CAPITULO 1

INTRODUCCION

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

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. Los dos parámetros más importantes que deben ser determinados, en cualquier diseño dinámico de una cimentación son: la frecuencia natural y la amplitud de vibración del sistema maquinaria-cimentación-suelo, en condiciones normales de operación.

El costo inicial de la construcción de una cimentación para maquinaria es generalmente una pequeña fracción del costo de la misma máquina, de los accesorios y de la instalación. Sin embargo, la falla de una 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 debe resolver tres principales problemas:

a) Que los movimientos de la maquinaria y la cimentación no sean excesivos, ya que originarían fallas y desperfectos en la operación propia del equipo.
b) Que los asentamientos debidos a los efectos dinámicos estén dentro de los límites permisibles.
c) Que se disminuyan o, en su caso, se eliminen las vibraciones transmitidas a través del suelo, que pudieran afectar a personas, edificios u otra maquinaria.

Con base en lo anterior, la práctica común en el diseño y construcción de cimentaciones para maquinaria fue la de proporcionar grandes masas de concreto para controlar las amplitudes de vibración. Aunque esto resultó satisfactorio durante algún tiempo, actualmente se buscan las soluciones más eficientes y económicas. Esto, debido a que los espacios para la colocación de equipos en las industrias son cada vez más escasos y pequeños; lo que representa un factor importante en el dimensionamiento de la cimentación, por lo que no resulta adecuado controlar las amplitudes de vibración mediante un gran bloque de concreto, siendo entonces necesaria la utilización de otros medios más económicos y eficientes, que aseguren el control de las

vibraciones. Uno de esos medios puede ser la colocación de aisladores de vibración, teniendo en mente que si la maquinaria es atornillada rígidamente a su cimentación, el movimiento vibratorio en sí mismo puede ser reducido, pero la vibración transmitida a la cimentación puede ser mayor. Esto produciría efectos perjudiciales aún a una distancia considerable del origen de la vibración. De otra manera, si se coloca un soporte flexible bajo la maquinaria o en la cimentación la vibración transmitida será considerablemente reducida, pero esto puede causar un movimiento significativo en la maquinaria durante su operación normal o durante el encendido y el apagado del equipo; por tanto, es necesario lograr un equilibrio entre estos dos requerimientos.

Es así como se ha extendido el uso de los sistemas de aisladores de vibración, con la idea fundamental de reducir las amplitudes y tener menores masas de concreto en la cimentación. Esto origina algunas variantes en la conceptualización de los modelos de análisis, los cuales son diferentes a los convencionales ya que se agregan los parámetros adicionales del aislador.

De esta manera resulta necesario solucionar analíticamente los modelos matemáticos que consideren el aislamiento, para así tener un precedente que permita evaluar en forma conveniente la eficiencia de esta alternativa, en la solución de cimentaciones para maquinaria.

1.1 Alcance del Estudio

El presente estudio pretende solucionar analíticamente los modelos discretos de sistemas bajo efectos dinámicos, según se establece en el capítulo 7. No se presentan datos experimentales, ni comparaciones entre los resultados teóricos y los valores reales, medidos en cimentaciones existentes; ya que esto no se encuentra dentro de los objetivos del presente trabajo; sin embargo, resultaría conveniente hacer estas comparaciones en un trabajo posterior, con la finalidad de encontrar un patrón de comportamiento entre lo real y lo teórico. En lo referente a los modelos matemáticos, se consideraron únicamente las vibraciones verticales, las cuales son independientes de los demás modos de vibrar; así también, se consideraron las vibraciones horizontales y por cabeceo, las cuales son acopladas, y su solución es similar en las dos direcciones en que actúan. No se determinó la respuesta debida a las vibraciones por torsión, la cual también es independiente, aunque sí se aportan las ecuaciones generales para su solución.

Otros aspectos que no se consideraron, en los modelos matemáticos, son: el efecto del encajonamiento, la proximidad de un estrato muy rígido, y las cimentaciones desplantadas sobre pilotes; ya que cada uno de estos casos representa un estudio independiente por sí solo. De esta manera, es posible plantear los siguientes objetivos, general y particular.

1.2 Objetivos

Objetivo General.- Determinar y cuantificar el efecto del aislamiento de vibración, en cimentaciones sujetas a efectos dinámicos.

Objetivo Particular.-Evaluar analíticamente los modelos dinámicos de cimentaciones para maquinaria, con sistemas de aislamiento y sin él, sujetas a vibraciones verticales, horizontales y por cabeceo.

Objetivo Personal.- Que el lector tenga la suficiente información, en una sola fuente, para resolver problemas prácticos referentes a vibraciones en cimentaciones para maquinaria.

CAPITULO 2

LOS TIPOS DE MAQUINARIA Y SUS CIMENTACIONES

Existen muchos tipos de máquinas y cada uno puede requerir un cierto tipo de cimentación. Se describen a continuación los diferentes tipos de maquinaria y sus características especiales, así como también las cimentaciones comúnmente utilizadas.

Los diferentes tipos de maquinarias son excitados normalmente por cargas desbalanceadas; en general, pueden clasificarse dentro de las siguientes categorías:

a) Máquinas Reciprocantes

b) Máquinas Rotatorias

c) Máquinas de Impacto

d) Equipos Especiales

2.1 Máquinas Reciprocantes

Las máquinas reciprocantes son probablemente las máquinas más antiguamente usadas y es un ejemplo clásico el 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, máquinas de combustión interna (por ejemplo de gasolina, diesel y petróleo), bombas y compresores.

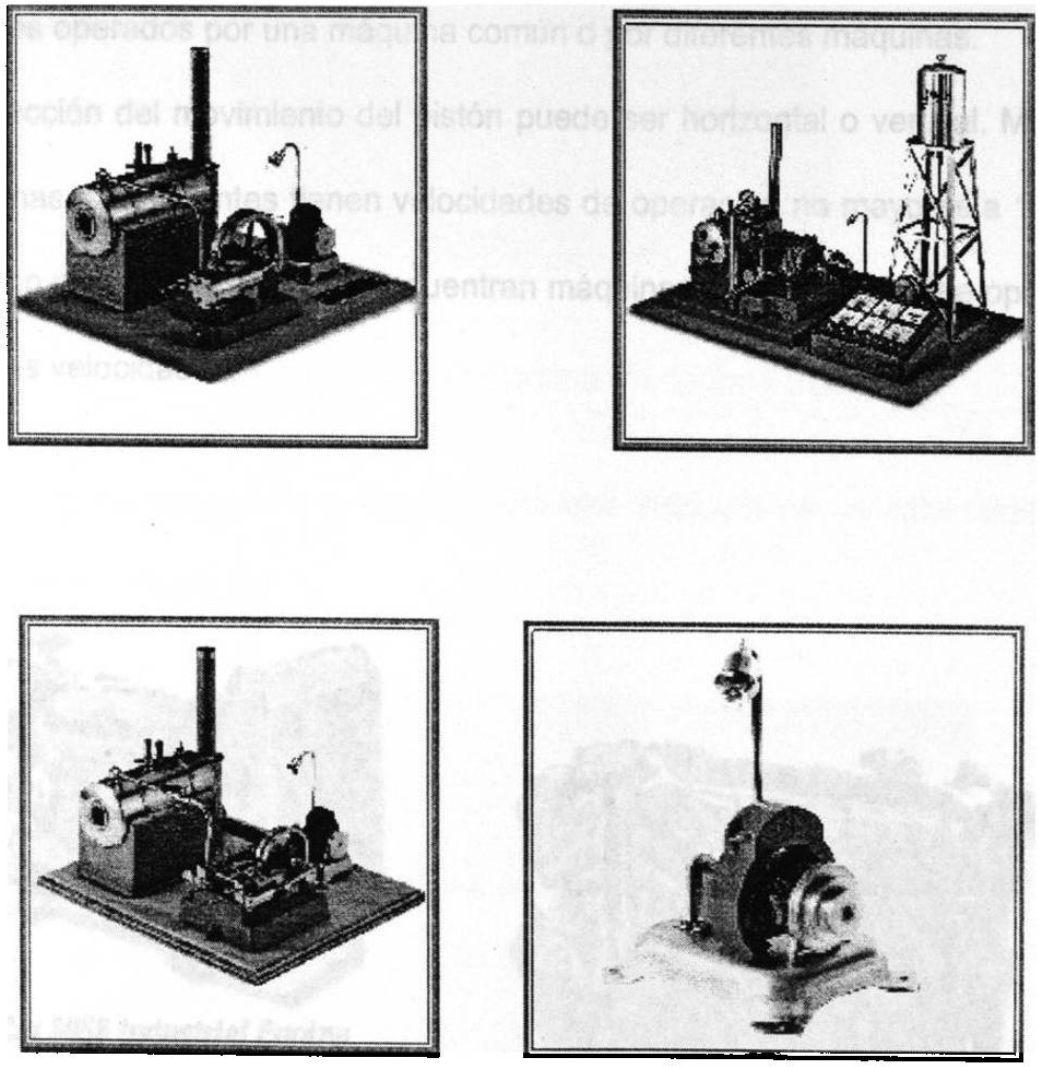


Fig. 2.1 Máquinas de Vapor

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

Las bombas y los compresores pertenecen a la categoría de máquinas reciprocantes, que pueden ser del tipo 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. Muchas máquinas reciprocantes tienen velocidades de operación no mayores a 1200 – 1500 r.p.m. En ocasiones, se encuentran máquinas reciprocantes que operan a grandes velocidades.

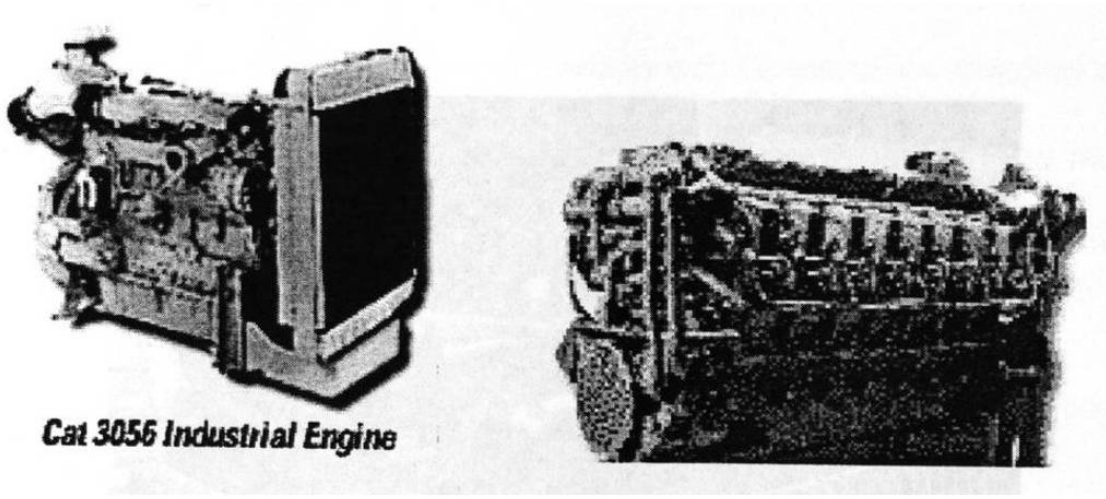


Fig. 2.2 Máquinas de Combustión Interna

La cimentación para las máquinas reciprocantes usualmente 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.

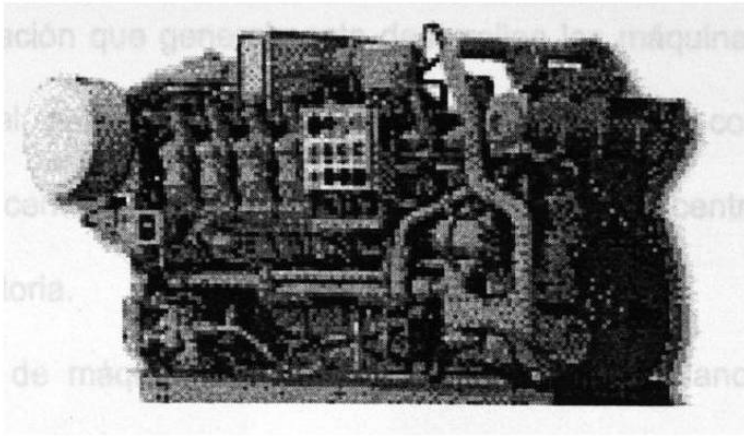


Fig. 2.3 Máquinas de Combustión Interna (tipo V)

Un simple mecanismo de manivela para una máquina de un solo cilindro se muestra en la figura 2.4.

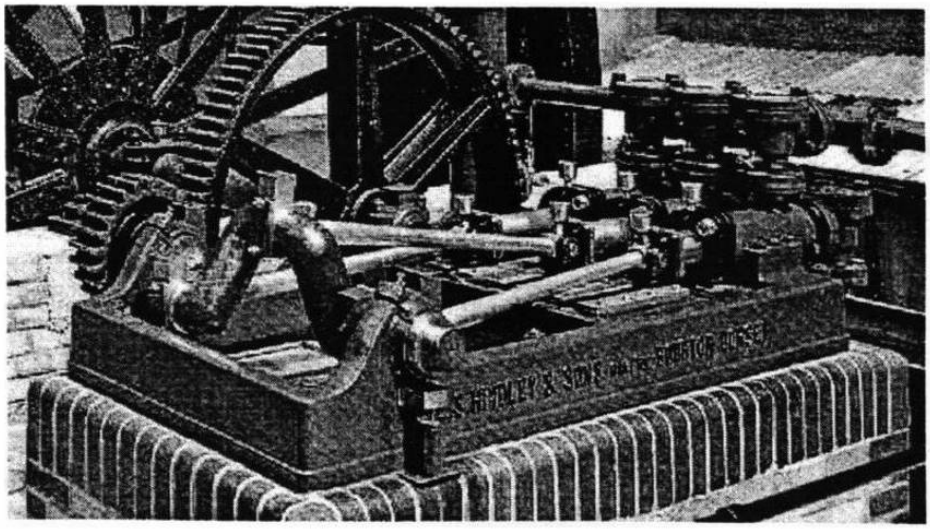


Fig. 2.4 Mecanismo de Manivela

2.2 Máquinas Rotatorias

El tipo de excitación que generalmente desarrollan las máquinas rotatorias es del tipo senoidal; 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 del todo el desbalanceo, ya que éste se ve afectado por los procedimientos del diseño, de la fabricación, de la instalación y del 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.

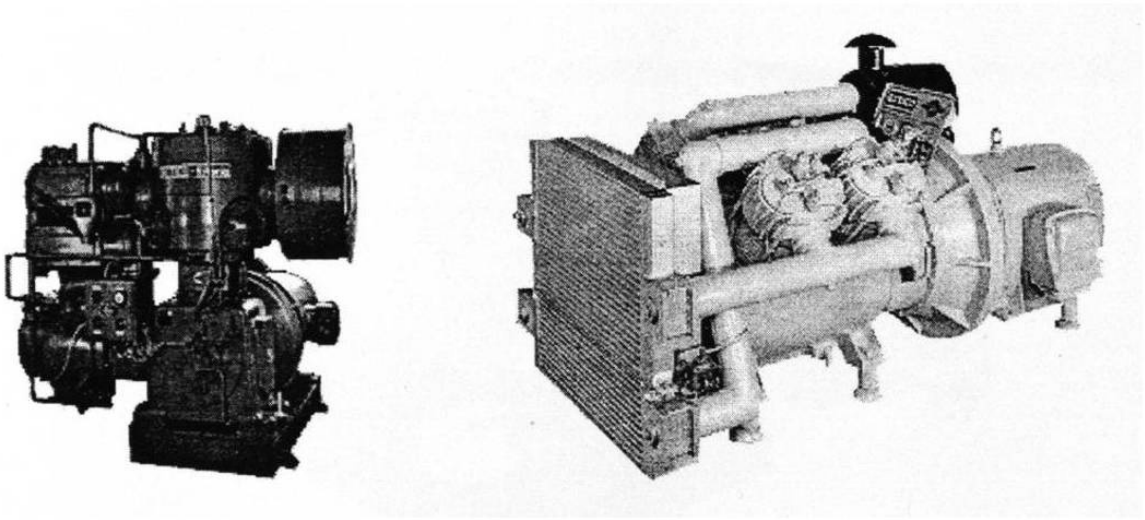
En términos prácticos, las máquinas rotatorias se clasifican de la siguiente manera:

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, los ventiladores, las devanadoras, etc.

Fig. 2.5 Compresores W-6 con embrague



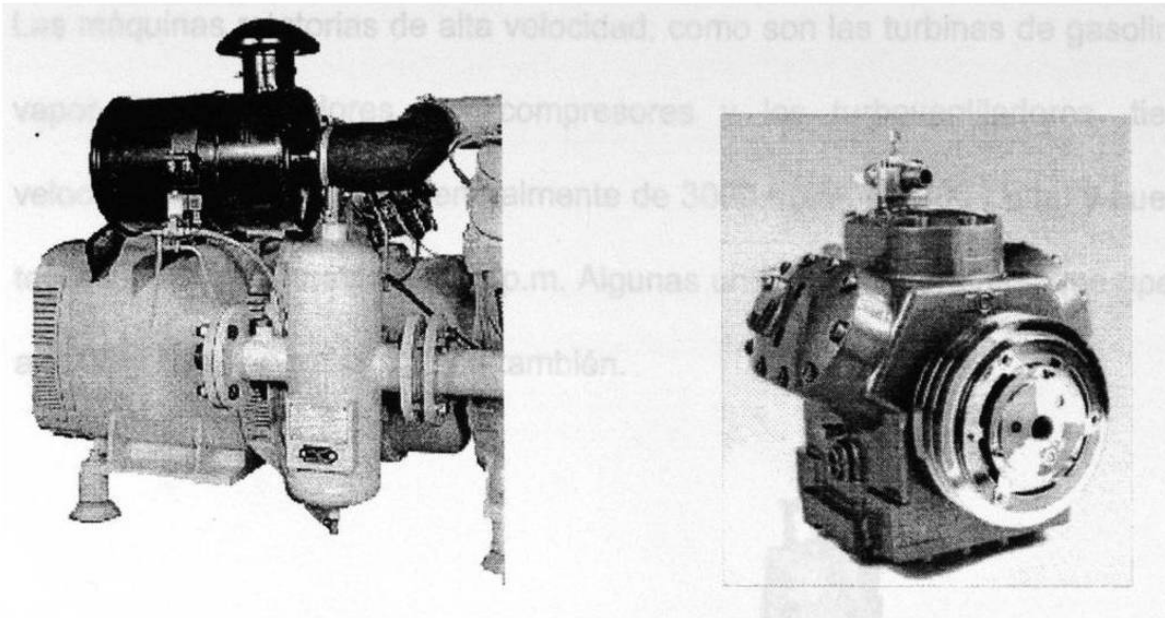


Fig. 2.6 Compresores Industriales

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, los generadores, los compresores y los turboventiladores, tienen velocidades de operación generalmente de 3000 r.p.m. ó 3600 r.p.m. y pueden tener un valor de hasta 10000 r.p.m. Algunas unidades de turbinas, que operan a 1500 y 1800 r.p.m. se utilizan también.

