Una plataforma rígida sobre la que se construye el modelo a analizar.
- Un sistema de soporte de la plataforma en ruedas, pedestales articulados, rodamiento de agujas ó aire comprimido.
- Un sistema excitador (impacto, periódico a aleatorio).
- Un sistema de control electrónico equipado de un controlador, un selector de programas y un servo controlador.
- Un sistema de captura de datos, compuesto de un transductor, un acondicionador de señal y dispositivos de registro.

3.2 Técnicas de Campo.

Las medidas de determinación en campo de las propiedades del suelo, implican medir sus características, tan cerca de la cimentación como sea posible, obteniendo sus parámetros de manera indirecta a través de las ondas que se transmiten en el medio, pudiendo ser: Ondas de compresión (P) primarias, Ondas de Corte (S) secundarias y ondas Rayleigh (de superficie). Los ensayos de muestras de suelo representativas de las condiciones en el sitio, tienen la ventaja de que no existe la alteración de las propiedades, causada por la extracción, transporte, almacenamiento y preparación, para el ensayo de la muestra. Siendo los ensayos de campo más comunes los siguientes:

3.2.1. Ensayo de Ondas de Superficie

Consiste en generar un estado de ondas de una frecuencia conocida y medir la longitud de las ondas generadas, el método es colocar un vibrador mecánico ó electromagnético sobre una placa de acero, con el se produce un estado conocido de ondas Rayleigh de una frecuencia ω_t conocida y mediante la colocación de geófonos en la superficie del terreno, medir la longitud de onda L_R de la vibración provocada. Fig. 3.10.

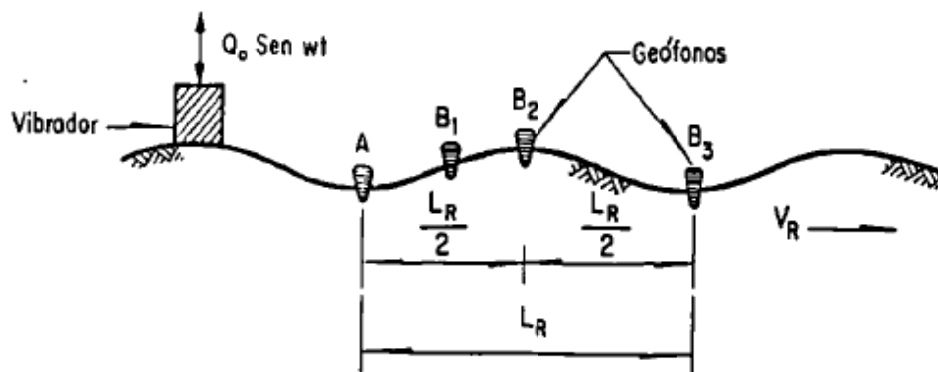


Fig. 3.10 Ensayo de vibración de la superficie del terreno.

Con lo anterior, queda determinada la longitud de onda L_R , la velocidad de onda Rayleigh V_R se puede calcular con la expresión:

$$V_R = L_R \omega$$

Si se sabe que la velocidad de la onda Rayleigh es aproximadamente igual a la velocidad de onda de esfuerzo cortante V_s , se tiene:

$$V_s = V_R = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

3.2.2. Ensayo de Refracción Sísmica.

Consiste en medir la velocidad de propagación de las ondas elásticas generadas en un foco de perturbación, por un impacto o explosión en la superficie del terreno, colocando una serie de geófonos, separados entre sí una distancia de 18 m. Fig. 3.11.

El impacto genera ondas que se propagan en el terreno, el tiempo de llegada de estas ondas a los distintos geófonos se amplifica y se registra en un oscilógrafo.

El registro obtenido, Fig. 3.12, consiste en varias líneas o trazos, una por cada geófono. El instante de impacto, se registra mediante una marca en el canal del oscilógrafo, y el instante de llegada a cada uno de los geófonos, queda igualmente registrado.

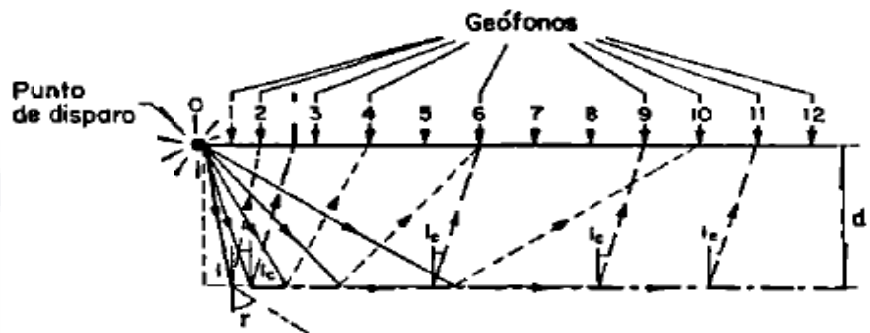


Fig. 3.11 Colocación de geófonos.

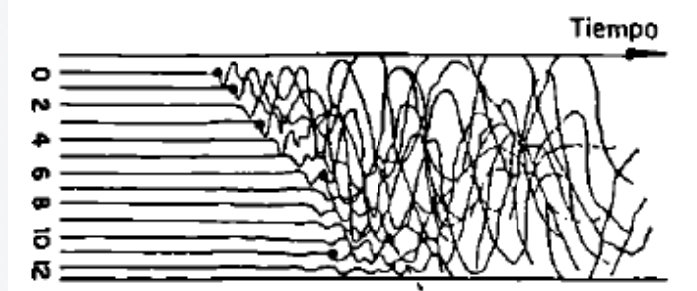


Fig. 3.12 Esquema ensayo Refracción Sísmica

Para obtener la curva de distancia contra tiempo de llegada, se dibujan en el eje de las abscisas las distancias entre geófonos; sobre ellas se dibuja verticalmente, como ordenadas, el tiempo transcurrido entre el impacto y el instante de llegada al geófono correspondiente. Al unir los puntos de intersección, indican la diferencia de velocidad de propagación de ondas elásticas, cuya magnitud se obtiene de la pendiente del tramo recto correspondiente.

Para obtener buenos resultados de la aplicación de este ensayo, es necesario que exista contraste entre las propiedades de las capas de suelo investigadas. La onda directa que se propaga desde el punto del impacto o explosión hasta el primer geófono

tardará en llegar $T_1 = \frac{x}{V_1}$, por lo que, para una onda refractada, puede demostrarse que tardará en llegar:

$$T_2 = \frac{x}{V_2} + \frac{2d_1\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_1V_2}$$

En la gráfica distancia tiempo, esta expresión es la ecuación de una recta con pendiente igual a $1/V_2$ que corta con el eje de las ordenadas en t_1 , denominado tiempo de intersección. Con estos datos, se puede relacionar:

$$V_s = V_R = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

3.2.3. Ensaye de Resonancia Vertical.

El fundamento teórico de este ensaye está ubicado en el campo de la interacción-suelo-estructura y consiste en colocar, a una profundidad z sobre una base de concreto, Fig. 3.13, en donde un vibrador mecánico o electromagnético realiza un barrido de frecuencias para obtener la curva de frecuencia contra amplitud, con objeto de determinar la frecuencia de resonancia f_s vertical del sistema vibrador-cimentación-suelo.

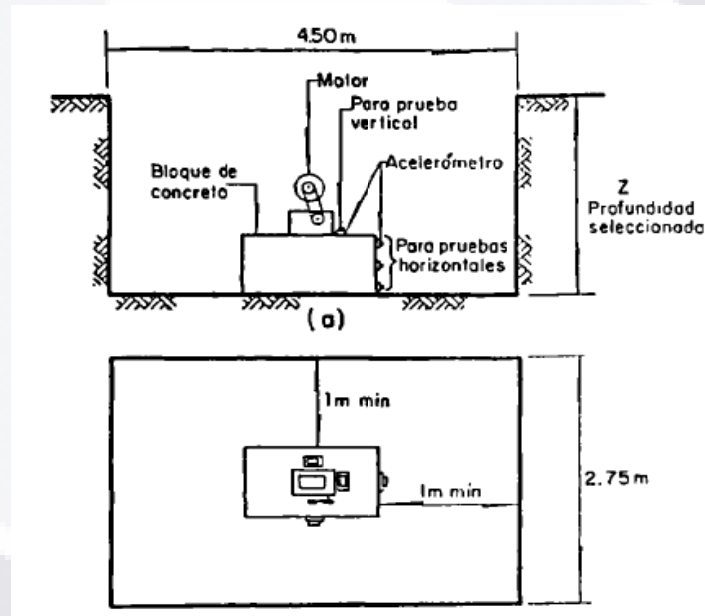


Fig. 3.13 Esquema Ensaye de Resonancia

La base de concreto, se instrumenta con acelerómetros que permiten medir la aceleración vertical producida por un estado estacionario de vibración y de acuerdo con la teoría del semiespacio elástico, se obtiene la expresión de la amplitud de vibración, A_z del sistema.

$$A_z = \frac{a_z}{4\pi^2 f^2}$$

3.2.4. Ensaye de Resonancia Horizontal.

Este ensaye es similar al de resonancia vertical y consiste en colocar a una profundidad z sobre una base de concreto, un vibrador mecánico o electromagnético, con el que se realiza un barrido de frecuencias, para obtener la curva frecuencia-amplitud. La base de concreto, se instrumenta con acelerómetros, con sus ejes sensibles orientados en dirección horizontal, que produce un estado establecido de vibración horizontal.

3.2.5. Ensaye Up-hole y Down-hole.

Estos ensayos están basados en la medición de la propagación de ondas sísmicas en los suelos, provocadas por una fuente de perturbación, F , y registradas en un punto R , denominado receptor. Se realiza un sondeo y si la fuente está en la superficie y el receptor en el interior, las ondas generadas viajan hacia abajo (down-hole) y en caso contrario el ensaye será up-hole. Fig. 3.14.

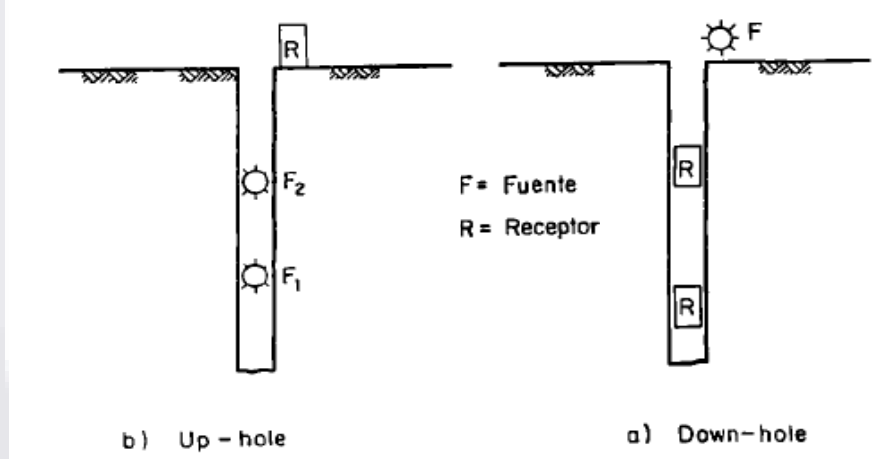


Fig. 3.14 Ensaye Up-hole y Down-hole

El procedimiento consiste en perforar un sondeo de 7.6 cm de diámetro hasta la profundidad requerida, se coloca a la profundidad z un geófono de tres componentes dentro del sondeo y se le acuña. El impulso se logra mediante un golpe, con un martillo de 4.5 kg al bloque de concreto, generando el impacto ondas de cuerpo. En un osciloscopio se registra la traza del impacto y las trazas de llegada de las ondas al geófono. El procedimiento se repite cada 1.5 m., hasta la profundidad final.

Si se conoce el tiempo requerido para que la onda viaje desde el punto de perturbación al receptor y la distancia entre ambos, se determina la velocidad de propagación de las ondas compresionales V_c o de las ondas de esfuerzo de cortante V_s . Fig. 3.15.

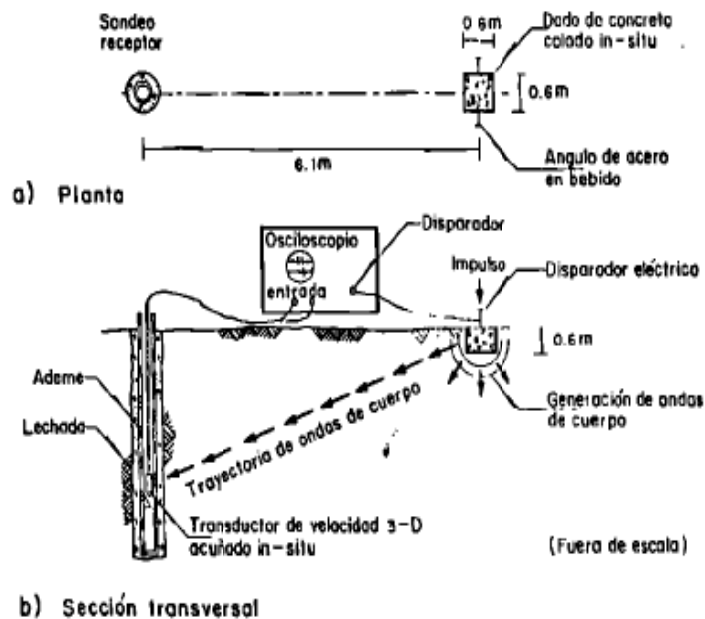


Fig. 3.15 Esquema ubicación fuente-receptor.

3.2.6. Ensaye Cross-hole.

El ensaye sísmico cross-hole o de sondeos en paralelo, es útil para la medición de la variación del módulo al esfuerzo cortante G con la profundidad. Mediante este ensaye se mide la velocidad de propagación de ondas de cuerpo (P ó S) para puntos colocados a la misma profundidad. (Fig. 3.16)

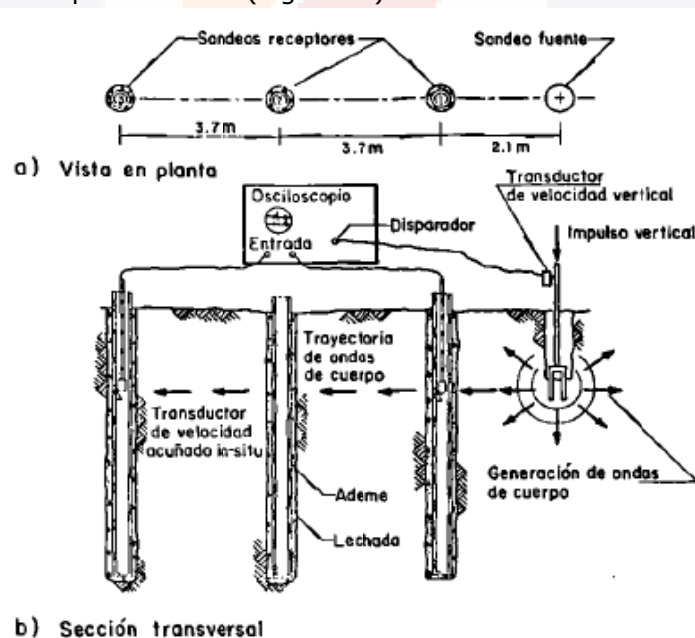


Fig. 3.16 Esquema ubicación fuente-receptor.

En la tabla 3.1, se ejemplifican los ensayos recomendados, así como los rangos de frecuencia y deformación de suelos sometidos a cargas cíclicas³, para obtener el Módulo de Young E, Módulo de corte G, Porcentaje de amortiguamiento .

Ensayo	Rango de frecuencia f(Hertz)	Rango de deformación angular Y(%)	Rango de velocidad de deformación angular (1/seg)
Triaxial cíclico (L)	0.2 -5	10^{-2} -5	0.8×10^{-4} -1
Corte simple cíclico (L)	0.2 -5	10^{-2} -5	0.8×10^{-4} -1
Torsión cíclica (L)	0.2 -5	10^{-2} -5	0.8×10^{-4} -1
Columna rescirante(L)	50 -200	10^{-4} - 10^{-2}	2×10^{-4} - 8×10^{-2}
Refracción sísmica (C)	20 -100	10^{-4} - 10^{-3}	0.8×10^{-4} - 0.4×10^{-2}
Cross-hole. Down hole y Up hole (C)	20 -100	10^{-4} - 10^{-3}	0.8×10^{-4} - 0.4×10^{-2}
Vibración forzada en bloques o placas (C)	< 50	10^{-3} - 10^{-1}	$< 2 \times 10^{-3}$ - $< 2 \times 10^{-1}$
Ensayo de placa cíclico (T)	<0.1	10^{-2} -5	$< 0.4 \times 10^{-4}$ - $< 2 \times 10^{-1}$
Vibración forzada en placa atomillada (C)	< 50	10^{-3} - 10^{-1}	2×10^{-3} - 2×10^{-1}
Presiómetro dinámico (C)		10^{-2} - 10^{-1}	
Solisitaciones en: Máquinas	3.0 -50	10^{-4} - 10^3	1.2×10^{-3} - 2×10^3
Sismos con foco transcurso	3.0 -5		
Sismos con foco subductivo	10.0 -15	Depende del suelo , solisitaciones de interaccion suelo-estructura, etc.	
Olas	<0.2		
Los rangos expuestos en la tabla corresponde a valores típicos pudiendo variar según sean las modificaciones especiales introducidas en los equipos de ensayo. Las frecuencias de los sismos corresponden a valores predominantes en suelos duros a distancias			

Tabla 3.1 Recomendación estudios de acuerdo a rango frecuencias

CAPITULO 4

ANÁLISIS DE VIBRACIONES

4.1 Introducción

La variación en los parámetros que influyen en el diseño de una cimentación de maquinaria son: a) el centro de gravedad, b) el momento de inercia de la base, c) el momento de inercia de la masa, d) la rigidez efectiva de la base-soporte y e) el amortiguamiento.

Los parámetros mencionados en a, b y c se denominan "propiedades geométricas del sistema maquina-cimentación, y los parámetros d y e son características del terreno se desplante.

De acuerdo a lo anterior, es común identificar en primer término que tipo de maquinaria es a la que se habrá de diseñar la cimentación, por lo que se presentan los siguientes criterios.

4.2 Modelos discretos

Los compresores recíprocos son máquinas relativamente pesadas y generan fuerzas vibratorias de magnitud considerable en frecuencias bajas de operación. Las frecuencias de operación están muy cercanas a las frecuencias naturales de la cimentación en los varios modos de vibración, creando así condiciones resonantes en el sistema de cimentación. La magnitud de la amplitud de vibración en la condición resonante llega a ser un criterio de control por la aproximación de las frecuencias natural y de operación. Por lo tanto, la inclusión de los efectos de amortiguación interna y geométrica durante la oscilación llega a ser una consideración importante y esto solo puede ser realizado por el uso de la teoría del medio elástico. En el pasado, los Bloques de cimentación para compresores recíprocos han sido proporcionados usando el concepto del módulo de reacción dinámico². En esta teoría, la estructura cargada descansa sobre el suelo es considerada que descansa sobre una serie de resortes elásticos independientes que representan el soporte suministrado por el suelo. Estos resortes proveen una fuerza reactiva equivalente en respuesta al desplazamiento.

El modelo para este tipo de problema consiste de un bloque rígido de concreto, en el cual el terreno ha sido reemplazado por un resorte, de manera similar a una viga sobre un medio elástico, excepto que en la viga se suponen varios resortes y en este caso es uno solo, pudiendo o no considerar el amortiguamiento proporcionado por el suelo. Ver fig. 4.1

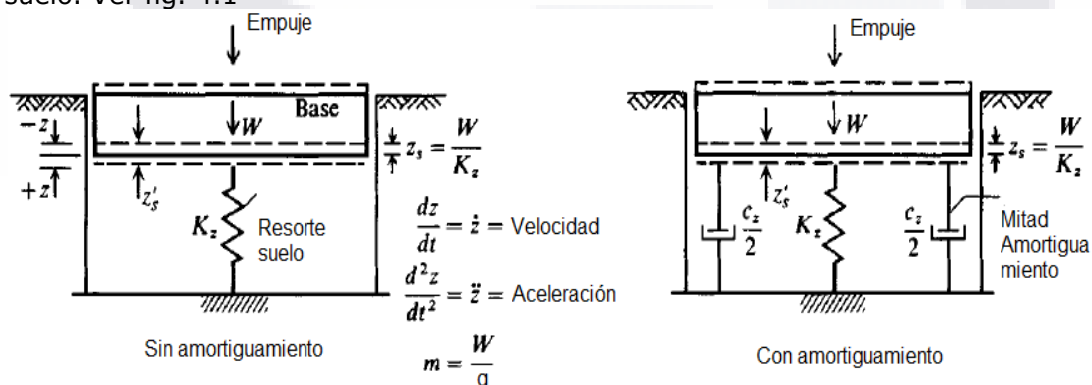


Fig. 4.1 Cimentación en estado de equilibrio

En esta condición, el resorte que modela el suelo, está comprimido por efecto del peso estático y la deformación se puede obtener de la siguiente expresión:

$$Z_s = \frac{W}{k_z}$$

En ese instante, Z_s y K_z son valores estáticos. La siguiente consideración es que en ese momento el bloque comienza a moverse hacia arriba y hacia abajo vibrando y entonces los valores de Z_s y K_z se convierten en dinámicos.

Se puede escribir entonces la ecuación diferencial que describe este movimiento usando los conceptos de la fig. 4.1 en la forma de la segunda ecuación de Newton, $F=ma$, que en una dimensión se puede expresar como la siguiente ecuación diferencial:

$$m\ddot{Z} + K_z Z = 0$$

En cuya solución, se tiene lo siguiente:

Frecuencia angular: $\omega_n = \sqrt{\frac{K_z}{m}}$, frecuencia angular

Periodo: $T = \frac{2\pi}{\omega_n}$

Frecuencia natural: $f_n = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_z}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_z g}{W}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{Z_s}}$

Donde la vibración continuaría de manera infinita, cosa que no es cierta, ya que aparece un amortiguamiento provocado por el terreno. La amortiguación se considera como una restricción proporcional a la velocidad. Con este concepto se puede plantear la ecuación diferencial como:

$$m\ddot{Z} + C_z \dot{Z} + K_z Z = 0$$

De cuya solución obtenemos el desplazamiento dinámico instantáneo Z como:

$$Z = C_1 e^{\beta_1 t} + C_2 e^{\beta_2 t}$$

Donde: $\beta_1, \beta_2 = \frac{-C_z}{2m} \pm \sqrt{\left(\frac{C_z}{2m}\right)^2 - \frac{K_z}{m}}$

Teniendo los siguientes tres casos de amortiguamiento, dependiendo del resultado del radical:

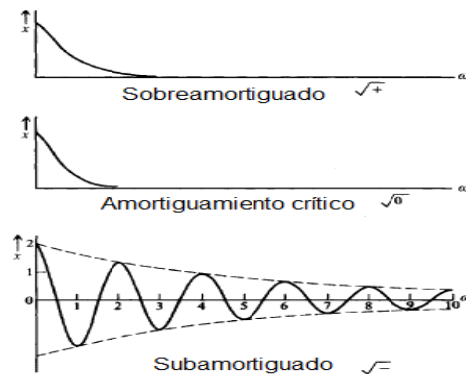
Caso 1. No amortiguado (radical < 0), donde $C_z^2 = 0$

Caso 2. Sobre amortiguado (radical > 0), con $C_z^2 > 4K_z m$

Caso 3. Amortiguamiento crítico (radical = 0) con $C_z^2 = 4K_z m$,

definiendo el amortiguamiento crítico como: $C_{zc} = 2m\omega_n = 2\sqrt{K_z m}$

Los resultados gráficos que ejemplifican los tres sistemas antes mencionados se muestran en la Fig. 4.2

**Fig. 4.2 Vibración libre**

Definiendo la razón de amortiguamiento del sistema como:

$$\xi = \frac{C}{C_{cr}}$$

De acuerdo a lo anterior, algunos autores¹¹, recomiendan las siguientes bases para efectuar un análisis dinámico, tomando en cuenta los siguientes parámetros.

Equipos recíprocos > 200 H.P.
Equipos centrífugos > 500 H.P.
ó cuando el equipo tenga un peso > 2,270 kg

La diferencia entre la respuesta estática y dinámica, puede expresarse matemáticamente con las siguientes expresiones:

Respuesta estática: $P = k u$

Respuesta dinámica: $P(t) = k u + c \frac{du}{dt} + m \frac{d^2u}{dt^2}$

Donde: C= coeficiente de amortiguamiento (medida de la energía disipada en un ciclo de vibración).

Para el diseño de una cimentación de maquinaria, se deben satisfacer los siguientes requisitos:

- 1.- Los esfuerzos dinámicos inducidos en la cimentación debidos a la operación de la maquinaria, en combinación con los esfuerzos debidos a el peso propio de la cimentación y el de los accesorios, no debe exceder el límite permisible para el material del ciminto.
- 2.- El suelo debe ser capaz de soportar las fuerzas periódicas que se trasmiten a través de la superficie de contacto, sin sufrir deformaciones importantes.
- 3.- El movimiento de la cimentación y del terreno en que se apoya, para cualquier modo de vibración, no debe ser perjudicial para la operación de la propia maquina, los equipos o estructuras vecinas, ni para las personas.

4.3 Modos de vibración de una cimentación tipo bloque.

Una cimentación rígida, tiene 6 grados de libertad, Fig. 4.3, y por consecuencia seis correspondientes de frecuencia natural, tres de ellas son traslaciones paralelas a los tres ejes principales y las otras tres son giros alrededor de esos mismos ejes.

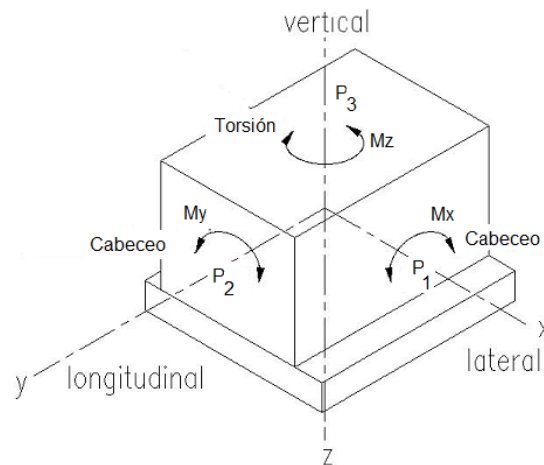


Fig. 4.3 Modos de vibración de una cimentación en Bloque

1. Traslación a lo largo del eje Z (Vibración Vertical)
2. Traslación a lo largo del eje X (Vibración Horizontal Lateral)
3. Traslación a lo largo del eje Y (Vibración Horizontal Longitudinal)
4. Rotación alrededor del eje X (cabeceo)
5. Rotación alrededor del eje Y (Cabeceo)
6. Rotación alrededor del eje Z (Torsión)

Los modos de vibración pueden ser acoplados o desacoplados, dependiendo de la posición relativa del centro de gravedad del conjunto maquina-cimiento y del centro de gravedad del área del bloque.

4.4 Métodos dinámicos para análisis de cimentaciones de maquinaria.

Se usan varios métodos en el análisis de la vibración de cimentaciones de tipo bloque, los cuales se exponen a continuación:

- 1.- Métodos empíricos
- 2.- Método del semi-espacio elástico
- 3.- Método de los resortes lineal elásticos sin considerar el peso del suelo. (Método de Barkan).
4. Método de los resortes lineal elásticos considerando el peso del suelo.

4.4.1 Métodos empíricos.

Estos métodos están basados en resultados de datos experimentales, Tschebotariof², presenta una relación aproximada entre el área de contacto de la cimentación de la maquinaria y una variable que define como "frecuencia natural reducida".

$$f_{nr} = f_n \sqrt{\sigma} \text{ donde } \sigma = \frac{W}{BL}$$

Siendo W el peso de la cimentación y el área igual al producto BL , la gráfica se muestra en la Fig. 4.4. La metodología de este método consiste en determinar el valor de la frecuencia natural reducida basándose en el esfuerzo medio en el terreno y la frecuencia natural de la maquinaria; con este valor se entra en la gráfica y de acuerdo al tipo de suelo, se obtiene el valor del área de desplante, la que debe coincidir con la suposición inicial.

Alpan¹² hizo uso de los planteamientos de Tschebotariof y desarrolló una expresión para obtener la frecuencia natural de la siguiente manera:

$$f_n = \frac{\alpha}{\sqrt{W}} (BL)^4$$

Donde: W es el peso de la cimentación en kg y

B, L las dimensiones en planta del bloque en m.

α es una constante igual a 3,900 para limos,

69,000 para arcillas plásticas,

82,000 para arenas y

111,000 para arenas cementadas.

De acuerdo a la naturaleza de estos métodos, se recomienda usarlos básicamente para diseños preliminares.

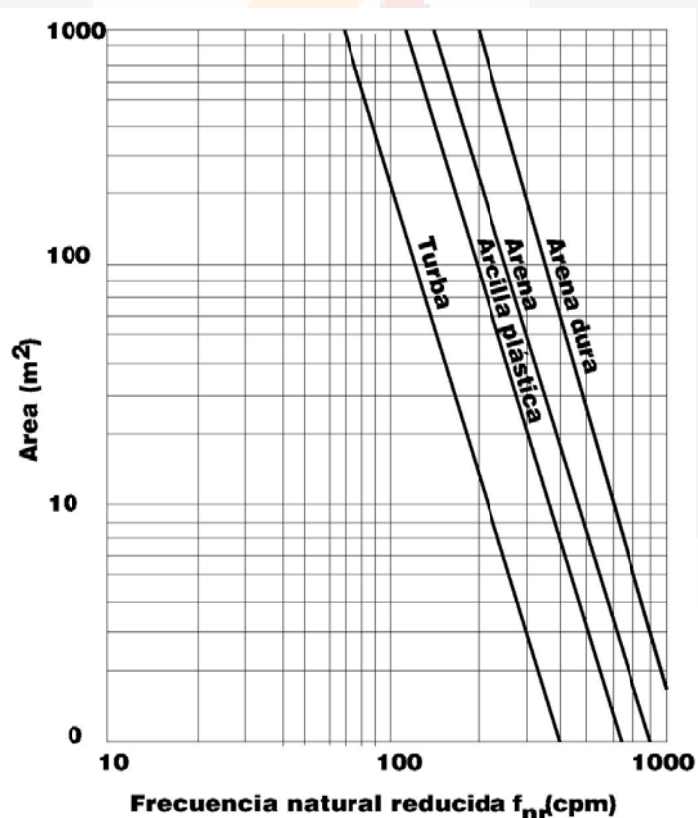


FIG. 4.4 Relación f_{nr} contra área de la cimentación.

4.4.2 Métodos basados en considerar al suelo como un sólido elástico semi-infinito.

El suelo es considerado como un sólido semi-infinito elástico e isotrópico, comúnmente llamado "semi espacio elástico", el cual está sujeto a las vibraciones de un oscilador, apoyado en una base circular. Las propiedades que se requieren del sólido elástico son: El módulo de cortante G , la relación de Poisson μ , y la densidad de masa ρ . Estos métodos predicen la amplitud del movimiento resultante de una fuerza periódica.

Bajo estas hipótesis se suponen tres tipos de distribución en la base de la cimentación, uniforme, parabólica y la producida por una base rígida. Fig. 4.5.

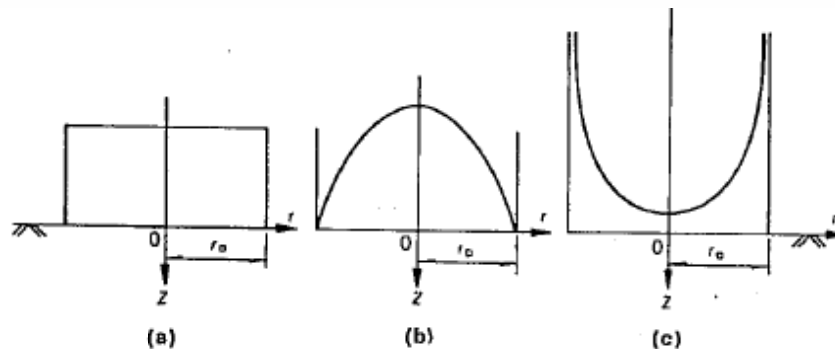


Fig. 4.5 Tipos de distribución de presiones, a)Uniforme, b)Parabólica y c)Base rígida

En esta teoría, la zapata se considera que descansa en la superficie del medio elástico y tiene áreas de contacto geométricas, usualmente circulares, pero otras formas tales como rectangulares ó franja longitudinal pueden también ser manejadas con algunas simplificaciones. Esta teoría incluye la disipación de energía a través del medio por "amortiguación geométrica" y permite el cálculo de una amplitud finita de vibración en la frecuencia resonante. El método es un procedimiento analítico que provee un medio racional de evaluar las constantes de resorte y amortiguación para su incorporación en parámetros globales, sistemas vibratorios masa-resorte-amortiguador.

Las soluciones matemáticas para calcular la respuesta de una cimentación vibrando en diferentes modos, han sido obtenidas por varios investigadores. El estudio de Lamb (1904) da la respuesta de un semi-espacio elástico excitado por una fuerza vertical periódica, actuando a lo largo del eje vertical, es la primera investigación en esta área, este problema, el cual también es conocido como "Carga dinámica de Boussinesq", se analizó como un caso de propagación de onda de dos dimensiones. El estudio fue luego ampliado para cubrir las condiciones de vibración ocasionadas por una fuerza oscilatoria horizontal o vertical actuando en la superficie, y para la vibración por fuerzas horizontales o verticales aplicadas linealmente en cualquier punto dentro de un medio elástico. Estos casos son ilustrados en la Fig. 4.6.

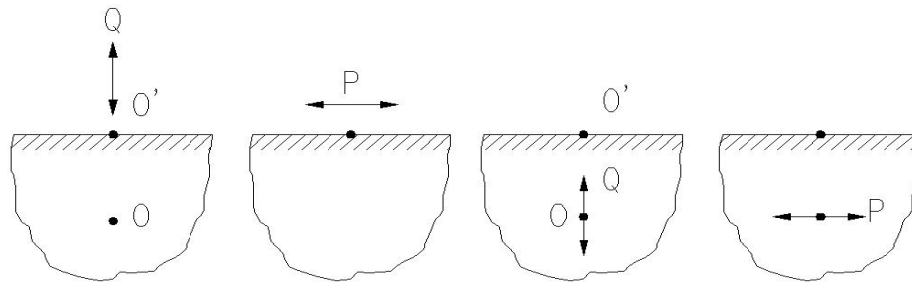


Fig. 4.6. Problemas de Lamb, Fuerza Oscilatoria en Estado Continuo.

4.5 Consideraciones de diseño:

4.5.1. Condiciones estáticas.

De manera general, la cimentación de maquinaria reciprocante o rotatoria de baja velocidad, consiste en un bloque masivo de concreto que puede considerarse para efecto de vibraciones como infinitamente rígido, para lo cual es adecuado tomar en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Proporcionar un área de desplante que trasmita el 50% de la capacidad de carga del suelo.
- Ya que los asentamientos deben ser uniformes, el centro de gravedad de la cimentación y de la maquinaria deben tener máximo un 5% de excentricidad.
- La suma de las cargas estáticas y dinámicas, no deben crear un estado de presiones mayor al 75% de la capacidad de carga del suelo.
- La combinación del centro de gravedad de las cargas estáticas y dinámicas deben tener un máximo de 5% de excentricidad respecto a la base. En el caso de que existan fuerzas de giro, el eje de giro debe coincidir con el eje principal del cimient. La magnitud de el resultado de los asentamientos, debe ser menor que la capacidad de deformación de las tuberías que se conecten a la maquinaria.
- La frecuencia natural de vibración vertical del sistema maquina-cimentación no debe de coincidir con la frecuencia de operación de la máquina.
- La amplitud de los desplazamientos no debe exceder normalmente de 0.2 mm.

4.5.2. Condiciones Dinámicas.

El diseño de una cimentación tipo bloque sujeta a cargas dinámicas será precedida por la racionalización de la estructura en un modelo matemático discreto adecuado. Un problema de vibración es resuelto para definir el sistema estructural en términos de un modelo equivalente consistente de una masa total con un resorte elástico y un amortiguador. Cuatro modelos de los modos independientes tienen un grado de libertad en la dirección de la fuerza actuante y un modelo para un modo acoplado tiene dos grados de libertad (traslación y rotación).

Los parámetros de diseño, se representan convencionalmente como un sistema masa-resorte y un amortiguador, los cuales son usados para analizar el movimiento de un bloque rígido de cimentación.

Las ecuaciones del movimiento están dadas por:

$$m\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = P(t)$$

Donde m es la masa equivalente, C es la constante equivalente de amortiguamiento, K es la constante del resorte y $P(t)$ es una fuerza variable con el tiempo. Una representación de estos modelos aparece en la Fig. 4.6

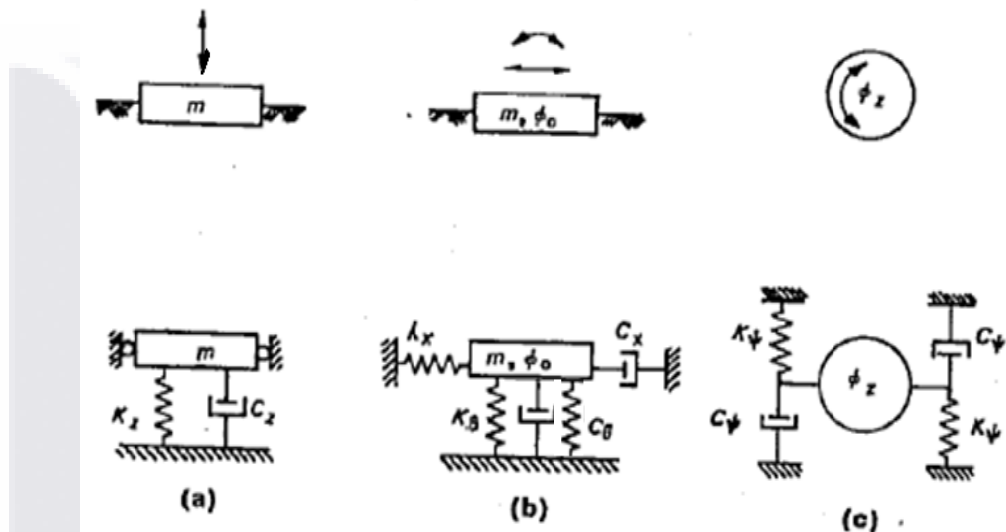


Fig. 4.6 Sistemas masa-resorte equivalentes a) vibración vertical amortiguada, b) deslizamiento y cabeceo amortiguado, c) Modo torsional amortiguado.

4.6 Metodología de diseño del semi-espacio elástico.

En el método del semi-espacio elástico existen dos opciones; una de ellas es usada si la cimentación es superficial, en cuyo caso no se considera el amortiguamiento que le induce el terreno circundante al bloque, y en la segunda opción, si es considerado este efecto.

4.6.1 Cimentaciones superficiales.

1.- Obtención de la frecuencia natural

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

donde la constante del resorte k se obtiene a partir de las siguientes expresiones:

a).- Para cimientos circulares:

Modo de Vibración	Constante de Resorte	Planteada por:
Vertical	$k_z = 4 Gr_o / (1 - \mu)$	Timoshenko and Goodier
Horizontal	$k_x, k_y = \frac{32(1 - \mu)Gr_o}{7 - 8\mu}$	Whitman and Richart
Cabeceo	$k_\phi = \frac{8Gr_o^3}{3(1 - \mu)}$	Borowicka
Torsión	$k_\theta = \frac{16Gr_o^3}{3}$	Reissner and Sagoci

b).- Para cimientos rectangulares:

Modo de Vibración	Constante de Resorte	Planteada por:
Vertical	$k_z = G F_z \sqrt{BL} / (1 - \mu)$	Barkan
Horizontal	$k_x, k_y = F_x G (1 + \mu) \sqrt{BL}$	Barkan
Cabeceo	$k_\psi = F_\psi G B^3 / (1 - \mu)$	L/B > 1.0 Gorbunov-Possadov y Serebranyi

Donde:

G, μ = Módulo de cortante y relación de Poisson, del suelo.

r_o = Radio equivalente de la base

Los coeficientes F_z, F_ψ, F_x para zapatas rectangulares sujetas a vibración, dependiendo de la relación L/B se indican en la siguiente tabla 4.1:

L/B	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0	10.0
F_z		2.12	2.18	2.26	2.44	2.82
F_ψ		3.64	2.35	1.82	1.38	1.01
F_x $\mu =$						
0.1	2.08	2.00	2.04	2.10	2.30	2.50
0.3	1.85	1.74	1.74	1.81	1.90	2.08
0.4	1.69	1.58	1.57	1.61	1.70	1.88
0.5	1.54	1.41	1.37	1.40	1.46	1.88

Tabla 4.1 Coeficientes F para zapatas rectangulares.

Para la obtención de r_o se basa en un área circular con un momento de inercia equivalente, y el momento de inercia de masa de un cilindro de altura h alrededor de los ejes en su base I_ϕ . La masa se puede obtener para ambos I , como:

$$m = \pi \cdot r_o^2 h \gamma / g$$

Se pueden usar las formulas siguientes para obtener los radios equivalentes.

Vertical $\sqrt{\frac{BL}{\pi}},$

Horizontal $\sqrt{\frac{BL}{\pi}},$

Cabeceo $\sqrt[4]{\frac{BL^3}{3\pi}},$

$$\text{Torsión} \quad \sqrt[4]{\frac{BL(B^2 + L^2)}{6\pi}}$$

2.- Obtención de la relación de masas B_z , B_x y B_ψ y los coeficientes de amortiguamiento D_z , de acuerdo a la siguiente tabla:

Modo de vibración	Relación de masas	Amortiguamiento	Referencia
Vertical	$B_z = (1 - \mu) W / (4 \gamma r_o^3)$	$\xi_z = 0.425 \alpha z / \sqrt{B_z}$	Lysmer and Richart
Horizontal	$B_x = (7-8\mu) W / (32 (1-\mu) \gamma r_o^3)$	$\xi_x = 0.288 / \sqrt{B_x}$	Hall, Richart
Cabeceo	$B_\psi = 3(1-\mu) I_\psi / (8 \rho r_o^5)$	$\xi_\psi = 0.15 / (1+B_\psi) \sqrt{B_\psi}$	Source
Torsional	$B_\phi = I_\phi / (\rho r_o^5)$	$\xi_\phi = 0.15 \alpha \phi / (1+n\phi B_\phi) \sqrt{n\phi B_\phi}$	Whitman and Richart

3.- Obtener la frecuencia de resonancia, de acuerdo a los siguientes criterios.

Para fuerza constante de excitación:

$$f_r = f_n \sqrt{1 - 2\xi^2}$$

Para fuerza dependiendo de frecuencia de excitación:

$$f_r = f_n \frac{1}{\sqrt{1 - 2\xi^2}}$$

Con la frecuencia de resonancia, se obtiene la relación de frecuencias $\frac{f_r}{f_n}$ y empleando las gráficas¹³ siguientes, se obtiene el factor de amplificación:

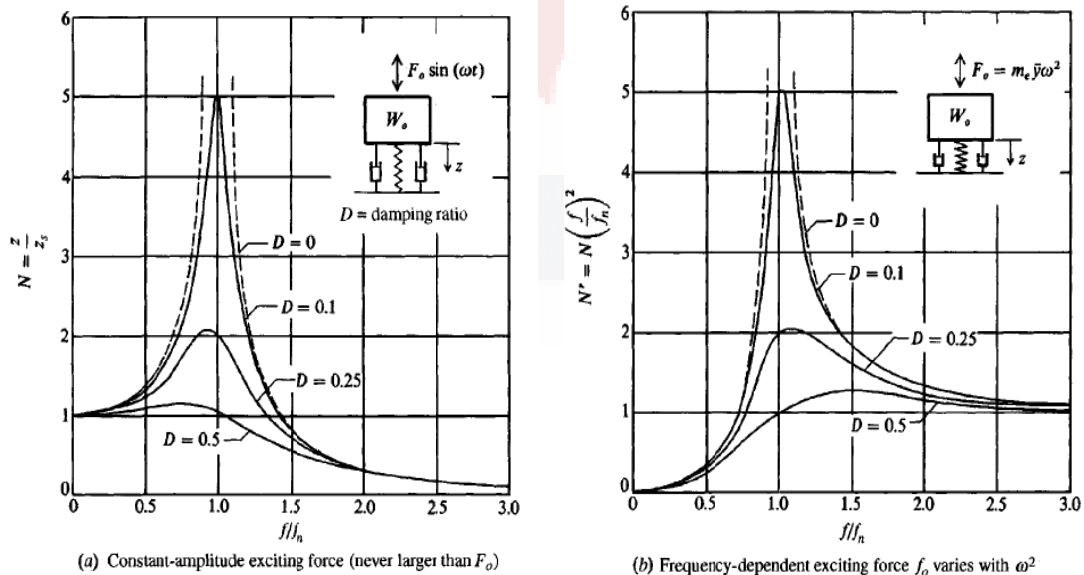


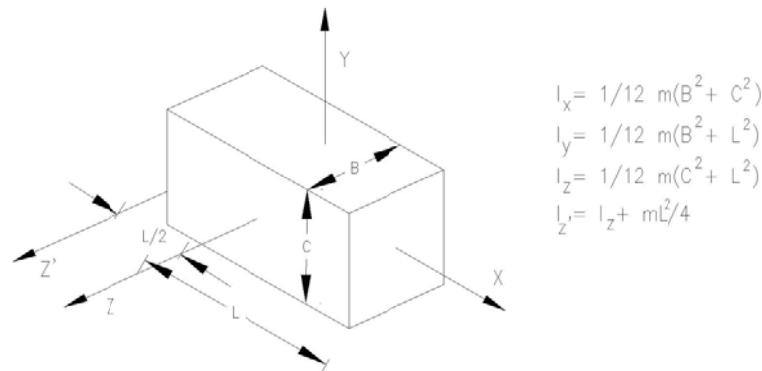
Fig. 4.8 Relaciones Amplitud-Relación de frecuencias

4.6.2 Cimentaciones Embebidas.

Si se considera el amortiguamiento inducido por el terreno circundante al bloque de cimentación, la metodología de diseño consiste de los siguientes pasos:

1.- Determinación de la masa y el momento de inercia de la masa.

$$m = \frac{W}{g} , \quad I_{\psi, \phi} = \sum_1^n \left[\frac{m_i}{12} (B_i^2 + C_i^2) + m_i k_i^2 \right]$$



2.- Determinar las constantes de resorte, tomando las siguientes consideraciones:

2.1 Radio equivalente para zapatas rectangulares y coeficiente de embebido.

Donde:

h=profundidad de la cimentación embebida debajo del terreno.

L=dimensión horizontal perpendicular al eje de cabeceo

B=dimensión restante.

2.2 Coeficiente de constante de resorte β Fig. 4.9

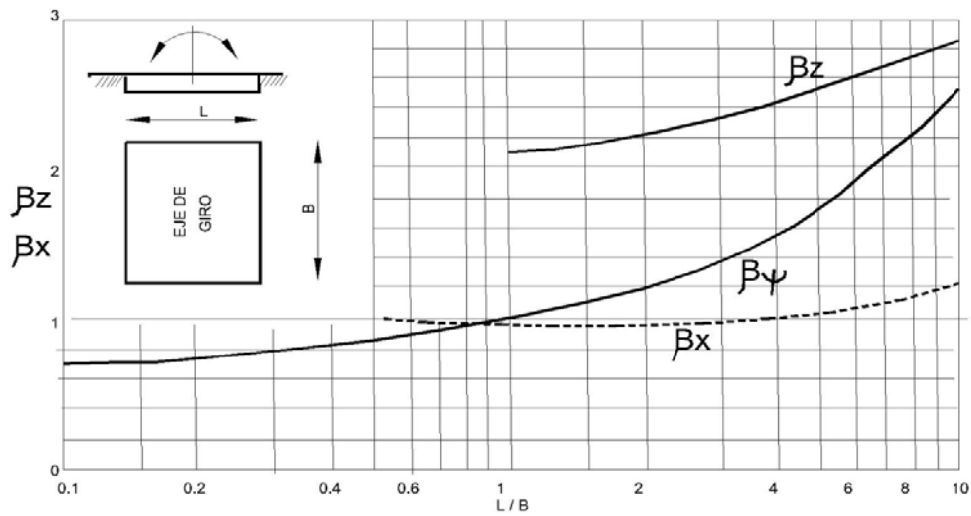


Fig. 4.9 Coeficiente de constante de resorte β

2.3 Constante de resorte equivalente K :

	γ
	γ
	$L\eta_x$
	$\cdot \mu$

Tabla 4.2 Constante de resorte

3.- Determinar la relación de amortiguamiento.

3.1 Factor de embebido α .

$\sqrt{\eta_\psi}$

Tabla 4.3 Efecto de la profundidad de desplante en factor amortiguamiento

3.2 Relación de masa B y relación de amortiguamiento.

3x

Tabla 4.4 Relación de masa y relación de amortiguamiento.

3.3 Coeficiente de amortiguamiento efectivo.

0.2
1.60

Tabla 4.5 Valores de $\eta\psi$ para valores de $\beta\psi$

3.4 Determinar el amortiguamiento interno, en base al estudio de mecánica de suelos. En caso de no contar con datos de laboratorio, se pueden usar los de la tabla 4.6¹³

Type of Soil	Equivalent D
Dry sand and gravel	0.03 to 0.07
Dry and saturated sand	0.01 to 0.03
Dry sand	0.03
Dry and saturated sands and gravels	0.05 to 0.06
Clay	0.02 to 0.05
Silty sand	0.03 to 0.10

Tabla 4.6 Valores típicos de amortiguamiento interno¹³

3.5 Obtener el amortiguamiento total:

$$D = D \text{ interno} + D \text{ embebido}$$

En todos los casos : $\xi = D$

4.- Obtención de las frecuencias.

4.1 Frecuencia natural.

$$f_n = 60 \frac{\sqrt{\frac{k}{m}}}{2\pi}$$

4.2 Frecuencia de resonancia f_m

Fuerza constante $F_o = cte$: $f_m = f_n \sqrt{(1 - 2D^2)}$

Masa rotatoria $F_o = m_i e \omega^2$: $f_m = \frac{f_n}{\sqrt{1 - 2D^2}}$

5.- Factor de amplificación.

Fuerza constante $F_o = cte$: $M = \frac{1}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2Dr)^2}}$

Masa rotatoria $F_o = m_i e \omega^2$: $M = \frac{r^2}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2Dr)^2}}$

6.- Desplazamientos de respuesta.

Fuerza constante $F_o = cte$: $Y_{\max} = \frac{(F_o / k)}{2D\sqrt{(1 - D^2)}}$

Masa rotatoria $F_o = m_i e \omega^2$: $Y_{\max} = \frac{(m_i e / m)}{2D\sqrt{(1 - D^2)}}$

7.- Factor de transmisibilidad

Fuerza constante $F_o = cte$: $T_y = \frac{\sqrt{1 + (2Dr)^2}}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2Dr)^2}}$

Masa rotatoria $F_o = m_i e \omega^2$: $T_y = \frac{r^2 \sqrt{1 + (2Dr)^2}}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2Dr)^2}}$

8.- Fuerza transmitida.

Vertical $P_v = \Sigma T_r F_{z0}$

$$\text{Horizontal} \quad P_H = \sum T_r F_{x0}$$

$$\text{Cabeceo} \quad PT_\psi = \sum T_r T_{\psi 0} \quad \text{ó} \quad PT_\phi = \sum T_r T_{\phi 0}$$

4.7 Criterios de aceptación.

Una vez realizados los cálculos anteriores, se está en posibilidad de revisar si las dimensiones propuestas de la cimentación de la maquinaria son aceptables, pudiendo seguir la siguiente metodología:

- a) Verificación de la presión transmitida al terreno en condiciones estáticas y dinámicas.

Capacidad de carga estática. Se proporcionará un área de cimentación para el 50% de la capacidad de carga admisible.

El asentamiento estático será uniforme. El Centro de Gravedad de la zapata y de las cargas de la maquinaria, deberán estar dentro del 5% de cada dimensión lineal.

- b) Verificación de capacidad de carga estática más dinámica. El factor de Amplificación de acuerdo al punto 5 anterior, preferentemente deberá ser menor de 1.5.

La suma de cargas estáticas + dinámicas modificadas no deberán crear presiones de carga mayor que el 75% de la presión de carga admisible dado para condiciones estáticas.

$$q_{act} = \frac{P_v}{BL} + \frac{6(PT_\psi)}{BL^2} + \frac{6(PT_\phi)}{LB^2} < 0.75q_{adm}$$

- c) Asentamientos: Carga estática más dinámica repetida. El Centro de Gravedad combinado de la carga estática más carga dinámica deberán tener como máximo una excentricidad de 5% con respecto al Centro de Área de la zapata.

Para movimientos de cabeceo, los ejes de cabeceo coinciden con los ejes principales de la zapata. La magnitud del asentamiento resultante deberá ser menor que el admisible permitido por las instalaciones se conecten a la zapata.

Limitaciones de las condiciones dinámicas.

- a).- Amplitud de vibración en la frecuencia de operación. La amplitud máxima del movimiento de la cimentación deberá estar en la zona "A" o "B" de la figura 4.10

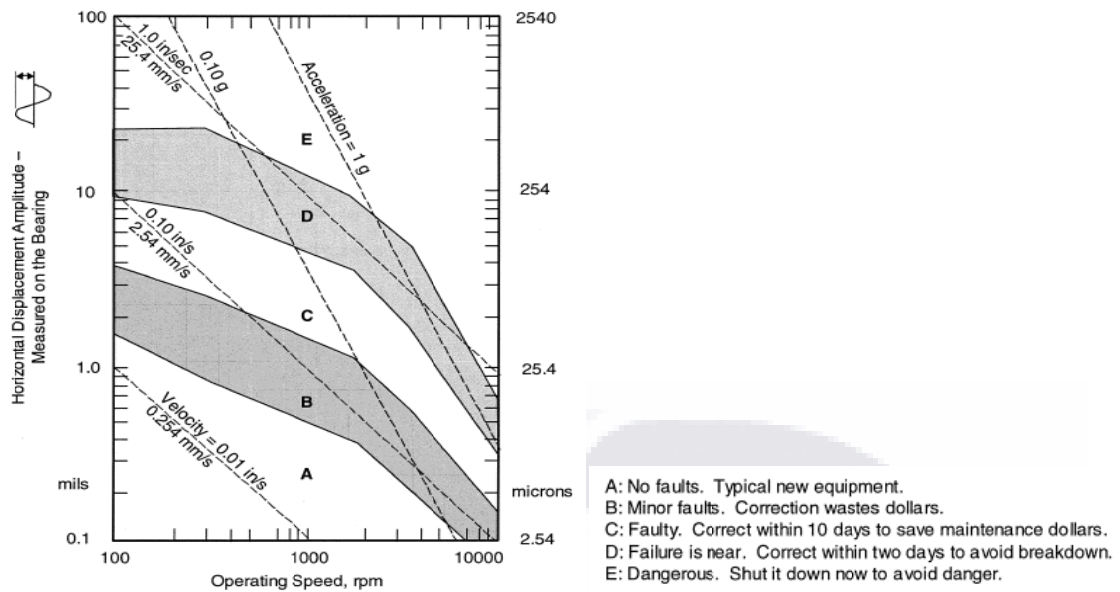


Fig. 4.10 Criterios de Vibración para maquinaria recíprocante

b) La velocidad ($2\pi \cdot f(\text{cps})$) x la amplitud de desplazamiento, será comparada con los valores límite de la tabla 4.7 y la Fig. 4.10 y Fig. 4.11. para tener al menos condiciones aceptables de operación.

Tabla 4.7 Datos generales de la severidad de la vibración de maquinaria.

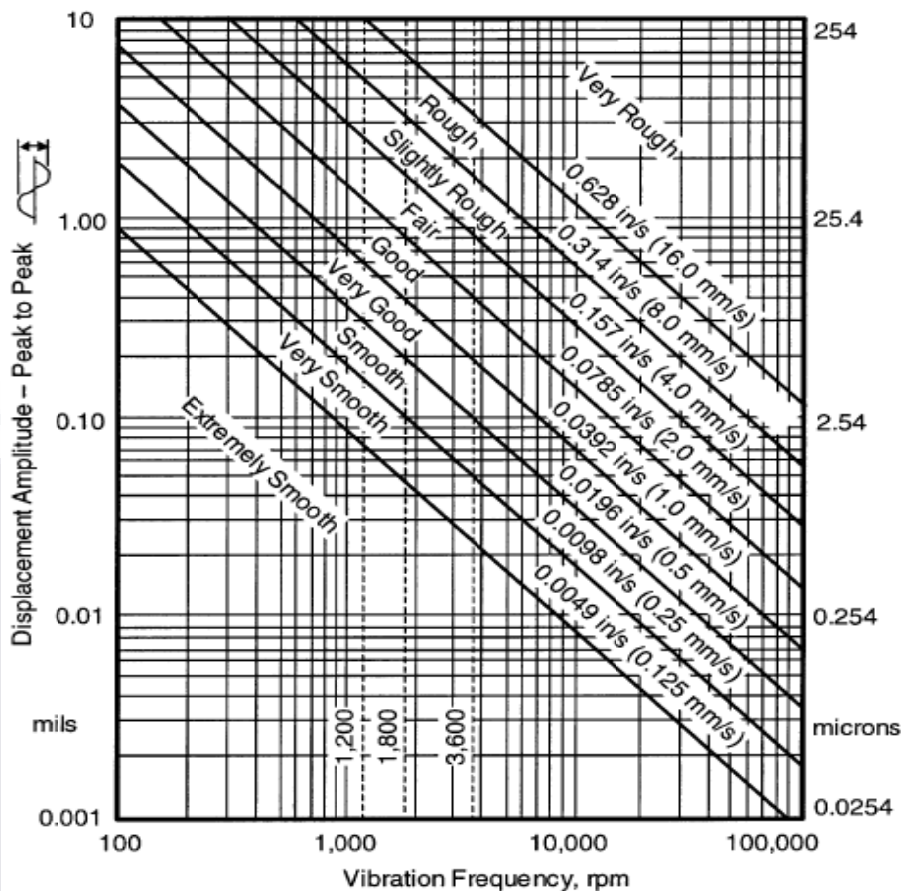


Fig. 4.11 Datos generales de la severidad de la vibración de maquinaria.

c) La aceleración igual a $4\pi^2 f_2 \times$ la amplitud de desplazamiento, deberá caer en las zonas "A" o "B" de la fig. 4.10

d) El factor de amplificación de acuerdo con la sección 5, preferiblemente deberá ser menor a 1.5.

Resonancia

Las frecuencias actuantes, de la máquina deberán tener al menos una diferencia de $\pm 20\%$ con las frecuencias resonantes esto es $f < 0.8 f_m$ o $f > 1.2 f_m$.

Factor de Transmisibilidad.

Usualmente considerado para máquinas de alta frecuencia montadas sobre resortes. Los factores de transmisibilidad deberán ser menores que 3.

Demandas ambientales.

1.- Efectos fisiológicos en las personas. Si la máquina está localizada en un edificio, se usará la Fig. 4.12 y 4.13 para probar la suficiencia de la instalación.

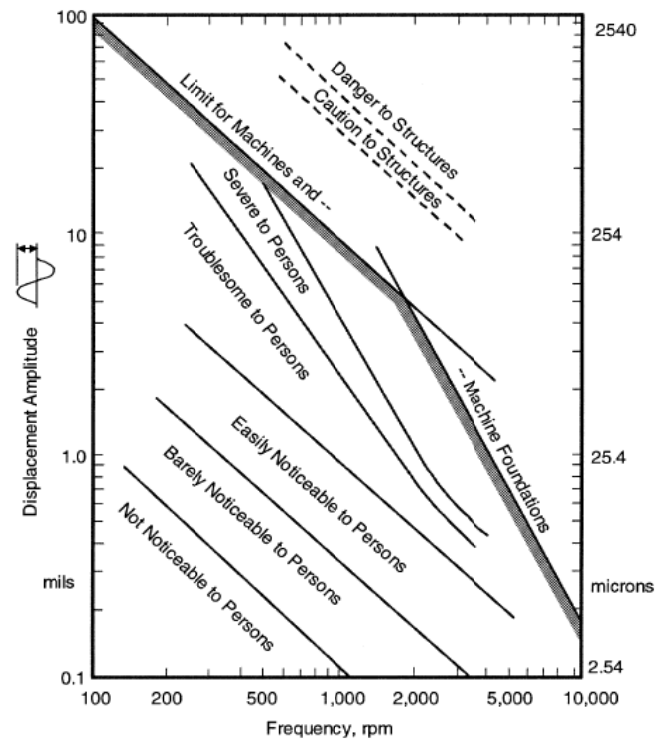


Fig. 4.12 Límites de amplitud de desplazamiento para distintas frecuencias

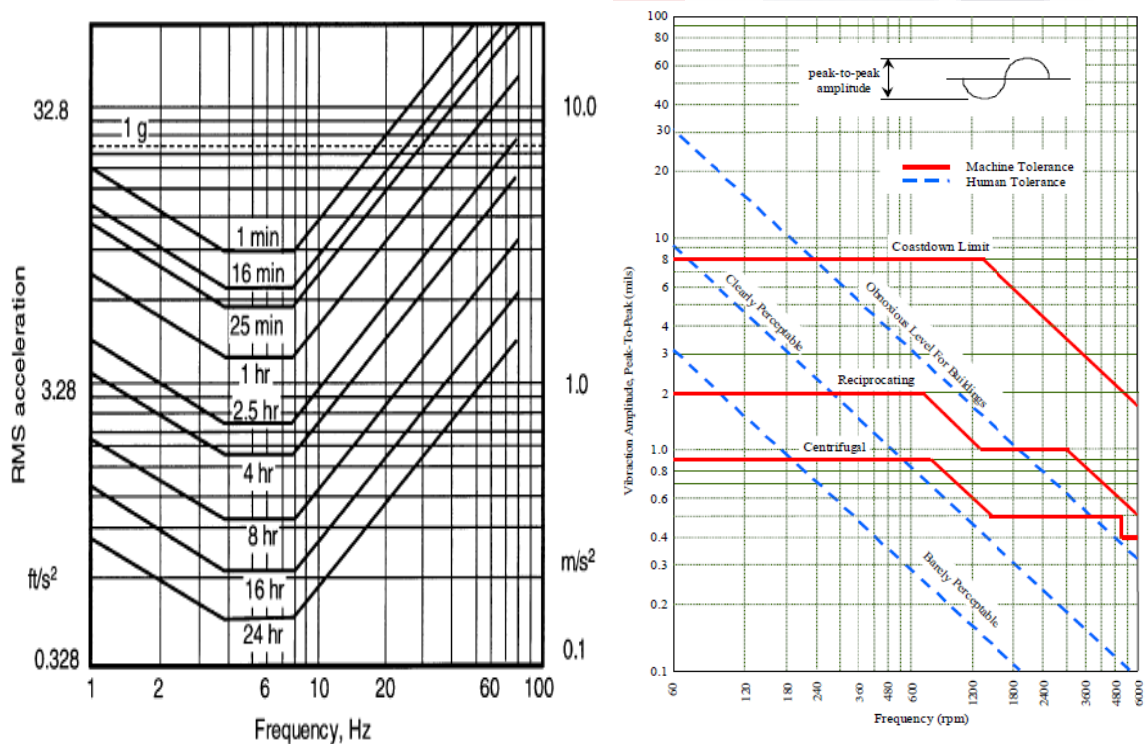


Fig. 4.13 Límites de exposición de vibraciones para distintas frecuencias

Daños a la estructura. Se usarán los límites dados en la Fig. 4.11

Resonancia de la superestructura. Se deberá evitar la resonancia con la frecuencia natural menor, manteniendo la relación de frecuencia operante a frecuencia natural menor que 0.5 ó mayor que 1.5.

4.8 Cimentaciones sujetas a máquinas de impacto.

Los martillos y prensas son ejemplos típicos de máquinas de impacto. Las cimentaciones de estos equipos, también son generalmente bloques de concreto. Fig. 4.14.

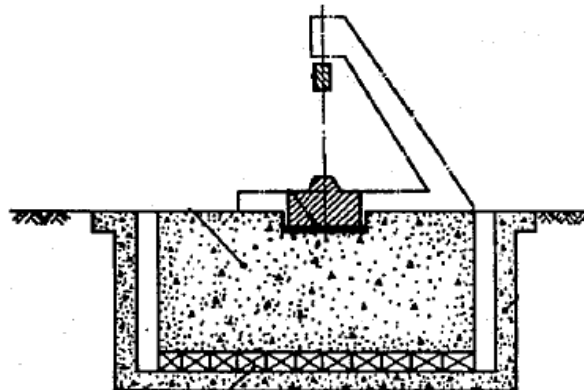


Fig. 4.13 Máquina de impacto

Los datos necesarios para el diseño son los siguientes:

- a).- Tipo de maquinaria de impacto.
- b).- Peso de la pieza que cae W_t
- c).- Peso del yunque W_a
- d).- Peso del soporte del martillo W_{st}
- e).- Dimensiones en la base de la maquinaria $L \times B$
- f).- Movimiento máximo del martillo, h
- g).- Presión efectiva de trabajo (p) en el pistón o área del pistón (A)
- h).- Planos del equipo y de los mecanismos de sujeción.

Criterios de diseño:

La amplitud de deformación del bloque de cimentación, no debe de exceder de los siguientes valores, a menos que el fabricante especifique unos diferentes:

Para el bloque de cimentación a_t :

La amplitud vertical máxima no debe de exceder de 1.2 mm

Para la prensa:

Las amplitudes permisibles dependen del peso de la masa que impacta, pudiendo tomarse a manera de ejemplo, los siguientes:

Peso de la parte que cae.	1 ton	2 ton	3 ton
Máxima amplitud permisible:	1 mm	2 mm	3-4 mm

b).- Los esfuerzos máximos en el suelo no deben de sobrepasar los límites permisibles del material.

4.8.1 Procedimiento de diseño:

El peso mínimo (W_t) de la cimentación, está basado en requerimientos de amplitud de la vibración, que deberá ser menor a 1.2 mm, pudiendo obtenerse mediante la siguiente expresión:

$$W_{\min} = W_t \left[8(1+k)\mu - \frac{W_a + W_{st}}{W_t} \right]$$

Donde k es un coeficiente de impacto ($k=0.5$ para prensas de estampado y 0.25 para martillos de forja), el término W_{st} será usado solo si la máquina está apoyada directamente sobre la cimentación.

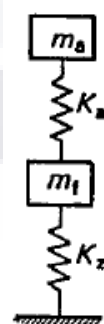
El área mínima de la base estará en función de los requerimientos de esfuerzos en el terreno de desplante, pudiendo usarse la siguiente expresión.

$$A_{\min} = \frac{20(1+k)}{\sigma_p} \mu W_t$$

La siguiente tabla¹² proporciona una idea de los espesores mínimos de la cimentación en base a diferentes pesos de la cabeza del martillo.