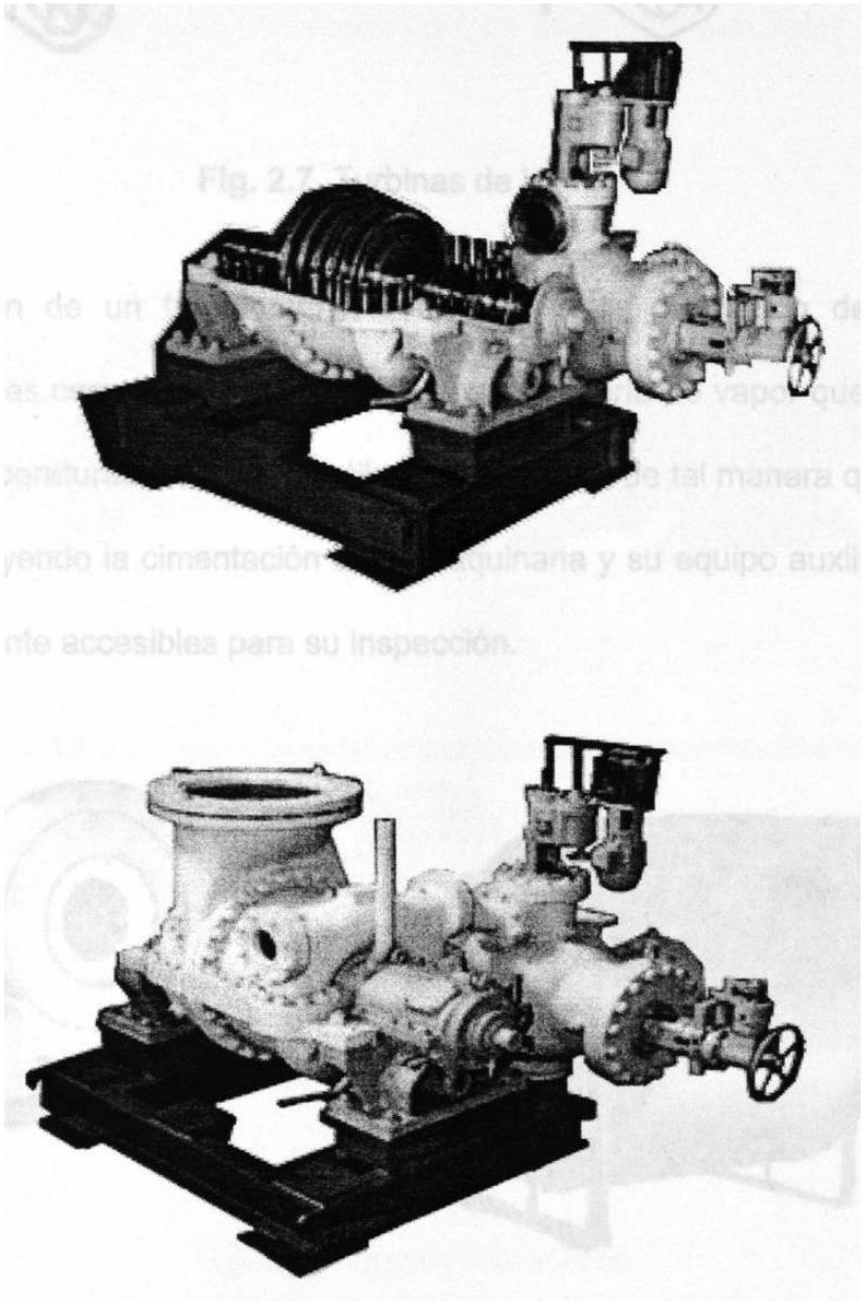


Fig. 2.7 Turbinas de Vapor

La instalación de un turbogenerador representa la colocación de equipos auxiliares, tales como condensadores, líneas de tubería 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, deben estar totalmente accesibles para su inspección.

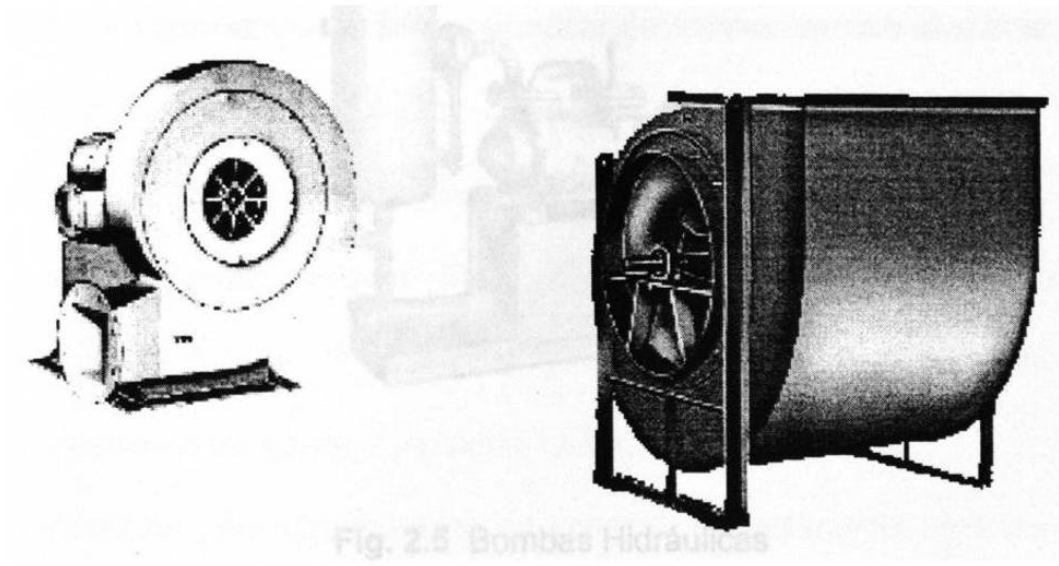


Fig. 2.8 Ventiladores

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

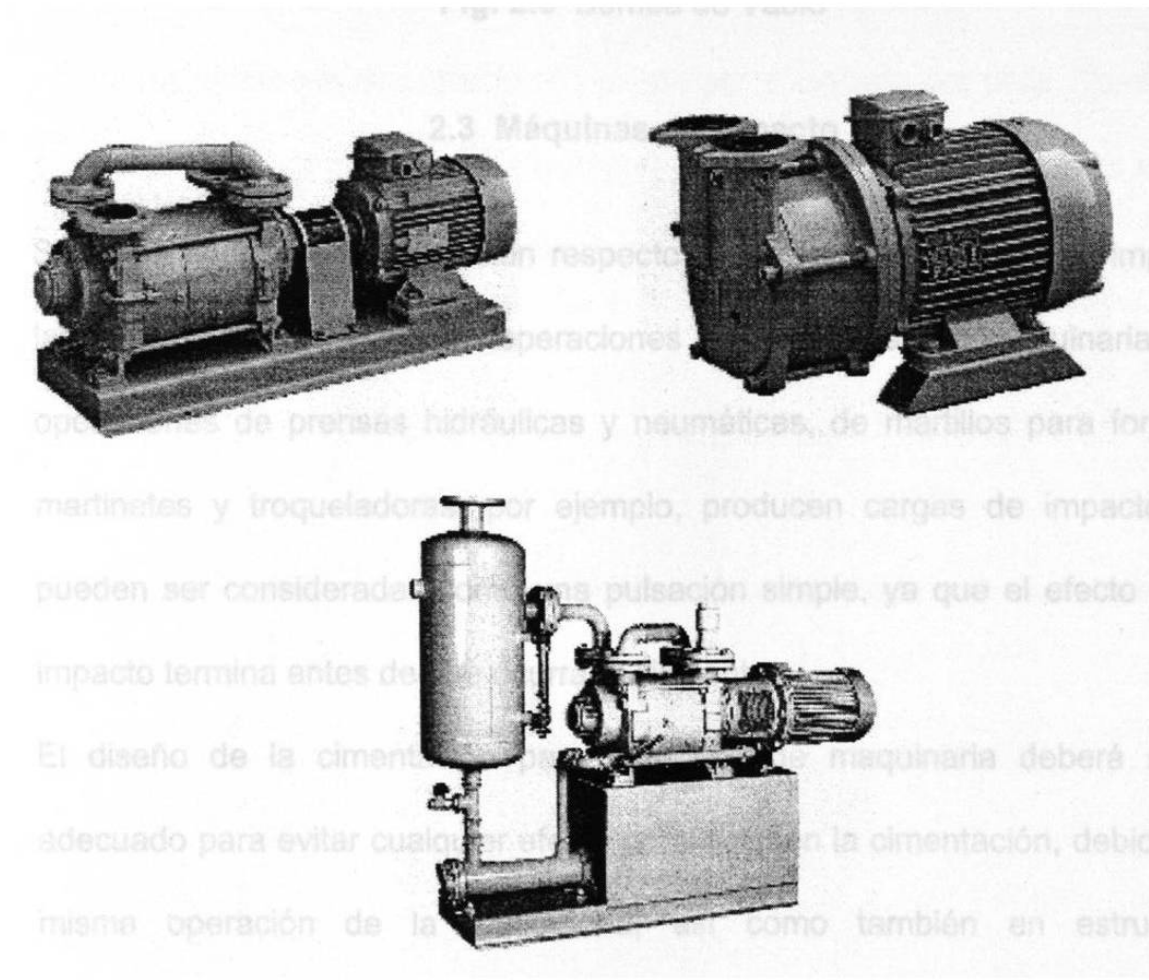


Fig. 2.5 Bombas Hidráulicas

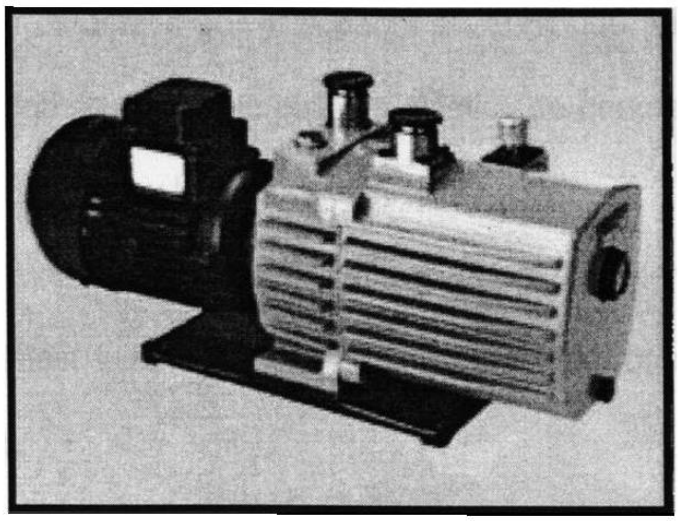


Fig. 2.6 Bomba de Vacío

2.3 Máquinas de Impacto

Se dispone de poca información respecto a cargas transitorias o de impacto, las cuales se generan por operaciones intermitentes de maquinaria. Las operaciones de prensas hidráulicas y neumáticas, de martillos para forja, de martinetes y troqueladoras, 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 el 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.

A continuación se presentan algunos tipos de máquinas que se clasifican como de impacto:

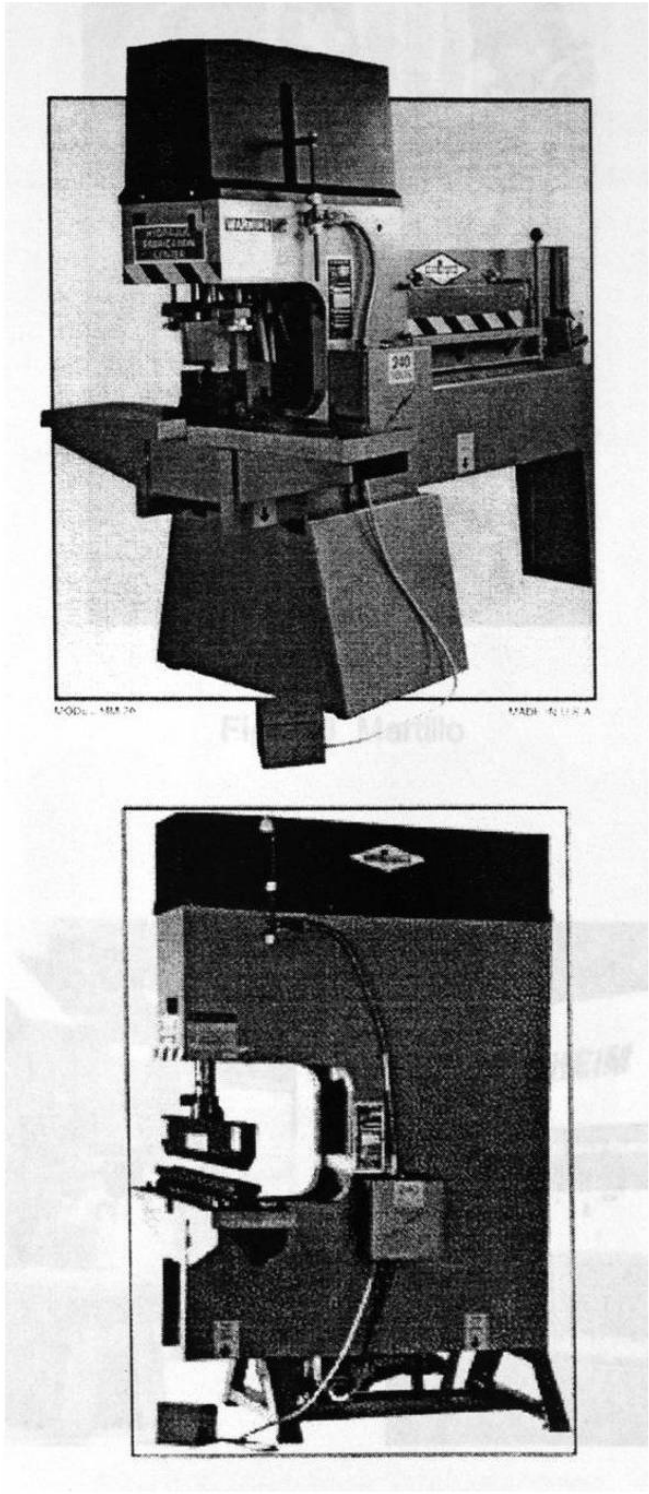
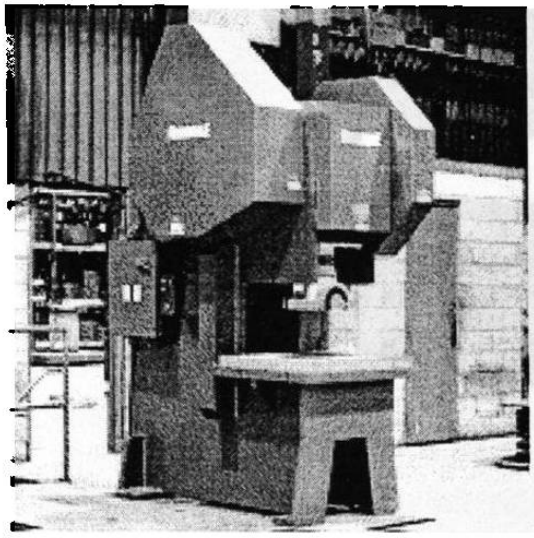


Fig. 2.7 Prensas Hidráulicas

Fig. 2.8 Martillo



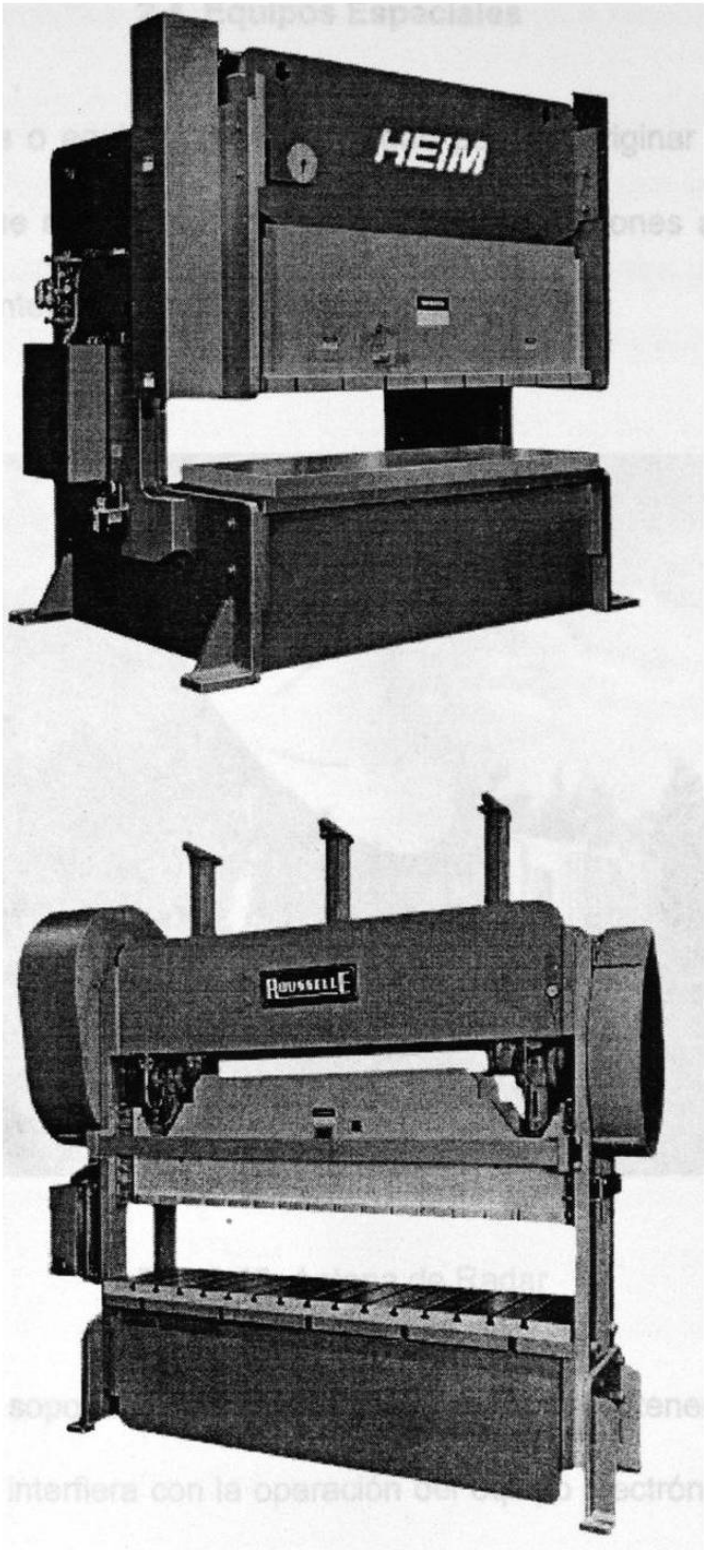


Fig. 2.9 Máquinas Troqueladoras

2.4 Equipos Especiales

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

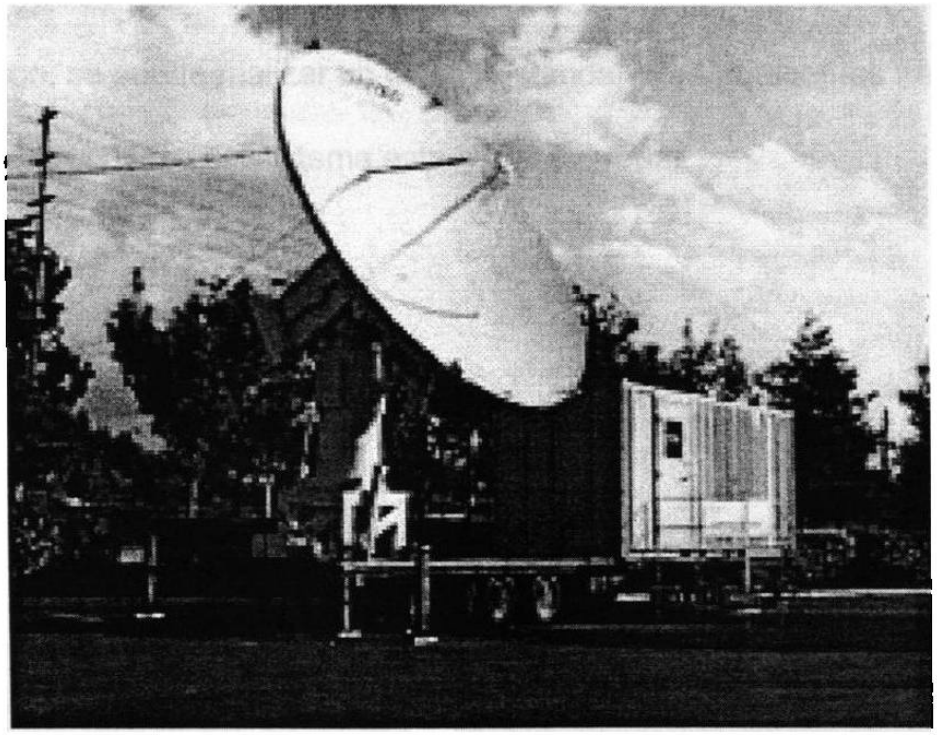


Fig. 2.10 Antena de Radar

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 suficientemente 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.