ESPESOR MINIMO DE LA CIMENTACION		
Peso de cabeza de martillo		Espesor mínimo de cimienta
	ton	m
mas de	1.0	1.00
	2.0	1.25
	4.0	1.75
	6.0	2.25
	> 6.0	>2.25

Para el análisis de las vibraciones verticales, se debe considerar un sistema formado por dos masas-resorte en serie. Fig. 4.15



La masa se obtiene con:

$$m_t = (W_t + W_{st})/g$$

$$m_a = W_a/g$$

La Rigidez del resorte:

$$K_z = C'_z A_t$$

$$C'_z = \alpha C_z$$

Fig. 4.14 Modelo de análisis dinámico Prensa-cimentación. Masas.

$$m_t = (W_t + W_{st})/g$$

$$m_a = W_a /g$$

Rigidez de los resortes.

$$K_z = C'_z A_t$$

$C'_z = \alpha C_z$, donde C_z es el coeficiente elástico de compresión uniforme del área de la base, el que puede tomarse como 3, para cimentaciones de prensas, por lo que la rigidez del resorte K_a puede tomarse como:

$$K_a = \frac{E_a A_s}{t_a}$$

Límite de las frecuencias.

El cuadrado del límite de la frecuencia (ω_a^2), definido como la frecuencia natural de vibración de la maquinaria, suponiendo el suelo como rígido ($K_s = \infty$), esta dado por:

$$\omega_a^2 = \frac{K_a}{m_a}$$

El cuadrado del otro límite de frecuencia (ω_s^2) del sistema completo, suponiendo el suelo como rígido ($K_s = \infty$), esta dado por:

$$\omega_s^2 = \frac{K_s}{m_s + m_a + m_{st}}$$

M_{st} debe agregarse en el denominador, solo si la prensa esta apoyada directamente en el bloque de cimentación.

Frecuencias naturales ω_{n1} Y ω_{n2} :

Para el análisis del sistema de dos grados de libertad sujeto a vibraciones libres, la frecuencia natural circular, debe obtenerse de las raíces de la siguiente ecuación cuadrática.

$$\omega_n^4 - (\omega_a^2 + \omega_z^2) (1 + \alpha) \omega_n^2 + (1 + \alpha) \omega_a^2 \omega_z^2$$

$$\text{Donde } \alpha = \frac{m_a}{m_t + m_{st}}$$

Velocidad de la cabeza antes del impacto:

Para caída libre, se emplea la siguiente fórmula:

$$v = \alpha \sqrt{2gh_o}$$

Donde: h_o , es la altura de caída

α es un factor que toma en cuenta la resistencia del eje del pistón, ($\alpha \cong 1.0$) para ejes ajustados.

Para pistones de doble efecto:

$$v = \alpha \sqrt{\frac{2g(W_t + pA)l}{W_t}}$$

donde: p = presión media del pistón

a = el área del pistón

l = longitud del eje.

α varía de 0.5 a 0.8 (se toma generalmente el promedio).

La energía del impacto E_o , generalmente es un dato proporcionado por el fabricante del equipo, sino puede tomarse la siguiente relación:

$$h_o = \frac{E_o}{W_t} \quad y \quad v = \sqrt{2gh_o}$$

Velocidad después del impacto:

Para un golpe centrado, la velocidad (V), con la que se mueve el sistema después del impacto está dada por:

$$V = \frac{(1+k)}{1 + \frac{W}{W_t}} \cdot v$$

donde W es el peso del sistema recibiendo el impacto. ($W = W_a$)

Para un golpe dado de manera excéntrica, la velocidad V y la velocidad angular del sistema después del impacto son:

$$V = \frac{(1+k)}{1 + \frac{W}{W_t} + \frac{e^2}{i^2}} \cdot v \quad y \quad \dot{\theta} = \frac{(1+k)e}{i^2 \left(1 + \frac{W}{W_t}\right) + e^2} \cdot v$$

donde $i^2 = \frac{\varphi}{m}$ es el momento de inercia de la masa en movimiento

alrededor del eje de rotación, m es la masa y e es la excentricidad del impacto.

Amplitudes:

La amplitud del movimiento de la cimentación estará dada por:

$$a_t = \frac{-(\omega_a^2 - \omega_{n_2}^2) \cdot (\omega_a^2 - \omega_{n_1}^2) V}{\omega_a^2 (\omega_{n_1}^2 - \omega_{n_2}^2) \omega_{n_2}}$$

La amplitud de la prensa:

$$a_a = \frac{-(\omega_a^2 - \omega_{n_1}^2)V}{(\omega_{n_1}^2 - \omega_{2n_2}^2)\omega_{n_2}}$$

Cálculo de las fuerzas dinámicas F_d :

La fuerza dinámica debajo de la cimentación $(F_d)_t$ está dada por:

$$(F_d)_t = \xi \cdot K_z a_t$$

donde ξ es un factor de fatiga que usualmente es tomado como 3.

La fuerza dinámica debajo de la prensa $(F_d)_a$, se puede obtener con:

$$(F_d)_a = \xi(a_t - a_a)K_a$$

4.8.2 Criterios de aceptación:

1.- Las amplitudes calculadas deben de estar dentro de los valores permisibles, de acuerdo a los criterios de diseño.

2.- Los esfuerzos en el suelo, suponiendo una distribución uniforme de carga estarán dada por la siguiente ecuación, donde W es el peso de la maquinaria mas la cimentación.

$$\sigma_s = \frac{W + (F_d)_t}{A_t}$$

En el caso de que se usen placas elásticas para amortiguar la vibración, colocadas debajo de la base de la prensa.

$$\sigma_a = \frac{W + (F_d)_t}{A_a}$$

Los esfuerzos σ_s y σ_a deberán estar por debajo de los límites permitidos, de acuerdo a cada material.

Capítulo 5 Ejemplos de aplicación.

Al calcular una cimentación de maquinaria, se debe partir de un diseño preliminar en el cual puede procederse por tanteos, o pueden utilizarse las recomendaciones del fabricante de maquinaria, cumpliendo con los requisitos básicos de la estática relativos a factores de seguridad al volteo y los de mecánica de suelos en lo concerniente a capacidad de carga y asentamiento del terreno.

El punto que debe cuidarse es que la frecuencia de vibración natural vertical del sistema maquina-cimentación, no coincida con la frecuencia de operación de la maquina, ya que de no cumplirse, se provocan desplazamientos nocivos. En maquinas de baja velocidad, se recomienda que la frecuencia natural del sistema no exceda de una a dos veces la velocidad de operación.

En los primeros tres ejemplos, se trató de seguir los procedimientos descritos en la teoría antes expuesta y para cada una de los diferentes tipos de máquinas.

Ejemplo 1.- Se trata del diseño de una cimentación (bloque de concreto), para soportar un compresor. Se emplea el método empírico y dado que este método consiste en una serie de iteraciones donde se plantea el espesor del bloque y se revisa si cumple o no, se obtuvo una ayuda de diseño a partir de la cual puede iniciarse el primer tanteo. Las dimensiones en planta del equipo son tomadas de las recomendaciones del fabricante.

Ejemplo 2.- Se trata del diseño de la cimentación (bloque de concreto), para soportar un compresor recíprocante, usando el método del semiespacio-elástico. En este ejemplo se inicia planteando las dimensiones del espesor del bloque, aplicando la gráfica planteada en el ejemplo 1 y se sigue la metodología de diseño planteada en la parte teórica de este trabajo.

Ejemplo 3. Se trata del diseño de una cimentación de una máquina de impacto, en donde de acuerdo a la velocidad de operación las fuerzas transmitidas al cimiento pueden suponerse como impulsos, ya que antes de que ocurra el segundo, el efecto del primero ya se disipo.

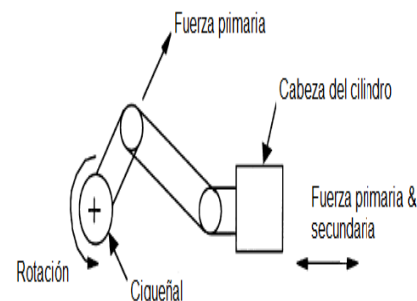
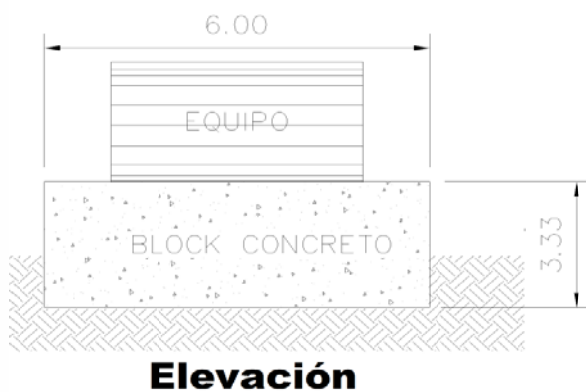
Ejemplo 4. Se trata de modelar una cimentación existente de una prensa y obtener como resultado del análisis la magnitud de los desplazamientos en el área circundante, en el modelo, se obtiene la respuesta del sistema ante una fuerza impulsiva, para luego comparar estos resultados contra los datos obtenidos de mediciones directas en campo con un equipo Etna.

Ejemplo 1. Diseño de la cimentación de un compresor usando el método empírico.

El compresor mostrado a continuación, está soportado por un bloque de concreto. La amplitud de la vibración debe ser menor a ± 0.01 mm y la frecuencia de resonancia debe estar en un rango menor a las 800 rpm. Las características del terreno de desplante son de una arena limosa con un peso volumétrico de 1.7 ton/m^3 , la Capacidad de carga admisible es de 15 t/m^2

Al no tener datos del módulo de rigidez del suelo¹³, se tomará un valor de 1720 ton/m^2 y una relación de Poisson $\mu = 0.25$

Valores representativos del Módulo G	
Material	t/m ²
Arena limpia y densa de cuarzo	1200-2000
arena fina	1600
arena tipo Berlín (e=0.53)	1700-2400
Arena Margosa	1000
Arena densa con grava	70000
Arcilla cenegoza mojada	900-1500
Arcilla cenegoza seca	1700-2100
arcilla	2500-3500
arcilla medianamente arenosa	1200-3000
arcilla arenosa	1200-3000



Datos del Equipo: (por fabricante de maquinaria)

Peso de la maquinaria: 1.01 ton

Fuerza Primaria: $F_p = 1.574 \text{ ton}$

Fuerza Secundaria: $F_s = 0.476 \text{ ton}$

Frecuencia de operación: 1,800 rpm

Ancho del bloque = 1.50 m

Se usará concreto $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$

Paso 1.- Presión estática en el terreno.

$$W_{\text{bloque}} = 3.33 \text{ m} \times 1.50 \text{ m} \times 6.0 \text{ m} \times 2.4 \text{ t/m}^3 = 71.92 \text{ ton}$$

$$\text{área del bloque en planta: } 6.0 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} = 9.0 \text{ m}^2$$

Esfuerzo transmitido al suelo:

$$q = \frac{71.92 + 1.01}{9} = 8.10 \frac{t}{m^2} < q_{admissible}$$

Paso 2. Calcular r_o y frecuencia natural.

$$r_o = \sqrt{\frac{BL}{\pi}} = \sqrt{\frac{1.5 \times 6}{\pi}} = 1.69.m$$

$$k_z = 4 Gr_o / (1 - \mu) = \text{-----} = 15,502 \text{ t/m}$$

$$m = \frac{W}{g} = \frac{71.92 + 1.01}{9.81} = 7.26 \text{ seg}^2 / m$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{15502}{7.26}} = 7.35 \text{ Hz}$$

Paso 3. Calcular desplazamiento máximo:

$$\beta_z = \frac{(1 - \mu)W}{4\gamma r_o^3} = \frac{(1 - 0.25)71.92}{4 \times 1.7 \times 1.69^3} = 1.64$$

$$D = \frac{0.425}{\sqrt{\beta_z}} = \frac{0.425}{\sqrt{1.64}} = 0.332$$

$$f_r = f_n \frac{1}{\sqrt{1 - 2D^2}} = 7.35 \frac{1}{\sqrt{1 - 2 \times 0.332^2}} = 8.34 \text{ Hz} = 500 \text{ rpm} < f_{\text{permisible}} (800 \text{ rpm})$$

Relación de frecuencias

$$\frac{f_r}{f_n} = \frac{8.34}{7.35} = 1.1369$$

De Fig. 4.8 $N' = 1.35$

Cálculo de F_o :

$$F_o = (F_p + F_s) \left(\frac{f_r}{f_o} \right)^2 = (1.574 + 0.476) \left(\frac{8.34}{1800/60} \right)^2 = 0.16 \text{ ton}$$

$$x_s = \frac{F_o}{K_z} = \frac{0.16 \times 1000}{15502} = 0.010 \text{ mm}$$

$$x_{\max} = x_{\max}(N') = 0.010 \times 1.35 = 0.0135 > 0.010$$

por lo que deberán modificarse las dimensiones de la cimentación.

Este mismo ejemplo se resolvió para distintas condiciones de espesor del bloque y diferente frecuencia de operación para tratar de encontrar una ayuda de diseño que nos dé una idea más rápida de cuáles deben ser las dimensiones iniciales propuestas del bloque. Se muestra a continuación el resultado de la prueba y el ejemplo resuelto para encontrar estas ayudas.

Como una observación cabe aclarar que en el ejemplo pasado, ya que se desconoce el espesor del bloque, se hicieron previamente algunos tanteos para encontrar el adecuado. Con la gráfica propuesta, se trata de reducir el número de tanteos a efectuar. Se muestra como sería el proceso de plantear el espesor inicial del bloque.

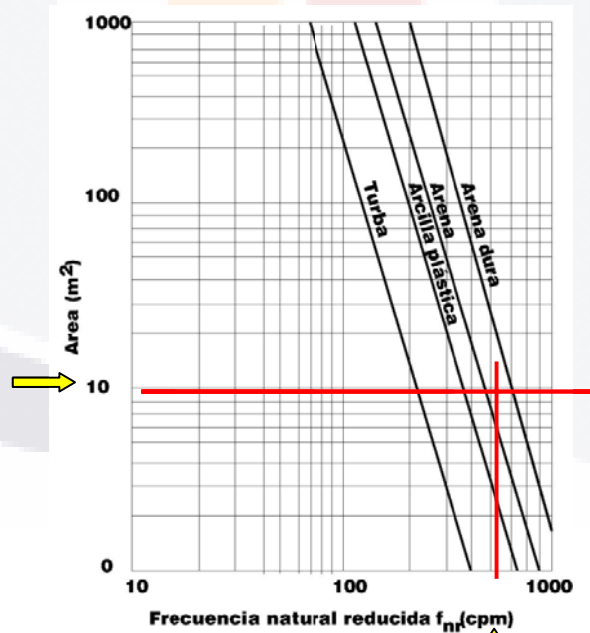
Datos del equipo:

Frecuencia de operación: 1,800 rpm

Ancho del bloque = 1.50 m

Largo del bloque = 6.00 m $\Rightarrow$ Area = 9.00 m²

Primer paso: Con el valor del área (que está acotada por las dimensiones de apoyo del equipo) se entra a la gráfica siguiente¹¹ trazando una horizontal hasta encontrarse con la línea del tipo de terreno, de ahí se traza una horizontal y se obtiene en el eje de las ordenadas el valor de la frecuencia natural reducida.



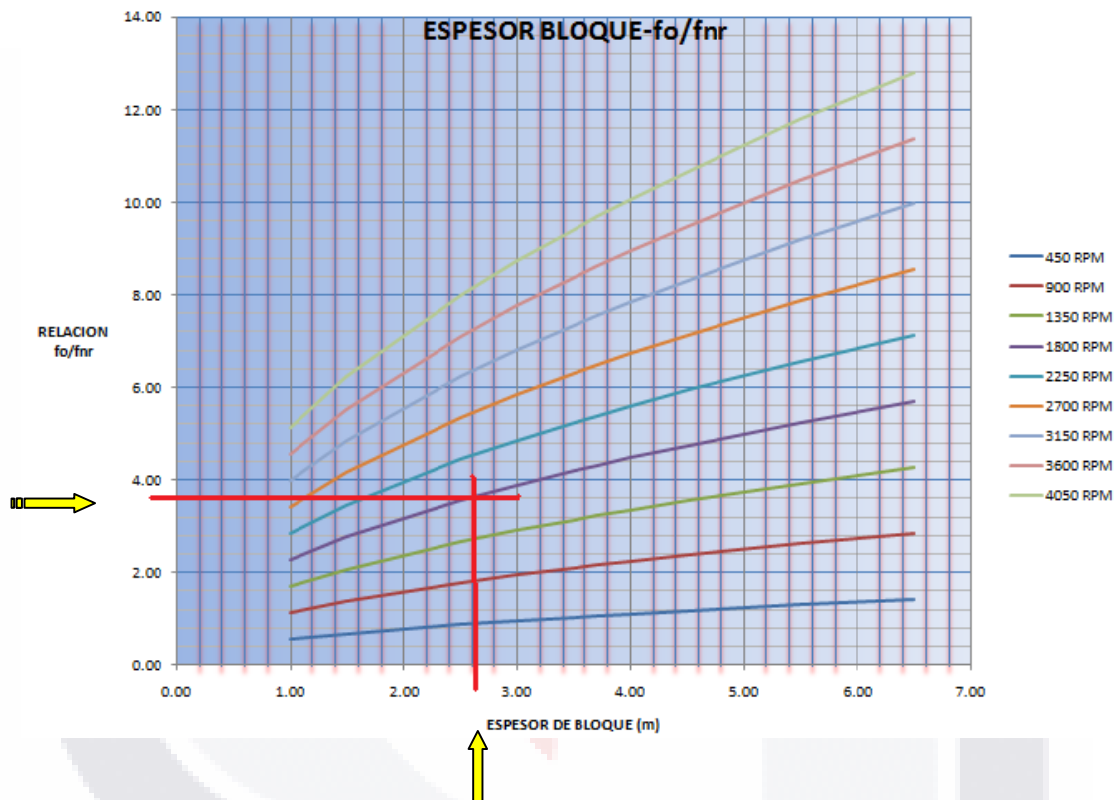
Aplicando el proceso se obtiene f_{nr} aproximadamente igual a 500 cpm.

Segundo paso: Se obtiene el valor de la relación f_o/f_{nr} que en este caso es:

$$\text{---} = 3.60$$

Con este valor se entra a la gráfica siguiente en el eje de las ordenadas hasta cruzar con el valor de la frecuencia de operación de la máquina, trazando luego una línea horizontal hasta encontrar en el eje de las abscisas el valor del espesor propuesto del bloque de cimentación.

Siguiendo este proceso el valor es aproximadamente de 2.82 m, que fue el primero que se usó como base para el primer diseño preliminar del ejemplo.



Otro aspecto que se pudo observar en el análisis del diseño de la cimentación de un compresor es que la relación $H/(BL)$ deberá ser mayor de 0.33 para no tener problemas de vibración.

Revisando esta relación tenemos: $\text{---} = 0.31 < 0.33$, por lo que deberá incrementarse un poco el espesor del bloque.

Se muestra a continuación las diferentes alternativas que se usaron para construir la gráfica anterior. Se probaron las siguientes opciones:

a).- Se modificaron los valores de la frecuencia de operación del compresor, respetando que la relación $H/(BL)$ se mantenga en 0.33.

b).- Se modificaron los valores de la frecuencia de operación del compresor, respetando que la relación $H/(BL)$ se mantenga en 0.10.

c).- Se consideraron los mismos valores de la frecuencia de operación del compresor, variando el espesor del bloque de cimentación.

d).-Frecuencia de operación constante y con valor del doble del caso anterior y se modifico el espesor del bloque de cimentación, se observa que los valores aceptables están en el rango de relaciones $H/(BL)$ mayor a 0.33.

e).- Se mantuvo constante la frecuencia de operación del compresor y se modificaron las características del terreno de desplante y el espesor de la losa.

Otra recomendación para determinar el espesor de la losa es:

El espesor de la losa debe ser mayor a:

60 cm

La longitud de anclaje de los pernos,

O mayor que $1/5$ de la dimensión menor en planta de la cimentación, o no menor a:

$$t = 0.01 \left(\frac{GL^4}{b} \right)^{\frac{1}{3}} \geq 0.60m$$



	DATOS DE MAQUINARIA				DATOS DEL SUELO			CIMENTACION PROPUESTA				RELACIONES				MASA	RADIO EQUIVALENTE	CONSTANTE DE RESORTE EQUIVALENTE	RELACION DE AMORTIGUAMIENTO		FRECUENCIAS			AMPLITUD DINAMICA	Fo	Xs	Xmax	CONCLUSIONES	
	Fza prim.	Fza Sec.	Frec. Oper.	W maq	γ	G	ν	B	L	H	W C _{im}	PARAMETRICAS				(C _{im} +Eq)			REL. DE MASA	REL. GEOM. AMORT.	Frecuencia Natural	Frecuencia de Resonancia							
	Fp	Fs	fo	ton	ton/m³	ton/m²						H/(BL)	m _{oim}	fn/fr	fo/fn	m			B	ζ	fn	f _r = fn / √ (1 - 2D²)							
	ton	ton	rpm	ton				m	m	m	ton		m _{eq.}			Ton seg²/m			ton/m		Hz	Hz	rpm						
																	kz = 4Gr _c / (1 - n)	Bz = (1 - n) W / (4 gr _c ³)	Dz = 0.425 / √ Bz	(√ k/m) / 2p									
INCREMENTO EN FRECUENCIA DE OPERACION REL. H / BL >0.3	0.175	0.053	200	0.11	1.73	1753.00	0.25	1.50	6.00	3	64.80	0.33	578.00	1.15	0.43	6.62	1.69	15824.39	1.45	0.35	7.78	8.98	539.02	2.02	1.65	0.10455	0.21081	Si se mantiene constante el espesor de la cimentación con una relación aprox. 1:2:3, a medida que aumentan la frecuencia de operación de la máquina, disminuye la deformación. Se observa una relación de H/BL de 0.33	
	0.525	0.159	600	0.34	1.73	1753.00	0.25	1.50	6.00	3	64.80	0.33	192.67	1.15	1.29	6.64	1.69	15824.39	1.45	0.35	7.77	8.97	538.09	2.02	0.55	0.03473	0.07003		
	0.874	0.264	1000	0.56	1.73	1753.00	0.25	1.50	6.00	3	64.80	0.33	115.60	1.15	2.15	6.66	1.69	15824.39	1.45	0.35	7.76	8.95	537.17	2.02	0.33	0.02077	0.04187		
	1.224	0.370	1400	0.78	1.73	1753.00	0.25	1.50	6.00	3	64.80	0.33	82.57	1.15	3.01	6.69	1.69	15824.39	1.45	0.35	7.74	8.94	536.25	2.02	0.23	0.01478	0.02981		
	1.574	0.476	1800	1.01	1.73	1753.00	0.25	1.50	6.00	3	64.80	0.33	64.22	1.15	3.88	6.71	1.69	15824.39	1.45	0.35	7.73	8.92	535.34	2.02	0.18	0.01146	0.02310		
	1.924	0.582	2200	1.23	1.73	1753.00	0.25	1.50	6.00	3	64.80	0.33	52.55	1.15	4.75	6.73	1.69	15824.39	1.45	0.35	7.72	8.91	534.43	2.02	0.15	0.00934	0.01884		
	2.274	0.688	2600	1.46	1.73	1753.00	0.25	1.50	6.00	3	64.80	0.33	44.46	1.15	5.62	6.75	1.69	15824.39	1.45	0.35	7.70	8.89	533.52	2.02	0.12	0.00788	0.01589		
	2.623	0.793	3000	1.68	1.73	1753.00	0.25	1.50	6.00	3	64.80	0.33	38.53	1.15	6.50	6.78	1.69	15824.39	1.45	0.35	7.69	8.88	532.62	2.02	0.11	0.00681	0.01372		
	2.798	0.846	3200	1.79	1.73	1753.00	0.25	1.50	6.00	3	64.80	0.33	36.12	1.15	6.94	6.79	1.69	15824.39	1.45	0.35	7.68	8.87	532.17	2.02	0.10	0.00637	0.01284		
	3.148	0.952	3600	2.02	1.73	1753.00	0.25	1.50	6.00	3	64.80	0.33	32.11	1.15	7.82	6.81	1.69	15824.39	1.45	0.35	7.67	8.85	531.28	2.02	0.09	0.00564	0.01138		
INCREMENTO EN FRECUENCIA DE OPERACION REL. H / BL ≈0.10	0.175	0.053	200	0.11	1.73	1753.00	0.25	1.50	6.00	0.9	19.44	0.10	173.40	2.44	0.24	1.99	1.69	15824.39	0.43	0.64	14.18	34.53	2072.09	6.02	24.45	1.54504	9.29553	Si se mantiene constante la relación H/BL=0.1, la deformación baja conforme aumenta la frecuencia de Operación, aunque se presentan valores altos de deformación	
	0.525	0.159	600	0.34	1.73	1753.00	0.25	1.50	6.00	0.9	19.44	0.10	57.80	2.44	0.71	2.02	1.69	15824.39	0.43	0.64	14.10	34.34	2060.31	6.02	8.06	0.50917	3.06338		
	0.874	0.264	1000	0.56	1.73	1753.00	0.25	1.50	6.00	0.9	19.44	0.10	34.68	2.44	1.19	2.04	1.69	15824.39	0.43	0.64	14.02	34.15	2048.72	6.02	4.78	0.30208	1.81742		
	1.224	0.370	1400	0.78	1.73	1753.00	0.25	1.50	6.00	0.9	19.44	0.10	24.77	2.44	1.67	2.06	1.69	15824.39	0.43	0.64	13.94	33.96	2037.34	6.02	3.38	0.21338	1.28377		
	1.574	0.476	1800	1.01	1.73	1753.00	0.25	1.50	6.00	0.9	19.44	0.10	19.27	2.44	2.16	2.08	1.69	15824.39	0.43	0.64	13.87	33.77	2026.14	6.02	2.60	0.16414	0.98754		
	1.924	0.582	2200	1.23	1.73	1753.00	0.25	1.50	6.00	0.9	19.44	0.10	15.76	2.44	2.66	2.11	1.69	15824.39	0.43	0.64	13.79	33.59	2015.12	6.02	2.10	0.13284	0.79922		
	2.274	0.688	2600	1.46	1.73	1753.00	0.25	1.50	6.00	0.9	19.44	0.10	13.34	2.44	3.16	2.13	1.69	15824.39	0.43	0.64	13.72	33.40	2004.28	6.02	1.76	0.11120	0.66901		
	2.623	0.793	3000	1.68	1.73	1753.00	0.25	1.50	6.00	0.9	19.44	0.10	11.56	2.44	3.66	2.15	1.69	15824.39	0.43	0.64	13.64	33.23	1993.61	6.02	1.51	0.09535	0.57365		
	2.798	0.846	3200	1.79	1.73	1753.00	0.25	1.50	6.00	0.9	19.44	0.10	10.84	2.44	3.92	2.16	1.69	15824.39	0.43	0.64	13.61	33.14	1988.34	6.02	1.41	0.08892	0.53496		
	3.148	0.952	3600	2.02	1.73	1753.00	0.25	1.50	6.00	0.9	19.44	0.10	9.63	2.44	4.43	2.19	1.69	15824.39	0.43	0.64	13.54	32.97	1977.93	6.02	1.24	0.07821	0.47055		
MISMA FRECUENCIA DE OPERACIÓN, VARIABLE ESPESOR Y CAMBIO EN RELACION H/(BL)	1.574	0.476	1800	1.01	1.73	1753.00	0.25	1.50	6.00	6.5	140.40	0.72	139.15	1.06	5.69	14.41	1.69	15824.39	3.14	0.24	5.27	5.61	336.35	2.43	0.07	0.00452	0.01097	Se observa que existe una relación entre (f _{op} /f _{nat}) vs. H	
	1.574	0.476	1800	1.01	1.73	1753.00	0.25	1.50	6.00	5.5	118.80	0.61	117.74	1.08	5.24	12.21	1.69	15824.39	2.66	0.26	5.73	6.16	369.81	2.30	0.09	0.00547	0.01257		
	1.574	0.476	1800	1.01	1.73	1753.00	0.25	1.50	6.00	4.5	97.20	0.50	96.33	1.10	4.74	10.01	1.69	15824.39	2.17	0.29	6.33	6.93	415.80	2.17	0.11	0.00691	0.01502		
	1.574	0.476	1800	1.01	1.73	1753.00	0.25	1.50	6.00	4	86.40	0.44	85.63	1.11	4.47	8.91	1.69	15824.39	1.93	0.31	6.71	7.44	446.34	2.11	0.13	0.00797	0.01683		
	1.574	0.476	1800	1.01	1.73	1753.00	0.25	1.50	6.00	3.7	79.92	0.41	79.21	1.12	4.30	8.25	1.69	15824.39	1.79	0.32	6.97	7.80	468.25	2.08	0.14	0.00877	0.01823		
	1.574	0.476	1800	1.01	1.73	1753.00	0.25	1.50	6.00	3.5	75.60	0.39	74.93	1.13	4.19	7.81	1.69	15824.39	1.69	0.33	7.16	8.08	484.79	2.06	0.15	0.00940	0.01934		
	1.574	0.476	1800	1.01	1.73	1753.00	0.25	1.50	6.00	3	64.80	0.33	64.22	1.15	3.88	6.71	1.69	15824.39	1.45	0.35	7.73	8.92	535.34	2.02	0.18	0.01146	0.02310		
	1.574	0.476	1800	1.01	1.73	1753.00	0.25	1.50	6.00	2.5	54.00	0.28	53.52	1.19	3.55	5.61	1.69	15824.39	1.21	0.39	8.45	10.10	606.02	2.00	0.23	0.01468	0.02937		
	1.574	0.476	1800	1.01	1.73	1753.00	0.25	1.50	6.00	1.5	32.40	0.17	32.11	1.41	2.77	3.41	1.69	15824.39	0.72	0.50	10.85	15.32	919.48	2.31	0.53	0.03380	0.07794		
FRECUENCIA DE OPERACIÓN (CONSTANTE Y CAMBIO EN EL ESPESOR H)	1.574	0.476	1800	1.01	1.73	1753.00	0.25	1.50	6.00	1	21.60	0.11	21.41	1.99	2.27	2.30	1.69	15824.39	0.48	0.61	13.19	26.28	1577.00	4.10	1.57	0.09944	0.40810	Se observa que al modificar de manera asimétrica la frecuencia de operación, cambia en la misma proporción la relación (fo/fnat)	
	3.148	0.952	3600	2.02	1.73	1753.00	0.25	1.50	6.00	6	129.60	0.67	64.22	1.07	10.98	13.42	1.69	15824.39	2.90	0.25	5.47	5.84	350.34	2.36	0.04	0.00246	0.00580		
	3.148	0.952	3600	2.02	1.73	1753.00	0.25	1.50	6																				

Ejemplo 2. Diseño de la cimentación para un compresor recíprocante usando el método del semi-espacio-elástico. Lamina 1 y 2.