Obviamente, la antena de radar tiene muchos grados de libertad de vibración; sin embargo, se puede realizar un diseño estándar para obtener las frecuencias de resonancia críticas del sistema estructural del radar.

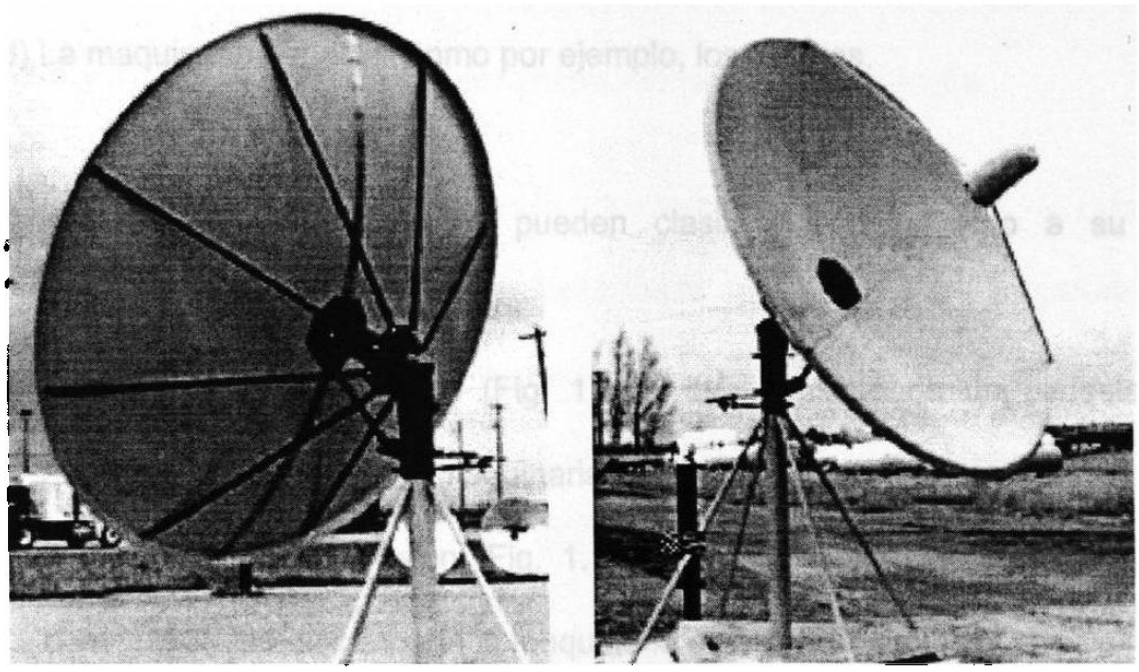


Fig. 2.11 Antenas de Radar

De tal manera, el diseño de las cimentaciones para este tipo de equipo deberá ser el adecuado, para cubrir todas las especificaciones de servicio y asegurar un funcionamiento satisfactorio.

2.5 Tipos de Cimentaciones

Basándose en el criterio de diseño de sus cimentaciones, las maquinarias pueden clasificarse como:

a) Las que producen fuerzas de impacto, como son los martillos y las prensas.

b) Las que producen fuerzas periódicas, como los compresores.

c) La maquinaria de alta velocidad, como las turbinas y los compresores rotatorios.

d) La maquinaria especial, como por ejemplo, los radares.

A su vez, las cimentaciones pueden clasificarse atendiendo a su tipo estructural, de la siguiente manera:

a) Cimentaciones tipo bloque (Fig. 1.1.a), que consiste de un pedestal de concreto que soporta a la maquinaria.

b) Cimentación de tipo cajón (Fig. 1.1.b), la cual consiste en un bloque de concreto hueco que soporta la maquinaria en su parte superior.

c) Cimentación de tipo muro (Fig. 1.1.c), formada por un par de muros que dan soporte a la maquinaria.

d) Cimentación de tipo marco (Fig. 1.1.d), con base en columnas verticales que soportan en la parte superior una plataforma horizontal, la cual sirve de asiento a la maquinaria.

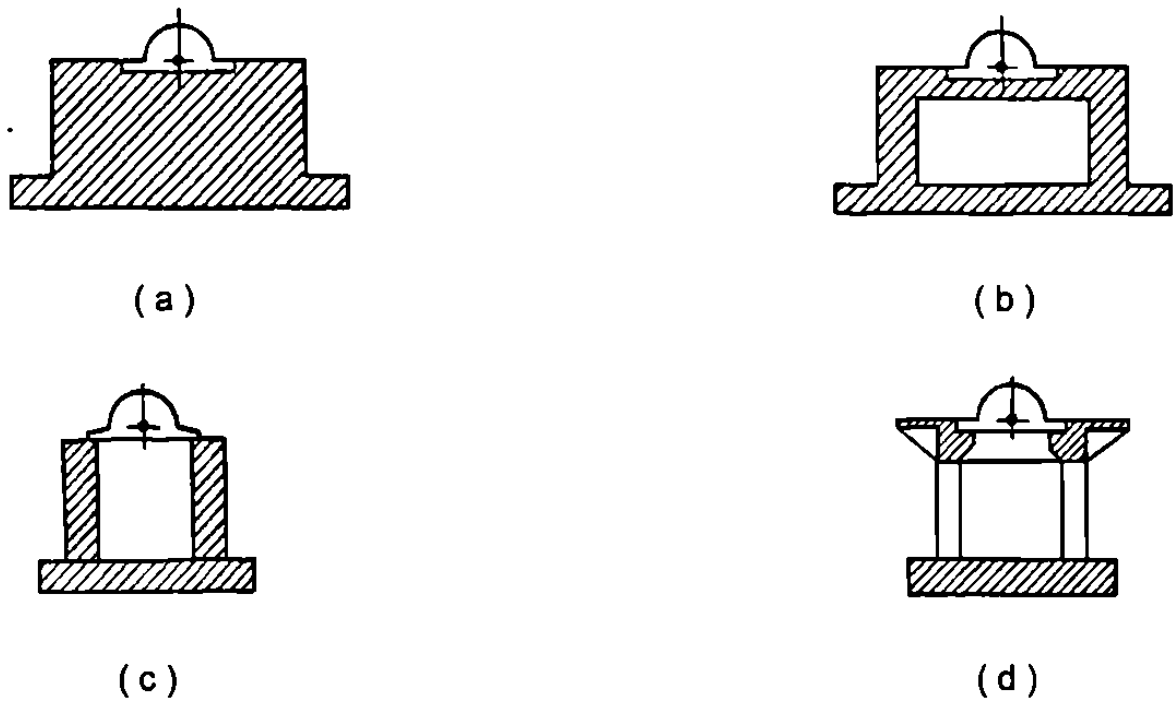


Fig. 1.1 Tipos de Cimentaciones para Maquinaria

La maquinaria que produce impactos y fuerzas periódicas de baja velocidad es generalmente montada sobre cimentaciones de tipo bloque. Aquellas que trabajan a altas velocidades y la maquinaria del tipo rotatorio se coloca sobre cimentaciones de marco; sin embargo, para ciertas condiciones particulares, lo anterior puede modificarse; en tal caso, se puede proponer un tipo alternativo de cimentación.

Alguna maquinaria, como los tornos, induce muy poca fuerza dinámica, y pueden ser atornillados directamente al firme, sin necesidad de una cimentación especial.

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

a) Grupo 1.- Frecuencias de bajas a medias, con valores de 0-500 r.p.m.

b) Grupo 2.- Frecuencias de medias a altas, con valores de 300-1000 r.p.m.

c) Grupo 3.- Frecuencias muy altas con valores mayores que 1000 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 50-250 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.

El grupo 2 incluye máquinas reciprocantes de tamaño medio, como son las máquinas de gasolina y diesel. Se recomiendan generalmente las cimentaciones de tipo bloque, desplantadas sobre resortes o placas elásticas como el neopreno, 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 alta velocidad, motores eléctricos y turbogeneradores. Son recomendables las cimentaciones de tipo bloque, con poca superficie de contacto, aisladas con placas elásticas para bajar la frecuencia natural. La turbo-maquinaria requiere de cimentación de tipo marco para acomodar entre las columnas los equipos auxiliares necesarios.

2.6 Requerimientos Generales para Cimentaciones de Maquinaria

Los siguientes requerimientos generales deberán ser satisfechos, desde el punto de vista de diseño:

a) La cimentación deberá ser capaz de soportar las cargas impuestas, sin tener fallas de corte o de aplastamiento.

b) Los asentamientos deberán estar dentro de los límites permisibles.

c) 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.

d) Deberá evitarse la resonancia; por lo tanto, la frecuencia natural del sistema suelo-cimentación deberá ser o mayor o menor que la frecuencia de operación de la maquinaria. Para maquinaria de baja velocidad, la frecuencia natural deberá ser alta y viceversa.

e) 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.

f) Todas las partes rotatorias y reciprocantes de una maquinaria deberán estar bien balanceadas, de modo que minimicen las fuerzas o los momentos desbalanceados.

g) En lo posible, la cimentación deberá estar proyectada de tal 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 cumplirse los siguientes requerimientos:

a) El nivel freático, en caso de existir, deberá estar tan abajo como sea posible, por lo menos una cuarta parte del ancho 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 las ondas de vibración.

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

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

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

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

CAPITULO 3

PROPIEDADES DINAMICAS DEL SUELO

3.1 Introducción

En las últimas décadas se han realizado grandes avances en el desarrollo de procedimientos analíticos para calcular la respuesta del terreno sujeto a la acción de cargas dinámicas, El uso de tales procedimientos requiere el conocimiento de las propiedades dinámicas del suelo para llegar a soluciones satisfactorias.

El diseño de la cimentación para maquinaria y el comportamiento de un depósito de suelo durante un sismo intenso son dos problemas típicos de la dinámica de suelos, que requieren la determinación de las propiedades dinámicas para valores diferentes de deformación.

Hasta la fecha, se han desarrollado varias técnicas para medir las propiedades dinámicas de los suelos, teniendo en cuenta el valor de las deformaciones características de cada aplicación. Mientras que un sismo intenso puede desarrollar deformaciones del 10 %, la cimentación de un microscopio electrónico es sensible a una deformación del 10^{-4} %.

Las principales propiedades dinámicas de los suelos que se requieren en la práctica profesional 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, υ
- El amortiguamiento, ξ
- Las propiedades esfuerzo-deformación
- Los parámetros de licuación
- La resistencia al esfuerzo cortante en función de la velocidad de aplicación de la carga.

Debe tenerse en cuenta que no existe un ensaye único que cubra todo el intervalo de deformaciones requerido en la solución de los problemas de la dinámica de suelos. El ensaye de los suelos sometidos a carga dinámica puede realizarse mediante técnicas de laboratorio o mediante técnicas de campo, ambos enfoques tienen ventajas y desventajas, las cuales se discutirán a continuación. Las ventajas de las técnicas de laboratorio radican en su economía, en la relativa facilidad con la que las variables de ensaye se puede variar, así como en la definición de las condiciones de frontera; su principal desventaja radica en la alteración provocada por los procedimientos de muestreo, transporte, almacenamiento y ensaye.

Las ventajas de las técnicas de campo radican en el ensaye de un mayor volumen de suelo y que en algunos casos la alteración del suelo puede ser minimizada; su principal desventaja consiste en la dificultad para controlar las condiciones de frontera y los bajos niveles de deformación que se pueden alcanzar.

El ensaye de los suelos tiene dos objetivos:

a) Proporcionar la información básica para el análisis y diseño.

b) Obtener la base experimental que permita el desarrollo de ecuaciones constitutivas.

De acuerdo con el primer objetivo, debe reconocerse que las técnicas de ensaye reproducen sólo en forma aproximada las condiciones reales de trabajo que se pueden presentar en el sitio; sin embargo, a partir de resultados de laboratorio y combinados con la experiencia, se pueden proporcionar valores muy útiles para el análisis y el diseño. El segundo objetivo pretende entender, explicar y predecir el comportamiento de los suelos, ante condiciones generales.

En relación con los procedimientos de laboratorio para determinar las propiedades esfuerzo-deformación y de resistencia de los suelos, bajo cargas dinámicas, las variables importantes son: la medición precisa de la carga, la deformación y la presión de poro.

3.2 Procedimientos de Laboratorio

La investigación experimental de las propiedades dinámicas de los suelos es un tema de gran interés, ya que puede afirmarse que las características esfuerzo-deformación de los suelos sometidos a cargas dinámicas son diferentes de aquellas obtenidas bajo cargas estáticas; por tanto, ha sido necesario desarrollar diferente equipo.

3.2.1 Ensayes de Pulsos Ultrasónicos.

Este ensaye consiste en generar mediante cristales piezoeléctricos ondas ultrasónicas ya sea longitudinales o de torsión y medir el tiempo t necesario para la propagación del pulso elástico generado, a través del espécimen de suelo de longitud L.Lo anterior permite conocer la velocidad de propagación del pulso generado en el espécimen en estudio.

Recíprocamente, si se aplica un campo eléctrico al cristal, se producen deformaciones que dependen de la intensidad del campo aplicado.

Por tanto, el método consiste en aplicar un pulso de carga repentinamente en un extremo del espécimen de suelo mediante un cristal piezoeléctrico; la deformación del espécimen debido a la carga se propaga a través de las ondas de esfuerzo. La llegada del pulso de carga al extremo opuesto del espécimen, al igual que la aplicación del pulso, se registra en un osciloscopio, como se muestra en la figura 3.1.

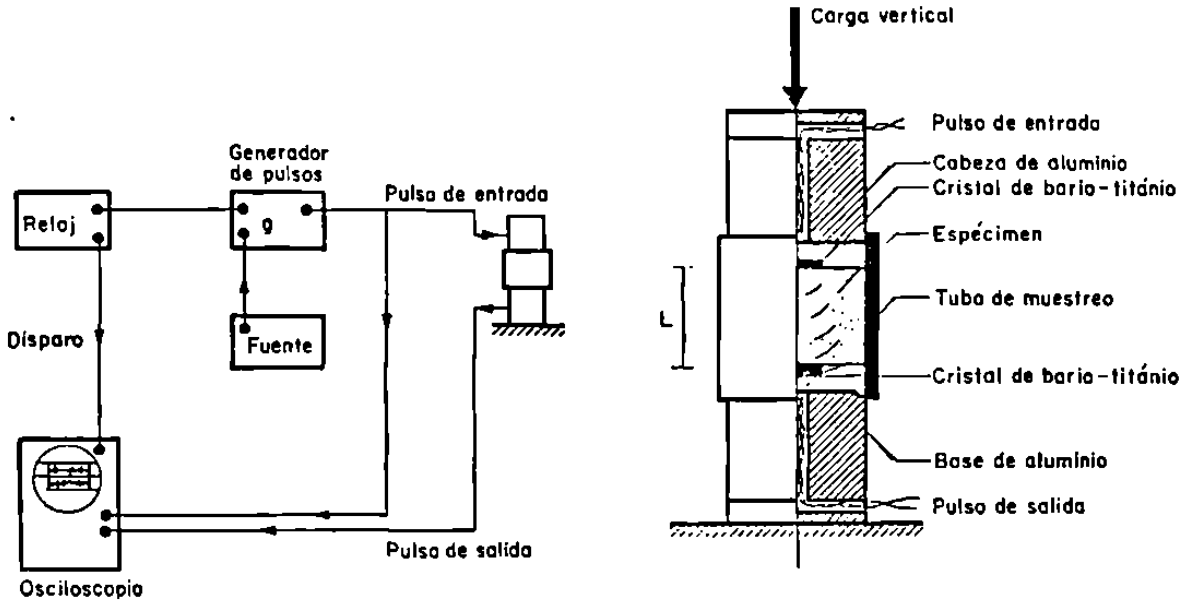


Fig. 3.1 Esquema del Equipo Utilizado en el Ensaye de Pulsos

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

$$V_c = \frac{L}{t_c} \qquad (3\text{-}1)$$

El módulo equivalente de Young E_{eq} se obtiene mediante:

$$E_{eq} = \rho V_c^2 = \frac{\rho L^2}{t_c^2} \qquad (3\text{-}2)$$

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

$$V_s = \frac{L}{t_s} \qquad (3\text{-}3)$$

El módulo al esfuerzo cortante G se obtiene mediante:

$$G = \rho V_s^2 = \frac{\rho L^2}{t_s^2} \qquad (3\text{-}4)$$

El ensaye de pulsos se considera un ensaye no destructivo ya que impone deformaciones unitarias del orden de 10^{-4} a 10^{-3}, en por ciento.