Datos de la maquinaria: (Por fabricante de equipo)

Distancia del eje del compresor a la base 0.7112 m (ver L-1)

Peso del compresor 5.60 ton
 Peso del motor 3.60 ton
 Peso de los Snubers 0.95 ton
 Peso total de la máquina **10.15 ton**

Masa de la máquina $m=W/g= 1.035 \text{ ton-seg}^2/\text{m}$

Fuerzas Dinámicas: (Por fabricante de equipo)

Velocidad de operación $F_1= 585 \text{ RPM}$ $F_2= 0 \text{ RPM}$

$$\omega = \frac{F_1 \cdot 2\pi}{60} = 61.26 \text{ rad/seg}$$

Máxima fuerza horizontal primaria 585 RPM $F_x= 1.51 \text{ ton}$
 Máxima fuerza vertical primaria 585 RPM $F_z= 5.66 \text{ ton}$

Máxima fuerza horizontal secundaria 585 RPM $F_x= 0 \text{ ton}$
 Máxima fuerza vertical secundaria 585 RPM $F_z= 0 \text{ ton}$

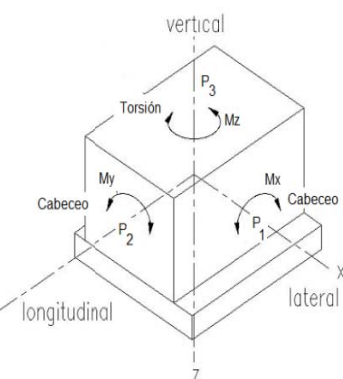
Cabeceo máximo (x) Momento Primario $T_\psi= 0.528 \text{ t-m}$
 Cabeceo máximo (y) Momento primario $T_\phi=0.151 \text{ t-m}$

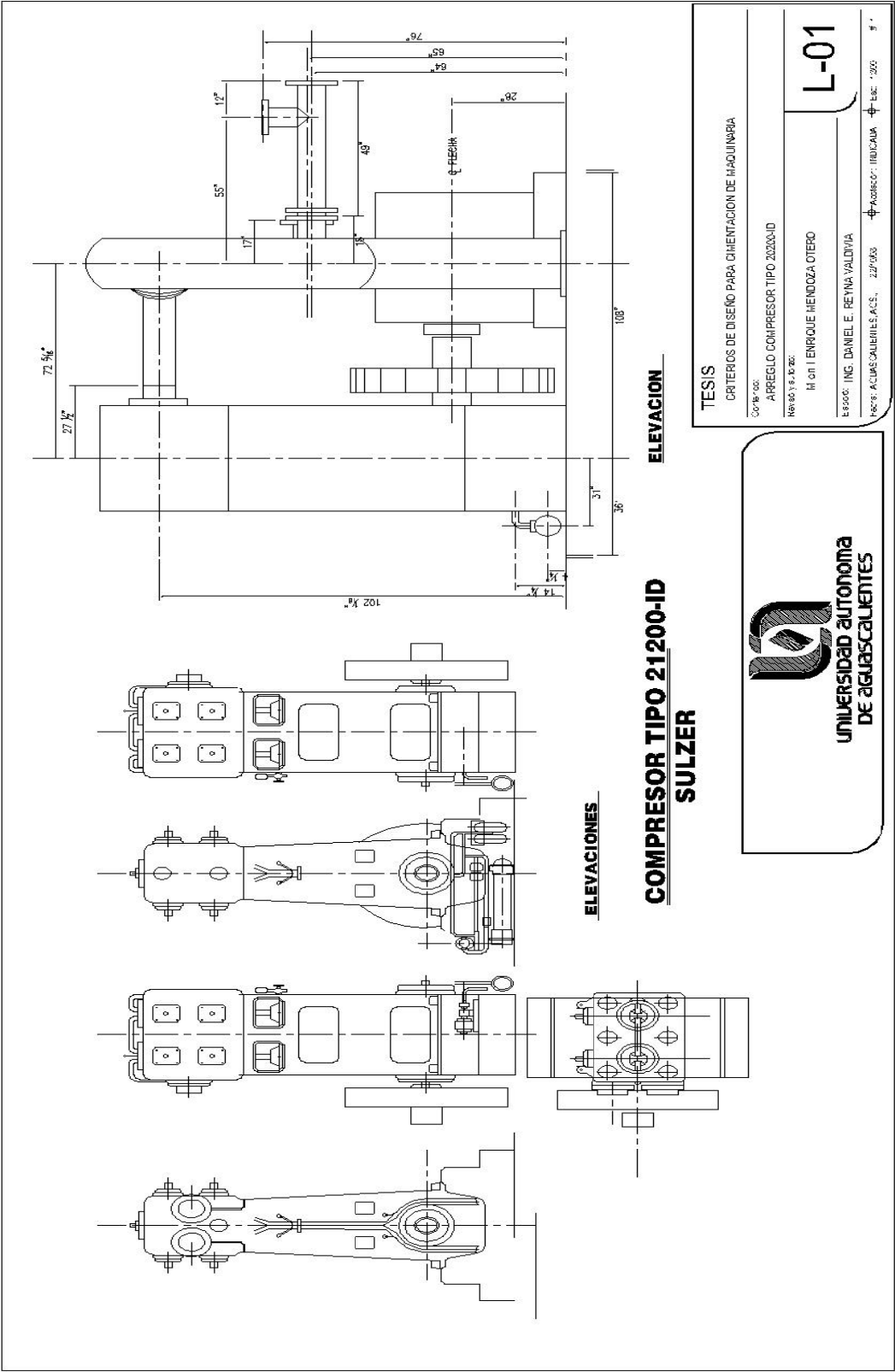
Cabeceo máximo (x) Momento Secundario $T_\psi= 1.717 \text{ t-m}$
 Cabeceo máximo (y) Momento Secundario $T_\phi=0 \text{ t-m}$

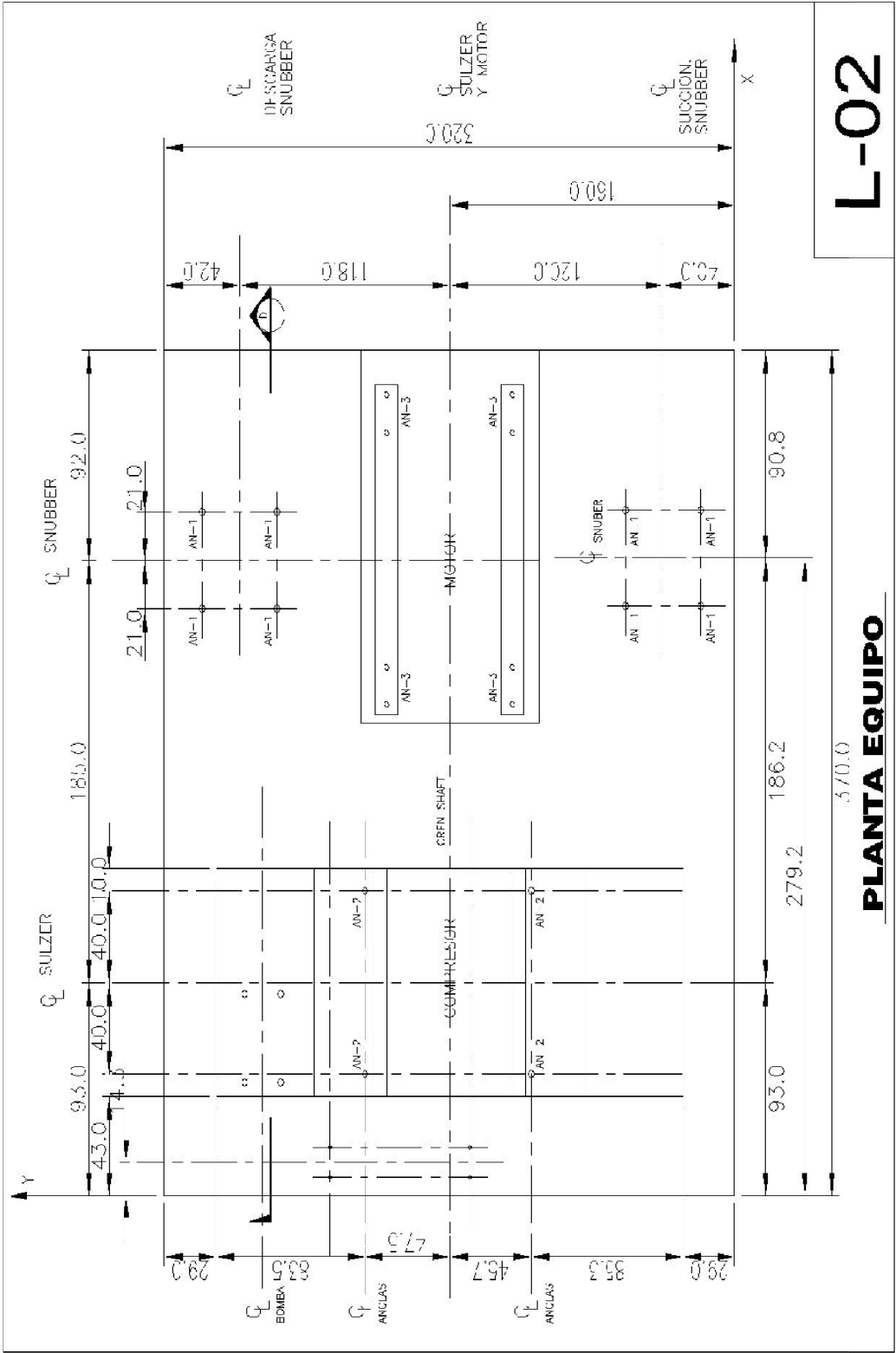
Datos del suelo: (por laboratorio de mecánica de suelos)

Estrato de Arena fina con gravilla intercalada

Peso Volumétrico $\gamma= 1.52 \text{ t/m}^3$
 Módulo de Cortante $G= 8796.30 \text{ t/m}^2$
 Relación de Poisson $\mu= 0.25$
 Relación de amortiguamiento interno $D_{\psi i}= 0.05$
 Capacidad de carga admisible $q_{adm}= 15.00 \text{ t/m}^2$
 $\rho= 0.15 \text{ t/m}^3$
 $E= 6500.00 \text{ t/m}^2$
 Asentamiento a la presión admisible 0.03 m
 $K=0.60 \text{ kg/cm}^3$







PROPUESTA DE LA CIMENTACION:

a) Análisis estático.

Es una cimentación tipo bloque rígido para una máquina reciprocante.

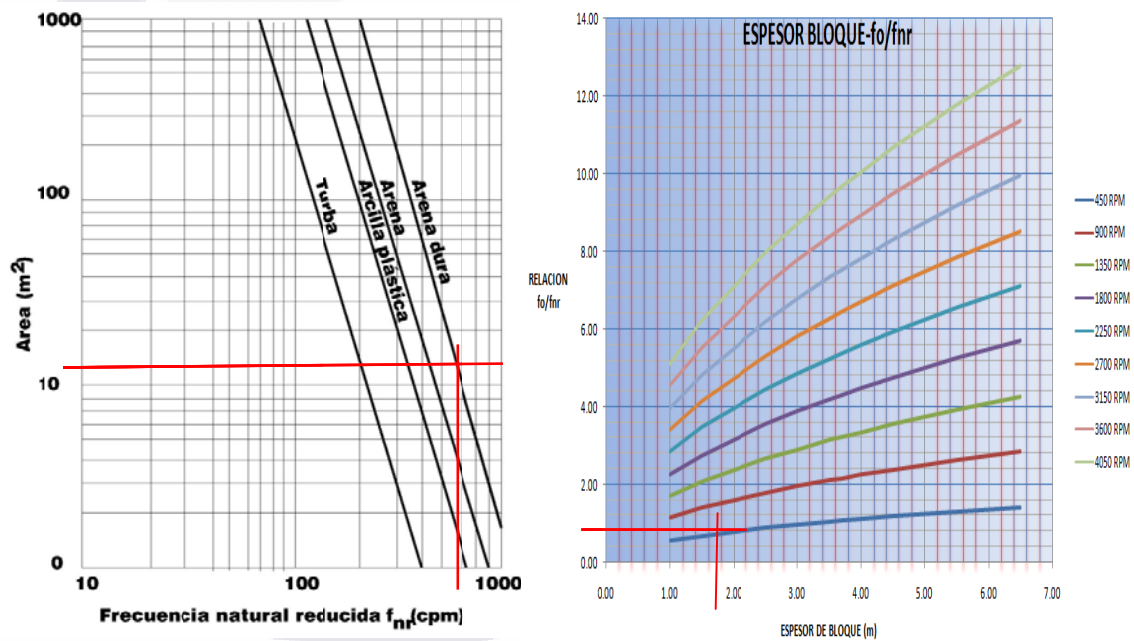
Las dimensiones iniciales propuestas se plantearán tomando en cuenta el área necesaria para apoyo planteado por el lay-out del equipo y el espesor del bloque se calculará de acuerdo a las gráficas propuestas en el ejemplo 1, cuidando además los siguientes aspectos:

- 1.- Masa de la cimentación ≥ 3 a 5 veces la masa de la máquina¹⁴
- 2.- Que al menos el 80% de la altura del bloque este embebida en el terreno.

Calculo del espesor del bloque:

Largo: $L=3.20$ m alrededor de ψ
 Ancho: $B=3.70$ m alrededor de ϕ

Área en planta= $3.20 \times 3.70 = 11.84 \text{ m}^2$



De la figura de la izquierda, con un área de 11.82 m^2 , considerando el terreno como arena dura, da como resultado el valor de $f_{nr} = 768 \text{ rpm}$.

Con este valor se obtiene la relación

$$\frac{f_o}{f_{nr}} = \frac{585}{768} = 0.7617$$

Lo que nos da un espesor propuesto inicial de 1.60 m

De acuerdo a lo anterior, se propone una zapata donde se haga coincidir el centro de la máquina con el centroide de área de la base.

Peso de la cimentación: (de acuerdo a dimensiones propuestas).

Largo: $L=3.20$ m alrededor de ψ
 Ancho: $B=3.70$ m alrededor de ϕ
 Espesor bloque: $H=1.6$ m
 Profundidad de embebido: $h_1= 1.30$ m
 Peso del concreto $f'c=250$ kg/cm²: $W_c= 2.4$ t/m³

Peso de la zapata: $W= 3.20$ m x 3.7 m x 1.6 m x 2.4 t/m³ = 45.47 ton
 Masa de la zapata: $m=4.635$ ton-seg²/m.

Revisión de las dimensiones del bloque de cimentación ante carga estática.

Carga estática total (W): 10.16 t + 45.47 t = 55.63 ton
 Área de la cimentación: 3.70 m x 3.20 m = 11.84 m²

Presión de contacto estática:

$$\sigma = \frac{W}{A_c} = \frac{55.63}{11.84} = 4.70 \text{ ton} / \text{m}^2 \dots < 50\% \dots q_{admisible}$$

Relación de peso = 4.47

b) ANALISIS DINAMICO

Cálculo del Centro de Masa y Momentos de Masa Inercial

No.	Elemento	Dimensiones (m)			Masa (Ton. Seg2/m)			Coordenadas del C. G. (m)			Momento Estático Particular (Ton. Seg2)			Momento de Inercia Particular (Ton. Seg2/m)			Dist. Entre C. G. (m)			r
		axi	ayi	azi	mi	xi	yi	zi	mixi	miyi	mizi	mi(ai2 + azi2)/12	xi	yi	zi	mi(ai2 + azi2)	xi	yi	zi	
1	Compresor	0.00	0.00	0.00	0.571	0.93	1.60	2.31	0.531	0.913	1.319	0.000	0.67	-1.23	-1.23	1.125				
3	Motor	0.00	0.00	0.00	0.367	2.79	1.60	2.31	1.024	0.587	0.848	0.000	-1.19	-1.23	-1.23	1.081				
4	Amortiguadores	0.00	0.00	0.00	0.097	0.93	1.60	2.31	0.090	0.155	0.224	0.000	0.668	-0.524	-0.524	0.070				
5	Losa/Zapata	3.20	3.70	1.60	4.635	1.60	1.85	0.80	7.415	8.574	3.708	4.944	-0.002	-0.774	-0.774	2.780				
Total					5.669				9.060	10.229	6.098	4.944				5.055				

$$X = \frac{9.060}{5.669} = 1.598 \text{ m} \quad e_x = 0.188 \%$$

$$Y = \frac{10.229}{5.669} = 1.804 \text{ m} \quad e_y = 4.563 \%$$

$$h_0 = \frac{6.098}{5.669} = 1.076 \text{ m}$$

$$I_y, I_z = [\frac{m_i}{12} (a_i^2 + b_i^2) + m_i k_i^2] = 4.944 + 5.055 = 9.998$$

Tabla 5.2 Análisis Dinámico de la Cimentación Propuesta.																						
Paso	Parámetro	Referencia	Excitación Vertical (Dirección Z)				Excitación Horizontal (Dirección X)				Excitación Cabeceo (Dirección Ψ)				Excitación Cabeceo (Dirección Φ)							
1	Masa	m = W/g	m = W/g	Ton seg2/m			m = W/g	Ton seg2/m			Ton seg2/m				Ton seg2/m							
				55.62		5.669		55.62		5.669	Iψ(máquina)	5.521	Iφ(máquina)	5.521								
1.1.	Momento de Inercia de Masa	ver 4.6.2 punto 1									Iψ(zapata)	9.242	Iφ(zapata)	6.276								
											Iψ(máquina + zapata)	14.763	Iφ(máquina + zapata)	11.797								
											I ψmâq = miki ²		I φmâq = miki ²									
											Iψzap=mi(L ² +B ²)/12		Iφzap=mi(L ² +H ²)/12									
											Dist. base zapata a centro máquina (ki) =	2.31										
2	CONSTANTES DE RESORTE		Ton / m				Ton / m				Ton - m / rad				Ton - m / rad							
2.a	Radio Equivalente para zapatas rectangulares	ver 4.6.2 punto 2	$r_o = \sqrt{BL/\pi}$				$r_o = \sqrt{BL/\pi}$				$r_o = \sqrt[4]{BL^3/\pi}$				$r_o = \sqrt[4]{B^3L/\pi}$							
			L =	3.20	ro =	1.941	L =	3.20	ro =	1.941	L =	3.20	ro =	1.894	L =	3.20	ro =	2.036				
			B =	3.70			B =	3.70			B =	3.70			B =	3.70						
2.b	Coeficiente de embebido	ver 4.6.2 punto 2	$\eta_z = 1 + 0.6 (1 - \mu) (h/ro)$				$\eta_x = 1 + 0.55 (1 - \mu) (h/ro)$				$\eta\psi = 1 + 1.2 (1- \mu) (h/r_o) + 0.2(2 - \mu)(h/r_o)$				$\eta\phi = 1 + 1.2 (1- \mu) (h/ro) + 0.2(2 - \mu)(h/r_o)^3$							
			80% h =	1.28	$\eta_z =$	1.297	h =	1.28	$\eta_x =$	1.635	h =	1.28	$\eta\psi =$	1.716	h =	1.28	$\eta\phi =$	1.653				
			μ=	0.25			μ=	0.25			μ=	0.25			μ=	0.25						
2.c	Coeficiente constante de resorte β	Figura 4-9 Se entra con la relación L/B intersectando la curva correspondiente	L =	3.20	$\beta_z =$	1.000	B =	3.70	$\beta_x =$	1.000	L =	3.20	$\beta\psi =$	1.000	L =	3.70	$\beta\phi =$	1.010				
			B =	3.70							B =	3.70										
			L/B =	0.86			L/B =	1.16			L/B =	0.86			L/B =	1.16						
2.d	Constante de Resorte Equivalente k	Tabla 4-2	$k_z = G \beta_z \sqrt{BL} \eta_z / (1 - \mu)$				$k_x = 2(1 + \mu) G \beta_x \sqrt{BL} \eta_x$				$k_\psi = G \beta_\psi B L^2 \eta_\psi / (1 - \mu)$				$k_\phi = G \beta_\phi B L^2 \eta_\phi / (1 - \mu)$							
			G =	8796.30	$k_z =$	52330.53	G =	8796.30	$k_x =$	123689.08	G =	8796.30	$k_\psi =$	762684.83	G =	8796.30	$k_\phi =$	857597.02				
			βz =	1.00			βz =	1.00			βz =	1.00			βz =	1.01						
			L =	3.20			L =	3.70			L =	3.20			L =	3.70						
			B =	3.70			B =	3.20			B =	3.70			B =	3.20						
			ηz =	1.30			ηx =	1.63			ηψ =	1.72			ηφ =	1.65						
			μ=	0.25			μ=	0.25			μ=	0.25			μ=	0.25						
3	RELACION DE AMORTIGUAMIENTO																					
3.a	Factor embebido α	Tabla 4 -3	$\alpha_z = 1 + 1.9(1 - \mu)(h/ro)/\sqrt{\eta_z}$				$\alpha_x = 1 + 1.9(2 - \nu)(h/ro)/\sqrt{\eta_x}$				$\alpha_z = 1 + 0.7(1 - \nu)(h/ro) + 0.6(2 - \nu)(h/ro)3/\sqrt{\eta_\psi}$				$\alpha_z = 1 + 0.7(1 - \nu)(h/ro) + 0.6(2 - \nu)(h/ro)3/\sqrt{\eta\phi}$							
			h =	1.28	$\alpha_z =$	1.703	h =	1.28	$\alpha_x =$	2.497	h =	1.28	$\alpha\psi =$	1.282	h =	1.28	$\alpha\phi =$	1.237				
			ro =	1.94			ro =	1.94			ro =	1.89			ro =	2.04						
			ηz =	1.30			ηx =	1.63			ηψ =	1.72			ηφ =	1.65						
μ=	0.25	μ=	0.25	μ=			0.25	μ=			0.25											
3.b	Relación de Masa B	Tabla 4 -4	$B_z = (1 - \mu) W / (4 \gamma r_{o3})$				$B_x = (7-8\mu) W / (32(1-\nu) \gamma r_{o3})$				$B_\psi = 3(1-\mu) I_\psi / (8 \rho r_{o5})$				$B_\phi = 3(1-\mu) I_\phi / (8 \rho r_{o5})$							
			W =	55.62	$B_z =$	0.939	W =	55.62	$B_x =$	1.043	Iψ =	14.76	$B_\psi =$	1.101	Iφ =	11.80	$B_\phi =$	0.612				
			ro =	1.94			ro =	1.89			ro =	2.04										
			γ =	1.52			γ =	1.52			ρ =	0.15			ρ =	0.15						
μ=	0.25	μ=	0.25	μ=			0.25	μ=			0.25											
3.c	Coeficiente de amortiguamiento efectivo	Tabla 4 -5	Bz =	0.94	nz =	---	Bx =	1.04	nx =	----	Bψ =	1.101	nψ =	1.600	Bφ =	0.612	nφ =	1.600				
3.d	Relación Geométrica de amortiguamiento D	Tabla 4 -4	$D_z = 0.425 \alpha_z / \sqrt{B_z}$				$D_x = 0.288 \alpha_x / \sqrt{B_x}$				$D_\psi = 0.15 \alpha_\psi / (1+n_\psi B_\psi) \sqrt{n_\psi B_x}$				$D_\phi = 0.15 \alpha_\phi / (1+n_\phi B_\phi) \sqrt{n_\phi B_\phi}$							
			Bz =	0.94	$D_z =$	0.747	Bx =	1.04	$D_x =$	0.704	Bψ =	1.10	$D_\psi =$	0.052	Bψ =	0.61	$D_\phi =$	0.095				
			αz =	1.70			αx =	2.50			αψ =	1.28			αφ =	1.24						
											nψ =	1.60	nψ =	1.60								
3.e	Amortiguamiento Interno D	Datos de Mecánica de suelos o Tabla 4.5	$D_{zi} =$				0.05	$D_{xi} =$				0.05	$D_{\psi i} =$				0.05	$D_{\phi i} =$				0.05
3.f	Amortiguamiento Total D	3.d + 3.e	$D_z =$				0.80	$D_x =$				0.75	$D_\psi =$				0.10	$D_\phi =$				0.14
4	FRECUENCIAS																					
4.a	Frecuencia Natural	(60 √ k/m) / 2π	kz =	52330.53			kz =	123689.08			kz =	762684.83			kz =	857597.02						
			mz =	5.669			mz =	5.669			mz =	14.763			mz =	11.797						
			fnz =	917.45			fnz =	1410.50			fnz =	2170.46			fnz =	2574.69						
4.b	Frecuencia Resonancia fm de	ver 4.6.2 punto 4.2	$f_{mz} = f_n \sqrt{(1 - 2D^2)}$				$f_{mx} = f_n \sqrt{(1 - 2D^2)}$				$f_{m\psi} = f_n \sqrt{(1 - 2D^2)}$				$f_{m\phi} = f_n \sqrt{(1 - 2D^2)}$							
			fnz =	917.45	$f_{mz} =$	#iNUM!	fnz =	1410.50	$f_{mx} =$	#iNUM!	fnz =	2170.46	$f_{m\psi} =$	2147.57	fnz =	2574.69	$f_{m\phi} =$	2520.17				
			f(P) =	0.00			f(P) =	0.00			f(P) =	0.00			f(P) =	0.00						
			f(S) =	0.00			f(S) =	0.00			f(S) =	0.00			f(S) =	0.00						
			D = f/fn =	0.80			D = f/fn =	0.75			D = f/fn =	0.10			D = f/fn =	0.14						
			2D ² =	1.27			2D ² > 1.00	2D ² =			1.14	2D ² > 1.00			2D ² =	0.02			2D ² < 1.00	2D ² =	0.04	2D ² < 1.00
			RESONANCIA NO ES POSIBLE				RESONANCIA NO ES POSIBLE				LA RESONANCIA SI ES POSIBLE				LA RESONANCIA SI ES POSIBLE							



4.c	Fuerzas Vibratorias (Amplitud absoluta)	Vibratorias máxima	Parámetros de la Máquina	Fz0 = 5.66 Ton P				Fx0 = 1.51 Ton P				Iψ0 = 0.528 Ton-m P				Iφ0 = 0.000 Ton-m P			
				@ ωt = 0,2nπ				@ ωt = (4n - 1)π/2				@ ωt = (4n - 1)π/2				@ ωt = 0,2nπ			
				Fz0 = 0.00 Ton P				Fx0 = 0.00 Ton P				+Fz0(P) Xg = 0.000				Iφ0 = 0.000 Ton-m S			
				@ ωt = (4n - 1)π/2				@ ωt = 0,2nπ				Fz0 = 0.00 Xg = 0.930				@ ωt = 0,2nπ			
				Fz0 = 0.00 Ton S				Fx0 = 0.00 Ton S				+Fx0(P) Zg = 0.000							
				@ ωt = (4n - 1)π/2				@ ωt = 0,2nπ				Fx0 = 0.00 Zg = 2.310							
								Sumatoria Iψ0= 0.528											
								Secundaria a @ ωt = (4n - 1)π/2											
								+Fz0(P) Xg = 0.000											
				Fz0 = 0.00 Xg = 0.850															
4.d	Factor Amplificaciòn	de	ver 4.6.2 punto 5	Mz =1/ (√ (1 - r2) 2 + (2Dr)2				Mx =1/ (√ (1 - r2) 2 + (2Dr)2				Mψ =1/ (√ (1 - r2) 2 + (2Dr)2				Mψ =1/ (√ (1 - r2) 2 + (2Dr)2			
				r =ω(P)/ωn 0.64	Mz(P) = 0.850	r =ω(P)/ωn 0.415	Mx(P) = 0.964	r =ω(P)/ωn 0.27	Mψ(P) = 1.076	r =ω(P)/ωn 0.23	Mψ(P) = 1.052								
				r =ω(S)/ωn 0.00		r =ω(S)/ωn 0.000		r =ω(S)/ωn 0.00		r =ω(S)/ωn 0.00									
				ω (P)= 585.00		ω (P)= 585.00		ω (P)= 585.00		ω (P)= 585.00									
				ω (S)= 0.00	ω (S)= 0.00	ω (S)= 0.00	ω (S)= 0.00												
				ωn (P)= 917.45	Mz(S) = 1.000	ωn (P)= 1410.50	Mx(S) = 1.000	ωn (P)= 2170.46	Mψ(S) = 1.000	ωn (P)= 2574.69	Mψ(S) = 1.000								
ωn (P)= 0.00	ωn (P)= 0.00	ωn (P)= 0.00	ωn (P)= 0.00																
D = 0.80	D = 0.75	D = 0.10	D = 0.14																
4.e	Desplazamientos Respuesta	de	Z =Σ Mz Fzo/kz				X =Σ Mx Fxo/kx				Ψ =Σ Mψ Tψ/kψ				Φ =Σ Mφ Tφ/kφ				
			Mz (P)= 0.850	Mx (P)= 0.964	Mψ (P)= 1.076	Mφ (P)= 1.052													
			Fz0(P)= 5.66 Ton 4.809	Fx0(P)= 1.51 Ton 1.455	ΣTψ(P)= 0.53 Ton 0.568	ΣTφ(P)= 0.00 Ton 0.000													
			Mz (S)= 1.000	Mx (S)= 1.000	Mψ (S)= 1.000	Mψr(S)= 1.000													
			Fz0 (S)= 0.00 Ton 0.000	Fx0 (S)= 0.00 Ton 0.000	ΣTψ(S)= 0.00 Ton 0.000	ΣTφ(S)= 0.00 Ton 0.000													
			Σ Mz Fzo = 4.81 0.000 4.809	Σ Mx Fxo = 1.46 0.00 1.455	ΣMψFψ = 0.57 0.000 0.568	ΣMφFφ = 0.00 0.000 0.000													
kz = 52330.53	kx = 123689.08	kψ = 762684.83	kφ = 857597.02																
Z = 0.009189213966 cm				X = 0.001176475928 cm				Ψ = 0.000000745203 rad				Φ = 0.000000000000 rad							
4.f	Desplazamientos Totales de Respuesta	ver 4.6.2 punto 6	Zt = Z + Ψ Rhz + Φ Rhy				Xt = X + Ψ Rz												
			Zz = 0.009189213966 cm	Zx = 0.001176475928 cm															
			Ψ = 0.00000074520 rad	Ψ = 0.00000074520 rad															
			Rhx = L = 3.200 1.600	Rz = ver croquis 2.210															
			Rhx = 0.0000011923247 cm	Rz = 0.0000016468985 m															
			Φ = 0.000000000000 rad	Φ = 0.000000000000 rad															
			Rhx = B = 3.700 1.850	Rhx = B = 0.000 0.000															
			Rhx = 0.000000000000 cm	Rhx = 0.000000000000 cm															
			Zt = 0.009190406291 cm	Xt = 0.001178122827 cm															
							Yt = X + Ψ Rz												
							Zx = 0.001176475928 cm												
							Φ = 0.000000000000 rad												
							Rz = ver croquis 2.210												
							Rz = 0.0000000000000000 cm												
				Φ = 0.000000000000 rad															
				Rhx = B = 0.000 0.000															
				Rhx = 0.0000000000000000 cm															
				Xt = 0.117647592822 cm															
4.g	Factor Transmisibilidad	de	ver 4.6.2 punto 7	Tz =√ (1+ (2Dr)2 / (√ (1 - r2) 2 + (2Dr)2				Tx =√ (1+ (2Dr)2 / (√ (1 - r2) 2 + (2Dr)2				Tψ =√ (1+ (2Dr)2 / (√ (1 - r2) 2 + (2Dr)2				Tφ =√ (1+ (2Dr)2 / (√ (1 - r2) 2 + (2Dr)2			
				r =ω(P)/ωn 0.64	Tz(P) = 1.211	r =ω(P)/ωn 0.41	Tx(P) = 1.137	r =ω(P)/ωn 0.27	Tφ(P) = 1.078	r =ω(P)/ωn 0.23	Tx(P) = 1.054								
				r =ω(S)/ωn 0.00		r =ω(S)/ωn 0.00		r =ω(S)/ωn 0.00		r =ω(S)/ωn 0.00									
				ω (P)= 585.00		ω (P)= 585.00		ω (P)= 585.00		ω (P)= 585.00									
				ω (S)= 0.00	ω (S)= 0.00	ω (S)= 0.00	ω (S)= 0.00												
				ωn (P)= 917.45	Tz(S) = 1.000	ωn (P)= 1410.50	Tx(S) = NO EXISTE	ωn (P)= 2170.46	Tφ(S) = 1.000	ωn (P)= 2574.69	Tx(S) = 1.000								
ωn (P)= 0.01	ωn (P)= 0.00	ωn (P)= 0.00	ωn (P)= 0.00																
D = 0.80	D = 0.75	D = 0.10	D = 0.14																
4.h	Fuerza Transmitida	ver 4.6.2 punto 8	Pv =Σ Tr Fzo				PH =Σ Tr Fxo				PTψ =Σ Tr Tψ0				PTφ =Σ Tr Tφ0				
			Tz (P)= 1.211	Tx(P)= 1.137	Tψ (P)= 1.078	Tφ (P)= 1.054													
			Fz0(P)= 5.66 Ton 6.857	Fx0(P)= 1.51 Ton 1.716	Fy0(P)= 0.53 Ton 0.569	Fφ0(P)= 0.00 Ton 0.000													
			Tz (S)= 1.000	Tz (S)= NO EXISTE 0.000	Tψ (S)= 1.000	Tφ (S)= 1.000													
			Fz0 (S)= 0.00 Ton 0.000	Fx0 (S)= 0.00 Ton 0.000	Fψ0 (S)= 0.00 Ton 0.000	Fφ0 (S)= 0.00 Ton 0.000													
			Σ Tz Fzo = 6.86 0.000 6.857	Σ Tx Fxo = 1.72 0.000 1.716	Σ Tψ Fψ0 = 0.57 0.000 0.569	Σ Tφ Fφ0 = 0.00 0.000 0.000													
Pv= 6.857 Ton				Pv= 1.716 Ton				Pv= 0.569 Ton				Pv= 0.000 Ton							

b) Análisis dinámico

La suma de cargas estáticas más dinámicas, no deberán crear presiones de carga mayor a la presión admisible, dada para las condiciones estáticas.

Fuerza vertical transmitida: $P_v = 6.86 \text{ ton}$

Momentos transmitidos: $PT_\psi + (P_v)(X_g) + (P_h)(Z_g)$

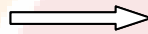
$PT_\psi =$					0.5690	ton-m
$(P_v)(X_g) =$	6.86	x	0.93	=	6.3798	ton-m
$(P_h)(Z_g) =$	1.716	x	2.31	=	3.9640	ton-m
$PT_\psi =$					10.92	ton-m
$PT_\phi =$					0	ton-m

Obtención de esfuerzos actuantes en suelo de desplante:

$$\sigma_{act} = \frac{P_v}{BL} + \frac{6(PT_\psi)}{BL^2} + \frac{6(PT_\phi)}{LB^2} < 0.75\sigma_{admisible}$$

$$\sigma_{act} = \frac{6.86}{11.84} \pm \frac{65.52}{37.89} \pm \frac{0}{43.81}$$

$$Q_{act} = 0.58 \pm 1.73 \pm 0.00$$



$$\begin{aligned} q_1 &= 2.31 \text{ Ton-m}^2 \\ q_2 &= -1.15 \text{ Ton-m}^2 \end{aligned}$$

Presión Estática + Dinámica Total $4.70 + 2.31 = 7.01 < 11.25 \text{ Ton-m}^2$ BIEN

Presión Estática - Dinámica Total $4.70 - 1.15 = 3.55 < 11.25 \text{ Ton-m}^2$ BIEN

A.2) Revisión de asentamientos

La carga estática mas la dinámica debe de causar asentamientos menores a los permitidos.

A.3) Limitaciones de las condiciones dinámicas

A.3.a.- Amplitud de vibración en la frecuencia de operación.

La amplitud máxima del movimiento de la cimentación debe estar en la zona "A" ó "B" de la Fig. 4.10, para la frecuencia dada (actualmente). La máxima amplitud de vibración, son:

$Z_t = 0.009187$	cm	$F_1 =$	585.00	RPM
$X_t = 0.001176$	cm	$F_2 =$	0.00	RPM

Verificando en figura para los desplazamientos:

horizontal: **ZONA A "no existe falla"**
vertical: **ZONA A "no existe falla"**

A.3.b.- La velocidad es igual a $2\pi \cdot f(\text{cps}) \cdot \text{amplitud de desplazamiento}$ como se determinó anteriormente. Esta velocidad será comparada con los límites de la Tabla 4.7 y Fig. 4.10 para al menos una "buena condición".

$$\text{Velocidad} = 2\pi \cdot 585/60 \cdot Z_t = 0.005629 \text{ m/s}$$

Esta velocidad cae en el rango (Tabla 4.7) **LEVEMENTE ASPERO**

Esta velocidad cae en el rango (Fig. 4.11), **MUY BUENO**

A.3.c.- La aceleración: es igual a $4\pi^2 \cdot f_2(\text{cps}) \cdot \text{amplitud de desplazamiento}$. Esta verificación solo es necesaria si las condiciones (A.3.a) ó (A.3.b) no son satisfechas.

La aceleración deberá caer en las zonas "A" o "B" de la figura 4.9

A.3.d.- Factor de Amplificación: Para la frecuencia de operación primaria, es menor que uno y es ligeramente mayor para la frecuencia de operación secundaria.

A.3.e.- Resonancia: Las frecuencias, actuantes de la máquina deberán tener al menos una diferencia de $\pm 20\%$ con las frecuencias resonantes, esto es; $f < 0.8 f_0$ ó $f > 1.2 f_0$. Donde f_0 =frecuencia de operación de la máquina

En este problema, la resonancia no ocurre con los modos vertical y horizontal (debido al amortiguamiento en estas dimensiones).

En el modo de cabeceo Ψ :

$0.8 \psi = 1059.136 \text{ RPM}$	Ψ	=	1663.64 RPM
$1.2 \psi = 1588.703 \text{ RPM}$	F_1	=	585 RPM
	F_2	=	0 RPM

Puesto que las frecuencias primaria y secundaria de la máquina son 585 RPM y 0.0 RPM, la resonancia no ocurrirá en el cabeceo ni en la frecuencia de operación primaria.

Las frecuencias caen fuera de estos rangos y por lo tanto, las condiciones de resonancia no son posibles.

A.3.f.- Factor de transmisibilidad: Usualmente considerado para máquinas de alta frecuencia montadas sobre resortes.

Los factores de transmisibilidad deberán ser menores que 3.

En ejemplo, los valores T_R son mayores que 1 indicando que las fuerzas dinámicas son amplificadas.

Modos de vibración posibles. La oscilación vertical y horizontal son modos posibles puesto que la fuerza puede actuar en esas direcciones, el cabeceo (Ψ) es también posible puesto que las fuerzas horizontales actúan arriba del centro de gravedad de la cimentación. El cabeceo (ϕ), deberá también ser considerado en este

problema, puesto que momentos desbalanceados son suministrados por el fabricante de la máquina. Sin embargo la oscilación torsional no es considerada, puesto que las fuerzas horizontales no forman un par en el plano horizontal. Los modos de traslación horizontal y cabeceo (ψ) no necesariamente son acoplados si:

$$\sqrt{(f_{mx2} + f_{m\psi2}) / (f_{mx} f_{m\psi})} < 2/3 f$$

$$f_{mx} = 0$$

$$f_{m\psi} = 1323.92$$

Demandas ambientales:

1.- Efectos fisiológicos en las personas. Si la máquina está localizada en un edificio, usar la figura 4.11 y 4.12, para probar la suficiencia de la instalación, en nuestro caso entrando con una amplitud de vibración máxima de:

$$Z_t = 0.009183 \quad \text{cm}$$

$$X_t = 0.001177 \quad \text{cm}$$

$$F1 = 585 \text{ RPM}$$

$$F2 = 0 \text{ RPM}$$

Los valores caen dentro de la zona: NOT NOTICEABLE TO PERSONS

2.- Efectos psicológicos en las personas. Usar el mismo procedimiento como en el punto 1, cuando la máquina está localizada cerca de personas no conectadas con las operaciones, una barrera acústica puede ser necesaria.

3.- Daños a la estructura. Usar los límites dados en la figura 4.11, que para nuestro caso no se presentan problemas.

4.- Resonancia de componentes estructurales (superestructura arriba de la zapata). Evitar resonancia con la frecuencia natural menor atendiendo a la relación de frecuencia operante a frecuencia natural menor que 0.5 ó mayor que 1.50.

Ningún otro componente estructural está involucrado en el presente ejemplo..

Conclusión:

La cimentación está destinada a comportarse de manera aceptable. El análisis estático y dinámico confirma la suficiencia de la cimentación propuesta y por lo tanto, el diseño propuesto **ES ACEPTABLE**.

Con los resultados obtenidos, se podría hacer otro tanteo suponiendo un espesor un poco menor.

Ejemplo 3. Diseño de la cimentación de un martillo de contragolpe.

Datos de la maquinaria: (propuestos por el fabricante)

Peso de la maquina completa (W_m) = 170 ton

Peso del dado superior (W_u)= 31.5 ton

Peso del dado inferior (W_i)= 34.5 ton

Caída de los dados (h)=0.70 m

Velocidad final de los dados (v)= 3.0 m/seg

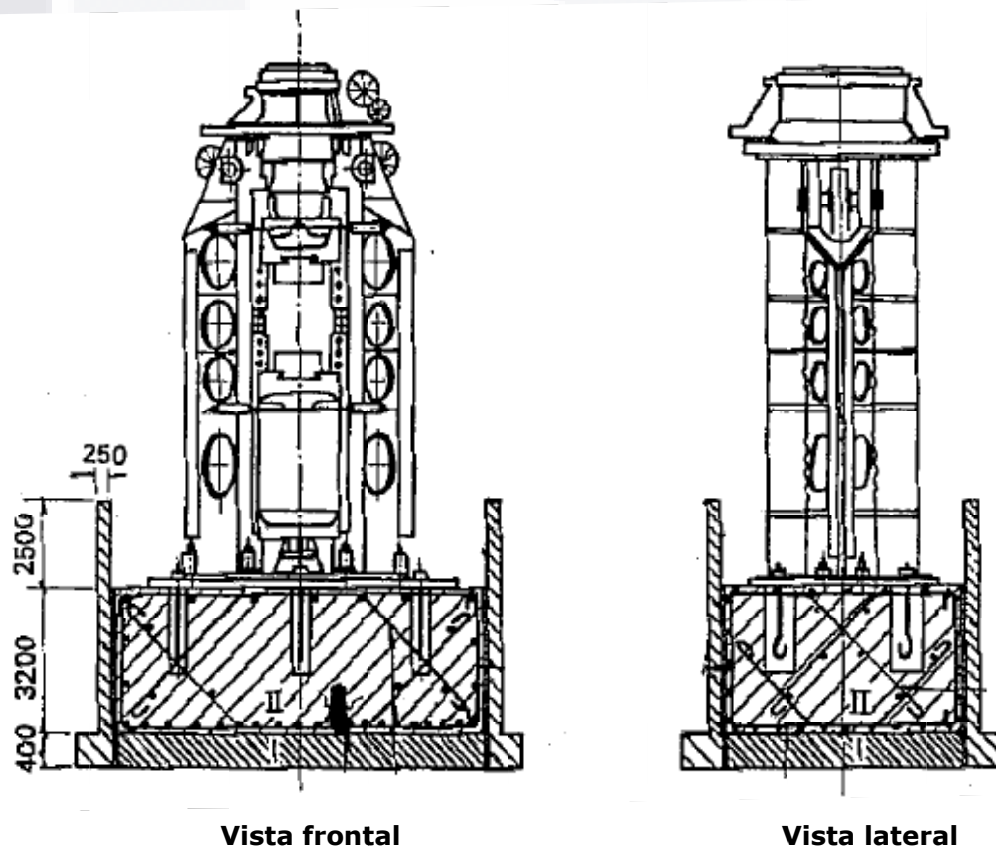
Frecuencia de operación (f_m)= 10-60 golpes/min

Datos del suelo:

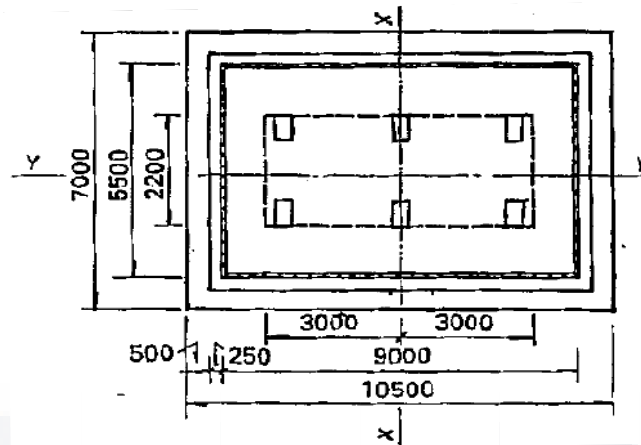
Esfuerzo admisible en el terreno (σ)= 30 t/m²

Coeficiente elástico de compresión uniforme (C_z) = 6 kg/cm²

Las dimensiones propuestas de la maquinaria y detalles del martillo se muestran en las figuras siguientes.



Martillo de Contragolpe



Dimensiones en planta del bloque de cimentación

1.- Peso de la cimentación:

Peso de la parte I= $9.0 \text{ m} \times 5.5 \text{ m} \times 0.40 \text{ m} \times 2.4 \text{ t/m}^3 = 47.52 \text{ ton}$

Peso de la parte II= $9.0 \text{ m} \times 5.5 \text{ m} \times 3.2 \text{ m} \times 2.4 \text{ t/m}^3 = 380.16 \text{ ton}$

Deducción por agujeros = $6 \text{ mx} 0.30 \text{ mx} 1.425 \text{ mx} 2.4 \text{ t/m}^3 = -1.85 \text{ ton}$

Peso neto de la cimentación = $= 425.83 \text{ ton}$

Peso total de máquina mas cimentación:

595.83 ton

2.- Análisis dinámico:

Velocidad de los dados antes del impacto (v)=

3 m/seg

Diferencia en pesos dados (W_d) =

3 ton

1.1 Primer impacto:

Aceleración de los dados:

$$\frac{v^2}{2h} = \frac{3 \times 3}{2 \times 0.70} = 6.43 \text{ m/seg}^2$$

Fuerza de impacto P_1 :

$$\frac{W_d}{g} = \frac{3}{9.81} \times 6.43 = 1.97 \text{ ton}$$

Periodo del martilleo:

$$\frac{2h}{v} = \frac{2 \times 0.70}{3} = 0.466 \text{ ton}$$

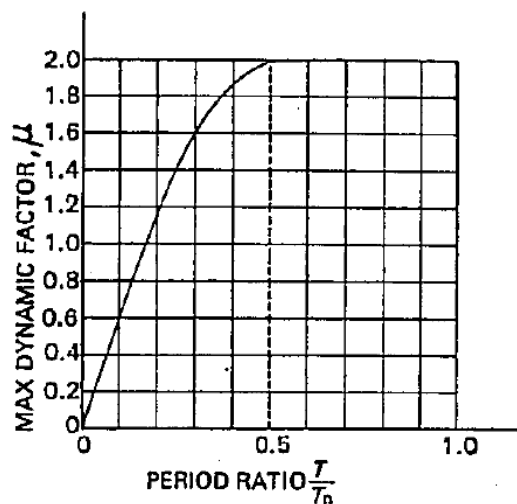
Periodo natural del sistema máquina-cimiento:

$$2\pi\sqrt{\frac{m}{k_s}} = 2\pi\sqrt{\frac{595.83}{6000 \times 9 \times 5.5 \times 9.81}} = 0.09 \text{ seg}$$

Relación de periodos:

$$\frac{T}{T_n} = \frac{0.466}{0.090} = 5.17$$

De la figura siguiente, el factor máximo dinámico¹³ μ es de 2.0.



Respuesta transitoria para un sistema de un grado de libertad debido a un pulso rectangular

Fuerza dinámica (F_1), debida al primer impacto:

$$\xi \times \mu \times P_1 = 3 \times 2.0 \times 1.97 = 11.82 \text{ ton}$$

1.2 Segundo impacto:

Velocidad (V) con los dados cayendo y causando el segundo impacto:

$$\frac{4.W_d.V}{W_u + W_2} = \frac{4 \times 3 \times 3}{31.5 + 34.5} = 5.17 \text{ m/seg}$$

Rigidez del resorte equivalente (K_s) del suelo = 20.5×10^2 t/m

Fuerza dinámica (F_2) inducida en la cimentación, debida al segundo impacto:

$$F_2 = 7.5V \sqrt{\frac{K_s W_u}{g}} \cdot x \frac{W_l}{W_u} = 7.5 \times 0.545 \times \sqrt{\frac{31.5}{9.81}} \times 20.5 \times 10^2 \times \frac{34.5}{31.5} = 362.22 - \text{ton}$$

Fuerza dinámica total (F_d): $F_1 + F_2$

$$11.92 + 363.22 = 375.14 \text{ ton}$$

3.- Verificación de los esfuerzos en el terreno:

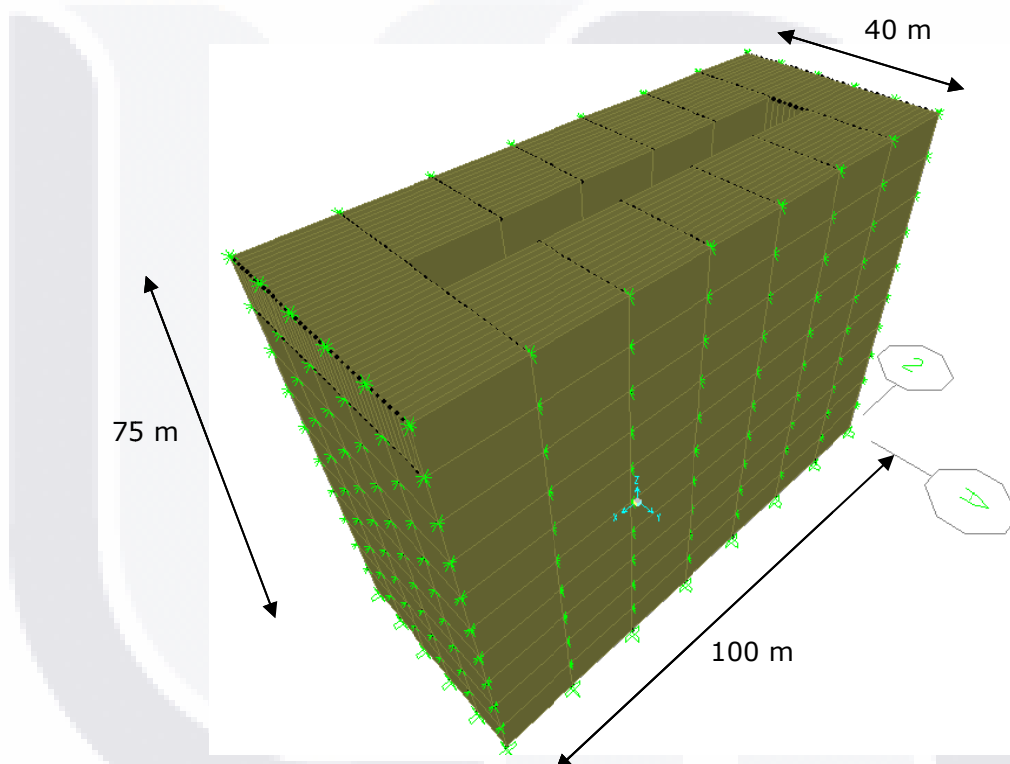
$$\text{Máximo esfuerzo en el terreno: } \frac{170 + 425.83 + 375.14}{9 \times 5.5} = 19.66 < 30 \text{ t/m}^2$$

Por lo que las dimensiones propuestas del bloque son aceptables.

Ejemplo 4. Análisis de vibraciones en el área circundante a una prensa de impacto, mediante análisis de elementos finitos volumen, en el espacio.

De la prensa mostrada a continuación, se conocen las características mecánicas de la misma, también las características del terreno de desplante y el diseño de la cimentación, por lo que en este ejemplo se tratará de medir el nivel de aceleraciones, velocidades y desplazamientos en diferentes puntos, modelando al sistema prensa-suelo con el método de elementos finitos (volumen) usando el programa SAP.

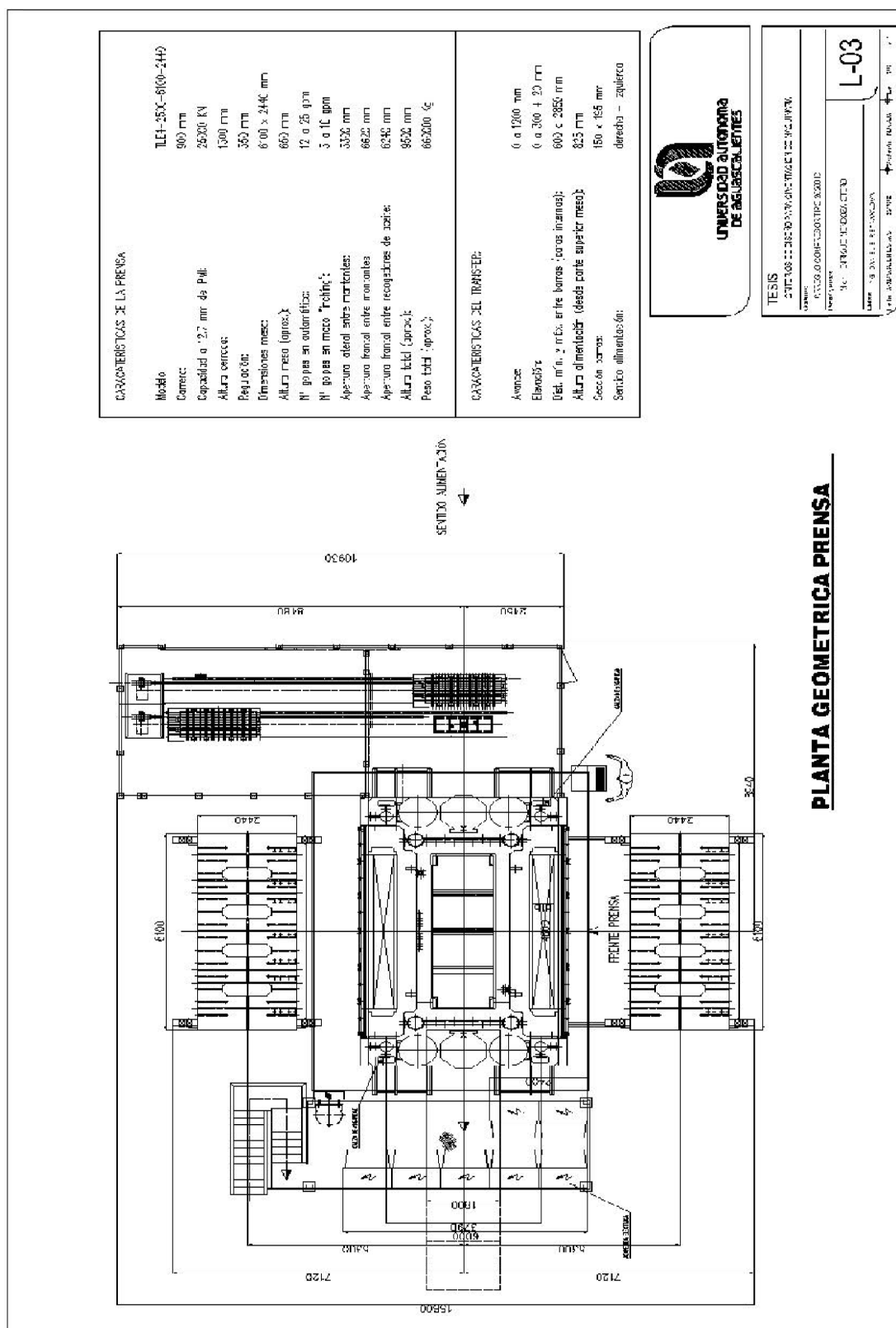
Se muestra a continuación en las láminas 3 y 4 las características de la prensa y en las imágenes siguientes los modelos efectuados, para posteriormente en el capítulo 6 realizar mediciones en campo y calibrar el modelo.



Modelo tridimensional modelando el terreno de desplante de la prensa.

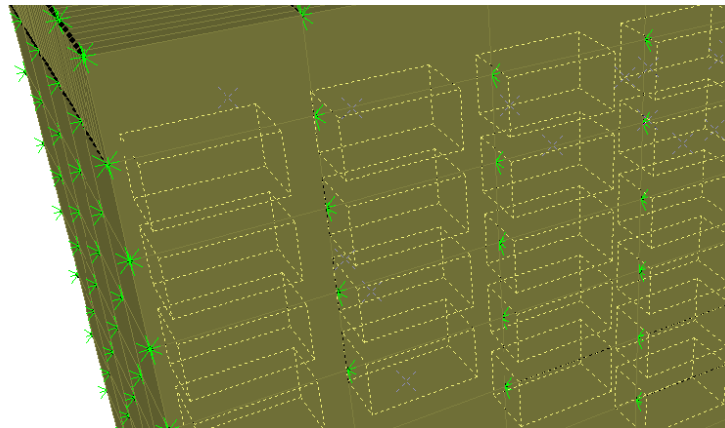
Se modela una porción de terreno de desplante, en elementos 600 finitos volumen, de acuerdo con lo siguiente:

NUMBER OF STIFFNESS DEGREES OF FREEDOM	=	5790
NUMBER OF MASS DEGREES OF FREEDOM	=	2658
MAXIMUM NUMBER OF EIGEN MODES SOUGHT	=	12
MINIMUM NUMBER OF EIGEN MODES SOUGHT	=	1
NUMBER OF RESIDUAL-MASS MODES SOUGHT	=	0
NUMBER OF SUBSPACE VECTORS USED	=	24
RELATIVE CONVERGENCE TOLERANCE	=	1.00E-09





SECCION LONGITUDINAL

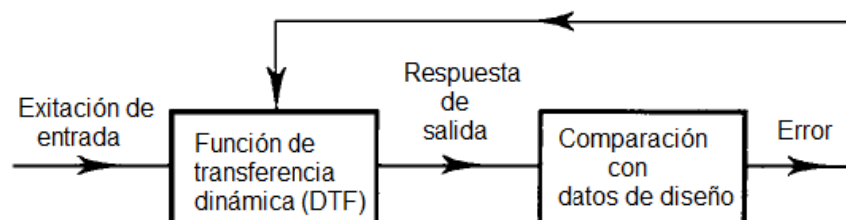


Parte del modelo tridimensional donde se aprecian los elementos finitos volumen.

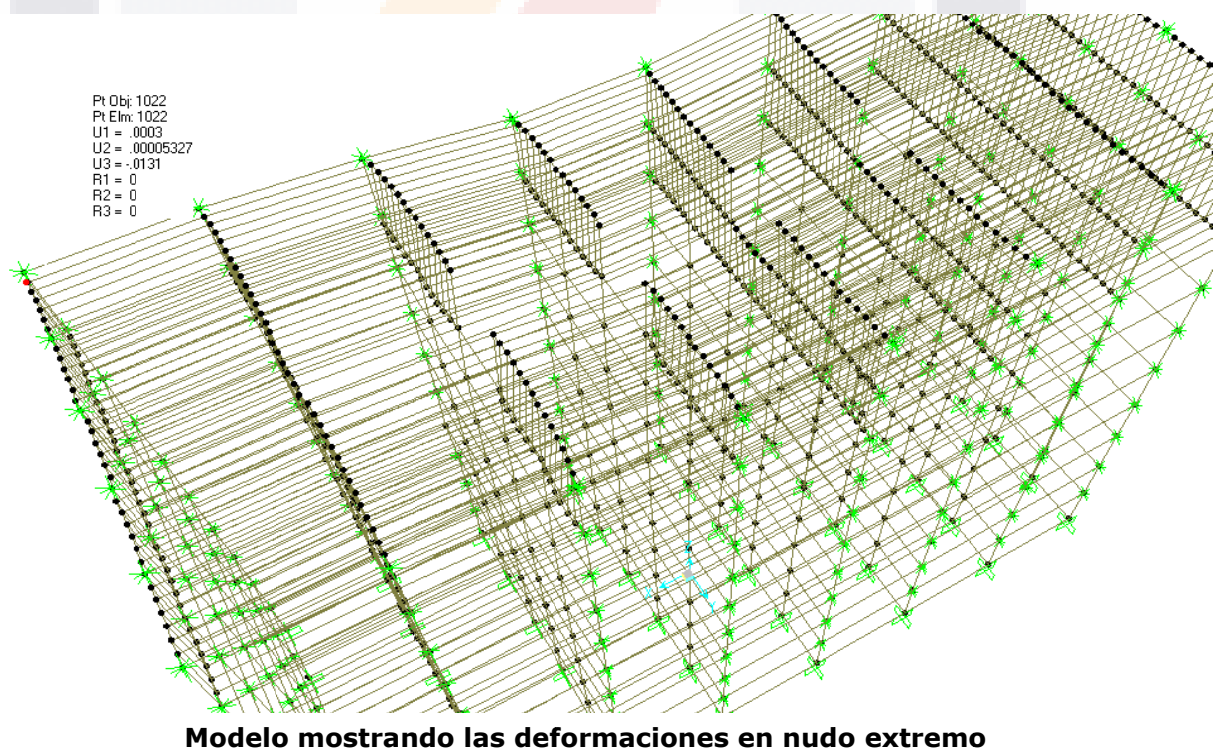
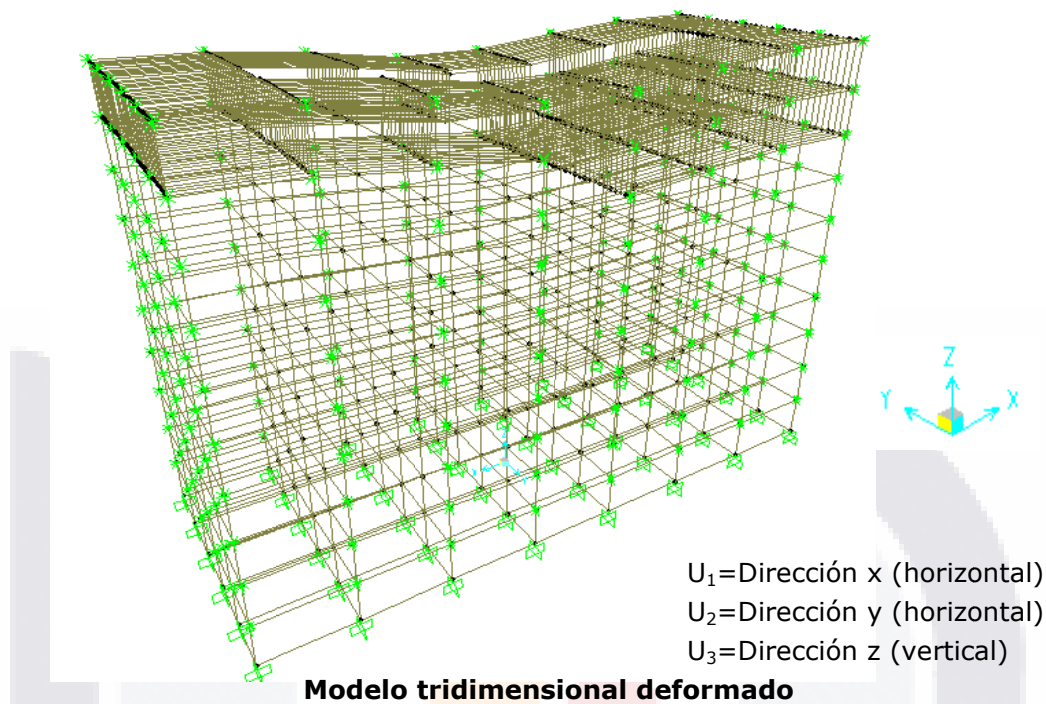
Las características que se consideraron en el modelo, son nudos empotrados en la base y apoyos simples en los nudos de las 4 caras restantes. Las dimensiones del bloque de suelo que se analizó tiene 40 m de ancho por 100 m de largo y 75 m de profundidad, se modeló también el foso existente y las placas de concreto (cimentación) de la prensa, se aplicó en los apoyos de la prensa la carga estática y dinámica proporcionada por el fabricante del equipo.

En este ejemplo, en el que se trata de modelar el nivel de desplazamientos que se presentan en el terreno, con el equipo en operación, se trata de plantear otra manera de buscar la solución del diseño de la cimentación de una maquinaria, empleando programas de computo que nos ayuden a discretizar con mayor fineza el problema.

No se describe con detalle la metodología que se llevo a cabo para la elaboración del modelado en el programa SAP, por considerar que cae fuera del alcance de este trabajo, solo se busca introducir la inquietud en los diseñadores, de plantear la solución a los problemas planteados siguiendo este camino, donde habrá que redefinir las técnicas para la obtención de las funciones de transferencia dinámica entre la maquinaria y el suelo, así como los caminos para obtener la medición de la respuesta del suelo-estructura e ir ajustando el modelo hasta que resulte similar al caso real.



Los resultados obtenidos relativos a los desplazamientos se muestran en las imágenes siguientes.



Joint Displacements										
Joint Text	Output Case Text	Case Type Text	Step Type Text	U1 cm	U2 cm	U3 cm	R1 Radians	R2 Radians	R3 Radians	
505	VIBRACION PRENSA	LinModHist	Min	0	0	-0.014006	0	0	0	0
516	VIBRACION PRENSA	LinModHist	Max	0	0	0.00000505	0	0	0	0
516	VIBRACION PRENSA	LinModHist	Min	0	0	-0.013907	0	0	0	0
527	VIBRACION PRENSA	LinModHist	Max	0	0	0.000011	0	0	0	0
527	VIBRACION PRENSA	LinModHist	Min	0	0	-0.013878	0	0	0	0
1021	VIBRACION PRENSA	LinModHist	Max	0	0.000044	0.000262	0	0	0	0
1021	VIBRACION PRENSA	LinModHist	Min	-0.000646	-0.000001778	-0.012157	0	0	0	0
1023	VIBRACION PRENSA	LinModHist	Max	0	0.000122	0.000146	0	0	0	0
1023	VIBRACION PRENSA	LinModHist	Min	-0.001193	-0.0000003505	-0.012481	0	0	0	0
1025	VIBRACION PRENSA	LinModHist	Max	0	0.000134	0.00015	0	0	0	0
1025	VIBRACION PRENSA	LinModHist	Min	-0.001505	-0.000001199	-0.012504	0	0	0	0
1027	VIBRACION PRENSA	LinModHist	Max	0	0.000117	0.000145	0	0	0	0
1027	VIBRACION PRENSA	LinModHist	Min	-0.001476	-0.0000003102	-0.012511	0	0	0	0
1029	VIBRACION PRENSA	LinModHist	Max	0	0.000087	0.000133	0	0	0	0
1029	VIBRACION PRENSA	LinModHist	Min	-0.001366	-0.0000004352	-0.012501	0	0	0	0
1031	VIBRACION PRENSA	LinModHist	Max	0.000000338	0.000079	0.000233	0	0	0	0
1031	VIBRACION PRENSA	LinModHist	Min	-0.000678	-0.0000006199	-0.012147	0	0	0	0
1033	VIBRACION PRENSA	LinModHist	Max	0.000002379	0.000017	0.000216	0	0	0	0
1033	VIBRACION PRENSA	LinModHist	Min	-0.000888	-0.000046	-0.01212	0	0	0	0
1035	VIBRACION PRENSA	LinModHist	Max	0	0.000028	0.000109	0	0	0	0
1035	VIBRACION PRENSA	LinModHist	Min	-0.001681	-0.000019	-0.012532	0	0	0	0
1037	VIBRACION PRENSA	LinModHist	Max	0	0.00003	0.000109	0	0	0	0
1037	VIBRACION PRENSA	LinModHist	Min	-0.001928	-0.000048	-0.012587	0	0	0	0
1039	VIBRACION PRENSA	LinModHist	Max	0	0.000025	0.000105	0	0	0	0
1039	VIBRACION PRENSA	LinModHist	Min	-0.001807	-0.00008	-0.012603	0	0	0	0
1041	VIBRACION PRENSA	LinModHist	Max	0	0.000021	0.000095	0	0	0	0
1041	VIBRACION PRENSA	LinModHist	Min	-0.001621	-0.000087	-0.012551	0	0	0	0
1043	VIBRACION PRENSA	LinModHist	Max	0.00004	0.000011	0.000199	0	0	0	0
1043	VIBRACION PRENSA	LinModHist	Min	-0.000473	-0.000022	-0.012055	0	0	0	0
1046	VIBRACION PRENSA	LinModHist	Max	0.0000006923	0	0.000151	0	0	0	0
1046	VIBRACION PRENSA	LinModHist	Min	-0.00262	-0.000096	-0.012441	0	0	0	0

Impresión de desplazamientos en nudos, donde se aprecia que los desplazamientos máximos están en el rango de .019 cm

Es importante hacer mención que la medida de la aceleración y velocidad no coincide en el modelo contra lo medido en la realidad, aunque probablemente esto se deba a que se considero únicamente la respuesta del primer impacto en una prensa y en la realidad existe un tren de prensas que en el proceso de fabricación que es necesario para terminar el proceso, situación que no se modelo en el programa, ya que solo se tomaron los impulsos sobre la primer prensa.

Otro aspecto importante de mencionar, es que resulta difícil obtener una función de impulsos, ya que un impulso ideal tiene una magnitud "en extremo grande" que dura un tiempo infinitesimal, considerando además que al segundo impulso, el sistema líneal no esta sometido a ninguna fuerza, pero si a una velocidad inicial.

CAPITULO 6

TRABAJO DE CAMPO

Al considerar los movimientos del terreno en el sitio sujeto a vibraciones de maquinaria, habrá que elegir el adecuado, de acuerdo a las características que se tengan en los datos. La elección del equipo depende de las siguientes características:

- a) *La intensidad de las vibraciones.* Se puede caracterizar la vibración en un punto del suelo por la historia temporal del desplazamiento, de la velocidad o de la aceleración. Cuando queremos registrar movimientos fuertes del suelo, hay que tener en cuenta que una vibración de aceleración 0.2g a una frecuencia de 2 Hz, corresponde a un desplazamiento máximo de 1.2 cm. y que una aceleración de 0.5g a 1 Hz, produciría un desplazamiento de 12 cm.; en cambio, en altas frecuencias, estos valores corresponderían a desplazamientos muy pequeños. Por tanto, un registrador de desplazamientos necesitará disponer de un rango dinámico muy grande para no llegar a la saturación.
- b) *El rango de frecuencias.* Nos interesa que el equipo que vamos a usar, sea capaz de registrar un amplio rango de frecuencias, tanto para estudiar las condiciones en toda la gama de periodos de vibración que puedan afectar a las estructuras.
- c) *Registro por disparo.* Debido a que se pretende registrar los movimientos fuertes del suelo que se producen en un pequeño radio de acción, el número de registros que se supone se va a obtener en ese instrumento, será muy pequeño, comparado al número de registros que hace un sismógrafo para registro de velocidades, además considerando que el periodo de retorno de los movimientos fuertes, es mucho mayor que en el caso de los movimientos débiles, no resultaría práctico usar un instrumento de registro continuo.