3.2.2 Ensaye de Columna Resonante.

Este ensaye consiste en someter un espécimen cilíndrico de suelo a un estado de vibración forzada longitudinalmente o torsional, variando la frecuencia de excitación hasta lograr la resonancia del espécimen. El módulo correspondiente se calcula con los datos de la frecuencia de resonancia f_n la geometría del espécimen (fig. 3.2) y las características del equipo.

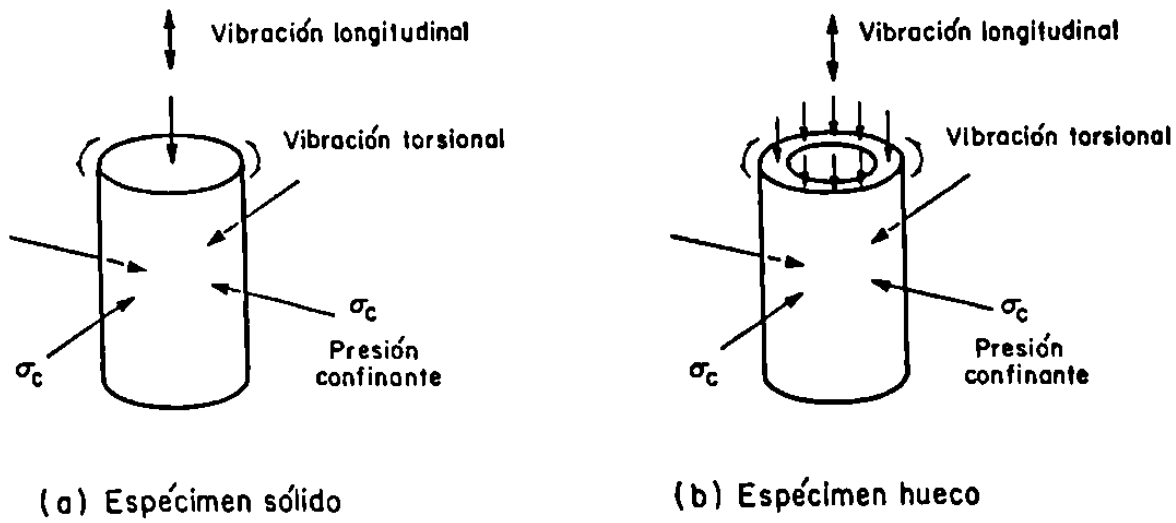


Fig. 3.2 Ensaye de Columna Resonante

Los antecedentes del equipo resonante se remontan a 1937 (ishimoto, M y Lida, K.), posteriormente Bishopp (1959), Hardin (1965), Drnevich, Hall y Richard (1967) y otros, fundamentaron la teoría en que se basa la interpretación de los resultados del equipo resonante. En la fig. 3.3, se muestra el equipo utilizado por Wilson y Dietrich (1960) para ensayes de vibración longitudinal en el que se emplea una bocina para fonógrafo como actuador y dos agujas también de fonógrafo como captadores de la respuesta del espécimen.

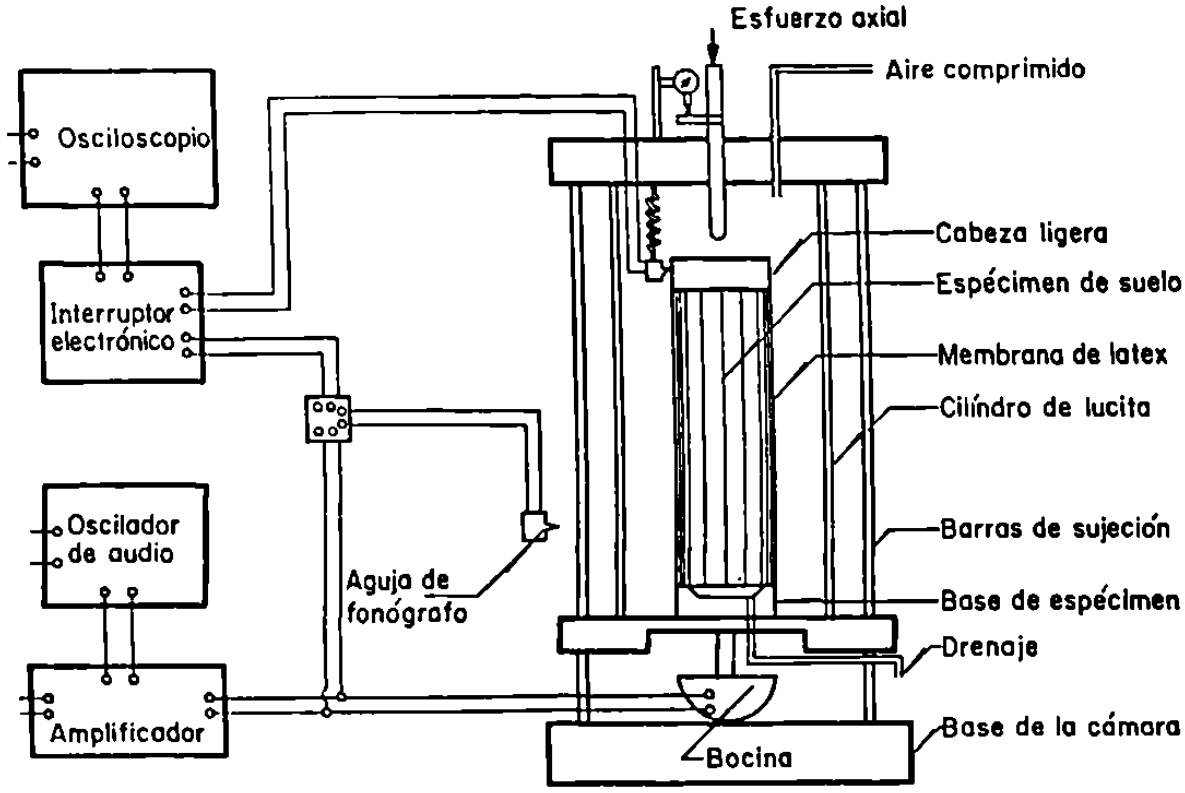


Fig. 3.3 Diagrama Esquemático del Aparato de Columna Resonante.

En general, el procedimiento de ensaye consiste en colocar un espécimen cilíndrico sobre una base rígida. El espécimen puede ser un cilindro sólido o hueco, en cuya parte superior se coloca el dispositivo que comunica la excitación torsional y/o longitudinal. En esta forma se tiene un espécimen de suelo fijo en su extremo inferior y libre en su parte superior.

Mediante un generador de funciones, se produce la forma de la onda con la amplitud y frecuencia requeridas, estas características se observan en la pantalla de un osciloscopio. La respuesta del suelo se mide mediante un acelerómetro, cuya salida se observa en el eje Y del osciloscopio.

La frecuencia de vibración se controla a voluntad, lo cual permite realizar un barrido de frecuencias hasta encontrar la frecuencia de resonancia f_n esta frecuencia depende tanto de las características del aparato utilizado como del espécimen mismo. También, mediante la figura X-Y observada en el osciloscopio, se puede conocer cuando el sistema está en resonancia.

Para medir la deformación axial, se emplea un transductor de desplazamientos.

La presión de confinamiento se aplica mediante aire comprimido.

Los principales factores que afectan los resultados de la prueba son: la amplitud de deformación angular γ, la presión de confinamiento σ_c y la relación de vacíos e. Otros factores, tales como la temperatura y el tiempo, afectan los resultados de la prueba, pero de una manera menos importante.

El módulo G se calcula a partir de la frecuencia de resonancia f_n , utilizando las expresiones obtenidas por Hardin (1965) de la teoría de vibraciones lineales de un cuerpo cilíndrico.

La ecuación que relaciona la velocidad de propagación de ondas de esfuerzo cortante V_s con la f_n queda definido por:

$$V_s = \frac{2\pi f_n L}{\psi_s} \qquad (3\text{-}5)$$

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

$$\psi_s tan\psi_s = \frac{J}{J_o} \qquad (3\text{-}6)$$

En donde J es el momento de inercia del espécimen y J_o es el momento de inercia de la cabeza del sistema.

Finalmente:

$$G = V_s^2 \rho \qquad (3\text{-}7)$$

En donde, ρ es la densidad de masa del espécimen.

El módulo E_{eq} se calcula en una forma semejante; la fracción del amortiguamiento se calcula a partir del registro de vibración libre, obtenido al suspender la corriente de excitación y aplicando la expresión del decremento logarítmico. La información detallada del equipo, el procedimiento de calibración, el ensaye de especímenes y el procesamiento de los datos se describen por Drnevich, Hardin y Shippy (1978).

3.2.3 Ensaye del Péndulo de Torsión.

Este ensaye consiste en someter un espécimen cilíndrico de suelo a un impulso que le provoque una vibración torsional libre.

La figura 3.4 ilustra el aparato desarrollado por Zeevaert (1967), que consiste en una cámara triaxial modificada, que permite someter la muestra a diferentes presiones de confinamiento σ_c. Esto lleva al conocimiento de la variación del módulo G, con la presión de confinamiento.

Un vástago, unido firmemente a un brazo horizontal, atraviesa la tapa de la cámara y transmite la vibración torsional libre a la cabeza de la muestra. El brazo horizontal, sobre el cual se colocan masas que guardan simetría con el eje de la muestra, da lugar a un sistema de un grado de libertad. Al brazo se le da un pequeño impulso inicial y esto hace que el sistema vibre libremente, la vibración como respuesta de los elementos elásticos del suelo, es registrada por un pequeño graficador dotado de dos plumillas; una registra la vibración libre del sistema y la otra registra las marcas de tiempo.

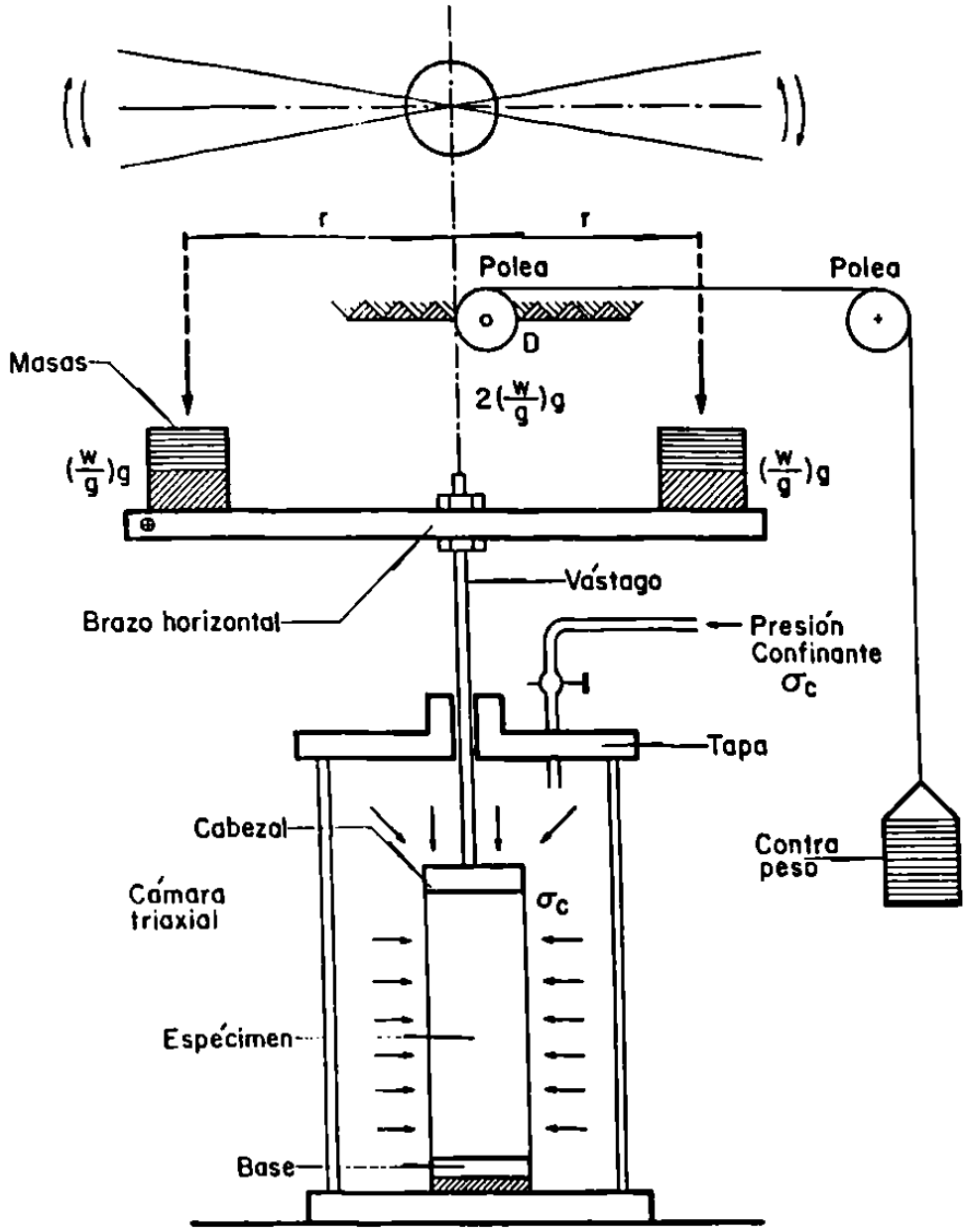


Fig. 3.4 Péndulo de Torsión de Vibración Libre (Zeevaert, 1967)

De los registros típicos para diferentes suelos (fig. 3.5) se obtiene la amplitud, el periodo y el decremento logarítmico de la vibración libre amortiguada del sistema aparato-suelo; de esta información se calcula el módulo G, de acuerdo con la expresión:

$$G = \frac{\omega_{sd}^2 C}{\left(1-\zeta_s^2\right)-\left(1-\zeta_a^2\right)\left(\omega_{sd}/\omega_{ad}\right)^2} \qquad (3\text{-}8)$$

donde:

$C = J_a h\ I_p$

J_a = Momento de inercia de las masas.

h = Altura del espécimen.

$I_p = \pi D^4\ 32$

D = Diámetro del espécimen.

ω_{sd} = La frecuencia circular amortiguada del sistema.

ω_{ad} = La frecuencia circular amortiguada de calibración.

ζ_s = La relación de amortiguamiento del sistema.

ζ_a = La relación de amortiguamiento del instrumento.

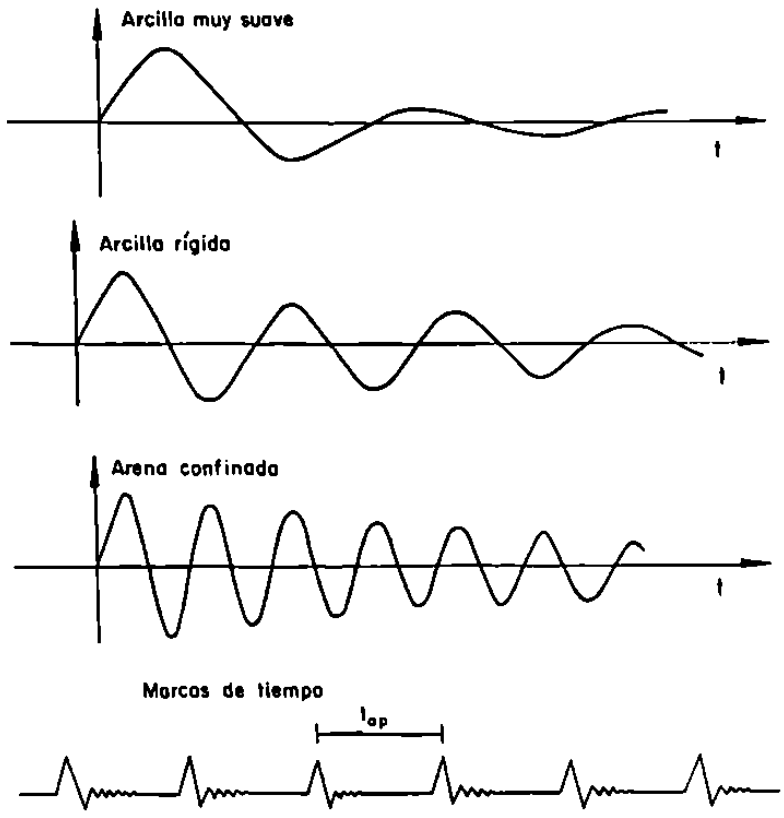


Fig. 3.5 Registros Típicos Obtenidos con el Péndulo de Torsión.

Zeevaert (1984) describe con detalle las consideraciones del funcionamiento del aparato, su uso, detalles de calibración e interpretación de resultados.

3.2.4 Ensaye Triaxial Cíclico.

El ensaye 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 axiales cíclicas.

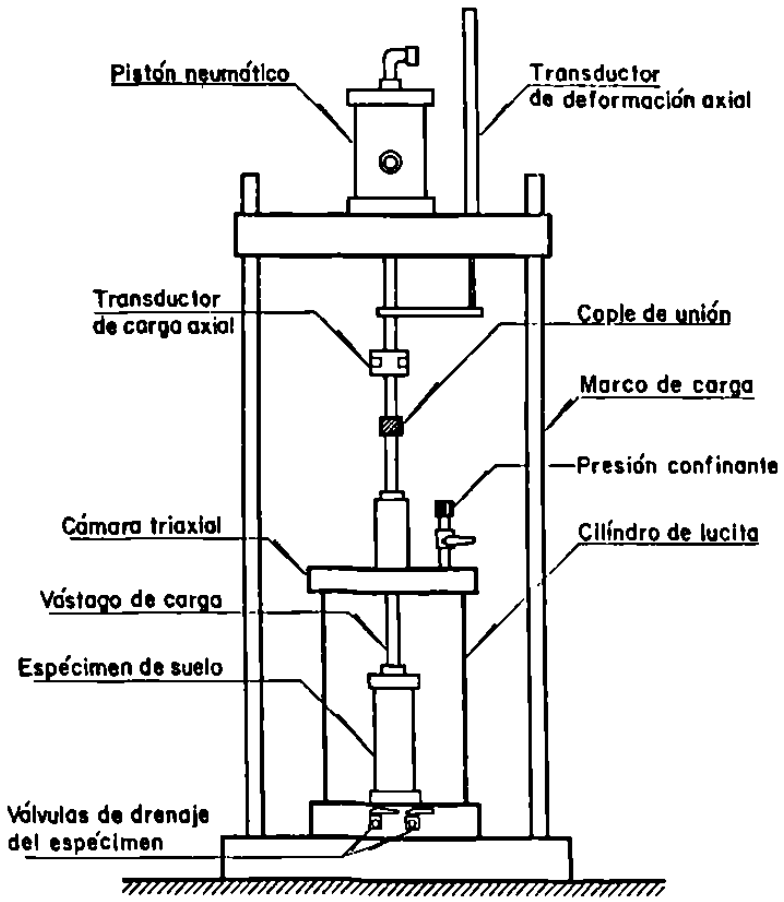


Fig. 3.6 Cámara Triaxial Cíclica

La figura 3.6 muestra un esquema de una cámara triaxial cíclica moderna. El ensaye 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.