6.1 INSTRUMENTACION UTILIZADA.

El instrumento que se utiliza para registrar los movimientos fuertes del suelo, en el denominado campo cercano, y que satisface las características anteriores, es el acelerógrafo. Este equipo, nos va a permitir obtener la aceleración del suelo en función del tiempo. Es un instrumento que posee además una baja amplificación, para evitar la saturación. El periodo del acelerógrafo puede estar comprendido entre 0s y 0.1s, Además, el amortiguamiento oscila entre el 50 y 100% del amortiguamiento crítico.

En la Figura 6.1 vemos unas curvas representativas de dos tipos de instrumentos, comparadas con la curva teórica de respuesta de un acelerógrafo ideal. Todos los acelerógrafos (analógicos ó digitales) constan de cuatro dispositivos comunes:

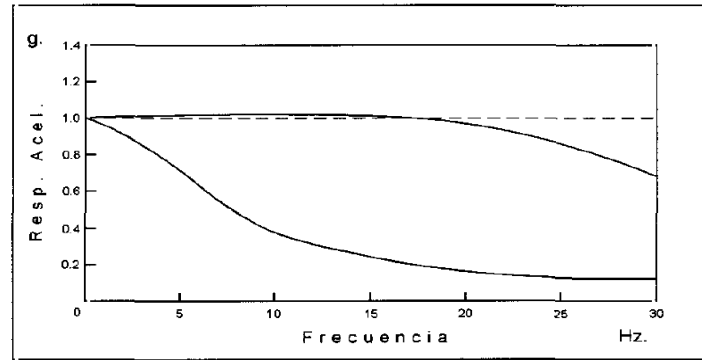


Fig. 6.1 Respuesta de un acelerógrafo. La línea discontinua correspondería a un acelerógrafo perfecto, mientras que las continuas muestran la respuesta de dos acelerógrafos: El superior para 25 Hz de frecuencia natural y amortiguamiento de 0.6, y el inferior para 7 Hz y amortiguamiento de 1.

1.- *Sistema de disparo.* Puesto que el registro del acelerógrafo no es continuo, se encuentra en una situación de alerta a la espera de una excitación que lo ponga en funcionamiento. Para ello cuenta con un sensor de bajo consumo que se dispara por la llegada de las primeras ondas, cuando estas superan un umbral de aceleración y frecuencia al que ha sido ajustado previamente. De esta forma se consigue que la pérdida de información sea pequeña.

Para evitar esa pequeña pérdida de información anterior a la superación del umbral prefijado, los acelerógrafos digitales cuentan con una memoria pre-evento, por la que la señal procedente del sensor es continuamente digitalizada e introducida en una memoria cíclica, y cuando detecta un valor de aceleración igual o superior a la del disparo se acciona el sistema de registro, guardándose primero la información que hay en memoria. De esta forma no se pierden las primeras llegadas de los eventos, y se obtienen registros completos.

2.- *Sensor y Transductor.* Ambos forman un cuerpo común, y convierten la energía del movimiento del suelo en otro tipo de energía, bien sea mecánica, electromagnética o electrónica.

3.- *Sistema de Registro.* Es el encargado de almacenar los eventos que se producen. Puede ser de varios tipos: Registro gráfico directo sobre película fotográfica, registro en cinta magnética o registro en memoria de estado sólido.

4.- *Sistema de tiempo.* Nos permite hacer un registro simultáneo del tiempo. Además de contar con reloj interno que no está relacionado con ninguna base de tiempo absoluto y puede estar conectado a un receptor de tiempo GPS. Los acelerógrafos digitales actuales, tienen un sensor de tipo captador o servo acelerómetro (Fig. 6.2), para su diseño, se parte de un sistema electromagnético en el que se introduce un sistema de retroalimentación.

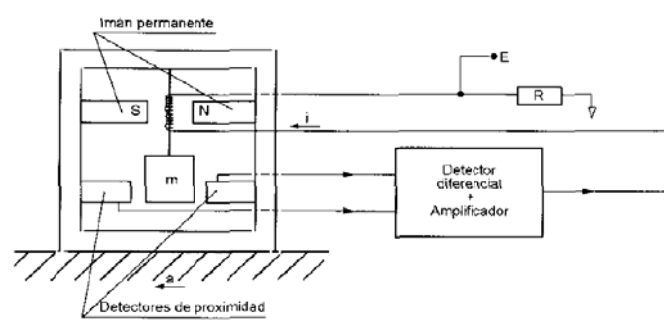


Fig. 6.2 Esquema de funcionamiento de un servo acelerómetro.

Suponemos una aceleración horizontal $a(t)$ en la base del acelerógrafo. La masa m tiende a sufrir un desplazamiento relativo respecto a la carcasa del instrumento que es solidaria al suelo, y cuando los detectores de proximidad detectan el movimiento, se induce en la bobina una corriente de intensidad I que origina una fuerza opuesta al movimiento de la masa, obligándola a que permanezca en reposo.

La fuerza de inercia asociada a la aceleración del suelo es:

$$F = m a$$

Y la fuerza generada por la corriente I es:

$$F_t = B l n I$$

Siendo B la intensidad del campo magnético que crea el imán, l la longitud de una espira, y n el número de espiras de la bobina. Los tres componentes son constantes del instrumento.

Cuando se consigue el equilibrio de fuerzas, tendremos:

$$F = F_t$$

$$M a = B l n I \text{ con lo que:}$$

$$I = \frac{m}{B l n} a$$

Tenemos entonces, que la intensidad I es proporcional a la aceleración absoluta del suelo, por lo que midiendo I obtendremos los valores instantáneos de a . Estos sensores tienen un mejor comportamiento dinámico que los acelerógrafos electromagnéticos, porque la masa siempre está en reposo. Además tienen mayor linealidad, mayor rango dinámico y mejor respuesta en frecuencias por ausencias de frecuencias resonantes, y mayor inmunidad al ruido.

6.2 TRATAMIENTO DE LOS REGISTROS.

Para obtener una determinación lo más exacta posible de los valores de aceleración que han sido producidos durante una excitación en el lugar de registro, es necesario hacer un cuidadoso tratamiento de los registros. Debido a que los datos se recogen en campo, están en formato original del propio acelerograma (binario), será necesario hacer una conversión de los mismos a formato ASCII con el que, comúnmente se manejan.

El acelerograma obtenido, presenta una serie de errores que deberán ser corregidos para que dicho acelerograma sea apto para ser utilizado. En la Fig. 6.3 se muestra el registro con sus tres componentes.

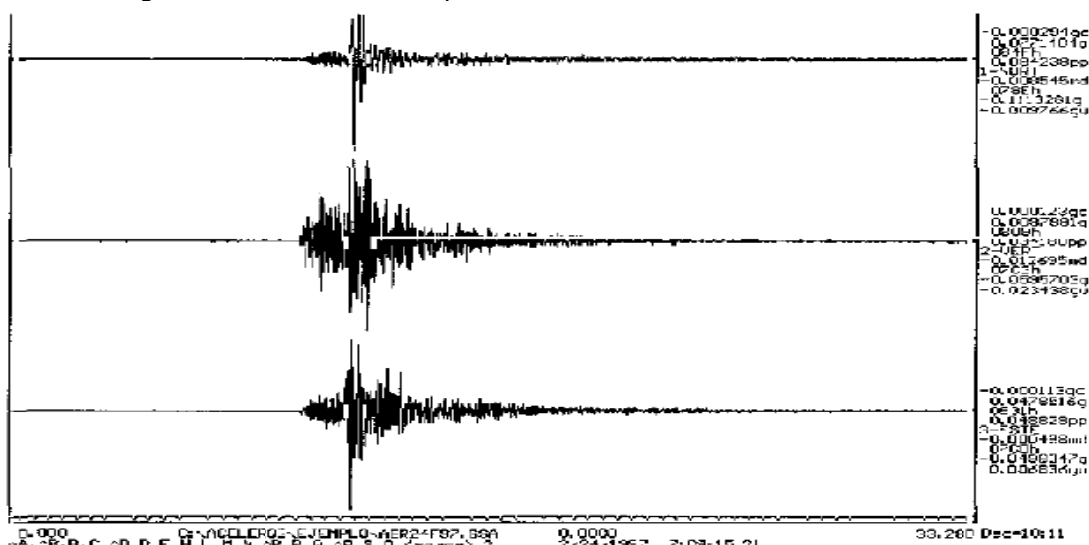


Fig. 6.3 Visualización del registro binario

Corrección de la línea base o corrección de ceros: A veces, ocurre que los valores del acelerograma se encuentran desplazados respecto a la línea cero de aceleración. Este error puede ocurrir porque el acelerógrafo no está perfectamente nivelado en su colocación, o bien porque el sistema de registro provoque una desplazamiento de los datos respecto a la línea base. Aunque este error puede ser imperceptible en aceleración, puede ser muy importante cuando se obtienen la velocidad y el desplazamiento por integración, ya que se está contabilizando el área que hay entre la curva de aceleración y la línea base.

Para darnos una idea de cómo afecta este error, si se supone un desplazamiento constante del acelerograma respecto a la línea base de 0.001g (Fig.

6.4). Al integrar con este error, obtendríamos un incremento lineal de velocidad, que si volvemos a integrar nos da un incremento parabólico de desplazamiento. Así el error cometido en desplazamiento cuando han transcurrido 20 s, será de 196 cm.

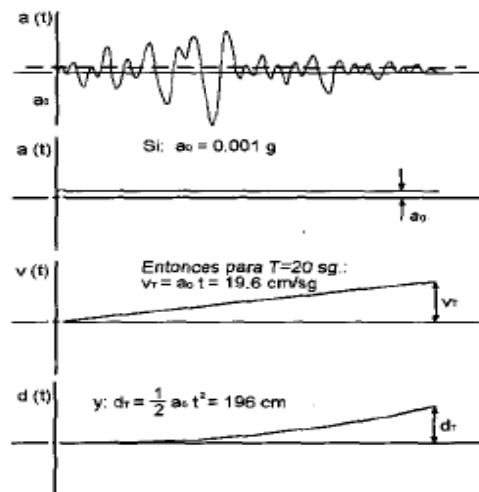


Fig. 6.4 Error de ceros en el acelerograma

6.3 EL RUIDO Y LOS FILTROS.

Una vez que nuestro acelerograma ha sido corregido tanto de la línea base como de corrección instrumental, habrá que tener en cuenta la repercusión que el ruido tiene sobre el acelerograma. Este ruido puede estar causado tanto por fenómenos naturales como por el tratamiento de los datos. Así, podremos considerar que el acelerograma es la suma de la señal producida por la maquinaria, mas el ruido.

$$a(t) = s(t) + r(t)$$

Siendo $a(t)$ el acelerograma sin corregir, $s(t)$ la señal de la maquinaria, y $r(t)$ el ruido. El ruido puede ser de dos tipos:

- a) *Ruido de alta frecuencia:* Cuando aparece por encima de la banda en que trabajamos, este ruido afecta a los picos de la aceleración fundamentalmente, sin embargo no afecta mucho el proceso de integración, ya que el área bajo la curva es básicamente la misma que para la señal corregida, dado que las desviaciones por encima y por debajo se compensan.
- b) *Ruido de baja frecuencia:* Cuando este aparece por debajo de la banda de frecuencias con las que trabajamos. Afecta al proceso de integración básicamente, ya que al integrar la aceleración para obtener velocidad y el desplazamiento estamos calculando el área bajo la curva.

Para evitar que estos errores afecten, se deberá limitar la información a la banda de frecuencias deseada, en lugar de mantener información adicional a mayores

y menores frecuencias. Para eliminar los errores se utilizan los filtros paso-baja y paso-alta, siendo lo más importante elegir la frecuencia de corte adecuada.

En cuanto a los registros que pueden causar ruido esta por ejemplo (Bard, 1988):

1. A bajas frecuencias (por debajo de 0.3 y hasta 0.5 Hz) son causados por las olas oceánicas que ocurren a grandes distancias.
2. A frecuencias intermedias (entre 0.3 - 0.5 Hz y 1 Hz), se registra el oleaje que rompe en las costas.

6.4 INTEGRACION DE LOS ACELEROGRAMAS.

Una vez que el registro temporal de aceleración ha sido corregido para su utilización, el siguiente paso es integrarlo para obtener los registros de velocidad y desplazamiento. Si consideramos el dominio del tiempo, la integración se hace por métodos numéricos, teniendo en cuenta que:

$$\bar{v} = \int_{t_0}^t \bar{a} dt + \bar{v}_0$$

$$\bar{r} = \int_{t_0}^t \bar{v} dt + \bar{r}_0$$

El pico de máxima velocidad nos da una clara medida del contenido de frecuencias intermedias del movimiento, los picos de desplazamientos, muestran las características de largo periodo del movimiento, por tanto con los tres valores pico (de aceleración, de velocidad y de desplazamiento), tenemos una importante descripción del movimiento del suelo, mostrando cada uno una región diferente de frecuencias. (Fig. 6.5)

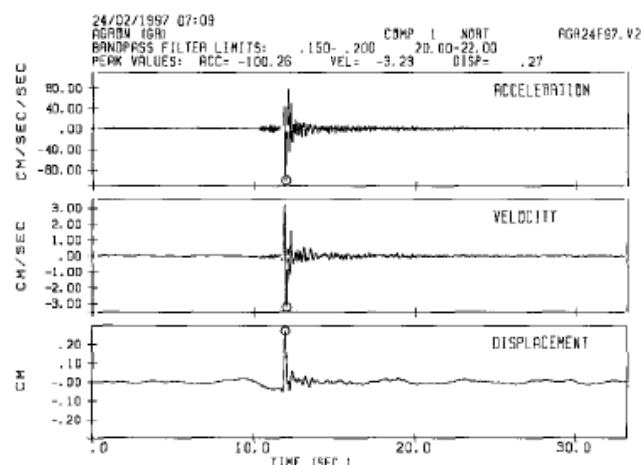


Fig. 6.5 Aceleración, velocidad y desplazamiento a partir del acelerograma

6.5 ANALISIS FRECUENCIAL.

Una vez que se han obtenido los registros de velocidad y desplazamiento, es necesario hacer un análisis del contenido de frecuencias del acelerograma, para ello se utilizan el espectro de Fourier y el espectro de respuesta.

6.5.1 ESPECTRO DE FOURIER.

El espectro de Fourier, es un parámetro que nos proporciona un amplio conocimiento acerca de cuál es el contenido en frecuencias del acelerograma, de modo que para cada periodo de oscilación del acelerograma se representa la amplitud máxima que le corresponde. (Fig. 6.6) El espectro de Fourier en amplitudes, se define matemáticamente como:

$$FS = \sqrt{\left[\int_0^t a(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau \right]^2 + \left[\int_0^t a(\tau) \sin(\omega\tau) d\tau \right]^2}$$

De la interpretación del espectro de Fourier, podemos deducir cuales son los periodos más importantes del movimiento (que son los que se van a caracterizar), solamente buscando en que lugares se alcanzan los valores pico de amplitud. Además, podemos ver cuál es la frecuencia o periodo predominante de un registro, que es aquel para el cual el espectro de Fourier de la aceleración alcanza su valor máximo y que además mantiene una correlación directa con la distancia epicentral.

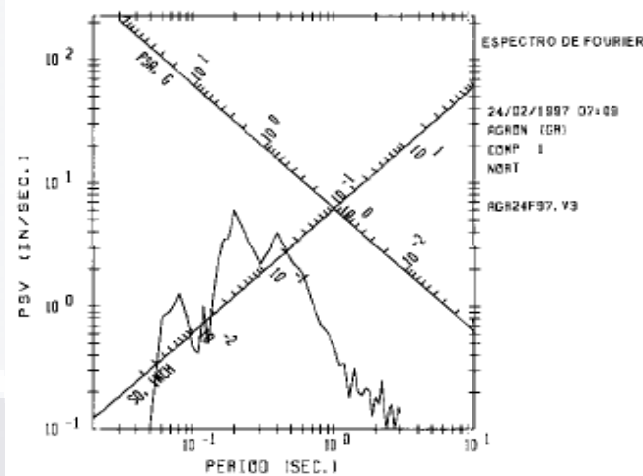


Fig. 6.6 Espectro de Fourier de un acelerograma

6.5.1 ESPECTRO DE RESPUESTA.

El espectro de respuesta de un acelerograma, representa la respuesta máxima de un oscilador de un solo grado de libertad y de masa unitaria, con frecuencia ω_0 y amortiguamiento ξ , cuando se le somete a un movimiento del suelo dado por dicho acelerograma. (Fig. 6.7)

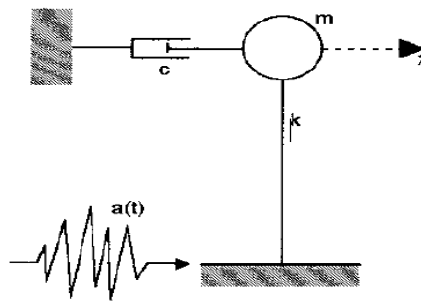


Fig. 6.7 Modelo de un grado de libertad sometido a una excitación.

Se suelen considerar distintos periodos propios del oscilador y distintos valores de amortiguamiento, de modo que para un periodo propio T y un amortiguamiento ξ del oscilador, el acelerograma provoca un movimiento cuyos picos de aceleración, velocidad y desplazamiento se recogen en el espectro de respuesta. El espectro de respuesta será entonces el conjunto de máximos valores de las respuestas del sistema.

$$S_d^r(\omega, \xi) = |x(t)|_{\max}$$

$$S_v^r(\omega, \xi) = |\dot{x}(t)|_{\max}$$

$$S_a^r(\omega, \xi) = |\ddot{x}(t) + a(t)|_{\max}$$

Una forma simple de representar el espectro de respuesta, es mediante un diagrama trilogarítmico, de cuatro entradas en el que aparece el pseudoespectro de velocidad frente al periodo T o frecuencia ω , y en las líneas a 45º se representan los valores constantes de pseudoaceleración absoluta para pendiente 1 y desplazamientos constantes relativos para pendiente -1. Además, el espectro de respuesta se suele representar para distintos valores del amortiguamiento. (Fig. 6.8).

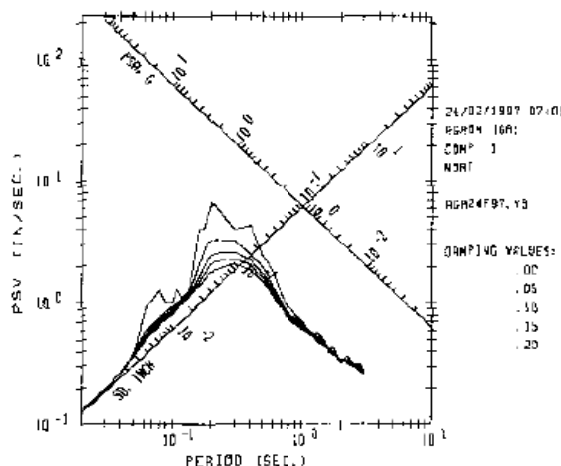


Fig. 6.8 Espectro de respuesta.

6.6 METODOLOGIA PARA ANALISIS DE LOS EVENTOS.

6.6.1 Equipo utilizado.

6.6.1.1 Registro de eventos con Etna.

Se empleó el Acelerómetro Etna (High Dynamic Range Strong Motion Accelerograph) mca. Kinemetrics, Inc. (Foto 6.1), propiedad de la Universidad Autónoma de Aguascalientes. Este equipo tiene las siguientes características:



Foto. 6.1 Etna (se muestra sin la tapa superior)

- a) *Sensor*: Tipo Triaxial episensor con acelerómetro internamente orientado.
- b) *Rango de disparo*: Filtro de paso banda Trigger IIR, con rango de 0.1 Hz a 12.5 Hz., con capacidad de pre-evento máximo de 60 seg en los tres canales @ 200 sps.

Registro de evento: El registro del evento se hace en volts, medidos a intervalos de tiempo predeterminados por el usuario.

Los datos de calibración del ETNA para un evento, se muestran a continuación:

```
KW2ASC: C:\USERS\ DANIEL~1\ ARCHIV~1\ EH002.EVT    01/01/1980 00:04
Altus K2 Header, Version. 1.30, S/N 3953
Stn: EMO Site:
12 channel unit, 3 channel(s) selected: 1 2 3
Channel(s) triggered: 3
Comment: EMO edificios y efecto de sitio
UserCodes: 256 512 768 1024

Main battery: 13.40V, charging, minimum alarm voltage: 12.0V
24 bit A/D with group delay: 0 msec
Temperature: 31.2 deg.C
```

Altus Time Source: RTC from cold start.
Event Start Time: 1/1/1980 (1) 0:04:07.000
Event Trigger Time: 1/1/1980 (1) 0:04:22.000

Samples per second: 200
Duration: 21.000 seconds, 210 frames
Pre-event: 15 seconds.
Minimum runtime: 10 seconds.
Post event: 5 seconds.
Array Propagation Window: 0 seconds.
Storage: Primary B:, Secondary B:

Digital Field Station OFF.

Program versions: sysBlk 0.00, bootBlk 1.12,
appBlk 2.98, dspBlk 1.01

Instrument latitude: 21.900000 Degrees North
Instrument longitude: -102.300003 Degrees East
Instrument elevation: 1850 Meters relative sea level.

GPS latitude: 0.00 Degrees North
GPS longitude: 0.00 Degrees East
GPS altitude: 0 Meters relative sea level.

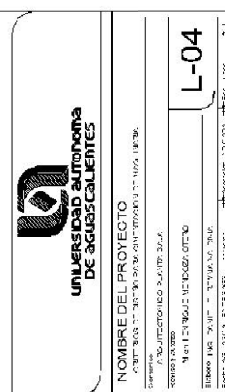
ch	1	2	3
MaxPeak:	-0.0067055V	-0.0016761V	0.0072116V
at seconds:	16.420	18.100	14.775
MinPeak:	-0.0099772V	-0.0049162V	-0.0037670V
at seconds:	18.575	19.790	14.725
Mean:	-0.0083002V	-0.0032845V	0.0010574V
AcqOffset:	0.0000000V	0.0000000V	0.0000000V

ch	1	2	3
Chan ID:	E-W,	N-S,	Vert,
Sensors:	Unknown (32) s/n 12372	Unknown (32) s/n 12289	unknown (32) s/n 12371
Displace, N:	0000,	0000,	0000,
Displace, E:	0000,	0000,	0000,
Displace, U:	0000,	0000,	0000,
Alt,Azi(deg):	0, 0	0, 0	0, 0

ch	1	2	3
Gain:	1	1	1
Fullscale	2.50V	2.50V	2.50V
Sensitivity:	2.498	2.498	2.496
Damping:	0.70	0.70	0.70
NatFreq:	218.00Hz	208.00Hz	216.00Hz

ch	1	2	3
Trigger Threshold:	0.10%FS	0.02%FS	0.02%FS
Detrigger Threshold:	0.10%FS	0.02%FS	0.02%FS
Alarm Trig Threshold:	2.00%FS	2.00%FS	2.00%FS

Cabe hacer mención que al momento de ajustar el dato de la fecha del evento, se optó por dejar la fecha que trae por default el equipo, la cual corresponde al 1/1/1980. Los registros de los eventos se almacenan en voltajes y en tres canales por separado, cada lectura es tomada con un intervalo de tiempo de 0.005 seg.



Se muestra a manera de ejemplo, parte de uno de los datos de un canal a continuación:

```
KW2ASC: C:\USERS\DANIEL~1\ARCHIV~1\EH002.EVT 01/01/1980 00:04
K2 Header Version 1.30
Station ID: EMO Site: Serial number: 3953 Channels: 3
Sampling rate: 200 Pre-event: 15 seconds. Post-event: 5 seconds.
Start time: 1/1/1980 (1) 0:04:07.000
Trigger time: 1/1/1980 (1) 0:04:22.000
Duration: 21.000 seconds, 210 frames, 4200 scans.
Currently checking for presence of GPS.
GPS updated the RTC 0 times since last reset.
Drift Rate at last two RTC updates to UTC: 0 & 0 msec.
Last GPS update times were:
1/1/1980 (1) 00:00:00 & 1/1/1980 (1) 00:00:00.
Last GPS TurnOn times were:
1/1/1980 (1) 00:01:08 & 1/1/1980 (1) 00:00:00.
Last GPS Lock times were:
1/1/1980 (1) 00:00:00 & 1/1/1980 (1) 00:00:00.
Count of times GPS failed to lock
within gpsMaxTurnOnTime: 0
Main battery: 13.40V, charging, minimum alarm voltage: 12.0V
```

writing formatted header, C:\USERS\DANIEL~1\ARCHIV~1\EH002.HDR, to disk.

```
Files Created: C:\USERS\DANIEL~1\ARCHIV~1\EH002.SHD,
C:\USERS\DANIEL~1\ARCHIV~1\EH002.001
C:\USERS\DANIEL~1\ARCHIV~1\EH002.002
C:\USERS\DANIEL~1\ARCHIV~1\EH002.003
```

-0.008541346	-0.007933974	-0.008758307	-0.008561015	-0.007501841	-0.007969737
-0.007911325	-0.007776022	-0.008379817	-0.008330345	-0.007821321	-0.008082986
-0.008113384	-0.007995367	-0.008129478	-0.008141398	-0.008401871	-0.008177757
-0.008118749	-0.008169413	-0.007879734	-0.008388162	-0.008035302	-0.007675290
-0.009101033	-0.008399487	-0.007227659	-0.008397102	-0.008408427	-0.007797480
-0.008113980	-0.008177161	-0.008057952	-0.007895231	-0.007998347	-0.008472800
-0.008385181	-0.008126497	-0.007894635	-0.008038878	-0.008345246	-0.007982850
-0.008158088	-0.008256435	-0.007780790	-0.008095503	-0.008513927	

Se eligieron 10 puntos para efectuar las mediciones con las prensas funcionando y 8 sin las prensas funcionando para obtener la frecuencia natural del terreno y en cada uno de ellos se registraron varios eventos, se muestra en la Lámina L-05, la localización de estos con respecto a las prensas. El registro marcado con el No. 10 se realizó sobre la cimentación del equipo PRO-single 32-28-21, con el objeto de determinar que tanto se amortiguan las vibraciones con la cimentación con la que se construyó. Se muestran en las fotografías 1 al 8 parte del proceso de obtención de datos de los eventos.

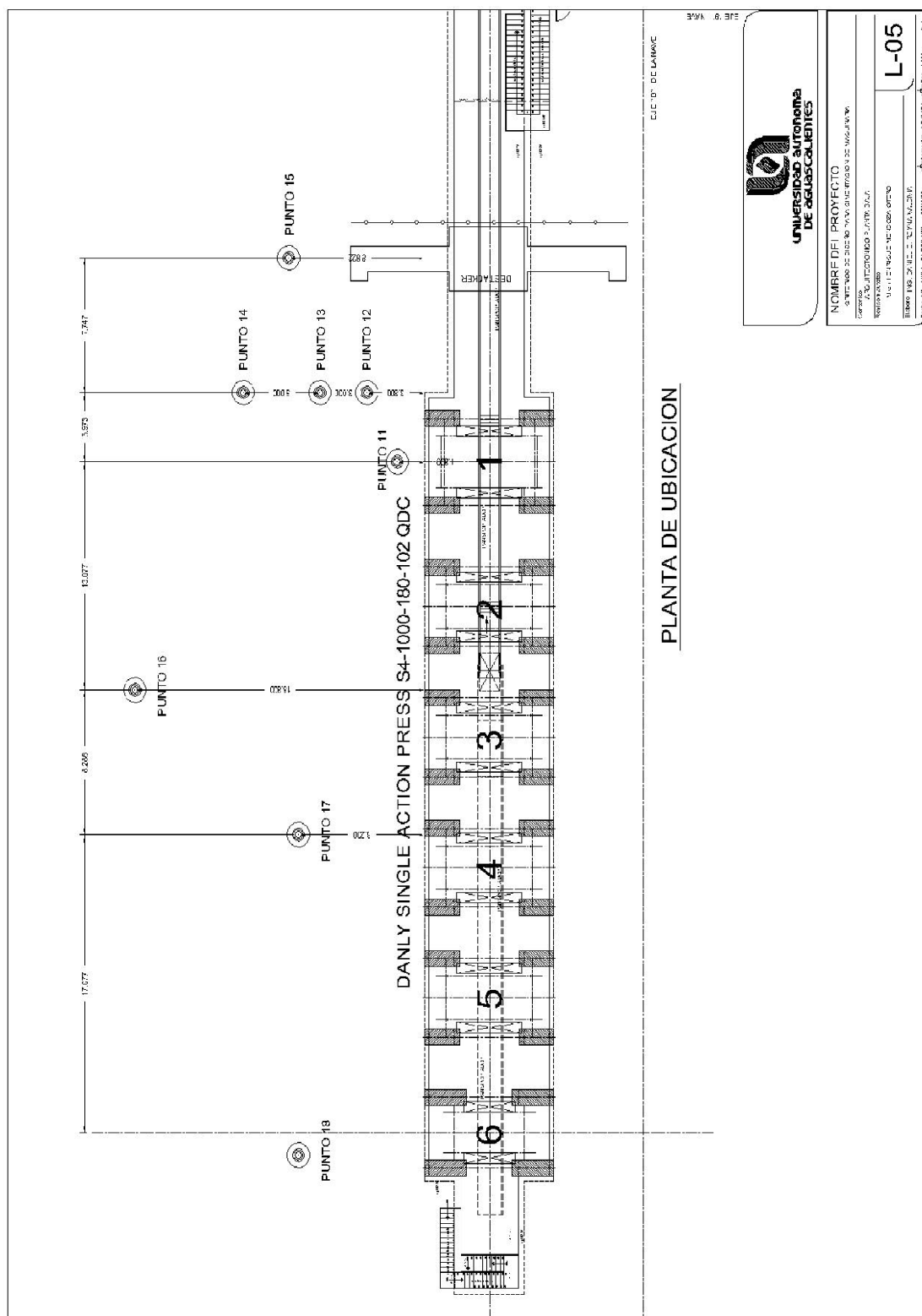




Foto 1 Medición en punto 1

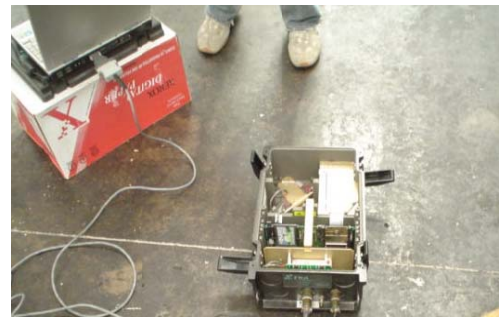


Foto 2 Equipo Etna



Foto 3 Medición punto 6



Foto 4 Medición Punto 8



Foto 5 Vista lateral prensas



Foto 6 Medición interior laboratorio



Foto 7 Vista lateral prensas



Foto 8 Vista hacia laboratorio

6.6.1.2 Análisis de eventos con Degtra y Strong Motion Analyst

Para analizar los datos proporcionados por el Acelerómetro Etna, se utilizaron 2 programas, el software DEGTRA, Fig. 6.9, desarrollado por el CENAPRED y el Instituto de Ingeniería de la UNAM y el software SMA desarrollado por Kinemetrics.

Ambos programas contienen rutinas que sirven para visualizar señales, uso de filtros básicos y avanzados, evaluar la coherencia, correlación cruzada, integrar, derivar, calcular espectros de amplitudes de Fourier, corregir la línea base, calcular espectros de respuesta y otros aspectos de interés para sismólogos e ingenieros sísmicos.



Fig. 6.9 Software empleado para el análisis de los registros.

6.6.2 Análisis de datos con Degtra.

Debido a que la grabación de datos no se puede leer directamente con el programa, en primer término se convirtieron los datos en cadenas de valores por medio del programa KW2ASC que trabaja en ambiente dos, el que crea tres archivos, dos de identificación del evento y tres más, uno de cada canal. Fig. 6.10, en el ejemplo que se muestra, los datos importantes del registro son: La duración del registro, y los archivos creados con extensiones SHD y EH-canal.

Una vez convertidos cada uno de los eventos se convirtieron a código ASCII, el archivo está en condiciones de poder ser leído por el programa DEGTRA, en donde se siguieron los siguientes pasos:

1. Se abre una ventana para cada canal y en ellos se lee el archivo correspondiente.
2. Se realiza la corrección de la línea base. Esto debido a que los valores de voltaje que arroja el ETNA son todos negativos o todos positivos.

```

Símbolo del sistema
Duration: 21.000 seconds, 210 frames, 4200 scans.
GPS Status byte decoded:
  Currently checking for presence of GPS.
GPS updated the RTC 0 times since last reset.
Drift Rate at last two RTC updates to UTC: 0 & 0 msec.
Last GPS Update times were:
  1/1/1980 <1> 00:00:00 & 1/1/1980 <1> 00:00:00.
Last GPS TurnOn times were:
  1/1/1980 <1> 00:01:00 & 1/1/1980 <1> 00:00:00.
Last GPS Lock times were:
  1/1/1980 <1> 00:00:00 & 1/1/1980 <1> 00:00:00.
Count of times GPS failed to lock
  within gpsMaxTurnOnTime: 0
Main battery: 13.40V, charging, minimum alarm voltage: 12.0V

Writing formatted header, C:\USERS\DANIEL~1\ARCHIV~1\EH002.HDR, to disk.

Channel Count <= 12, demultiplex data in one pass.

Files Created: C:\USERS\DANIEL~1\ARCHIV~1\EH002.SHD,
C:\USERS\DANIEL~1\ARCHIV~1\EH002.001
C:\USERS\DANIEL~1\ARCHIV~1\EH002.002
C:\USERS\DANIEL~1\ARCHIV~1\EH002.003

KW2ASC completed.
C:\Users\DANIEL~1\ARCHIV~1>_

```

Fig. 6.10 Conversión de archivos a código ASCII por el programa KW2asc.