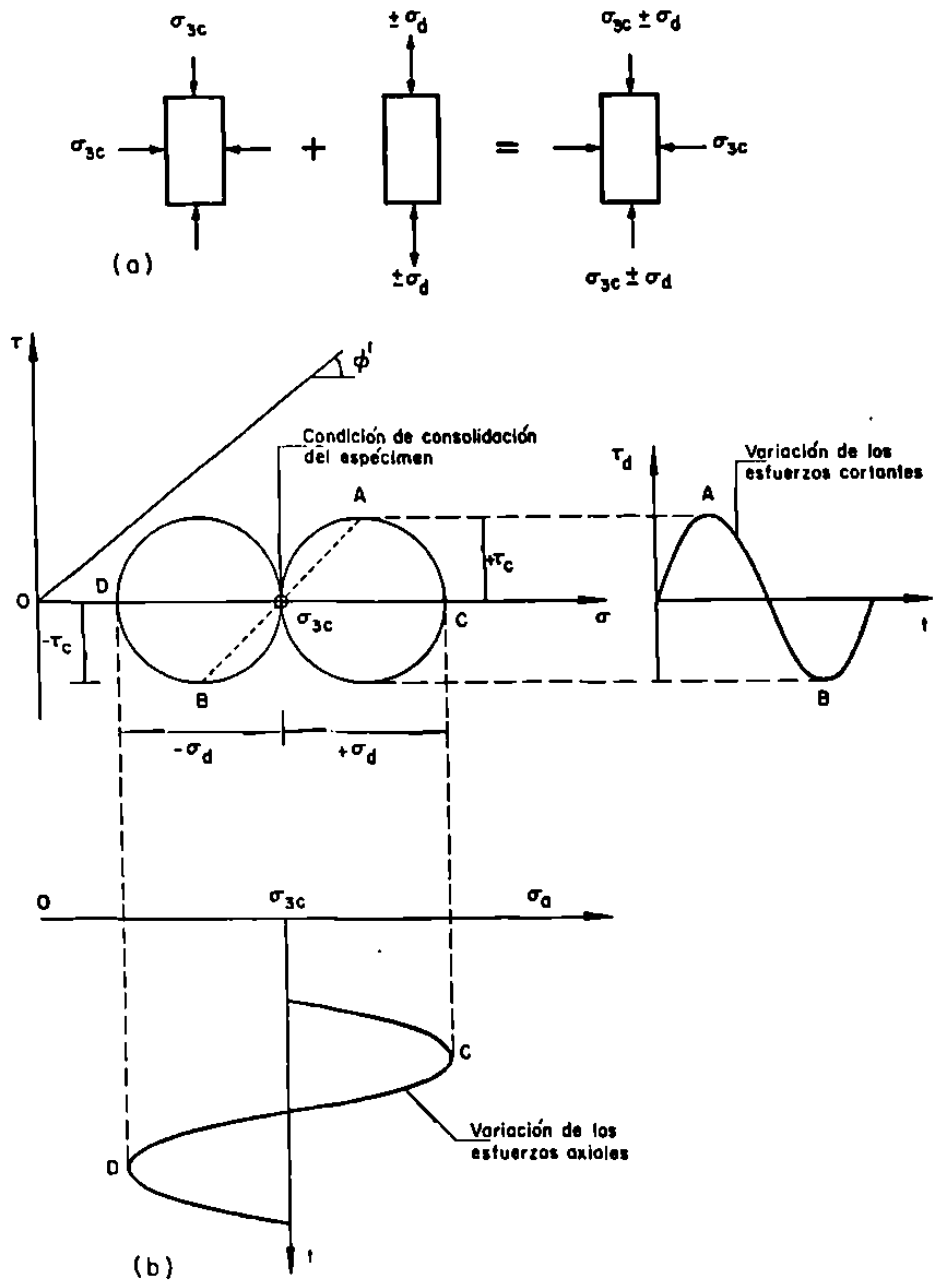


Fig. 3.7 Esquema Del Ensaye Triaxial Cíclico Convencional Para Espécimen Isotrópicamente Consolidado

El ensaye triaxial cíclico se realiza manteniendo la presión de confinamiento σ_{3c} constante y aplicando el esfuerzo axial cíclicamente, con magnitud de $\pm\sigma_d$ como se indica en la figura 3.7a. La figura 3.8 muestra las condiciones de esfuerzo de un ensaye triaxial cíclico para un espécimen anisotrópicamente consolidado.

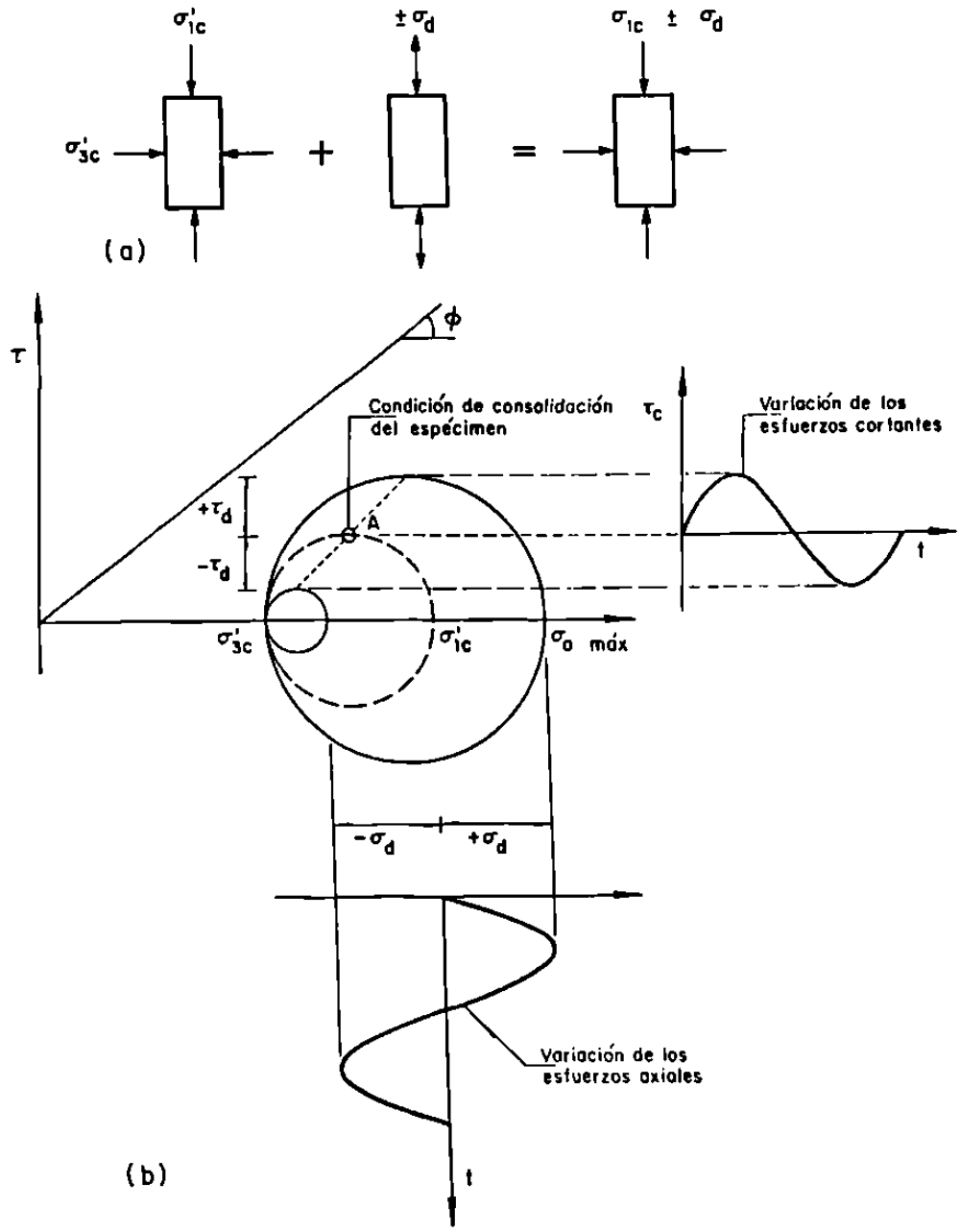


Fig. 3.8 Esquema del Ensaye Triaxial Cíclico Convencional para Espécimen Anisotrópicamente Consolidado

En este ensaye el espécimen se consolida primeramente a una presión isotrópica σ_{3c} y posteriormente se aplica un esfuerzo axial estático adicional bajo condiciones drenadas para lograr el estado de esfuerzos de consolidación anisotrópica (punto A en la figura 3.8b). La condición descrita tiene por objeto simular el estado de esfuerzos cortantes *in situ* a los que estaba sometido el elemento de suelo antes de extraerse mediante muestreo. A partir de la consolidación anisotrópica se aplica al espécimen de suelo un esfuerzo axial cíclico $\pm\sigma_d$ y se obtiene un registro continuo de las variables en estudio. En general, se obtienen las trazas o registros continuos de la variación de la carga axial aplicada P, la deformación axial producida δ_c, y la presión de poro Δ_u, generada durante la aplicación de carga cíclica.

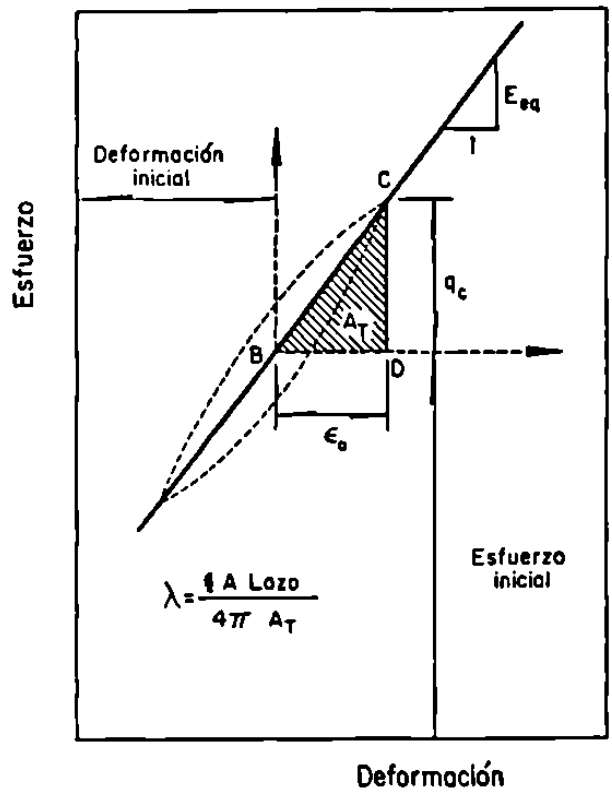


Fig. 3.9 Lazo de Histéresis y Definiciones

La figura 3.9 muestra un lazo de histéresis típico de un ensaye triaxial cíclico. En la figura se presenta el estado inicial de consolidación del espécimen, la variación del esfuerzo cíclico q_c y la variación de la deformación axial cíclica ε_c. El módulo equivalente de Young E_{eq} se determina a partir de la pendiente de la línea que une los puntos extremos del lazo de histéresis. La relación de amortiguamiento equivalente λ se calcula usando la expresión:

$$\lambda = \frac{1}{4\pi} * \frac{Area - lazo - histeresis}{Area - triangulo - BCD} \qquad (3\text{-}9)$$

A partir de los datos del ensaye también se puede obtener, entre otros, los parámetros de licuación de un suelo granular y los parámetros para los modelos de degradación de suelos cohesivos. La gran cantidad de información proveniente de una serie de ensayes triaxiales cíclicos requiere el uso de un mayor número de aparatos de registro o captura de datos.

3.2.5 Ensaye de Corte Simple Cíclico.

El ensaye de corte simple cíclico tiene como finalidad investigar el comportamiento esfuerzo-deformación y la resistencia al esfuerzo cortante de una muestra de suelo sometido a corte simple.

La prueba de corte simple cíclico se desarrolló con la finalidad de conseguir una mayor aproximación a las condiciones de campo en las que se encuentra

un elemento de suelo al ser sometido a la propagación vertical de las ondas esfuerzo cortante, que aquella lograda con la cámara triaxial cíclica.

Las condiciones de corte simple teóricas, que debe cumplir un elemento de suelo en un equipo de corte simple se resumen en:

a) Estático: simular el estado de esfuerzos iniciales.

b) Cíclico: imponer condiciones de corte simple.

En el plano xy esta condición queda definida por:

$$\frac{\delta u}{\delta x} = \frac{\delta v}{\delta y} = 0 \quad \text{y} \quad \frac{\delta u}{\delta y} \neq 0 \qquad (3\text{-}10)$$

Donde u y v son los desplazamientos en las direcciones x, y, respectivamente.

Debido a las condiciones no drenadas, el cambio de volumen de la muestra tendrá que ser nulo; por tanto, al ocurrir deformaciones angulares ω, no deberán producirse deformaciones verticales, es decir, cada punto de las fronteras inferior y superior, deberá moverse una cantidad de $\pm\omega h$ Para conseguir esto último, dichas fronteras deberán ser rugosas para evitar deslizamientos, que darían origen a zonas muertas.

Pickering (1969) realizó ensayes con placas de diferente rugosidad y obtuvo resultados satisfactorios cuando las placas proporcionaban la fricción necesaria para transmitir los esfuerzos cortantes τ_{xy}.

Uno de los primeros aparatos de corte simple fue el desarrollado por el Sewedish and Norwegian Geotechnical Institute (Kjellman, 1951); sin embargo, este aparato tiene el inconveniente de utilizar muestras cilíndricas y dificultades para lograr que existan los esfuerzos cortantes en una sección horizontal que sean uniformes.

Roscoe (1953) modificó el aparato y utilizó muestras de sección rectángular y paredes rígidas.

En la Universidad de California, en Berkeley, Peacock y Seed (1968) desarrollaron un aparato de corte simple, que emplearon para examinar la tendencia a licuarse de muestras de arena sometida a este tipo de esfuerzo. También en la Universidad de British Columbia, Pickering (1969), Finn, Pickering y Bransby (1971) diseñaron y utilizaron un aparato de corte simple para el estudio de licuación.

Al ensaye de corte simple cíclico se le han señalado limitaciones tales como la generación de condiciones de no-uniformidad de esfuerzos en las fronteras, lo cual causa la falla de los especímenes para esfuerzos menores que aquellos requeridos en el sitio de estudio. Existe una distribución no-uniforme de los esfuerzos normales en las fronteras, lo que da lugar a una excentricidad en los esfuerzos normales.

En la actualidad, se pueden encontrar dos tipos de aparatos de corte simple; uno de paredes rígidas y forma prismática de aproximadamente 5x5x2.9 cm; otro de forma cilíndrica, con dimensiones de 71 mm de diámetro y 20 mm de altura, en este caso los especímenes se colocan dentro de una membrana

reforzada con alambre de acero en espiral, esto último tiene como finalidad lograr que el desplazamiento relativo entre la parte superior y la parte inferior de la muestra defina una línea recta.

Finn y Vaid (1977) desarrollaron un aparato de corte simple cíclico para ensayes a volumen constante (fig. 3.10).

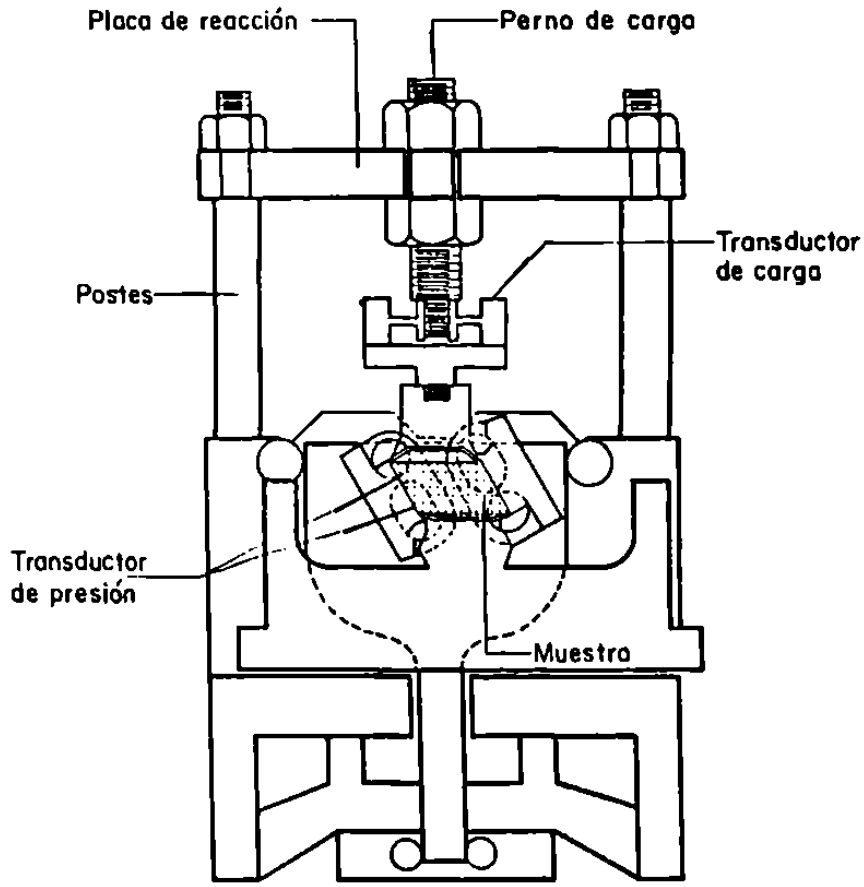


Fig. 3.10 Aparato de Corte Simple Cíclico de Volumen Constante

Este aparato tiene el propósito de reducir los efectos del cambio de volumen de la muestra debido a la deformación del equipo. Los errores debidos a la deformación del equipo son comunes, en los ensayes no drenados, para estudiar el potencial de licuación de los suelos. La magnitud de la deformación es en primer término en función del tipo de equipo utilizado y de la

granulometría del suelo bajo ensaye. En los equipos de corte simple de paredes rígidas, la deformación puede presentarse en las esquinas de la muestra.

El procedimiento que propone Finn y Vaid (1977) consiste en determinar el comportamiento no drenado de la muestra de ensaye, utilizando arena seca y midiendo el cambio de la presión vertical para mantener el volumen de la muestra constante, el cambio de la presión vertical se interpreta como el cambio de presión de poro equivalente.

Con objeto de superar algunas de las dificultades de los especímenes de tamaño pequeño, Díaz-Rodriguez, Weckmann e Iturbe (1973) diseñaron un aparato de corte simple de paredes rígidas para muestras de gran tamaño (30 x 60 x 90 cm). El equipo está diseñado para usarse sobre una mesa vibradora y ofrece las siguientes características:

a) Simular el efecto de la presión de sobrecarga y de fuerzas de inercia.

b) Imponer a la muestra condiciones de deformación de corte simple.

c) Medir la presión de poro generada en diferentes puntos de la muestra y de esta forma conocer la distribución de la presión de poro que da origen a la licuación.

3.2.6 Ensaye en una Mesa Vibradora.

Una mesa vibradora es un dispositivo que permite efectuar ensayes dinámicos de sistemas o componentes, ya sea a escala natural o a escala reducida.

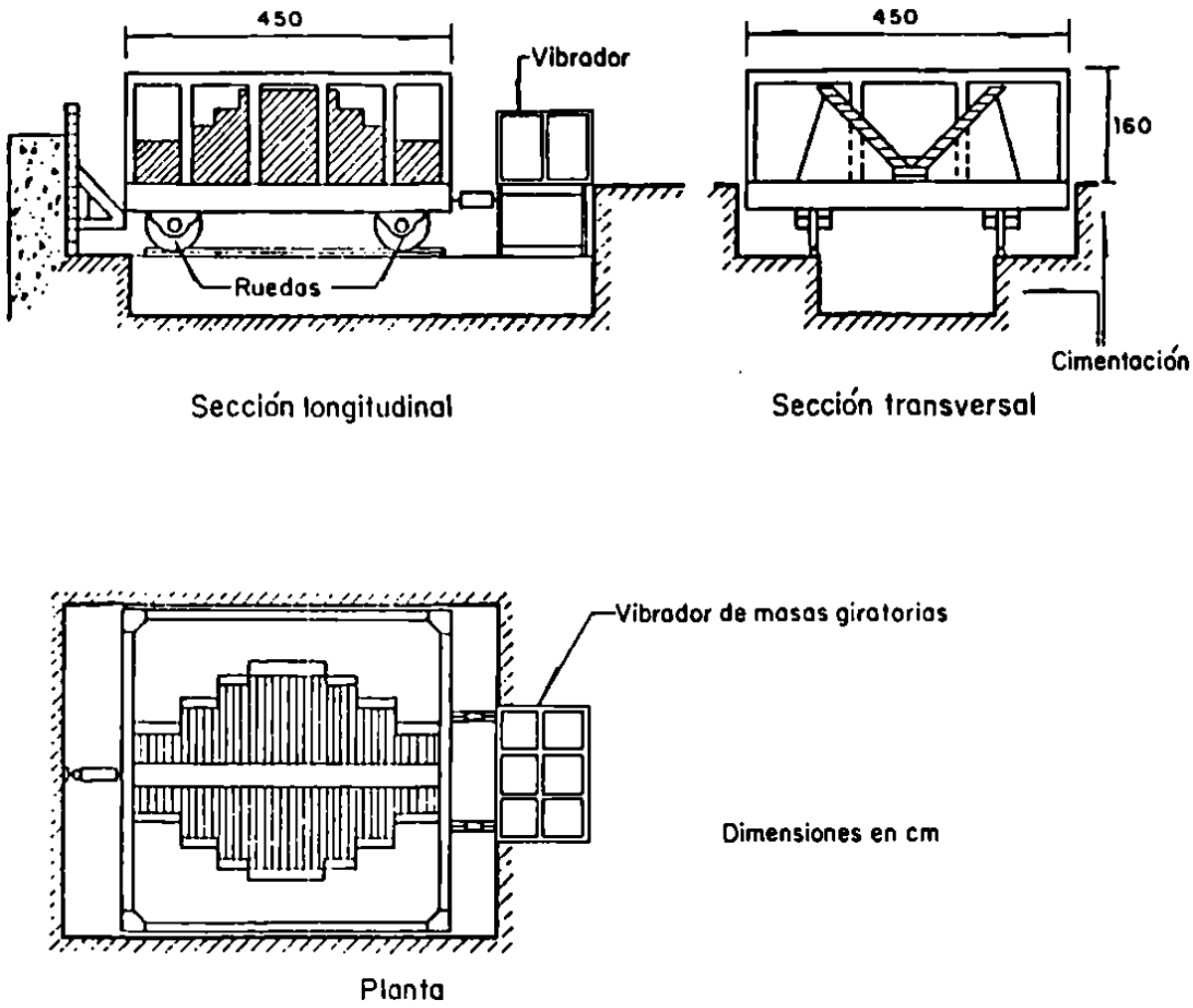


Fig. 3.11 Características de una Mesa Vibradora (Díaz Rodríguez, 1971)

Una mesa vibradora consta principalmente de:

a) Una plataforma rígida sobre la cual se fija o se construye el espécimen a ensayar. Sus dimensiones varían desde unos centímetros hasta varios metros.

b) Un sistema de soporte de la plataforma, que puede ser basándose en ruedas metálicas (Fig. 3.11), pedestales doblemente articulados (Fig. 3.12), rodamientos de agujas o aire comprimido.

c) Un sistema excitador encargado de aplicar a la plataforma el tipo de excitación, (impacto, periódica o aleatoria) que el ensaye requiera. Díaz-Rodriguez (1971) utilizó un excitador de masas giratorias excéntricas para la generación de vibraciones armónicas, en un rango de frecuencias hasta de 20 Hz y una fuerza máxima de 5 ton. En tanto que Díaz Rodríguez y Del Valle (1977) describen un moderno laboratorio con una mesa vibradora equipada con un excitador electrohidráulico, doblemente articulado en sus extremos, controlado electrónicamente y capaz de simular diferentes tipos de vibración (por ejemplo un acelerograma). El intervalo de frecuencia de vibración abarca hasta 100 Hz, con una fuerza de 75 ton.

d) Un sistema de control electrónico equipado con un controlador, un selector de programas, un acondicionador de programas y un servocontrolador. La función principal de este último es comparar una señal de entrada con una de retroalimentación y generar una señal de error que tiene la magnitud y la polaridad requeridas para corregir la señal deseada.

e) Un sistema de captura de datos, compuesto básicamente de un transductor, un acondicionador de señal y dispositivos de registro (en papel o en forma magnética).

f) Sistemas auxiliares.

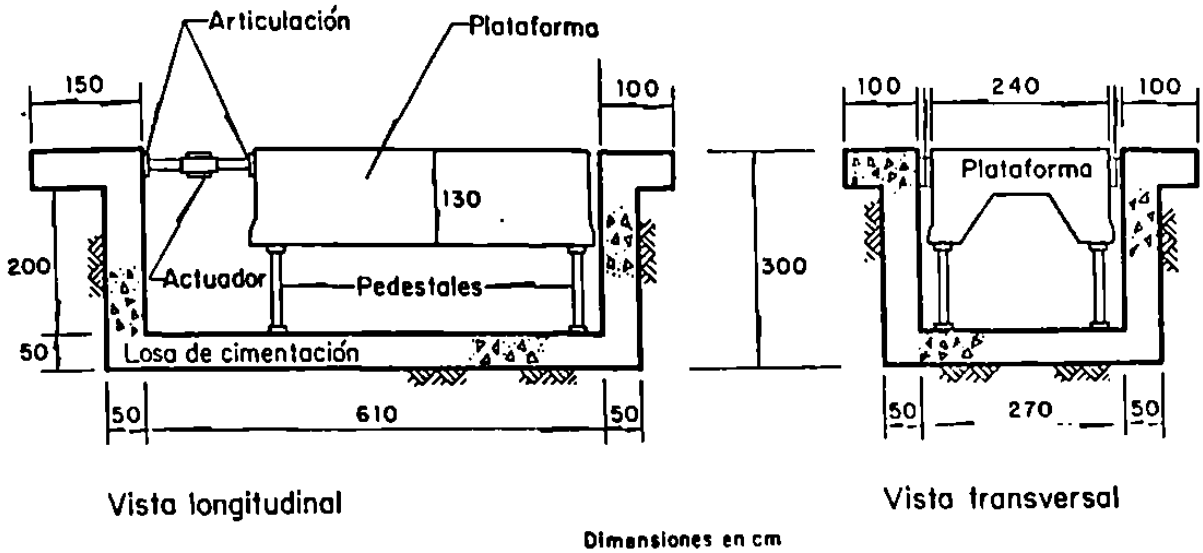


Fig. 3.12 Mesa Vibradora (Díaz Rodríguez y Del Valle, 1977)

Son muchas las aplicaciones que se pueden dar al uso de mesas vibradoras en la investigación del comportamiento dinámico de los suelos y estructuras construidas de suelo. Díaz-Rodriguez (1971, 1984) utilizó la mesa vibradora para investigar las características dinámicas de modelos a escala reducida de cortinas de enrocamiento, y obtuvo excelentes resultados en la determinación de las frecuencias naturales de vibración y la fracción del amortiguamiento crítico asociado con dichas frecuencias.

3.3 Métodos de Campo

El ensaye de muestras de suelo representativas de las condiciones *in situ* adolece de los efectos que sobre la muestra tiene la alteración causada por la extracción, transporte, almacenamiento y preparación para ensaye.

Con el propósito de evitar dicha alteración, se ha desarrollado un conjunto de métodos de campo, para la obtención de las propiedades dinámicas de los suelos.

A continuación se describirán las principales características de las técnicas y procedimientos de campo más usuales en la dinámica de suelos, su fundamentación, aspectos teóricos y sus ventajas y limitaciones.

3.3.1 Ensaye de Ondas de Superficie.

Este ensaye consiste en generar un estado establecido de ondas Rayleigh de una frecuencia conocida, y medir la longitud de las ondas generadas.

El esquema general del ensaye se muestra en la figura 3.13 y consiste en colocar un vibrador mecánico o electromagnético sobre una placa de acero. Con el vibrador se produce un estado establecido de ondas Rayleigh de una frecuencia f, conocida y mediante la colocación de geófonos en la superficie del terreno, medir la longitud de onda L de la vibración provocada. Para la medición de la longitud de ondas se utiliza un mínimo de dos geófonos.

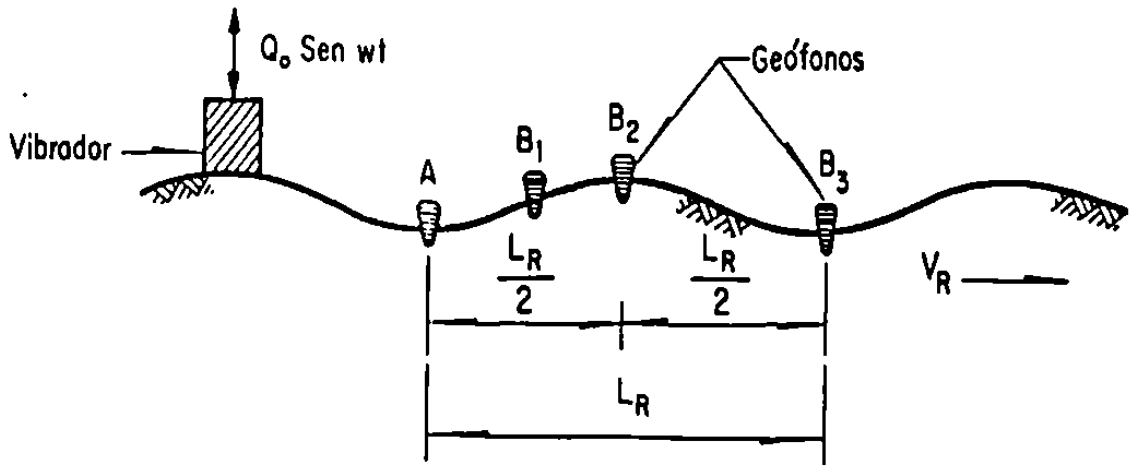


Fig. 3.13 Ensaye de Vibración de la Superficie del Terreno

La figura 3.14 ilustra de manera esquemática como se realiza tal determinación. Se coloca un geófono en el punto (A), figura 3.13, cercano al vibrador y otro en (B), a una cierta distancia; se obtienen los registros correspondientes, trazas 1 y 2 respectivamente, como puede apreciarse los registros muestran un desfasamiento θ. Se mueve el geófono del punto (B_1) hasta la posición (B_2), de tal forma que los registros muestren un desfasamiento de 180° (trazas 1 y 3 respectivamente), la distancia entre (A) y (B) es $L_R/2$. Para verificar la determinación se coloca un tercer geófono a una distancia L_R del punto (A), los registros deberán estar en fase como lo muestran las trazas 1 y 4.

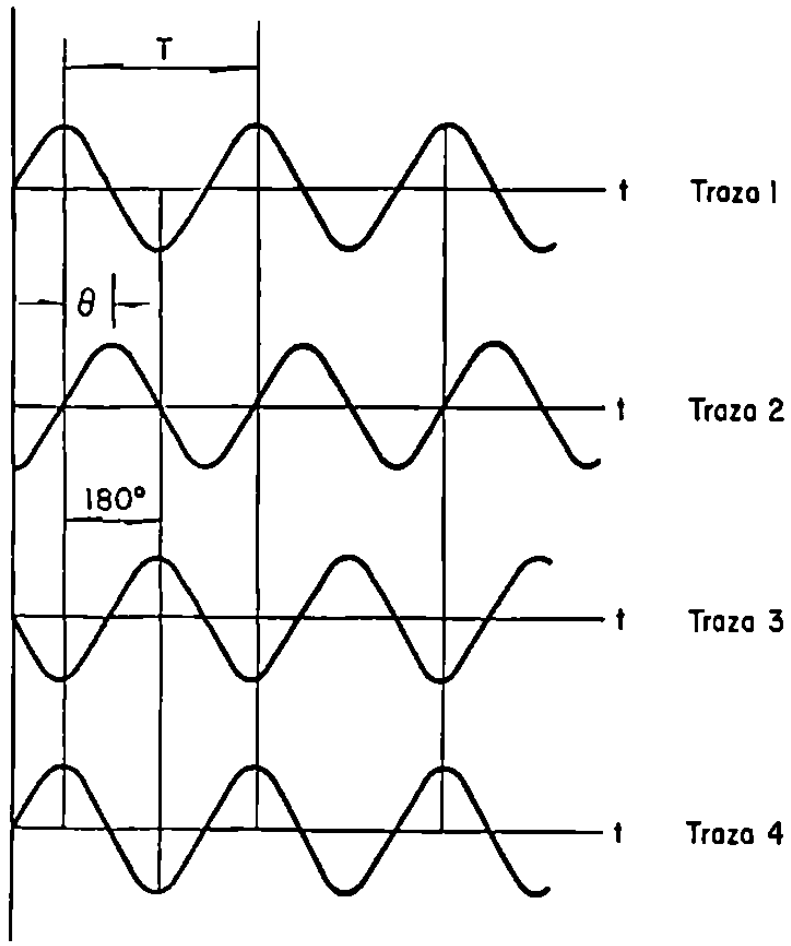


Fig. 3.14 Esquema para la Determinación de la Longitud de Onda

Con lo anterior queda determinada la longitud de onda L_r. La velocidad de onda Rayleigh V_r se puede calcular mediante la expresión:

$$V_r = L_r f \qquad (3\text{-}11)$$

La velocidad de la onda Rayleigh es aproximadamente igual a la velocidad de la onda de esfuerzo cortante V_s por lo tanto se puede escribir:

$$V_s = V_r = \sqrt{G/\rho} \qquad (3\text{-}12)$$

De la ecuación anterior se despeja el valor del módulo de rigidez G. La profundidad efectiva de la onda Rayleigh se ha estimado empíricamente por Ballard (1964) y resulta ser de ½ L_r. Esta profundidad constituye la principal desventaja del uso de esta técnica, además, se pueden presentar errores provocados por refracciones si se trata de un depósito estratificado.

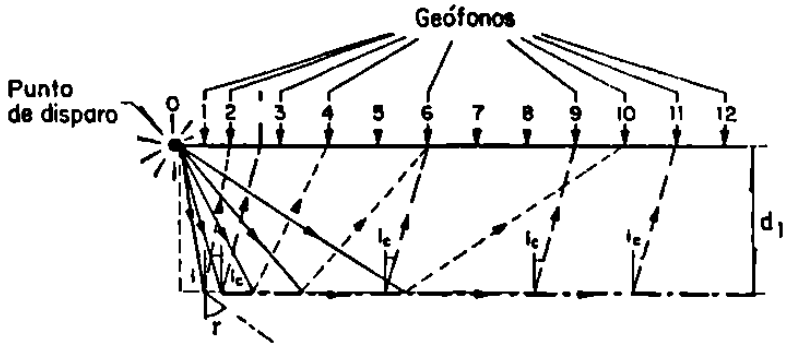
3.3.2 Ensaye de Refracción Sísmica.

Este ensaye 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.

La perturbación se puede provocar mediante explosivos (normalmente dinamitas gelatinosas) o mediante golpes con un martillo sobre placa de acero que se coloca sobre la superficie del terreno. El esquema general del ensaye se muestra en la figura 3.15 y consiste en colocar en la superficie del terreno una línea de geófonos, separados entre sí por una longitud media de 1 a 18 m. El punto de la perturbación se sitúa a una distancia igual a la escogida como la separación entre geófonos del primero de ellos.

El impacto genera ondas que se propagan en el terreno, el tiempo de llegada de estas ondas a los distintos geófonos se amplifican y se registran en un

oscilógrafo. El registro obtenido (fig. 3.15b) 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. Algunas ondas se propagan próximas a la superficie del terreno a una velocidad V_1; Otras cruzan la capa superior tanto hacia abajo como hacia arriba, en cierto ángulo crítico denominado ángulo de refracción. Debido a que las leyes de refracción de las ondas elásticas son semejantes a las de la refracción de la luz, existe semejanza en su terminología.



a) Colocación de geófonos

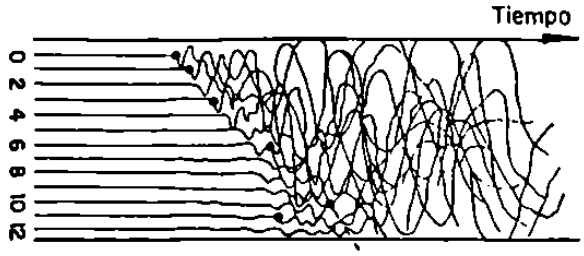


Fig. 3.15 Esquema del Ensaye de Refracción Sísmica

Para obtener la curva distancia versus 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 instante del impacto y el instante de llegada al geófono correspondiente. Al unir los puntos de intersección indican diferencia de velocidad de propagación de ondas elásticas, cuya magnitud se obtiene de la pendiente del tramo recto correspondiente. Las abscisas de los puntos de intersección están relacionadas directamente con el espesor de las distintas capas de suelo. La profundidad de exploración con este método es aproximadamente 10 veces la longitud del tendido total de geófonos.