3.- Se realiza el escalamiento de los registros, considerando que un 981 gals equivalen a 2.5 Volts, que es la escala completa de lectura del ETNA.

4.- Se Obtienen los espectros de aceleración para cada canal, se conoce cuales son las aceleraciones máximas y los periodos correspondientes. Fig. 6.11

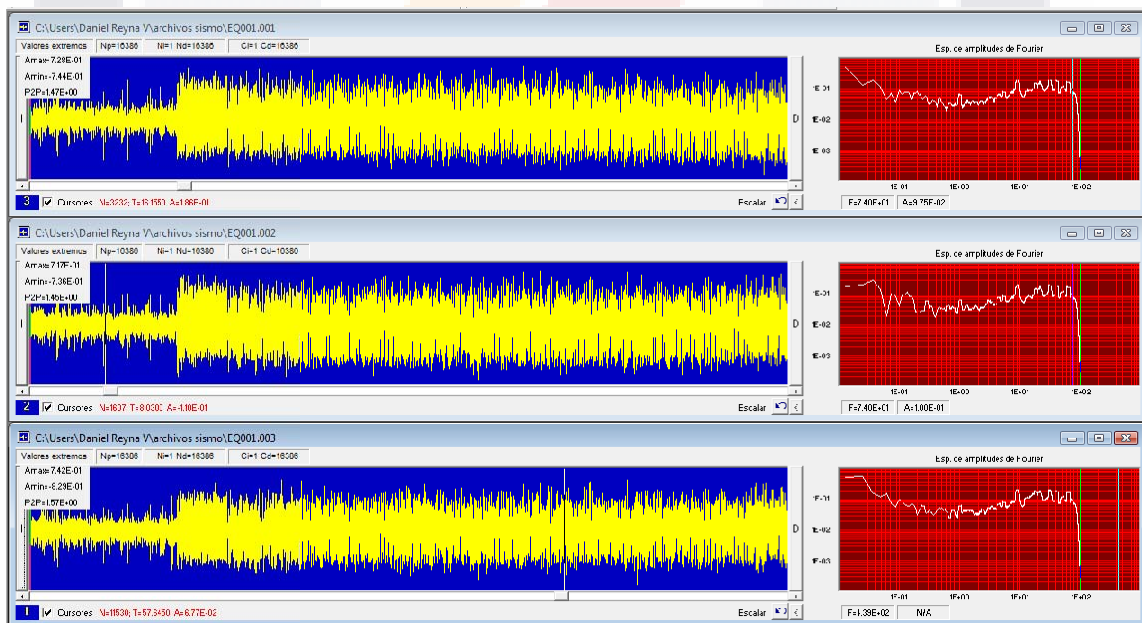


Fig. 6.11 Gráfica de aceleración por canal.

5.- Se filtra y se integra la función del área limitada por los cursores, se emplea el método trapezoidal, donde se obtienen los acelerogramas de velocidad. Fig. 6.12.

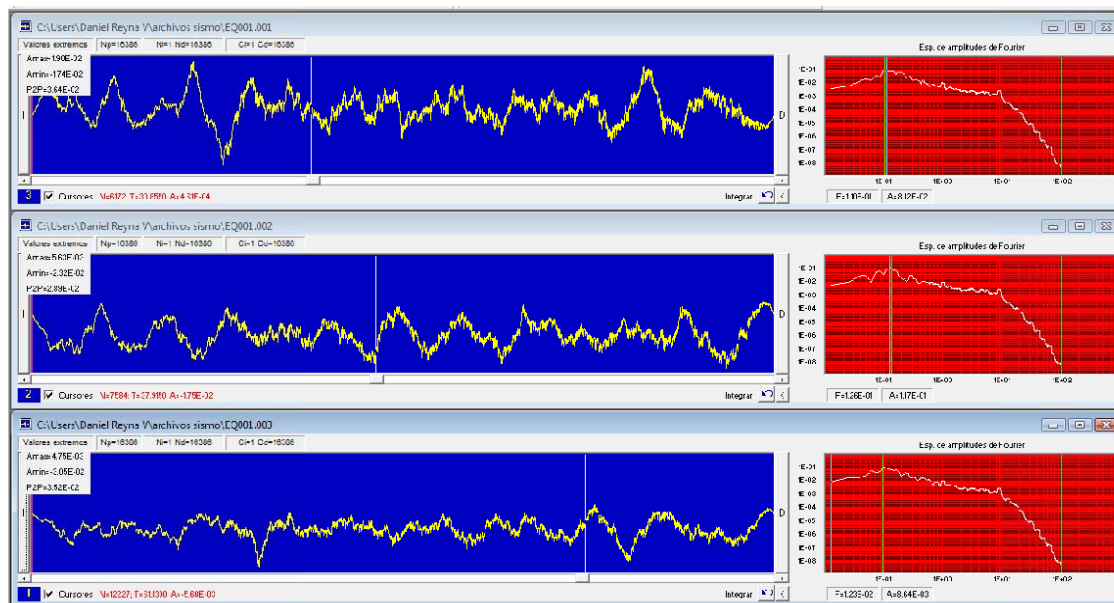


Fig. 6.12 Gráfica de velocidad por canal.

6.- Se vuelve a filtrar y se integra el área y se obtienen los acelerogramas de desplazamiento, en los que se conoce la amplitud del movimiento y la frecuencia con la que se presenta. Fig. 6.13

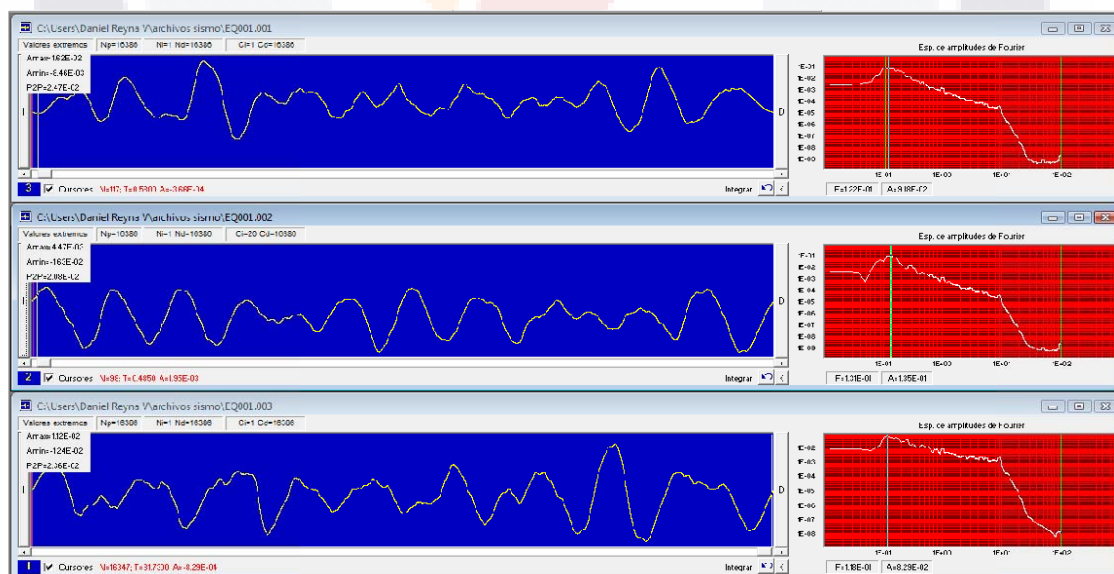


Fig. 6.13 Gráfica de desplazamiento por canal.

Este proceso se repite para cada uno de los eventos registrados.

6.6.3 Análisis de datos con Strong Motion Analyst

Este programa puede leer directamente las lecturas que arroja el programa ETNA, por lo que no es necesario transformar los voltajes a ningún código. Siendo la metodología para el análisis de datos la siguiente:

1...- Se lee el archivo del evento y se corrige la línea base. Fig. 6.14.

Station ID: ALTUS S/N 3953 Channel 3: Vert 01/01/1980 0:04:45 (GMT)

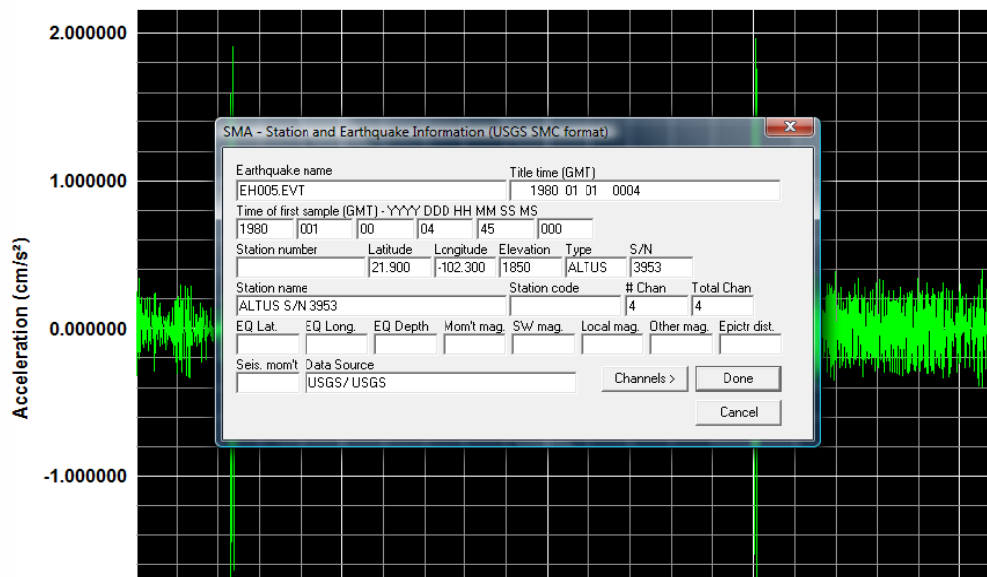
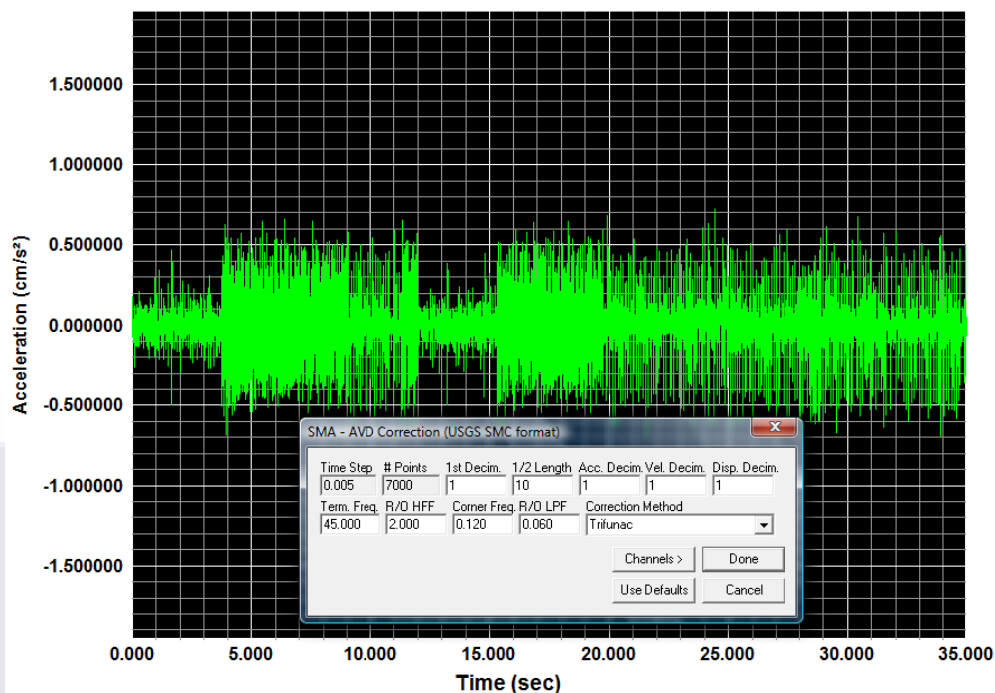


Fig. 6.14 Corrección de línea base

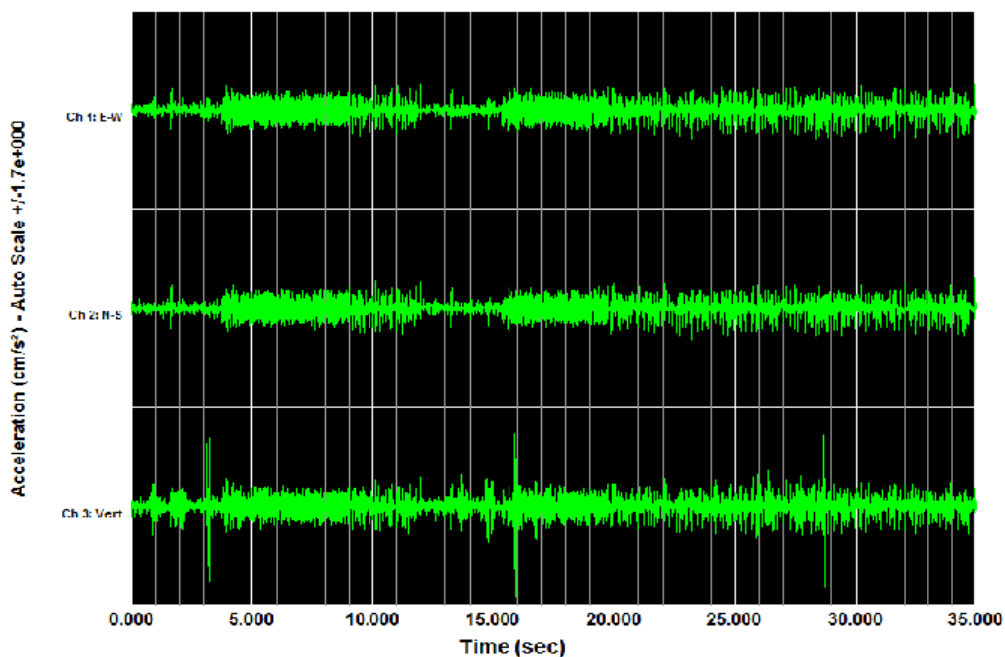
2.- Al corregir la línea base, los parámetros de los datos originales se ven afectados, por lo que se deben corregir usando la función ADV(2), que efectúa el filtrado por banda baja y banda alta. Los histogramas de velocidad y desplazamientos para cada uno de los canales Norte-Sur, Este-Oeste y Vertical, se obtienen de forma automática mediante métodos de integración usando los filtros necesarios para cada uno de ellos. Fig. 6.15 y 6.16.

3.- La función SPECTRA (V3) edita los parámetros que tienen que ver con los cálculos para calcular el espectro de respuesta y el espectro de Fourier. También se calcula la densidad del espectro de energía PSD y la transformada de Fourier para la serie de aceleración-tiempo. FFT. (Fig. 6.17).



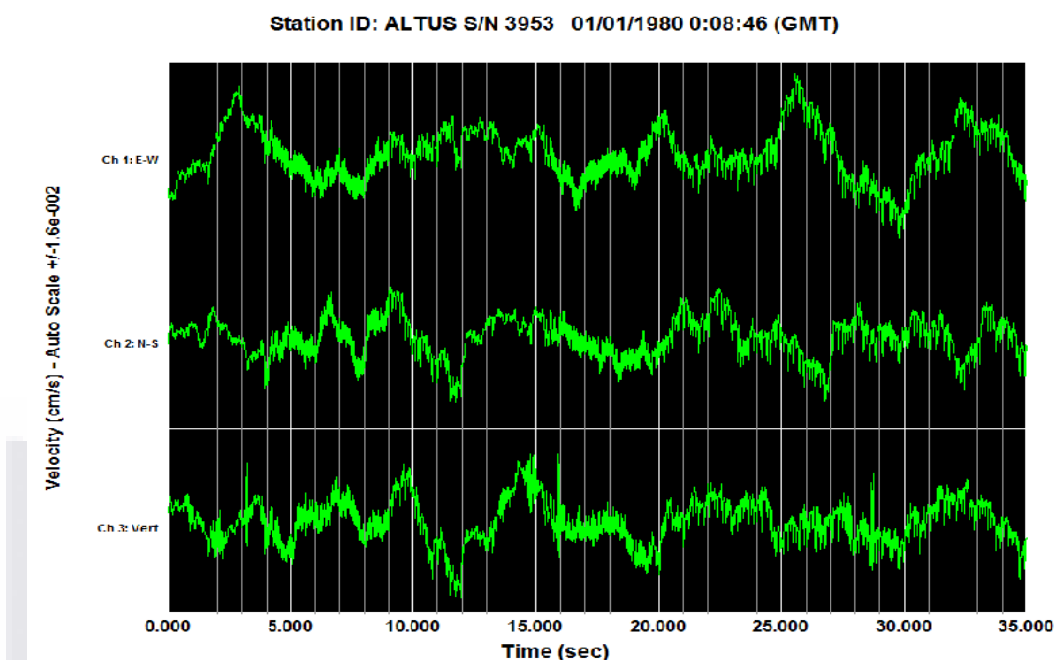
Pantalla mostrando la función ADV (V2) para uno de los canales.

Station ID: ALTUS S/N 3953 01/01/1980 0:08:46 (GMT)

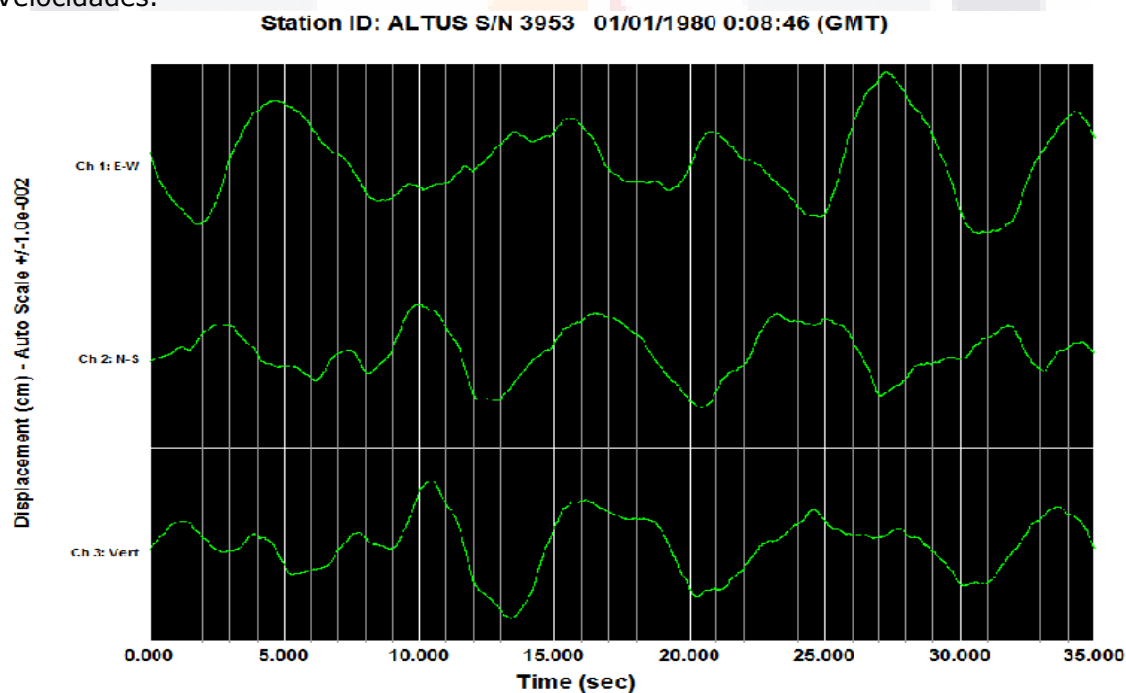


Pantalla mostrando la función ADV (V2) para uno de los canales. Se muestran aceleraciones.

Fig. 6.15



Pantalla mostrando la función ADV(V2) para uno de los canales. Se muestran Velocidades.



Pantalla mostrando la función ADV(V2) para uno de los canales. Se muestran los desplazamientos.

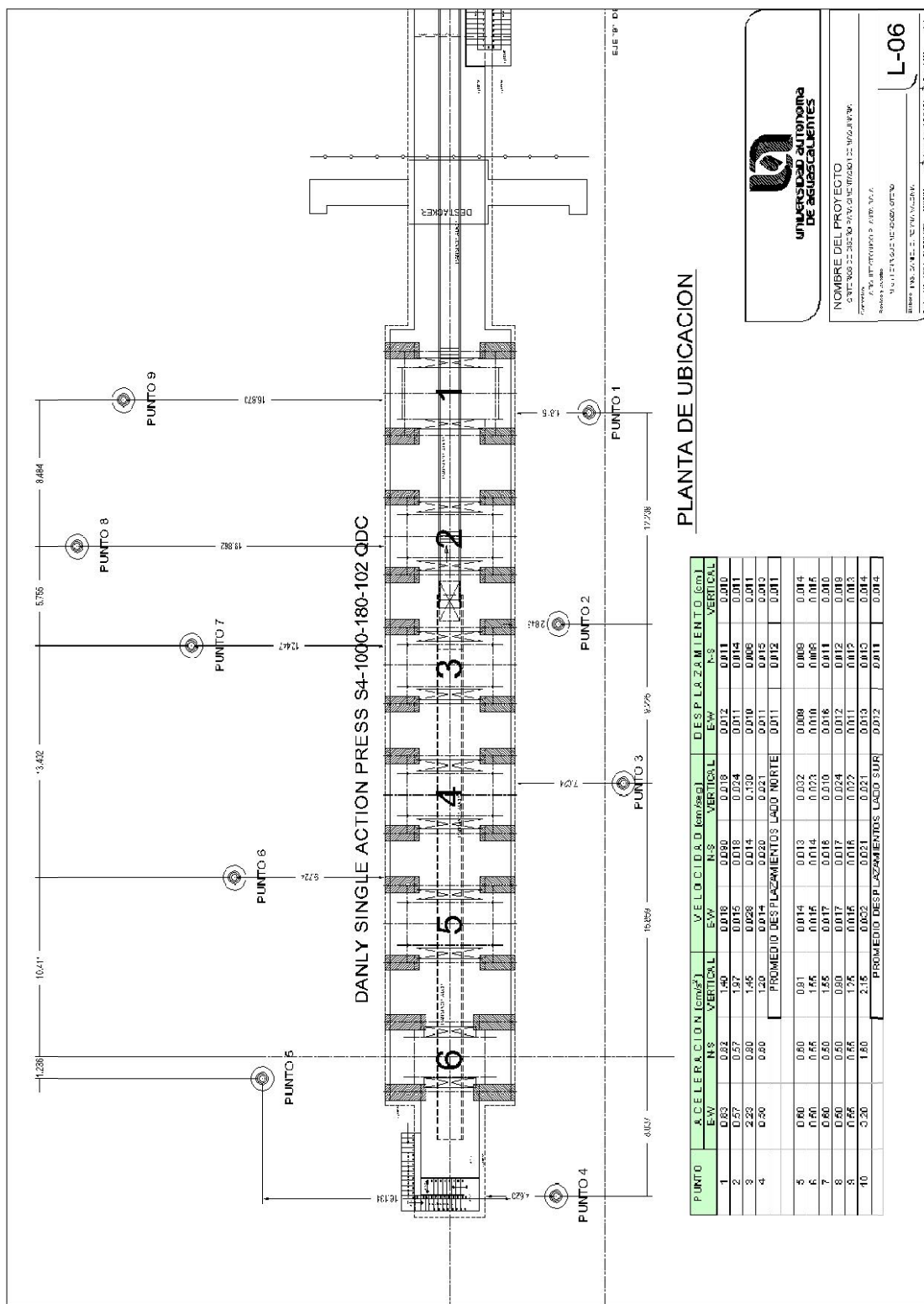
Fig. 6.16

De acuerdo al procedimiento antes mencionado, se realizó el análisis de todos los eventos registrados, y se obtuvo lo siguiente:

PUNTO	EVENTO	ACELERACIÓN (cm/s ²)			VELOCIDAD (cm/seg)			DESPLAZAMIENTO (cm)		
		E-W	N-S	VERTICAL	E-W	N-S	VERTICAL	E-W	N-S	VERTICAL
1	EG-001-EVT	0.520	0.520	1.000	0.013	0.014	..012	0.012	0.009	0.009
	EG002.EVT	0.480	0.490	1.220	0.011	0.014	0.014	0.008	0.008	0.008
	EG003.EVT	0.500	0.600	1.400	0.012	0.015	0.018	0.009	0.010	0.008
	EG004.EVT	0.490	0.510	1.125	0.008	0.013	0.015	0.004	0.004	0.007
	EG005.EVT	0.830	0.820	1.300	0.007	0.016	0.015	0.003	0.011	0.008
	EG006.EVT	0.500	0.500	1.200	0.018	0.015	0.018	0.003	0.007	0.007
	EG007.EVT	0.480	0.480	1.100	0.014	0.090	0.013	0.005	0.005	0.009
	EG008.EVT	0.505	0.520	1.100	0.011	0.009	0.017	0.007	0.004	0.005
	EG009.EVT	0.480	0.480	1.000	0.013	0.009	0.011	0.008	0.006	0.006
	EG0010.EVT	0.530	0.500	1.170	0.009	0.012	0.014	0.004	0.006	0.005
	EG0011.EVT	0.500	0.500	1.120	0.008	0.009	0.017	0.004	0.004	0.010
	EG0012.EVT	0.520	0.500	1.130	0.015	0.013	0.018	0.011	0.008	0.005
	EG0013.EVT	0.490	0.500	1.300	0.012	0.015	0.013	0.009	0.009	0.006
	EG0014.EVT	0.350	0.350	0.300	0.004	0.003	0.004	0.005	0.004	0.005
MAXIMO		0.830	0.820	1.400	0.018	0.090	0.018	0.012	0.011	0.010
2	EH-001-EVT	0.450	0.450	1.800	0.013	0.017	0.013	0.008	0.014	0.009
	EH002.EVT	0.430	0.430	1.900	0.014	0.011	0.023	0.009	0.008	0.011
	EH003.EVT	0.450	0.450	1.900	0.015	0.018	0.024	0.011	0.010	0.011
	EH004.EVT	0.430	0.430	1.900	0.012	0.014	0.021	0.008	0.011	0.008
	EH005.EVT	0.570	0.570	1.970	0.013	0.012	0.022	0.008	0.008	0.008
	EH006.EVT	0.500	0.420	1.900	0.010	0.012	0.016	0.005	0.008	0.006
MAXIMO		0.570	0.570	1.970	0.015	0.018	0.024	0.011	0.014	0.011
3	EI-005-EVT	0.390	0.350	0.230	0.003	0.004	0.003	0.001	0.001	0.001
	EI006.EVT	0.420	0.480	0.930	0.011	0.009	0.130	0.006	0.006	0.008
	EI007.EVT	0.470	0.500	1.050	0.009	0.009	0.011	0.006	0.006	0.008
	EI008.EVT	2.230	0.800	1.200	0.023	0.011	0.012	0.005	0.005	0.006
	EI009.EVT	2.200	0.800	1.450	0.028	0.014	0.014	0.008	0.006	0.008
	EI010.EVT	0.420	0.420	0.900	0.013	0.014	0.012	0.010	0.006	0.011
	EI011.EVT	0.480	0.500	1.200	0.013	0.014	0.013	0.010	0.009	0.009
	EI012.EVT	0.480	0.510	1.200	0.018	0.011	0.013	0.009	0.004	0.006
	EI013.EVT	0.500	0.500	1.100	0.017	0.011	0.012	0.011	0.006	0.054
	EI014.EVT	0.510	0.510	1.200	0.011	0.010	0.018	0.007	0.004	0.011
	EI015.EVT	0.550	0.510	1.200	0.011	0.008	0.019	0.004	0.005	0.011
MAXIMO		2.230	0.800	1.450	0.028	0.014	0.130	0.010	0.006	0.011
4	EJ-001-EVT	0.440	0.450	0.700	0.009	0.009	0.011	0.007	0.005	0.006
	EJ-002-EVT	0.480	0.480	0.720	0.014	0.009	0.011	0.007	0.006	0.009
	EJ-003-EVT	0.580	0.570	0.720	0.014	0.006	0.011	0.009	0.004	0.008
	EJ-004-EVT	0.510	0.510	1.100	0.013	0.013	0.015	0.006	0.011	0.011
	EJ-005-EVT	0.500	0.500	1.100	0.010	0.016	0.011	0.007	0.011	0.004
	EJ-006-EVT	0.400	0.420	1.050	0.010	0.020	0.011	0.009	0.015	0.005
	EJ-007-EVT	0.510	0.500	1.200	0.013	0.009	0.013	0.011	0.005	0.008
	EJ-008-EVT	0.520	0.520	1.200	0.012	0.016	0.015	0.011	0.013	0.007
	EJ-009-EVT	0.510	0.600	1.200	0.011	0.013	0.021	0.006	0.012	0.013
	EJ-010.EVT	0.520	0.520	1.200	0.011	0.012	0.020	0.005	0.007	0.012
MAXIMO		0.580	0.600	1.200	0.014	0.020	0.021	0.011	0.015	0.013
PROMEDIO DESPLAZAMIENTOS LADO NORTE								0.011	0.012	0.011

PUNTO	EVENTO	ACELERACION (cm/s ²)			VELOCIDAD (cm/seg)			DESPLAZAMIENTO (cm)		
		E-W	N-S	VERTICAL	E-W	N-S	VERTICAL	E-W	N-S	VERTICAL
5	EK-001-EVT	0.480	0.460	0.680	0.012	0.009	0.012	0.006	0.005	0.007
	EK002.EVT	0.460	0.490	0.840	0.011	0.011	0.011	0.005	0.007	0.005
	EK003.EVT	0.490	0.600	0.880	0.010	0.012	0.013	0.005	0.007	0.006
	EK004.EVT	0.600	0.500	0.880	0.014	0.012	0.032	0.005	0.006	0.013
	EK005.EVT	0.600	0.520	0.720	0.014	0.013	0.017	0.006	0.005	0.014
	EK006.EVT	0.520	0.530	0.910	0.014	0.013	0.013	0.007	0.006	0.008
	EK007.EVT	0.480	0.520	0.880	0.013	0.011	0.018	0.009	0.006	0.013
	EK008.EVT	0.480	0.480	0.800	0.011	0.012	0.012	0.007	0.009	0.006
MAXIMO		0.600	0.600	0.910	0.014	0.013	0.032	0.009	0.009	0.014
6	EL-001-EVT	0.400	0.500	1.400	0.011	0.010	0.011	0.006	0.006	0.004
	EL-002-EVT	0.500	0.550	1.550	0.015	0.012	0.014	0.009	0.006	0.008
	EL-003-EVT	0.500	0.520	1.400	0.014	0.009	0.023	0.006	0.008	0.015
	EL-004-EVT	0.500	0.550	1.200	0.008	0.014	0.018	0.004	0.006	0.005
	EL-005-EVT	0.500	0.450	1.200	0.008	0.013	0.014	0.005	0.007	0.004
	EL-006-EVT	0.500	0.450	1.350	0.010	0.013	0.018	0.007	0.006	0.011
	EL-007-EVT	0.450	0.450	1.400	0.010	0.011	0.020	0.005	0.007	0.011
	EL-008-EVT	0.450	0.410	1.500	0.013	0.012	0.014	0.010	0.007	0.008
	EL-009-EVT	0.500	0.500	1.550	0.013	0.011	0.014	0.010	0.004	0.010
	EL-010-EVT	0.500	0.500	1.400	0.014	0.011	0.017	0.008	0.006	0.012
MAXIMO		0.500	0.550	1.550	0.015	0.014	0.023	0.010	0.008	0.015
7	EM-001-EVT	0.450	0.400	1.500	0.011	0.010	0.014	0.007	0.008	0.009
	EM-002-EVT	0.460	0.460	0.560	0.017	0.009	0.016	0.016	0.004	0.010
	EM-003-EVT	0.460	0.460	0.580	0.014	0.011	0.011	0.008	0.005	0.005
	EM-004-EVT	0.600	0.500	1.500	0.013	0.016	0.013	0.009	0.011	0.009
	EM-005-EVT	0.500	0.500	1.550	0.007	0.015	0.013	0.005	0.008	0.010
	EM-006-EVT	0.450	0.450	1.550	0.010	0.011	0.018	0.007	0.006	0.006
MAXIMO		0.600	0.500	1.550	0.017	0.016	0.018	0.016	0.011	0.010
8	EP-001-EVT	0.440	0.400	0.900	0.016	0.010	0.012	0.012	0.005	0.007
	EP-002-EVT	0.400	0.480	0.580	0.017	0.014	0.016	0.009	0.012	0.010
	EP-003-EVT	0.500	0.500	0.690	0.010	0.009	0.016	0.006	0.005	0.006
	EP-004-EVT	0.400	0.420	0.540	0.014	0.011	0.017	0.009	0.006	0.008
	EP-005-EVT	0.460	0.420	0.780	0.016	0.010	0.024	0.008	0.007	0.019
	EP-006-EVT	0.460	0.400	0.660	0.013	0.017	0.015	0.009	0.010	0.008
	EP-007-EVT	0.460	0.460	0.710	0.016	0.011	0.018	0.008	0.005	0.010
MAXIMO		0.500	0.500	0.900	0.017	0.017	0.024	0.012	0.012	0.019
9	EN-001-EVT	0.500	0.450	1.050	0.015	0.013	0.014	0.007	0.009	0.007
	EN-002-EVT	0.550	0.530	1.050	0.015	0.013	0.016	0.006	0.007	0.008
	EN-003-EVT	0.550	0.550	1.150	0.014	0.014	0.016	0.011	0.011	0.007
	EN-004-EVT	0.500	0.550	0.550	0.011	0.016	0.012	0.005	0.012	0.005
	EN-005-EVT	0.450	0.450	1.250	0.015	0.013	0.018	0.011	0.008	0.013
	EN-006-EVT	0.500	0.500	1.250	0.014	0.014	0.022	0.007	0.008	0.011
	EN-007-EVT	0.500	0.550	1.100	0.013	0.015	0.018	0.007	0.008	0.009
MAXIMO		0.550	0.550	1.250	0.015	0.016	0.022	0.011	0.012	0.013
10	EQ-001-EVT	0.560	0.520	0.750	0.019	0.018	0.021	0.013	0.013	0.013
	EQ-002-EVT	0.900	1.600	0.700	0.020	0.021	0.017	0.007	0.007	0.011
	EQ-003-EVT	2.150	0.800	2.150	0.020	0.010	0.013	0.006	0.006	0.006
	EQ-004-EVT	0.460	0.540	0.440	0.016	0.010	0.017	0.009	0.006	0.010
	EQ-005-EVT	0.480	0.550	0.520	0.014	0.012	0.014	0.006	0.006	0.008
	EQ-006-EVT	3.200	0.500	0.700	0.032	0.016	0.014	0.006	0.009	0.010
	EQ-007-EVT	0.430	0.440	0.660	0.010	0.012	0.016	0.007	0.008	0.008
	EQ-008-EVT	0.520	0.560	0.660	0.012	0.013	0.017	0.006	0.007	0.014
	EQ-009-EVT	0.520	0.520	0.570	0.012	0.009	0.015	0.007	0.004	0.012
MAXIMO		3.200	1.600	2.150	0.032	0.021	0.021	0.013	0.013	0.014

PUNTO	EVENTO	ACELERACION (cm/s ²)			VELOCIDAD (cm/seg)			DESPLAZAMIENTO (cm)		
		E-W	N-S	VERTICAL	E-W	N-S	VERTICAL	E-W	N-S	VERTICAL
11	ER-001-EVT	0.530	0.530	0.540	0.012	0.019	0.026	0.008	0.015	0.014
	ER-002-EVT	5.500	1.500	12.300	0.055	0.023	0.100	0.009	0.013	0.010
	MAXIMO	5.500	1.500	12.300	0.055	0.023	0.100	0.009	0.015	0.014
12	EV-001-EVT	0.500	0.770	0.560	0.027	0.017	0.016	0.0135	0.014	0.012
	MAXIMO	0.500	0.770	0.560	0.027	0.017	0.000	0.000	0.014	0.012
13	ES-008-EVT	0.500	2.300	0.500	0.012	0.018	0.008	0.008	0.007	0.004
	MAXIMO	0.500	2.300	0.500	0.012	0.018	0.008	0.008	0.007	0.004
14	ES-009-EVT	0.550	0.920	0.450	0.016	0.013	0.012	0.012	0.009	0.007
	MAXIMO	0.550	0.920	0.450	0.016	0.013	0.012	0.012	0.009	0.007
15	ES-010-EVT	0.500	0.760	0.500	0.013	0.016	0.015	0.006	0.007	0.010
	MAXIMO	0.500	0.760	0.500	0.013	0.016	0.015	0.006	0.007	0.010
16	EV-001-EVT	0.500	0.760	0.520	0.026	0.017	0.016	0.014	0.014	0.012
	MAXIMO	0.500	0.760	0.520	0.026	0.017	0.016	0.014	0.014	0.012
17	ET-001-EVT	0.550	1.100	0.550	0.014	0.022	0.017	0.008	0.012	0.011
	MAXIMO	0.550	1.100	0.550	0.014	0.022	0.017	0.008	0.012	0.011
18	EU-001-EVT	4.000	0.600	0.600	0.046	0.018	0.018	0.013	0.009	0.013
	MAXIMO	4.000	0.600	0.600	0.046	0.018	0.018	0.013	0.009	0.013
PROMEDIO DESPLAZAMIENTOS LADO SUR								0.009	0.011	0.010



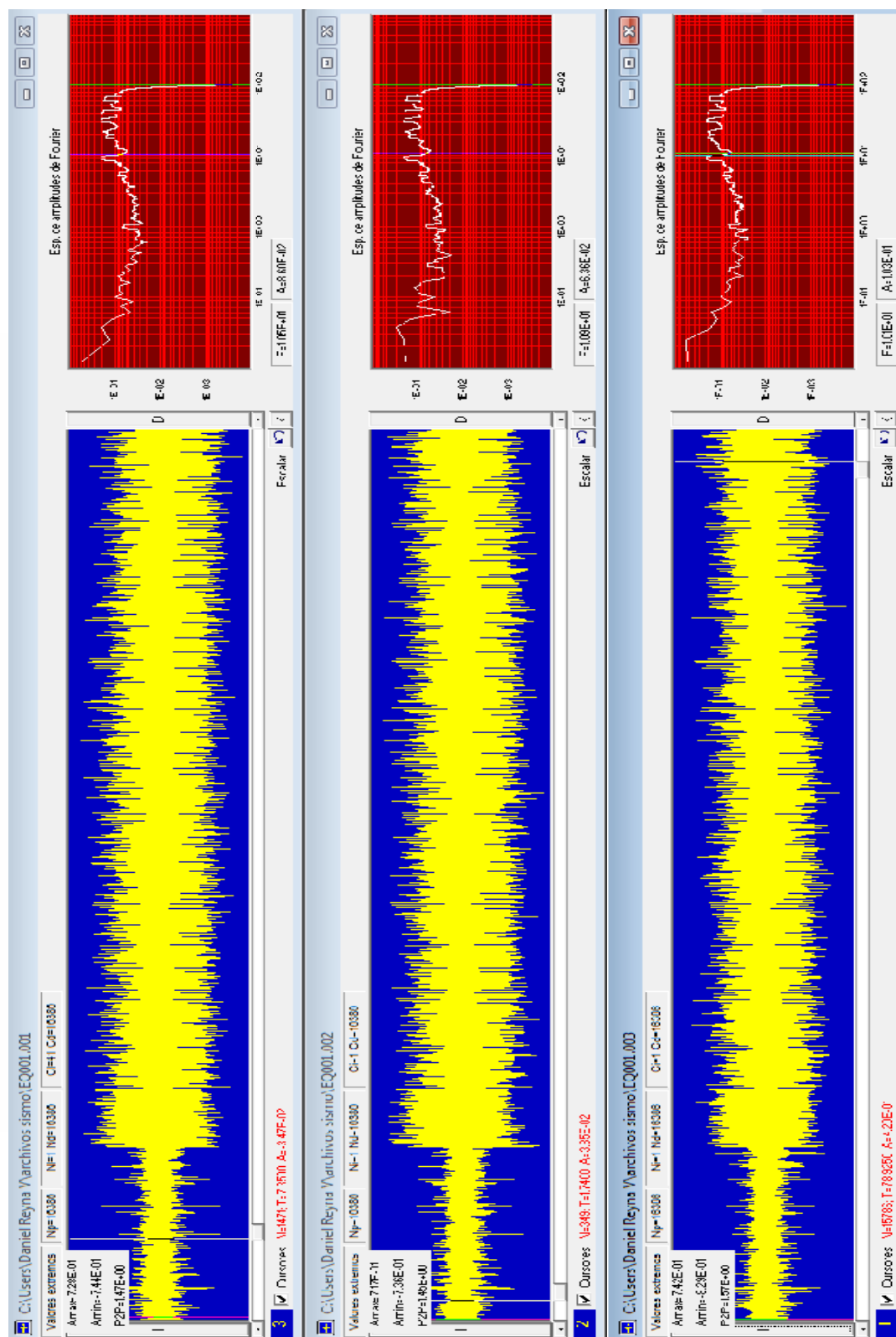


Figura 6.17

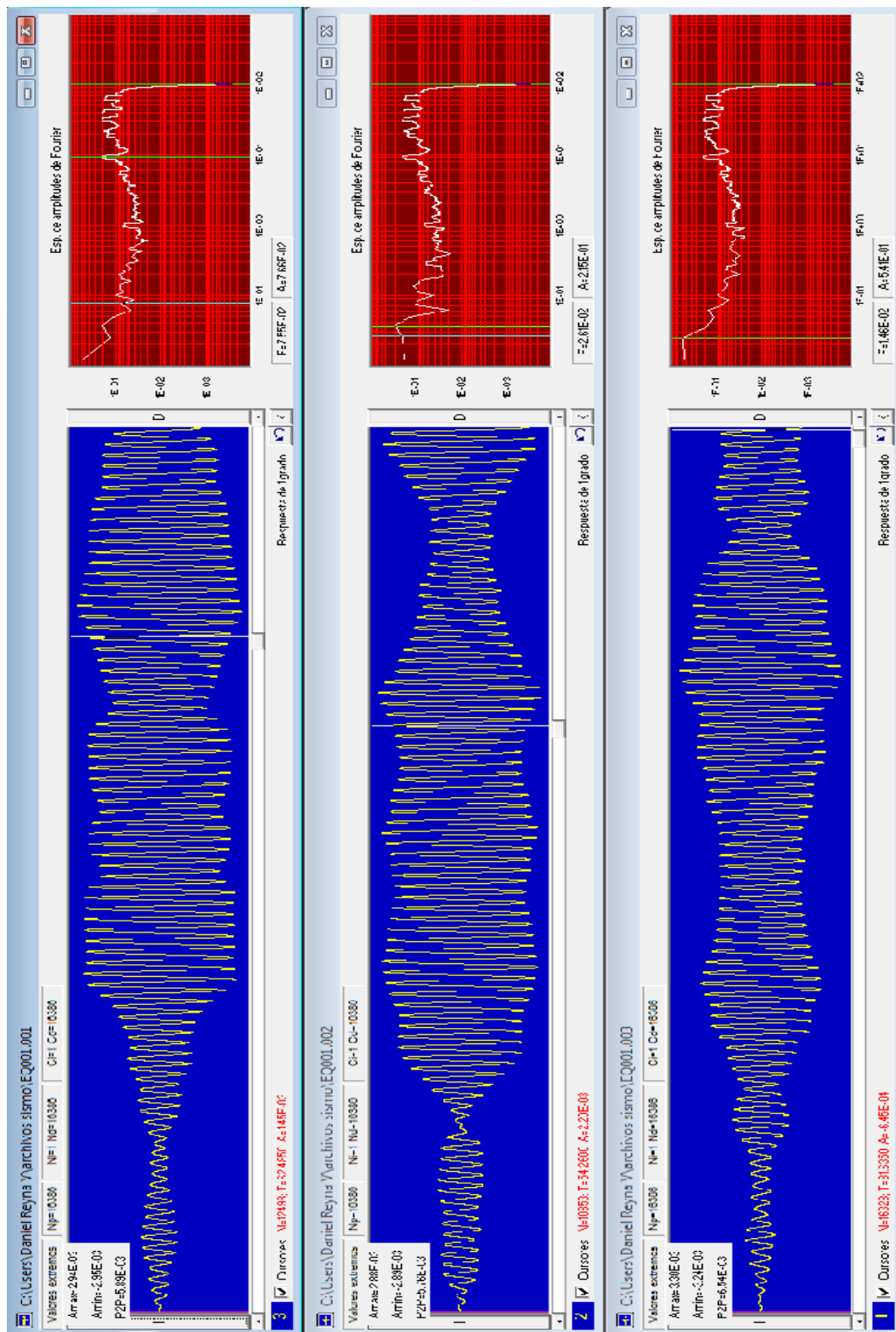


Figura 6.17

Conclusiones:

De acuerdo a los resultados de las mediciones de amplitudes de vibración en diferentes puntos de las prensas Danly Syngle Action Press, se transmiten en la cercanía de las prensas de manera similar en rangos que tienen una amplitud promedio de 1.5 mm. En las direcciones E-W, N-S y Vertical, ya que al estar la cimentación embebida en el terreno las ondas se transmiten hacia abajo y hacia los lados, Fig. 6.18

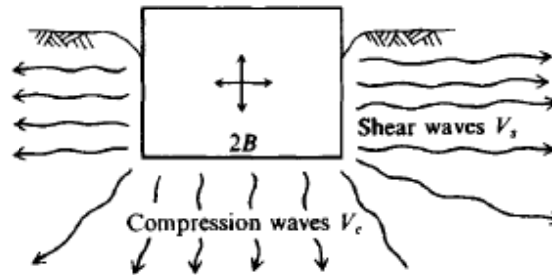


Fig. 6.18 Trasmisión de ondas

Asimismo, dado que la producción es en línea, si el proceso se inicia con la prensa marcada con el número 1 y continua con las siguientes 5, repitiéndose el ciclo a los 12.80 seg., entonces la propagación de las ondas en la cercanía de las prensas es registrada al momento de que se produce el impacto en la prensa más cercana y mientras se alejaron las mediciones, el incremento de desplazamientos en los tres ejes, fue creciendo dado que se traslapan las ondas provocadas por la seriación de la operación de las prensas.

Por otro lado, es importante mencionar que la medición que se hizo sobre la cimentación del equipo Pro-Single registra niveles de desplazamientos similares a los obtenidos fuera de la misma, por lo que el método de aislación de vibración que se empleó para construir la cimentación del equipo, solo modificó en los porcentajes siguientes la amplitud de los desplazamientos:

Este-Oeste	Se incremento el desplazamiento en un 8%
Norte-Sur	Se incremento el desplazamiento en un 8%
Vertical	Se redujo en un 35 %.

Por último cabe hacer mención que se desconocen los niveles máximos de vibración permisible del equipo denominado Pro-Single, por lo que no se puede saber con cuanto se rebasa ó en qué estado esta con respecto a los niveles aceptables de funcionamiento.

Es importante mencionar que será necesario realizar un mayor número de opciones de modelación con el programa SAP para tratar de ajustar los resultados obtenidos contra lo medido en campo.

Referencias.

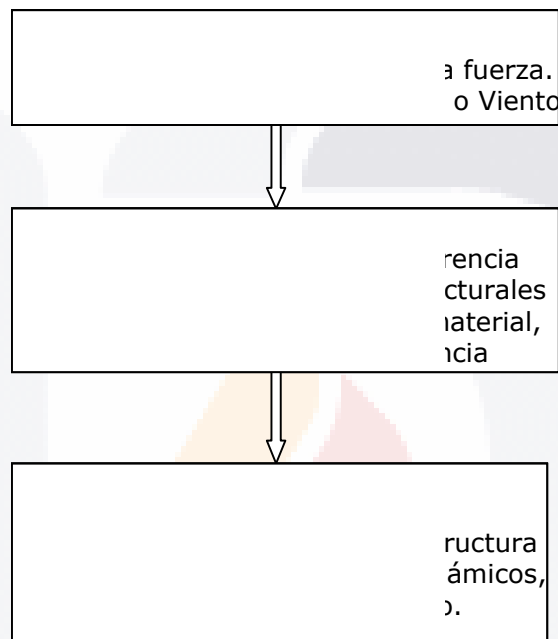
- 1.- Código Municipal de Aguascalientes. Criterios de diseño y estados límite. 2007
- 2.- **Tschebotarioff**, G.F. (1953): Performance records of engine foundations ASTM Special Technical publication, No.156.
- 3.- **Pauw**, A. (1953) A dynamic analogy for foundation-soil systems, ASTM Special Technical publication, No. 156.
- 4.- **Balakrishna** Rao, H.A. and Nagaraj, C.N. (1950): A new method for predicting The natural frequency of soil-foundation systems, Structural Engineer.
- 5.- **Barkan**, D.D. (1962): Dynamics of bases and foundations, Mc. Graw Hill.
- 6.- **ACI** 351.3R-04 Foundations for Dynamic Equipement.
- 7.- **Nieto**, J.A. y Reséndiz, D: Interacción dinámica entre subsuelo y estructura; una Revisión del problema. Boletín Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, vol. III No. 2 (sept. 1965).
- 8.- **Braja** M. Das: Principios de Ingeniería de Cimentaciones. Thomson 5ª. Ed.
- 9.- **Díaz** Rodríguez Abraham: Dinámica de suelos. Limusa-UNAM 2005
- 10.- **Zeevart** Leonardo: Interacción suelo-estructura de cimentación. Limusa. 1980
- 11.- **Srinivasulu** P. Vaidyanathan C.V: Handbook of Machine Foundations. Tata Mc. Graw-Hill
- 12.- **Alpan**: Machine foundations and soil resonance, Geotechnique, Vol. 11. 1961
- 13.- **Bowles** Joseph E.: Foundation analysis and design. Third Edition. International Student Edition
- 14.- **Surech** Arya Michael O'Neill, Pincus George: Design of structures and foundations for vibrating machines. Gulp Publishing company. 1979
- 15.- **Nieto**. J:A.; Resendiz y Rosenblueth, E. - "Interacción dinámica entre estructura y suelo".- Investigación para la Comisión de Electricidad.- (dic 1964).
- 16.- **Elorduy**, J. - "Sobre el comportamiento dinámico de bases rígidas sujetas a perturbaciones armónicas".- Tesis doctoral.- División de Estudios Superiores, Facultad de Ingeniería, UNANM.- (jun. 1967).
- 17.- **Major**, A.. - "Vibration Analysis and Design of Foundations for Machines Turbines".- Collet 's Holding Limited.- Londres (1962).
- 18.- **Nieto**. J:A. - "Estudios encaminados a establecer criterios de diseño para cimentaciones de compresoras".- Informe presentado a Petróleos Mexicanos.- (jul. 1966).

- 19.- **Soliman**, J. L. .- "Criteria for permissible levels of industrial vibrations with regard to their effect on human beings and buildings". RILEM Symposium, Budapest.- (1963).
- 20.- **Richart**, F:E., Jr. .- "Foundation Vibrations" .- Transactions ACE.- (1962).
- 21.- **Tschelbotarioff**, G:P: .- "Performance Record of Engine Foundations. .- Symposium on Dynamic Testing of Solis.- (1963).
- 22.- **Elorduy**, J:, Elorduy R. y nieto J: A. .- "Comportamiento de cimentaciones sujetas a cargas dinámicas" .- Simposio Panamericano de Estructuras.- Caracas; Venezuela .- (jul. 1967).
- 23.- **Álvarez**, R.- "Modelo matemático para diseño de cimentaciones sujetas a vibraciones de cabeceo" .- Universidad Iberoamericana.- (1967).
- 24.- **Newmark**, N:M. .- "Influence Charts for computation of vertical displacements in elastic foundations". .- Univ. de Illinois. .- (nov. 1962).
- 25.- **Balakumar** Balachandran, Edward B. Magrab.- "Vibraciones" Ed. Thomson
- 26.- **Yévenes**, U Fernando.- "Fundaciones de equipos vibratorios". P.U.C.
- 27.- **Díaz** Rodriguez Abraham.- "Dinámica de suelos" Limusa

ANEXO I

Causas y efectos de vibración estructural.

Existen 2 factores que controlan la amplitud y la frecuencia de vibración en una estructura: La excitación aplicada y la respuesta de la estructura a esa excitación; cambiando la excitación o las características dinámicas de la estructura, se modificará la respuesta. Estas fuerzas excitadoras y movimientos, pueden ser periódicas o armónicas en el tiempo, debidas a un golpe, o a cargas impulsivas.



La función dinámica de transferencia (DFT), llega a ser muy grande y complicada, particularmente si se consideran los efectos de amortiguamiento y la no linealidad.

Métodos de análisis de vibración estructural.

Al analizar una estructura para predecir la naturaleza de las frecuencias y su respuesta ante la fuerza excitadora, deben seguirse los siguientes pasos:

Etapas 1: Idear un modelo matemático o físico de la estructura que se analizará.

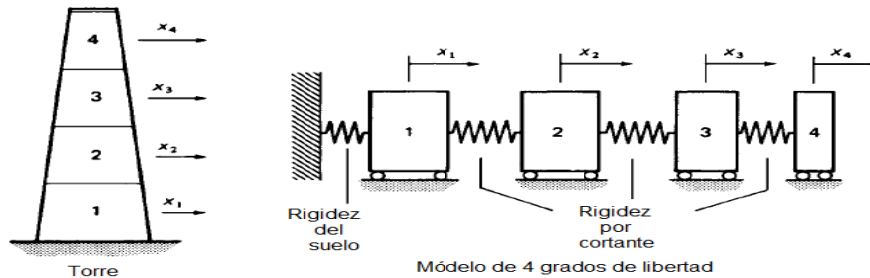
Etapas 2: Del modelo, plantear las ecuaciones del movimiento.

Etapas 3: Evaluación de la respuesta de la estructura ante una excitación específica Relevante.

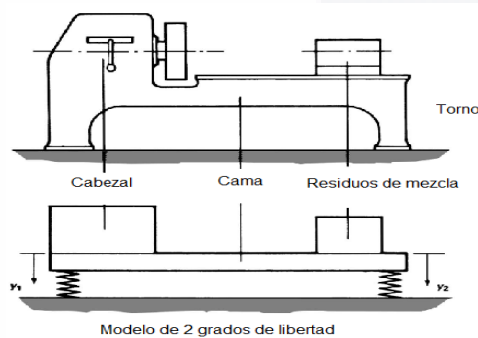
Generalmente se emplea un modelo matemático simple para analizar y de los resultados de este se obtiene la información para decidir cuál será la solución más económica. El modelo matemático representará las características dinámicas de la estructura real.

Todas las estructuras poseen un grado infinito de grados de libertad que serán necesarios para especificar la estructura en cualquier instante del tiempo, aunque normalmente se acotan para que la respuesta este ligada a los parámetros buscados, ejemplo de ellos son los siguientes:

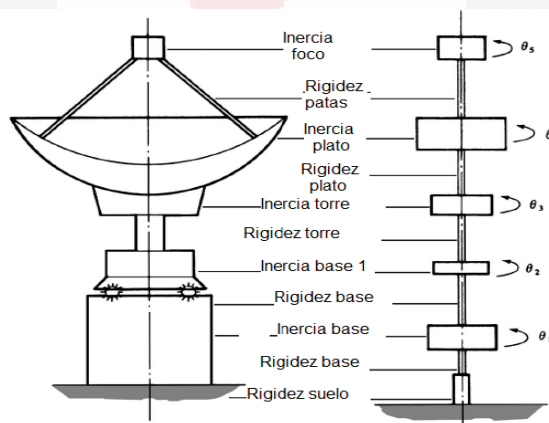
a).- Análisis de la vibración torsional de una estructura de una torre.



b).- Análisis de la vibración de un torno



Los parámetros del modelo se supondrán para dar una respuesta lineal, considerándolos como constantes para simplificar el análisis, por ejemplo las masas distribuidas se consideran actuando en un punto.



Diversos métodos son usados para obtener las ecuaciones del movimiento a partir del modelo matemático, de donde se obtendrán: La frecuencia, los modos de vibración, la respuesta general y la estabilidad del modelo. De todo ello se pueden obtener los esfuerzos dinámicos que se inducirán al terreno de soporte.

ANEXO II

La transformada de Fourier

Básicamente la Transformada de Fourier se encarga de transformar una señal del dominio del tiempo, al dominio de la frecuencia, de donde se puede realizar su antitransformada y volver al dominio temporal.

Una señal es periódica si para algún valor positivo T , diferente de cero, se verifica que:

$$x(t) = x(t + T) \quad \text{para toda } t.$$

Para que una señal periódica pueda representarse por una serie de Fourier, debe respetar las condiciones de Dirichlet:

- Que tenga un número finito de discontinuidades en el periodo T , en caso de ser discontinua.
- El valor medio en el periodo T , sea finito.
- Que tenga un número finito de máximos positivos y negativos.

Si se satisfacen estas condiciones, existe la serie de Fourier y puede escribirse en la forma trigonométrica como:

$$X(t) = a_0 + 2(a_1 \cos \omega t + a_2 \cos 2\omega t + a_3 \cos 3\omega t + \dots + b_1 \sin \omega t + b_2 \sin 2\omega t + \dots)$$

Es decir:

$$x(t) = a_0 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos(k\omega t) + b_k \sin(k\omega t)$$

Los coeficientes a_k y b_k , se obtienen mediante el siguiente cálculo integral.

$$a_k = \frac{1}{T} \int_T x(t) \cos(k\omega t) \cdot dt \quad b_k = \frac{1}{T} \int_T x(t) \sin(k\omega t) \cdot dt$$

El módulo de la transformada $|F(u)| = (R(a_k)^2 + I(b_k)^2)^{1/2}$ recibe el nombre de espectro de Fourier.

ANEXO III

Terminología de Vibraciones

El estudio de las vibraciones está relacionado con el comportamiento oscilatorio de los cuerpos, teniendo en cuenta que la mayoría de las máquinas y estructuras experimentan vibraciones en mayor o menor grado, por lo cual éstas deberán tenerse en cuenta al efectuar el diseño correspondiente de la cimentación.

Según la norma ISO 2041 en relación con la terminología de vibraciones, se establece que:

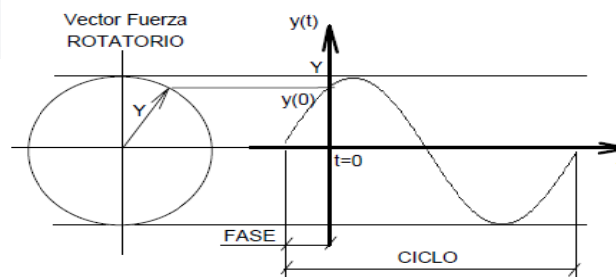
Vibración: Es toda variación con el tiempo, de una magnitud que describe el movimiento o la posición de un sistema mecánico, cuando esta magnitud es alternativamente mayor o menor que cierto valor promedio o de referencia.

De igual forma, la propia ISO 2041 establece que:

Vibración lineal: Es una vibración en la cual la trayectoria vibratoria de un punto tiene lugar según una línea recta.

El movimiento físico de una maquina-cimentación se interpreta como una vibración cuyas frecuencias y amplitudes tienen que ser cuantificadas para poder identificar la naturaleza de la vibración, que puede ser armónica, periódica o aleatoria.

Vibración Armónica. Constituye la forma más simple de oscilación. Caracterizada por una senoide, puede ser generada en sistemas lineales debidos a la presencia de un problema de desbalanceo.



Vibración armónica.

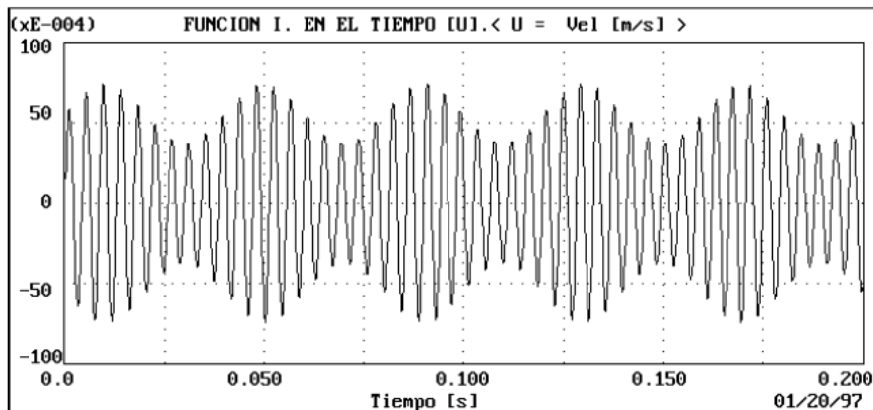
Este movimiento puede ser estudiado a través de un vector rotatorio con velocidad angular constante ω a partir del cual se define la frecuencia de oscilación f expresada en Hertz. Todo esto conduce a la modelación matemática de este fenómeno según:

$$y = Y \sen(\omega t + \varphi) = Y \sen(2\pi f t + \varphi) \quad ; \quad \omega = \frac{2\pi}{T} \quad ; \quad f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{T}$$

Siendo φ la fase de vibración.

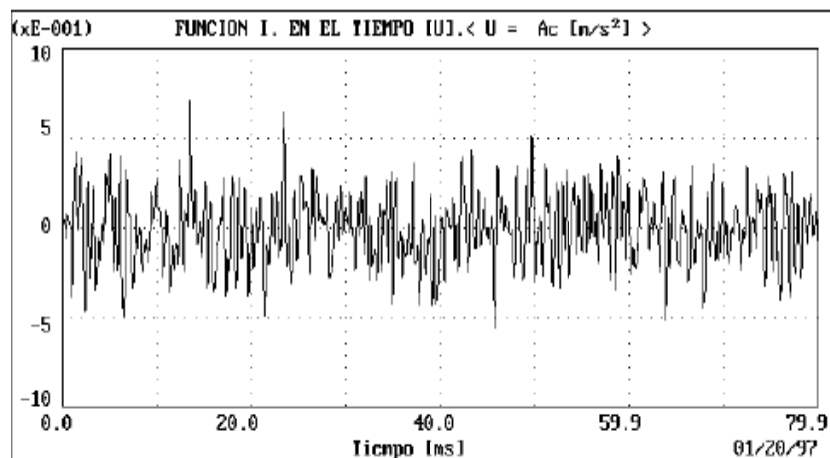
Frecuencia. Es el recíproco del periodo fundamental (tiempo de repetición de un fenómeno periódico). Se expresa en Hertz (Hz), lo cual corresponde a un ciclo por segundo.

Vibración periódica. Es un movimiento que se repite periódicamente.



Vibración periódica

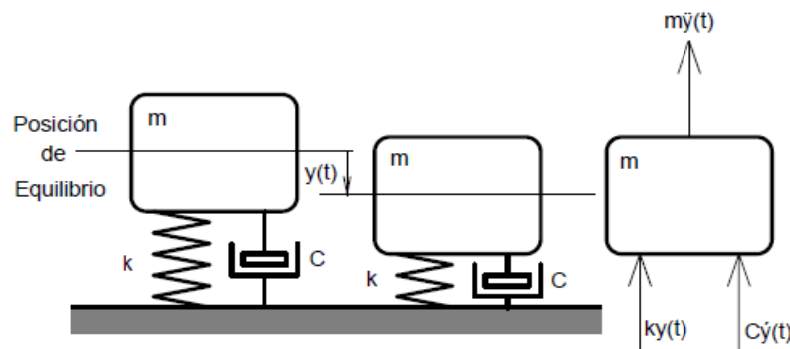
Vibración aleatoria. Ocurre en forma errática y tiene contenidos de frecuencias en toda la banda de frecuencias analizada, el espectro estará constituido por "infinitas" vibraciones armónicas, cada una caracterizada por amplitud, frecuencia y fase.



Vibración aleatoria.

Sistema máquina-soportes-cimentación. El sistema puede ser descrito a través de un sistema masa-resorte-amortiguador. Siendo la constante elástica k la magnitud de fuerza necesaria para deformar la unidad de longitud, se le denomina comúnmente rigidez, se expresa en unidades (fuerza/longitud).

Realmente, en la práctica, durante el fenómeno vibratorio, se disipa energía, lo que implica que la amplitud del movimiento no se mantenga constante en el transcurso del tiempo posterior a un "impulso" inicial.



Sistema máquina - soportes (masa - resorte - amortiguador).

A esta fuerza se le conoce como amortiguación, la cual es proporcional a la velocidad del movimiento en una magnitud C , denominada coeficiente de amortiguamiento y que es expresado en (fuerza-tiempo/longitud). Tal sistema máquina-soportes simplificado a un sistema masa-resorte-amortiguador, tendrá un comportamiento dinámico que estará caracterizado por su *frecuencia natural* o *frecuencia de las vibraciones propias no amortiguadas*, que estará descrita por las siguientes expresiones:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ en [1/s]} ; f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ en [Hz]} ; f_n = \frac{60}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ en [c.p.m.]}$$

ω_n como *FRECUENCIA ANGULAR NATURAL*

f_n como *FRECUENCIA NATURAL*.

Adicionalmente, existen otros dos parámetros en la caracterización dinámica del sistema masa-resorte. Si se admite que las fuerzas disipadoras de energía son proporcionales a la velocidad de las vibraciones del sistema, estos parámetros se definirán como:

El Coeficiente de Amortiguamiento Crítico $C_c = 2\sqrt{km}$

La Razón de Amortiguamiento $\zeta = \frac{C}{C_c}$

El coeficiente de amortiguamiento crítico C_c es una propiedad del sistema y no depende del amortiguamiento del mismo, mientras que la razón de amortiguamiento ξ se define como el cociente de amortiguamiento y el coeficiente de amortiguamiento crítico.

De igual forma, es sumamente importante destacar que cuando se considera en el análisis el posible amortiguamiento de los soportes de la máquina, entonces la frecuencia característica de la vibración en ausencia de fuerzas que restauren las pérdidas energéticas será la denominada *frecuencia de las vibraciones amortiguadas*

$$f_d = f_n \sqrt{1 - \zeta^2}$$

Sistema maquina-soporte ante la acción de una fuerza de carácter armónico.
Durante la operación de las maquinas se presentan fuerzas excitadoras que suministran la energía necesaria para mantener las vibraciones aun cuando exista amortiguamiento. Estas fuerzas pueden ser consideradas de carácter armónico, o sea:

$$F(t) = F \text{ sen}(2\pi f t)$$

Resonancia. Tiene lugar cuando se sintoniza alguna de las frecuencias de la excitación con alguna frecuencia natural, en estos casos, las vibraciones son amplificadas en una banda de frecuencias cercana a a ambos lados de la frecuencia natural. La resonancia tendrá lugar si la frecuencia de la fuerza excitadora está contenida dentro de la denominada *Banda de potencia media*. Por otro lado, lógicamente esta *frecuencia de resonancia* tendrá que estar relacionada con la frecuencia natural en dependencia del amortiguamiento presente, todo lo cual se expresa según:

$$f_r = f_n \sqrt{1 - 2\zeta^2}$$