Para obtener buenos resultados de la aplicación de este ensaye es necesario que exista contraste entre las propiedades de las capas de suelo investigadas. El contraste básico consiste en que las velocidades de propagación de las distintas capas aumenten con la profundidad. Con este ensaye se puede perder la detección de una capa de suelo blando, si ésta se encuentra entre dos capas de mayor velocidad de propagación.

Para el caso de tres capas de suelo, cada una con propiedades elásticas uniformes, la primera con un espesor d_1 y una velocidad V_1 la segunda y tercera con (d_2, V_2) y (d_3, V_3) respectivamente. Además, si se cumple la condición $V_3 > V_2 > V_1$, al producirse el impacto en el punto A de la superficie del terreno, la energía se transmite a partir de ese punto al primer geófono, colocado a una distancia x, siguiendo una trayectoria directa. Cuando el frente

de ondas choca contra la frontera de las dos capas, donde cambia la velocidad, la energía se refracta en la capa inferior de acuerdo con la ley de Snell.

La onda directa que se propaga desde el punto del impacto o explosión hasta el primer geófono tardará en llegar $T_1 = x/V_1$, dicho tiempo asociado a la distancia correspondiente están representados en la gráfica distancia-tiempo, por una línea recta que pasa por el origen y tiene una pendiente igual a $1/V_1$. Para una onda refractada, puede demostrarse que tardará en llegar:

$$T_2 = \frac{x}{V_2} + \frac{2d_1\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_1 V_2} \qquad (3\text{-}13)$$

En la gráfica distancia tiempo, esta expresión es la ecuación de una recta con pendiente igual a $1/V_2$ que corta el eje de las ordenadas en T_1, denominado tiempo de intercepción, cuya expresión es:

$$T_1 = 2d_1\sqrt{\frac{V_2^2 - V_1^2}{V_1 V_2}} \qquad (3\text{-}14)$$

Sustituyendo $T_1 = T_2 - x/V_2$ y despejándola la profundidad d_1:

$$d_1 = \frac{x_1}{2}\sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}} \qquad (3\text{-}15)$$

Ballard y McLean, (1975), nos proporcionan las siguientes expresiones:

$$d_2 = \frac{5}{6} d_1 + \frac{x_2}{2} \sqrt{\frac{V_3 - V_2}{V_3 + V_2}} \qquad (3\text{-}16)$$

$$d_3 = \frac{1}{6} d_1 + \frac{3}{4} d_2 + \frac{x_3}{2} \sqrt{\frac{V_4 - V_3}{V_4 + V_3}} \qquad (3\text{-}17)$$

donde

$d_{1,2,3}$ son los espesores de las capas.

$x_{1,2,3}$ son las distancias de la fuente a los puntos de cambio de pendiente

$V_{1,2,3}$ son las velocidades de propagación de las capas.

3.3.3 Ensaye de Resonancia Vertical.

El fundamento teórico de este tipo de ensaye está ubicado en el campo de la interacción suelo-estructura. Consiste en colocar, a una profundidad z sobre una base de concreto de las dimensiones indicadas en la figura 3.16, un vibrador mecánico o electromagnético y realizar un barrido de frecuencias para obtener la curva de frecuencia versus amplitud del movimiento (fig. 3.17), con objeto de determinar la frecuencia de resonancia f_R vertical, del sistema vibrador-cimentación-suelo.

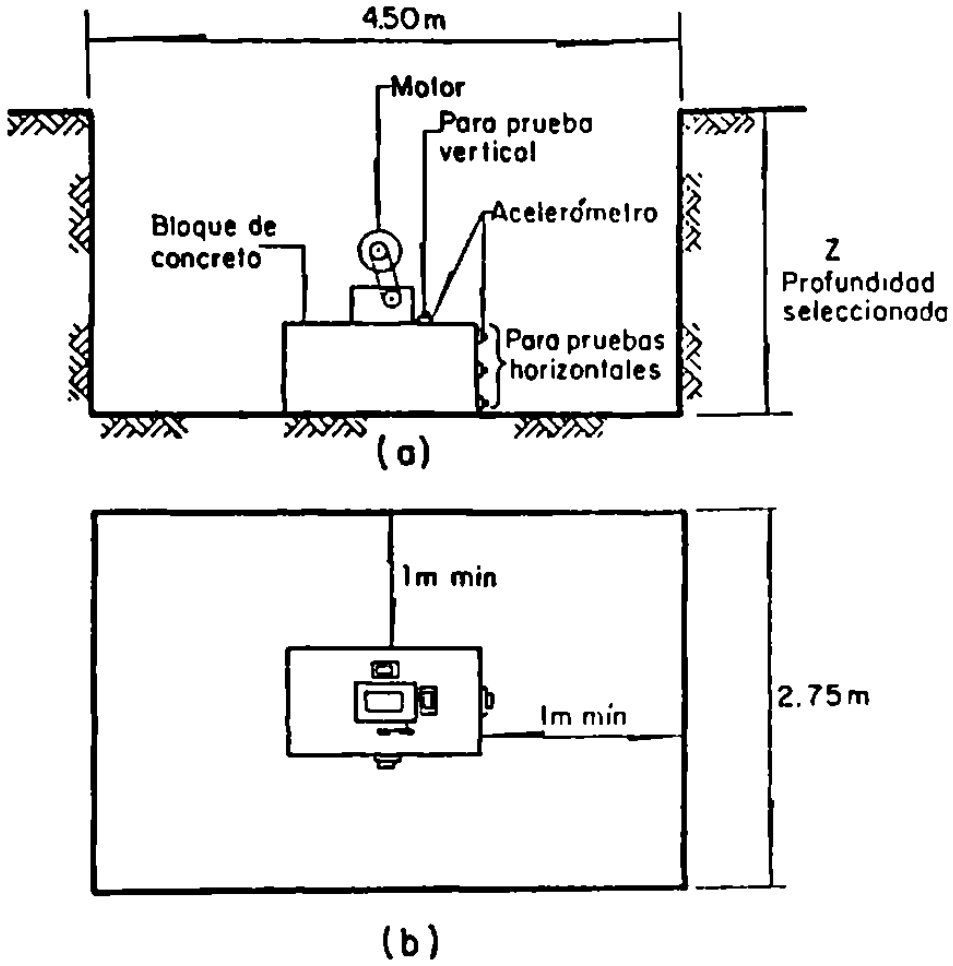


Fig. 3.16 Esquema para Ensaye de Resonancia

La base de concreto se instrumenta con acelerómetros que permitan medir la aceleración vertical producida por un estado estacionario de vibración.

De la teoría del semiespacio elástico se obtiene la expresión de la amplitud de vibración, A_z del sistema vibrador-bloque-suelo.

$$A_z = \frac{a_z}{4\pi^2 f^2} \qquad (3\text{-}18)$$

en donde:

a_z es la aceleración de vibración en mm/s^2

f es la frecuencia de vibración en Hertz

Barkan (1962) definió el coeficiente de compresión elástica C_u , según la expresión:

$$C_u = \frac{4\pi^2 f_R^2 M}{A_b} \qquad (3\text{-}19)$$

donde:

f_R frecuencia de resonancia en Hertz

M masa del bloque y vibrador

A_b área de contacto del bloque

El coeficiente C_u está relacionado con el módulo equivalente de Young E_{eq} mediante la expresión:

$$C_u = \frac{E_{eq}}{(1-\nu^2)} \frac{C_s}{\sqrt{BL}} \qquad (3\text{-}20)$$

donde:

υ Es la relación de Poisson.

B Es el ancho del área de contacto.

L Es la longitud del área de contacto.

C_s es un coeficiente en función de la relación L/B

Tabla 2 Valores de C_s (Barkan, 1962)

L/B	Cs
0.1	1.06
1.5	1.07
2.0	1.09
3.0	1.13
5.0	1.22
10.0	1.41

El amortiguamiento efectivo se puede determinar de la forma de la curva amplitud de desplazamiento versus frecuencia (fig. 3.17). Δ_f Define el ancho de la curva de respuesta para una amplitud igual a $A_{max}/\sqrt{2}$.

La fracción del amortiguamiento queda expresada por:

$$\zeta = \frac{\Delta f}{2 f_R} \qquad (3\text{-}21)$$

La mayor desventaja del ensaye de resonancia es la zona reducida de suelo que participa en el ensaye.

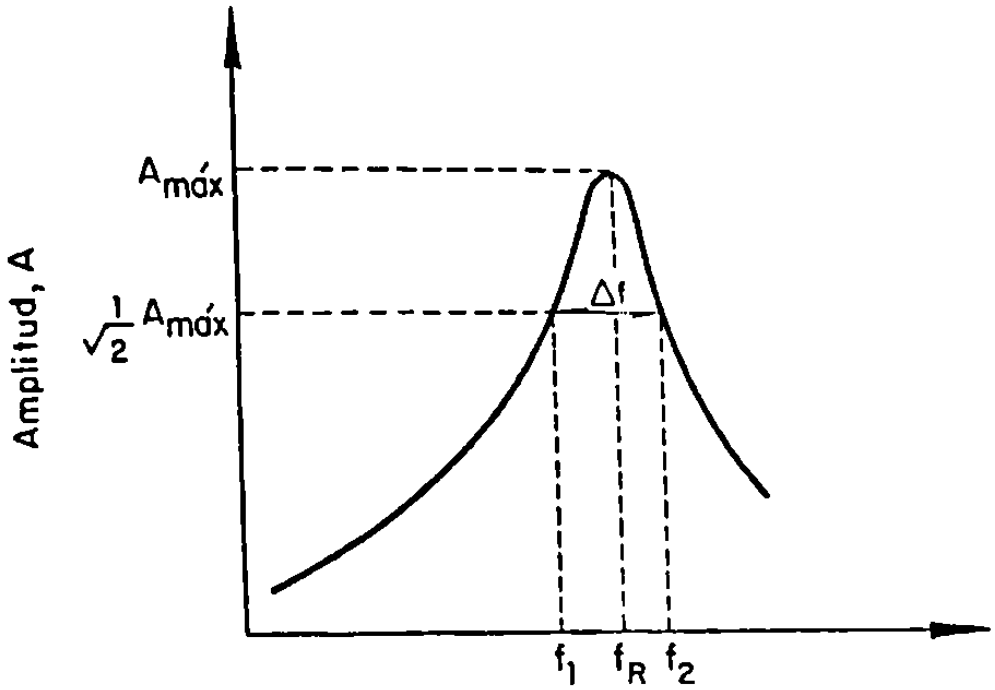


Fig. 3.17 Curva de Respuesta a la Frecuencia

3.3.4 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, con las dimensiones indicadas en la figura 3.16, un vibrador mecánico o electromagnético. Se realiza un barrido de frecuencias para obtener la curva frecuencia versus amplitud del movimiento (fig. 3.17), con objeto de determinar la frecuencia de resonancia horizontal del sistema vibrador-cimentación-suelo.

La base de concreto se instrumenta con acelerómetros, con sus ejes sensibles orientados en dirección horizontal, que produce un estado establecido de vibración horizontal.

La amplitud del movimiento horizontal A_h está expresada por:

$$A_h = \frac{a_h}{4\pi^2 f^2} \qquad (3\text{-}22)$$

donde:

a_h es la aceleración horizontal en mm/s^2

f es la frecuencia de vibración en Hertz.

El coeficiente de cortante elástico C_τ se expresa por:

$$C_\tau = \frac{8\pi^2 \gamma f_R^2}{(A_0 + I_0) \pm \sqrt{(A_0 + I_0) - 4\gamma A_0 I_0}} \qquad (3\text{-}23)$$

donde:

$\gamma =$ Mm/Mm$_0$

f_R = Es la frecuencia de resonancia en Hertz.

A_0 = A/M

I_0 = 3.46 (I/Mm$_0$)

Mm = Momento de inercia del bloque y vibrador alrededor del eje que pasa por el centro de gravedad del bloque y perpendicular a la dirección de vibración.

Mm_0 = Momento de inercia del bloque y vibrador alrededor del eje que pasa por el centro del área de contacto y perpendicular a la dirección del movimiento.

I =Momento de inercia del área de contacto alrededor del eje que pasa por el centro de gravedad del área de contacto y perpendicular a la dirección de vibración.

A partir del coeficiente C_r se puede obtener el módulo de rigidez al esfuerzo cortante G. Asimismo, el amortiguamiento efectivo se determina a partir de la curva de respuesta a la frecuencia (fig. 3.17) como se explicó para el ensaye de resonancia vertical.

3.3.5 Ensayes Up-hole y Down-hole.

Estos ensayes 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.

Para llevar a cabo los ensayes es necesario la realización de un sondeo. En la figura 3.18, se muestra esquemáticamente la colocación de la fuente y el receptor. Si la fuente se coloca en la superficie y el receptor en el interior del sondeo, a la profundidad de exploración, las ondas generadas viajarán hacia abajo y el ensaye recibe el nombre de down-hole (fig. 3.18a). Si por el contrario

la fuente se coloca en el interior del sondeo y el receptor en la superficie, el ensaye se conoce como up-hole (fig. 3.18b).

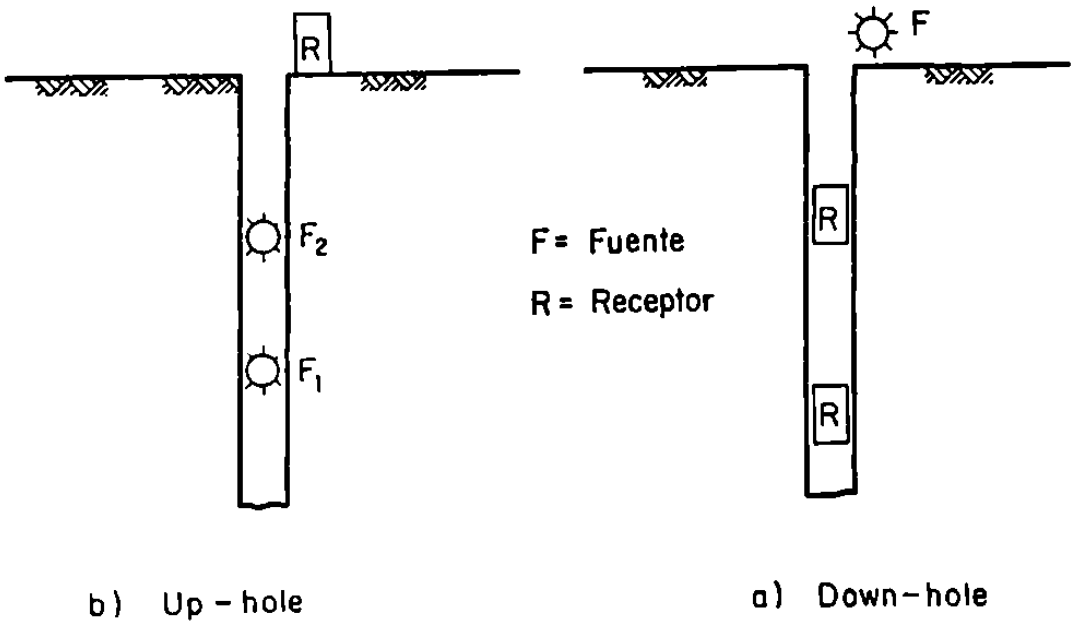


Fig. 3.18 Ensayes Down-hole y Up-hole

El procedimiento down-hole consiste en perforar un sondeo de 7.6 cm de diámetro hasta la profundidad de exploración requerida y proceder a colocar un ademe poco rígido. Se cuela un pequeño bloque de concreto de aproximadamente 0.6 m de lado, como se muestra en la figura 3.19.

Se coloca a la profundidad z un geófono de tres componentes dentro del sondeo y se acuña contra el ademe. El impulso se logra mediante el golpe, con un martillo de 4.5 Kg de peso al bloque de concreto. El impacto genera ondas de cuerpo. En un osciloscopio con memoria se registra la traza del impacto y las trazas de llegada de las ondas del geófono. El procedimiento se repite de cada 1.5 a 3 m, hasta la profundidad final.

Si se conoce el tiempo requerido para que la onda viaje desde el punto de la 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 cortante V_s. Debe tenerse presente que el ensaye mide la velocidad de propagación promedio.

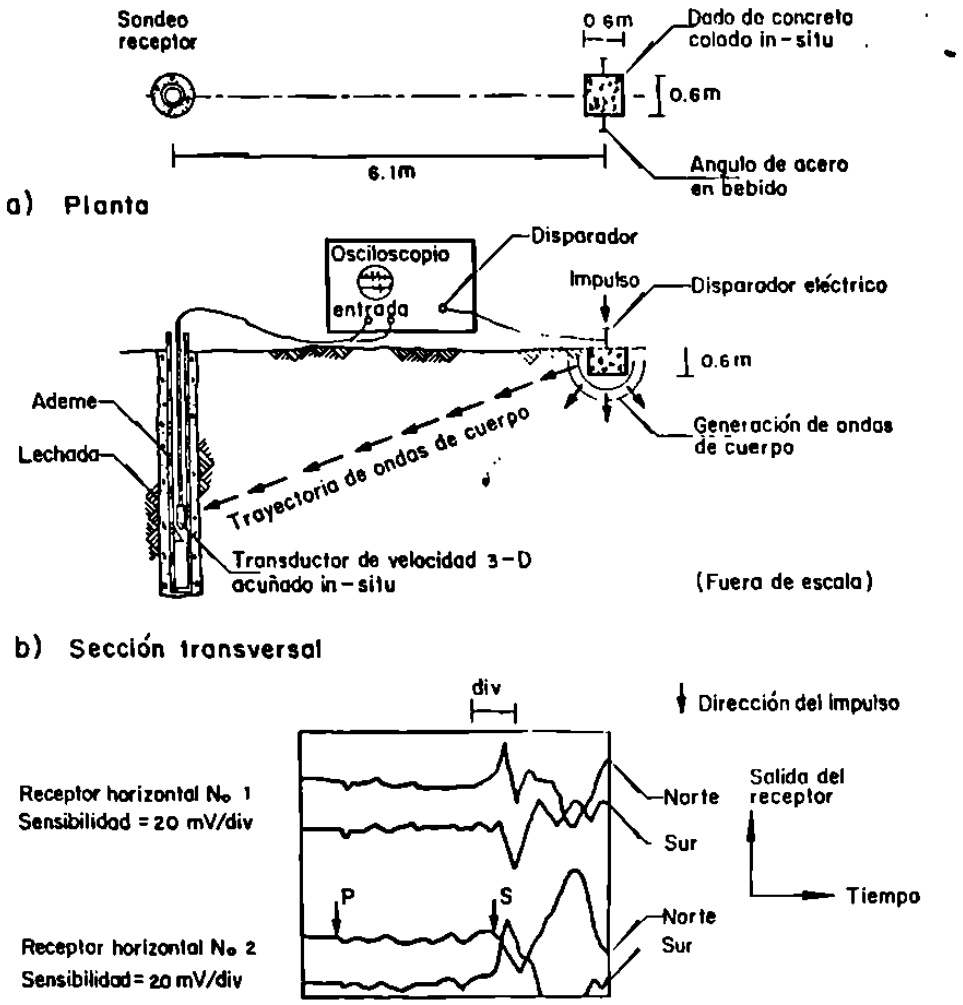


Fig. 3.19 Ensaye Sísmico Down-hole (Hoar y Stokoe, 1978)

La interpretación de los registros obtenidos requiere experiencia ya que desafortunadamente se generan dos tipos de ondas (compresionales y de esfuerzo cortante) lo que hace difícil la interpretación de los registros. Sin embargo, debido a que las ondas compresionales llegan primero a la estación de registro y que es posible cambiar el sentido de las ondas de cortante. También es posible realizar dos ensayes en los cuales el arribo de la onda compresional permanezca sin cambio en tanto que la llegada de la onda cortante se encuentra desfasada 180^0 , y esto lleva a su identificación; Hoar y Stokoe (1978) describen con detalle la forma de interpretación de los registros. El intervalo de deformaciones de este tipo de ensayes está comprendido entre 10^{-1} % y 10^{-3} %.

La principal desventaja de los ensayes down-holes y up-hole es la rápida atenuación de la energía con la profundidad.

3.3.6 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 o S) para puntos colocados a la misma profundidad (fig. 3.20). Para llevar a cabo el ensaye es necesario la realización de un mínimo de dos sondeos, uno de los cuales se utiliza como sondeo fuente y el otro como sondeo receptor.

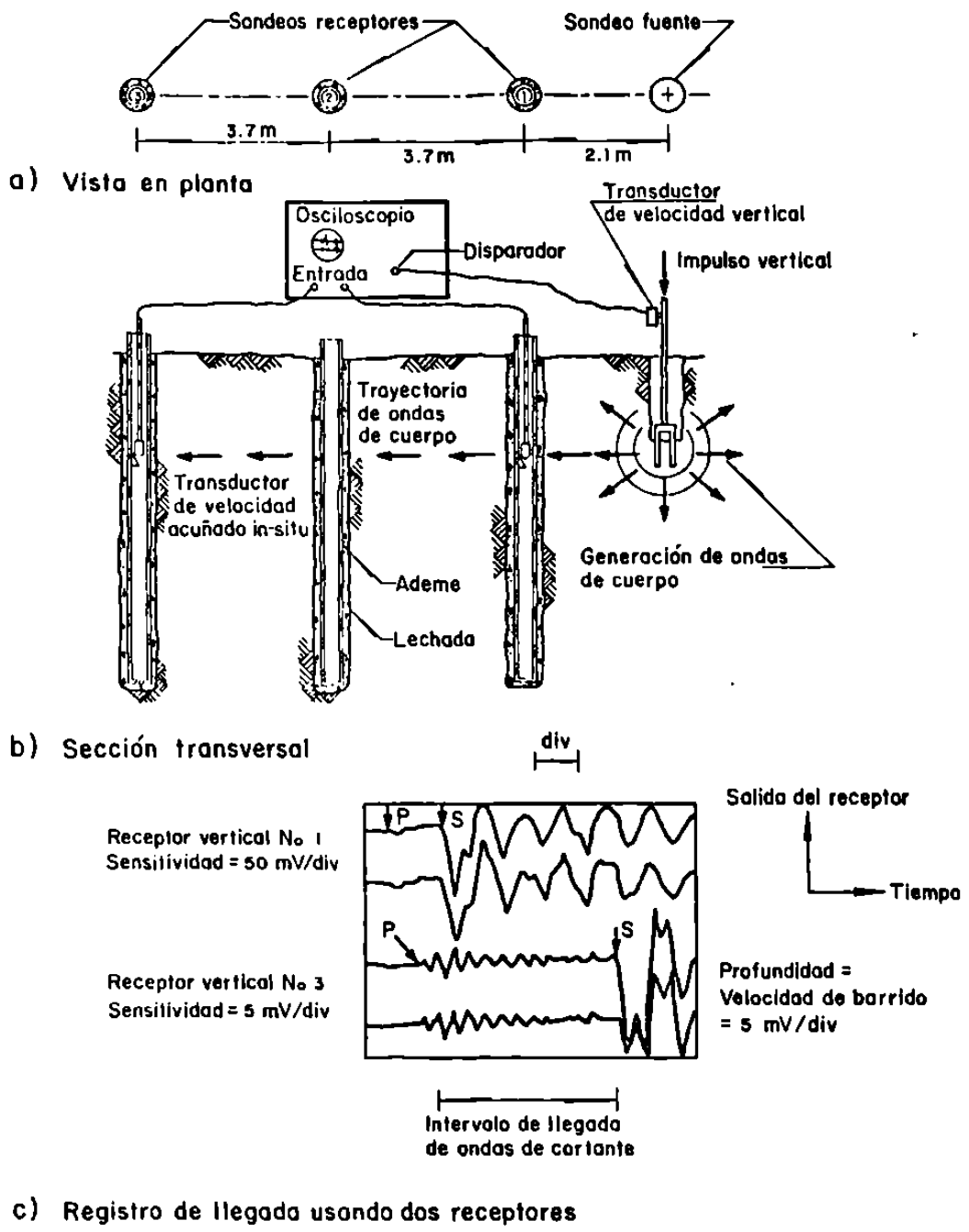


Fig. 3.20 Ensaye Sísmico Cross-hole (Hoar y Stokoe, 1978)

Los sondeos se deben ademar varios días antes de la realización del ensaye con objeto de lograr un buen contacto entre la pared exterior del ademe y el suelo. El material del ademe puede ser aluminio o plástico. El diámetro del

ademe no debe ser menor de 7.6 cm para permitir la colocación de geófonos, los cuales deberán acuñarse contra el ademe.

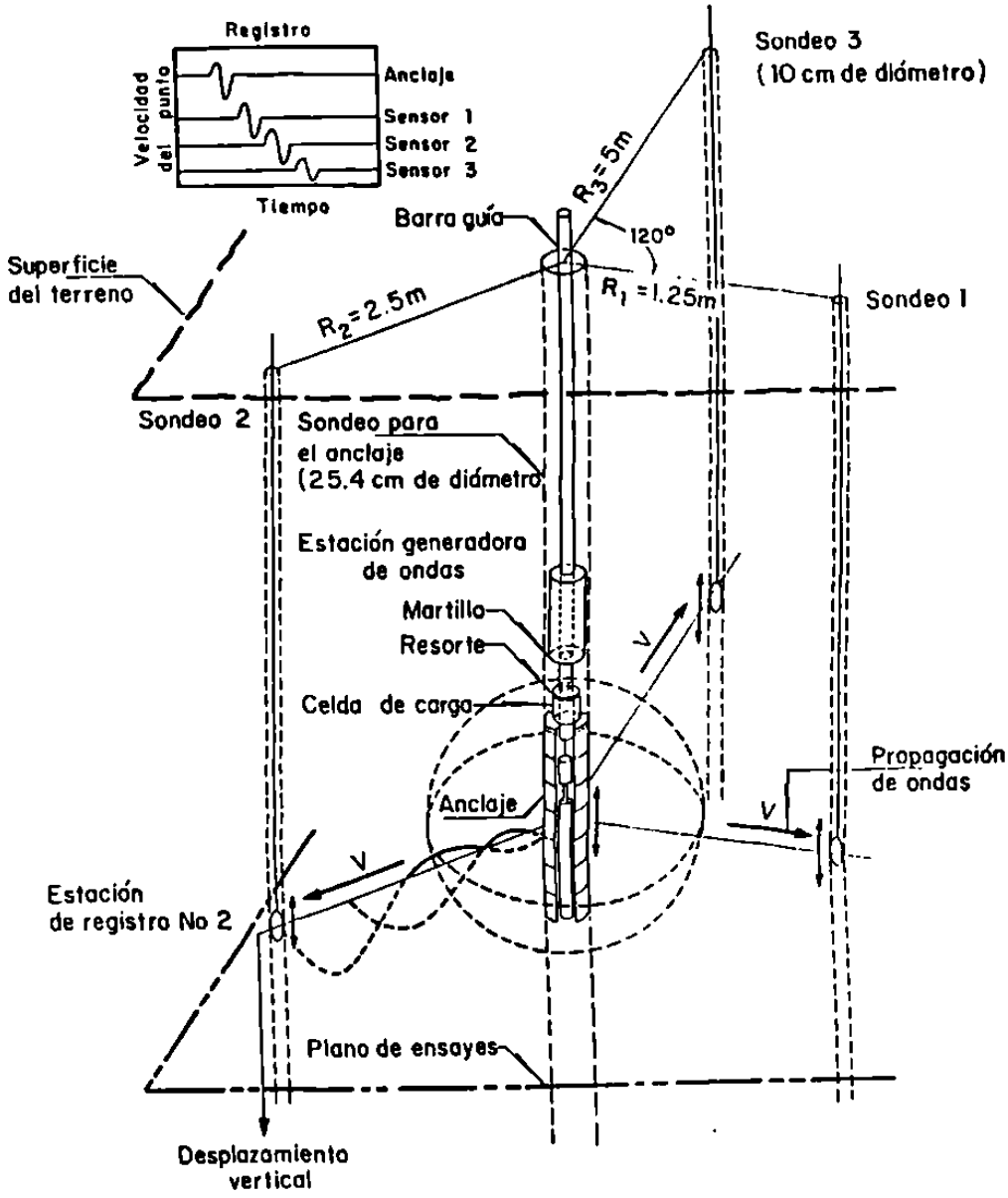


Fig. 3.21 Representación Esquemática de un Ensayo de Impulso in-situ

La perturbación en el sondeo fuente se puede realizar mediante el penetrómetro del ensaye de penetración estándar (SPT). Un transductor de velocidad vertical se coloca en la barra de perforación. Cada vez que el martillo de 63.5 Kg de peso golpea el penetrómetro, produce una señal eléctrica que

dispara el osciloscopio, al mismo tiempo se dispara el registro de las trazas de los geófonos receptores que se encuentran colocados a la misma profundidad de la perturbación.

La figura 3.21 ilustra un ensaye cross-hole en el que se puede variar el nivel de deformación variando la energía que se aplica mediante el impacto de un martillo de 68 Kg de peso, en un anclaje expandible fijo a las paredes del sondeo fuente. Este tipo de ensaye tiene la ventaja de generar predominantemente ondas de cortante.

METODOS PARA DETERMINAR PARAMETROS EN SUELOS SOMETIDOS A CARGA CICLICA
(Módulo de Young E, Módulo de Corte G, Porcentaje de Amortiguamiento ζ)

Ensayo	Rango de frecuencia f (Hertz)	Rango de deformación angular γ (%)	Rango de velocidad de deformación angular (1/seg)
Triaxial cíclico (L)	0.2 - 5	10^{-2} - 5	$0.8x10^{-4}$ - 1
Corte simple cíclico (L)	0.2 - 5	10^{-2} - 5	0.8x10-4 - 1
Torsión cíclica (L)	0.2 - 5	10^{-2} - 5	0.8x10-4 - 1
Columna Resonante (L)	50 - 200	10^{-4} - 10^{-2}	$2x10^{-4}$ - $8x10^{-2}$
Refracción sísmica (C)	20 - 100	10^{-4} - 10^{-3}	$0.8x10^{-4}$ - $0.4x10^{-2}$
Cross-hole, Down hole y Up hole (C)	20 - 100	10^{-4} - 10^{-3}	$0.8x10^{-4}$ - $0.4x10^{-2}$
Vibración forzada en bloques o placas (C)	< 50	10^{-3} - 10^{-1}	< $2x10^{-3}$ - < $2x10^{-1}$
Ensayo de placa cíclico (T)	< 0.1	10^{-2} - 5	< $0.4x10^{-4}$ - < $2x10^{-2}$
Vibración forzada en placa atornillada (C)	< 50	10^{-3} - 10^{-1}	$2x10^{-3}$ - $2x10^{-1}$
Presiómetro dinámico (C)		10^{-2} - 10^{-1}	
Solicitaciones en: Máquinas	3.0 - 50	10^{-4} - 10^{-3}	$1.2x10^{-5}$ - $2x10^{-3}$
Sismos con foco transcursivo	3.0 - 5		
Sismos con foco subductivo	10.0 - 15	Depende del suelo, solicitaciones de interacción suelo-estructura, etc.	
Olas	< 0.2		

Los rangos expuestos en la tabla corresponden a valores típicos pudiendo variar según sean las modificaciones especiales introducidas en los equipos de ensaye. Las frecuencias de los sismos corresponden a valores predominantes en suelos duros a distancias epicentrales no superiores a 300 km y para eventos con magnitud Richter > 7.
(L) = Laboratorio ; (C) = Campo ;

CAPITULO 4

ANALISIS DE VIBRACIONES

4.1 Modos de Vibración de una Cimentación en Bloque

Se puede asumir que una cimentación en bloque se desplaza como un cuerpo rígido, por consiguiente, bajo la influencia de fuerzas y momentos superpuestos, un bloque de concreto rígido puede vibrar en seis diferentes modos (fig. 4.1).

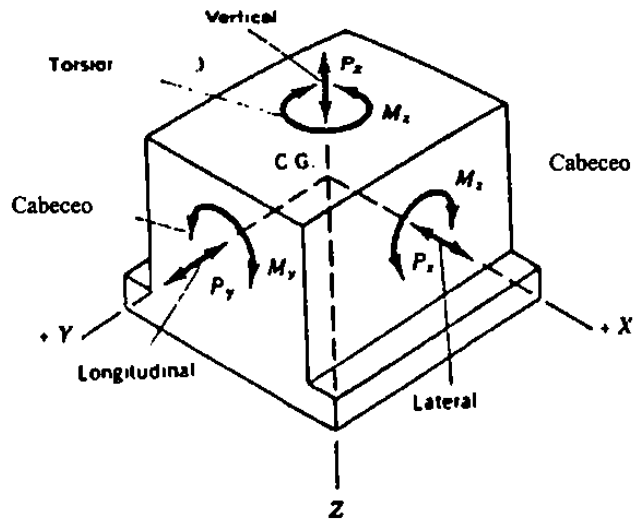


Fig. 4.1 Modos de Vibración de una Cimentación en Bloque

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)

Cualquier movimiento del bloque puede ser resuelto dentro de estos seis desplazamientos; entonces, el bloque tiene seis grados de libertad o modos de vibrar y seis correspondientes frecuencias naturales. De los seis modos, el traslacional a lo largo del eje Z y la rotación alrededor del eje Z pueden ocurrir independientemente de cualquier otro movimiento; sin embargo, la translación a lo largo de los ejes Y o X y la correspondiente rotación alrededor de los ejes X o Y, respectivamente, siempre ocurren juntas y se llaman modos acoplados. De tal forma que, en el análisis de cimentaciones de bloque, se consideran cuatro tipos de movimientos; de los cuales dos (la translación a lo largo del eje Z y la rotación alrededor del eje Z) son independientes, y los otros dos (la translación a lo largo del eje X y la rotación alrededor del eje Y y viceversa) son acoplados y ocurren simultáneamente.

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

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

El método que se estudiará en este capítulo será el del semi-espacio elástico, ya que es uno de los más usados en la práctica.

El método del semi-espacio elástico idealiza la cimentación de la maquinaria como un oscilador mecánico vibrando con una base circular apoyada en la superficie del suelo. El suelo se asume que es un cuerpo semi-infinito, isótropo, homogéneo y elástico, el cual es referido como el semi-espacio elástico.

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) de 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 en 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. 4.2.

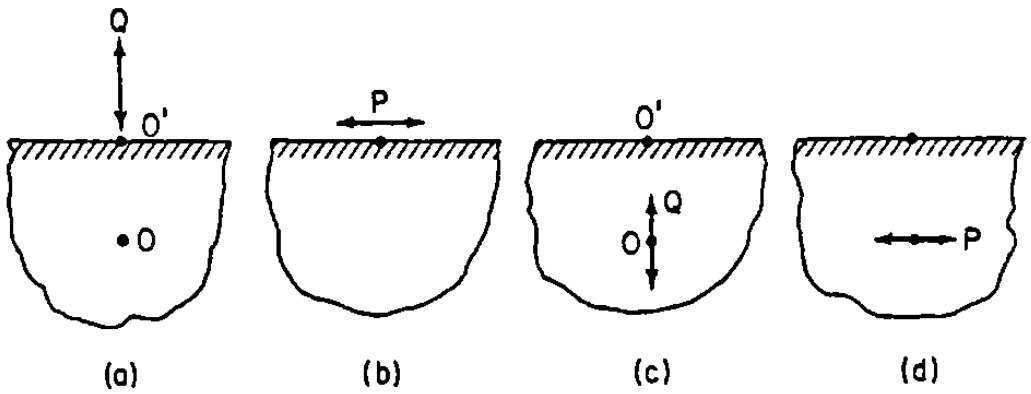


Fig. 4.2 Problemas de Lamb para Fuerza Oscilatoria en Estado Continuo o Carga por Pulsación en un Punto o a lo Largo de una Línea.

Lamb también demostró cómo una serie de fuerzas verticales periódicas, con diferentes frecuencias, pueden ser combinadas y remplazadas por una fuerza sencilla aplicada en la superficie.

4.2 Modo Translacional

4.2.1 Vibración Vertical.

Reissner (1936). - Durante el principio de 1930, la Sociedad Alemana de Investigación de Mecánica de Suelos investigó el uso de osciladores mecánicos para evaluar las propiedades del suelo en el campo. Debido a esto, E. Reisssner intentó realizar una teoría para evaluar la respuesta dinámica de una cimentación con vibración tal como fue usado para las propiedades del suelo. Él seleccionó el semi-espacio elástico para representar la masa de suelo. Los parámetros necesarios para describir las propiedades del cuerpo elástico fueron el módulo de corte G, la relación de poisson υ y la densidad de la masa

ρ. La cimentación fue representada por una masa oscilatoria la cual produce una presión vertical periódica distribuida uniformemente sobre un área circular de radio r_o, en la superficie del semi-espacio.

Con el modelo matemático del semi-espacio elástico, Reissner desarrolló una solución analítica para el desplazamiento vertical periódico z_o, en el centro del área circular cargada de la superficie. Obtuvo esta solución por integración de la solución de Lamb (1904) sobre un área circular. El desplazamiento vertical es expresado por:

$$z_0 = \frac{P_o e^{i\omega t}}{G r_o} f = \frac{P_o e^{i\omega t}}{G r_o}(f_1 + i f_2) \qquad (4\text{-}1)$$

en donde:

P_o = Amplitud de la fuerza total aplicada en el área circular de contacto.

ω = Frecuencia circular de la fuerza (rad/seg.).

G = Módulo dinámico del esfuerzo cortante del medio.

r_o = Radio del área circular de contacto.

f_1, f_2 = Funciones de desplazamiento de Reissner.

En la anterior ecuación tanto el desplazamiento como la fuerza son positivos en la dirección hacia abajo. Las expresiones para f_1, f_2 son funciones complicadas de la relación de poisson y de un término dimensional de frecuencia a_o, descrito por: