



RAFAEL HORACIO CORONADO FLORES

**Principios de Diseño de Cimentación
de Maquinaria Industrial**

UB
T(215)
c. 2

Guatemala, Julio de 1970.

BIBLIOTECA CENTRAL-USAC
DEPOSITO LEGAL
PROHIBIDO EL PRESTAMO EXTERNO

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, Centro América

PRINCIPIOS DE DISEÑO DE CIMENTACION DE
MAQUINARIA INDUSTRIAL

TESIS

Presentada a la Junta Directiva
de la
Facultad de Ingeniería
de la
Universidad de San Carlos de Guatemala

por

RAFAEL HORACIO CORONADO FLORES

Al conferírsele el título de

INGENIERO CIVIL

BIBLIOTECA CENTRAL-USAC
DEPOSITO LEGAL
PROHIBIDO EL PRESTAMO EXTERNO

Guatemala, Junio de 1970

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

Biblioteca Central

DL
OB
T(157)C

JUNTA DIRECTIVA
DE LA
FACULTAD DE INGENIERIA
DE LA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

Decano: Ing. Amando Vides Tobar
Vocal Primero: Ing. Marco Antonio Cuevas
Vocal Segundo: Ing. Rodolfo González M.
Vocal Tercero: Ing. Adolfo Behrens
Vocal Cuarto: Br. Alfredo Bonatti
Vocal Quinto: Br. Eliseo Osorio R.
Secretario: Ing. Héctor Centeno B.

TRIBUNAL QUE PRACTICO EL EXAMEN
GENERAL PRIVADO

Decano: Ing. Amando Vides Tobar
Examinador: Ing. Rodolfo Koenigsberger
Examinador: Ing. Rafael Pérez Riera
Examinador: Ing. Luis Felipe Mérida
Secretario: Ing. Héctor Centeno B.

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que la Ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala establece, presento a vuestra consideración mi trabajo de tesis titulado:

**PRINCIPIOS DE DISEÑO DE CIMENTACION DE
MAQUINARIA INDUSTRIAL**

Tema que me fue asignado por la Junta Directiva de la

FACULTAD DE INGENIERIA

CONTENIDO

1. INTRODUCCION	i
2. TEORIA DE VIBRACIONES EN CIMENTACION DE MAQUINARIA	1
2-1. VIBRACIONES VERTICALES	1
2-2. VIBRACIONES ROTACIONALES DE CIMENTACION	6
2-3. VIBRACIONES DE ESFUERZO CORTANTE PURO	9
2-4. VIBRACIONES DE CIMENTACIONES DE ROTACION SIMULTANEA, DESLIZAMIENTO Y DESPLAZAMIENTO VERTICAL	10
3. GENERALIDADES PARA EL DISEÑO DE CIMENTACIONES	17
3-1. VALORES DEL DISEÑO DE AMPLITUD PERMISIBLE DE CIMENTACIONES DE VIBRACION	17
3-2. CIMENTACIONES PARA MAQUINAS QUE PRODUCEN CARGAS DE IMPAC-	

TO	22
3-3. CIMENTACIONES MASIVAS	29
4. DISEÑO DE CIMENTACIONES	33
4-1. INTRODUCCION AL DISEÑO	33
4-2. SIMBOLOGIA	33
4-3. PROBLEMA	36
4-4. PROBLEMA	45
5. EFECTOS EN LAS ESTRUCTURAS DEBIDO A LAS VIBRACIONES PRODUCIDAS POR MAQUINAS CERCANAS A ELLAS	61
5-1. GENERALIDADES	61
6. CONCLUSIONES	65
7. BIBLIOGRAFIA	67

I INTRODUCCION

Guatemala es un país que cada día tiende más a industrializarse, requiriendo por lo mismo de diferentes tipos de maquinaria. Por lo tanto, del tipo de maquinaria, dependerá la cimentación que se use, para evitar que las vibraciones transmitidas de la máquina a la cimentación y estas a su vez a los lugares cercanos, puedan repercutir en personas, estructuras y en la misma máquina.

Los principios que rigen el diseño de cimentación de maquinaria, a pesar de que tienen varios años de estudio no han logrado llegar a la fase de reglamentar especificaciones puesto que existen muchos factores por los cuales, no se ha podido estandarizar los principios, reglamentos y codificaciones para el diseño. Razón por la cual, el presente trabajo está basado en experiencias teóricas, la mayoría de ellas obtenidas en otros países.

Cuando se inicia el diseño de una cimentación, es importante analizar el tipo de vibraciones a que estará sujeto, pues éstas pueden ser vibraciones verticales, rotacionales, de esfuerzo cortante puro o combinadas, y para cada caso la cimentación trabaja como un cuerpo rígido y el suelo como un medio semi-elástico.

La finalidad del presente trabajo ha sido generalizar algunos principios que se han considerado de interés, pues actualmente en nuestro medio no se encuentra literatura técnica referente al diseño de cimentaciones de maquinaria. Por lo tanto es de esperar que tenga alguna utilidad, ya sea como ilustración, ó como una motivación para aque

ii

Las personas que deseen profundizar en el tema.

2 TEORIA DE VIBRACIONES EN CIMENTACION DE MAQUINAS

2-1 VIBRACIONES VERTICALES

A) CONSIDERACIONES BASICAS

En general, la investigación de vibraciones en cimentaciones masivas sobre superficies de suelo, se puede reducir a la investigación de vibraciones de un bloque sólido apoyado sobre un medio elástico semi-infinito. Por lo tanto han sido necesarias varias consideraciones simplificadas concernientes a la vibración de bloques sólidos construidos sobre el suelo.

Primero que todo, se supone que hay una relación lineal entre la reacción del suelo sobre una cimentación vibrando y el desplazamiento de dicha cimentación. Después, la relación entre el desplazamiento y la reacción se determinará en términos de los coeficientes de elasticidad uniforme y compresión no uniforme, así como un coeficiente de corte elástico. Estos coeficientes dependen de las propiedades elásticas del suelo y del tamaño establecido de la cimentación; además, es necesario estimar, que el suelo sobre el cual descansa la cimentación no tiene propiedades de inercia, sino sólo las propiedades elásticas que describen los coeficientes. Estas consideraciones concernientes a cimentaciones y suelos hacen posible, de una manera general, el análisis de vibraciones en cimentaciones como un problema de cuerpos sólidos que descansan sobre resortes sin peso, sirviendo estos últimos como un modelo de suelo.

Frecuentemente, las cimentaciones de maquinaria son encajadas dentro del suelo a una determinada profundidad. En este caso, las reacciones elásticas del suelo no actúan solamente a lo largo de la superficie de contacto horizontal entre el suelo y la cimentación, sino también en las superficies laterales de la cimentación. Estas reacciones podrían tener efectos considerables en la frecuencia de vibraciones libres de la cimentación y en el coeficiente de amortiguamiento. Sin embargo, las reacciones a lo largo de las superficies laterales de la cimentación tienen efectos considerables en la amplitud de vibraciones tanto libres como forzadas bajo condiciones cercanas al período de resonancia.

Es difícil, evaluar el efecto de las reacciones laterales en la vibración de una cimentación. Este efecto es tentativamente tomado en cuenta, en el cálculo del diseño aumentando los valores de los coeficientes de elasticidad de la base. Por ejemplo, este método es aplicado en el cálculo de cimentaciones de martinete de fragua. Si un cimiento sufre solamente vibraciones forzadas (cimentaciones de maquinaria con vaivén), y los valores de diseño de las frecuencias de vibraciones naturales de estas cimentaciones son más grandes que la frecuencia de rotación de operación de la máquina, entonces el efecto de las reacciones es relativamente pequeño y puede ser despreciado.

En estos casos, despreciar la reacción anterior del suelo es conservadora, ya que resulta una estabilidad en un diseño dinámico menor que la estabilidad actual.

B) VIBRACIONES VERTICALES DE CIMENTACIONES DESPRECIANDO EL EFECTO DE AMORTIGUAMIENTO DE LAS REACCIONES DEL SUELO

Se deberán considerar las vibraciones de la cimenta-

tación causadas por fuerzas verticales las cuales varían con el tiempo. Se estima que el centro de masa de la cimentación y de la máquina y el centroide del área de la cimentación en contacto con el suelo se encuentran en una línea vertical, la cual coincide con la dirección de acción de la fuerza excitante. En este caso, la cimentación experimentará solamente vibraciones verticales, ya que se ha estimado que la cimentación es un cuerpo absolutamente rígido. Por lo tanto, su desplazamiento se determina por el desplazamiento del centro de gravedad. Como se mencionó anteriormente, las resultantes sin peso sirven como un modelo del suelo. Por lo tanto, el problema de vibraciones verticales de una cimentación se reduce a la investigación de las vibraciones de una masa centrada que descansa sobre un resorte, figura 2-1

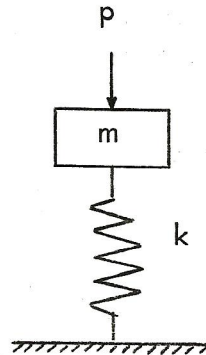


Figura 2-1 Vibración de una masa apoyada sobre un resorte

Con fuerza excitante, la frecuencia de ésta es mayor en comparación con la frecuencia natural, induciendo fuerzas de vibración de valor infinitesimal. Esta conclusión es usada particularmente como guía principal para el

diseño de maquinaria aislada de vibraciones, para el aislamiento de máquinas y motores. Cuando la frecuencia excitante está dada, el diseño para aislar a una máquina o un motor debe ser hecha en tal forma que la frecuencia de las vibraciones naturales de la maquinaria deben ser lo más pequeña posible en comparación con la frecuencia excitante, por ejemplo la frecuencia de oscilación causada por el tránsito. Las cimentaciones de maquinaria con vaivén generalmente son diseñadas de tal forma que la frecuencia natural de la cimentación sea mayor que la frecuencia operacional de la máquina (relación de frecuencia menor que uno.) Si se incrementa la masa del cimientto sin cambiar el área, la frecuencia natural de vibración decrecerá por lo tanto y la relación de frecuencias aumentará, hay otras condiciones iguales, si se incrementa la altura del cimientto se incrementará la amplitud de la fuerza de vibración. Esta es la razón por la que las cimentaciones modernas de maquinaria, especialmente las de maquinaria de vaivén, son diseñadas con base grande y altura pequeña.

C) VIBRACIONES VERTICALES DE CIMENTACIONES, CONSIDERANDO EL EFECTO DE AMORTIGUAMIENTO DE LAS REACCIONES DEL SUELO

Como se menciona en la discusión anterior, bajo condiciones de resonancia, la amplitud de vibraciones afectadas, teóricamente alcanzan el infinito. Sin embargo, esto contradice la información experimental que demuestra que bajo condiciones de resonancia la amplitud de las vibraciones aun se mantiene finita. Esta contradicción entre la experiencia y la teoría se explica por el hecho de que la amplitud de las vibraciones de la cimentación es afectada. Por la diferencia entre las propiedades mecánicas del terreno y las de un cuerpo elástico ideal. Como cualquier cuerpo real, el terreno se diferencia de un modelo idealizado

representado por un sólido idealmente elástico. Esta diferencia de las propiedades del terreno de aquellas de un sólido idealmente elástico, pueden ser tomadas en cuenta si se asume que la reacción del terreno depende no solamente del desplazamiento de la cimentación, sino también de su velocidad. En vista de que las velocidades de las vibraciones de la cimentación son más bien bajas, puede tomarse como una primera aproximación, que las reacciones de amortiguamiento del terreno son proporcionales a la primera fuerza de velocidad de vibración.

D) EL EFECTO DE LA INERCIA DEL SUELO SOBRE LAS VIBRACIONES VERTICALES AFECTADAS EN LAS CIMENTACIONES

La teoría anterior de vibraciones verticales de cimentaciones está basada en la hipótesis de que las reacciones del terreno pueden ser representadas por resortes sin peso caracterizados por el coeficiente k . Este modelo varía considerablemente de las propiedades reales del terreno. Por lo tanto, los resultados obtenidos deben considerarse únicamente como una primera aproximación. Como se estableció anteriormente, una solución exacta al problema de las vibraciones verticales de las cimentaciones, apoyadas en suelos, necesita una consideración del problema de vibraciones de un sólido apoyado sobre una base elástica, el cual en el caso más simple, presenta un medio elástico semi-infinito.

Aun, un suelo idealmente elástico tiene un efecto de amortiguamiento en la amplitud de las vibraciones de las cimentaciones. Esto es explicado por el hecho que la energía de la vibración de la cimentación, debido a su propagación en el suelo, es continuamente disipada; por lo tanto las vibraciones de las cimentaciones, aun si están co

locadas sobre un medio idealmente elástico representan una masa elástica semi-infinita, siendo amortiguadas por el tiempo.

Lo mencionado anteriormente tiene relación con el efecto de la inercia del suelo en cimentaciones o locadas sobre la superficie del suelo. Donde la cimentación está a cierta profundidad, el suelo actúa no sólo en la base de la cimentación sino también en los lados de la misma, donde puede haber un efecto considerable de la inercia del suelo.

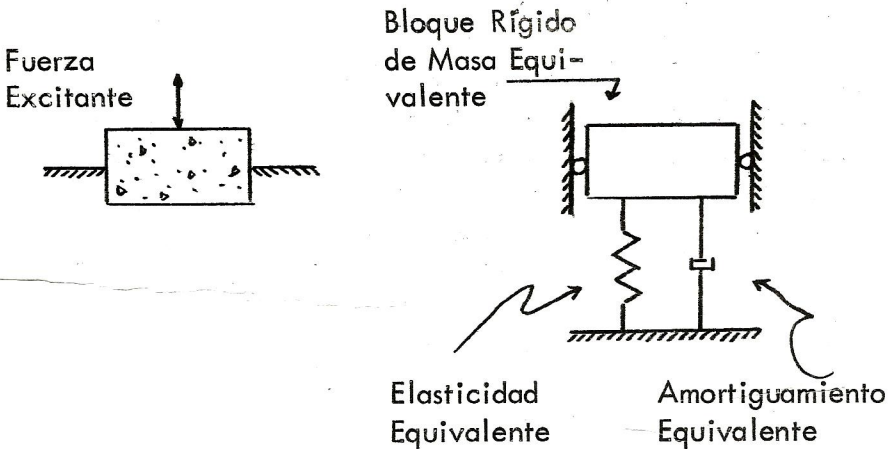


Figura 2-2 Sistema Típico Equivalente

2-2 VIBRACIONES ROTACIONALES DE CIMENTACIONES

Considerando las vibraciones de la cimentación pro-

ducidas por un momento exterior rotacional, el cual cambia con el tiempo, de acuerdo con la función $M \sin \omega t$ y esta a su vez se apoya en uno de los principales planos de la cimentación, se asume que, el centro de inercia de la masa de la cimentación y el centroide de su área de base horizontal, se apoya en una línea vertical localizada en el plano de un momento rotacional.

Asumiendo seguidamente que la resistencia elástica del suelo contra el deslizamiento de la cimentación es tan grande en comparación con la resistencia de la cimentación contra la rotación, que ésta puede considerarse infinitamente grande.

En este caso, el movimiento inducido por un momento externo $M \sin \omega t$ será una rotación alrededor del eje pasando por el centroide del área de la cimentación en contacto con el suelo, perpendicular al plano de vibraciones.

La posición de la cimentación es determinada por una variable independiente: el ángulo ϕ de rotación de la cimentación alrededor del eje 0 Figura 2-3.

Después se asume que en un cierto instante la cimentación tiende a girar un ángulo ϕ alrededor del eje de las abscisas. Donde W_0 es el momento de inercia de la masa del cimientto y máquina con respecto a la abscisa de rotación, $\sum M_e$ es la suma de todos los momentos externos con respecto a la misma abscisa, L es la distancia entre la abscisa de rotación y el centro de gravedad de la masa vibrando, y R es la reacción del suelo, en este caso el peso de la cimentación y suelo son consideradas fuerzas externas.

Las vibraciones rotacionales ocurren principalmente en cimentaciones altas de máquinas con movimiento hori-

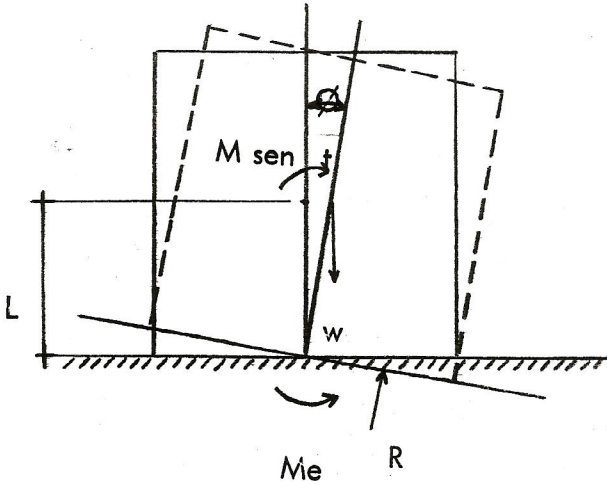


Figura 2-3 Movimiento Rotacional de una Cimentación

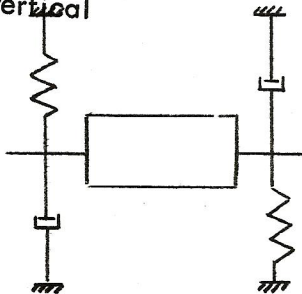
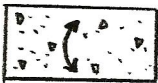
zonal desbalanceado con fuerzas y momentos excitantes.

CIMENTACION

SISTEMA EQUIVALENTE

Bloque rígido de masa y momento de inercia equivalente cerca de la abscisa vertical

Torsión Excitante



Torsión equivalente del resorte

Torsión equivalente del amortiguamiento

Figura 2-4 Sistema Típico Equivalente

2-3 VIBRACIONES DE ESFUERZO CORTANTE PURO

Si la resistencia del suelo a la compresión es grande en comparación a la resistencia del esfuerzo cortante, entonces el desplazamiento de la cimentación bajo la acción de fuerzas horizontales ocurriría principalmente en la dirección de la acción de las fuerzas horizontales excitantes.

Además, en las vibraciones de cimentaciones caracterizadas por desplazamientos horizontales del centro de gravedad de la masa vibrando, las vibraciones de corte tienen la forma de las vibraciones rotacionales con respecto al eje vertical que pasa a través del centro de gravedad de la cimentación y del centroide de la base.

CIMENTACION

SISTEMA EQUIVALENTE

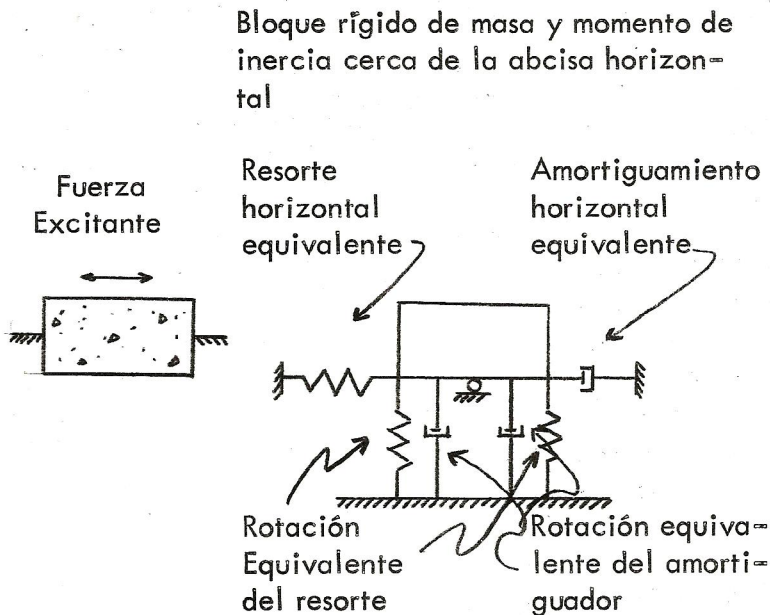


Figura 2-5 Sistema Típico Equivalente

2-4 VIBRACIONES DE CIMENTACIONES ACOMPAÑADAS DE ROTACION SIMULTANEA, DESLIZAMIENTO Y DESPLAZAMIENTO VERTICAL

Lo planteado anteriormente concierne a casos de vibraciones de cimentaciones masivas en donde el suelo se caracteriza por su rigidez infinita con respecto a la compresión o al esfuerzo cortante. Consideremos ahora el caso más simple de vibraciones de cimentaciones, donde el terreno puede ofrecer resistencia elástica a ambas, a la compresión y al esfuerzo cortante. Igual que antes, se asume que el centro de gravedad de la cimentación y máquina y el centroide del área de la base del cimiento están localizados en una línea vertical que se apoya en el plano central principal de la cimentación. Las fuerzas externas excitantes producidas por la máquina, también se apoyan en este plano; las cuales pueden ser reducidas a la fuerza excitante aplicada en el centro de gravedad de la masa vibrante, y un par que produce un momento, adaptando el origen de un sistema de coordenadas con el centro de gravedad de la cimentación y masa de la máquina en un instante, cuando la cimentación está sin movimiento.

Bajo la acción de la fuerza excitante y el par que produce el momento, el cimiento sufrirá un movimiento doble-dimensional determinado por los valores de tres parámetros independientes: las dos proyecciones de los desplazamientos del centro de gravedad de la cimentación en los ejes de coordenadas y el ángulo de rotación de la cimentación con respecto al eje que pasa por el centro de gravedad de la cimentación y máquina, perpendicular al plano de vibración, Figura 2-6.

De aquí, que las siguientes vibraciones de cimentaciones sucedan independientemente de vibraciones asociadas con las otras coordenadas. Si sobre una cimentación es

tán actuando cargas excitantes que no tienen componentes verticales, entonces las vibraciones verticales de la cimentación no se desarrollan. En este caso la cimentación experimentará a voluntad, una rotación alrededor de la abscisa Y y un desplazamiento horizontal en la dirección de la abscisa X .

Si en una cimentación está actuando por encima una carga excitante produciendo solamente una fuerza vertical al centro, entonces la cimentación experimentará a voluntad una sola vibración vertical.

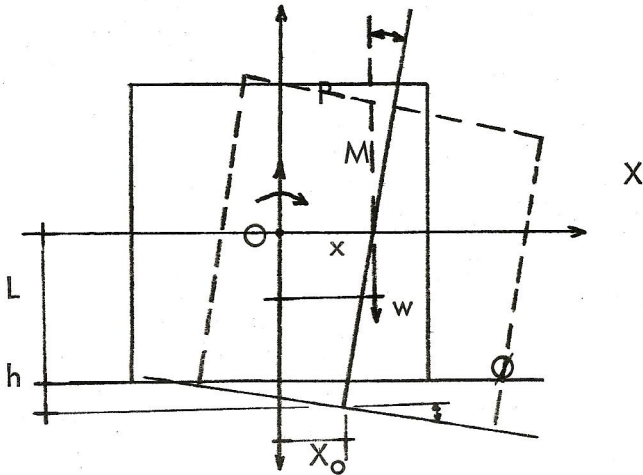


Figura 2-6 Análisis de Movimientos Combinados en una Cimentación

En igual forma sucede, si el equilibrio de una cimentación en un cierto instante de tiempo es perturbado solamente por un desplazamiento vertical de su centro de gravedad, o si en este momento la cimentación tiene una velocidad en la dirección vertical, cuando la cimentación ex-

perimente solamente vibraciones verticales naturales. Si el equilibrio de la cimentación es perturbado por un desplazamiento de su centro de gravedad en la dirección horizontal, o si se le da una velocidad en la misma dirección, no aparecerá la vibración vertical. En este caso, el movimiento del cimiento puede estar caracterizado por el cambio en dos coordenadas: X y ϕ . La misma coordenada caracteriza el movimiento de la cimentación, si este equilibrio es perturbado por el cambio de una u otra de ellas X o ϕ .

El factor de vibración vertical de la cimentación es independiente de las vibraciones en las direcciones X o ϕ considerándose un cambio, en cada tipo de vibración separadamente.

A) VIBRACIONES LIBRES

Si el equilibrio de una cimentación se altera, producirá por poco tiempo, cambios en las coordenadas X y ϕ , así también en las velocidades de ambas coordenadas, y durante el tiempo que sigue, la cimentación estará sujeta a las reacciones del suelo elástico y a las fuerzas iniciales.

B) FUERZAS DE VIBRACION

El cambio en la frecuencia de las fuerzas excitantes conduce a cambiar la amplitud de las vibraciones, aun cuando la magnitud de las fuerzas excitantes sea la misma. El fenómeno de resonancia es observado cuando una de las frecuencias naturales coincide con la frecuencia de las fuerzas excitantes.

Para cada frecuencia de las fuerzas de vibración de

un cimiento corresponde una forma particular de vibración, la cual se caracteriza por la magnitud y signo del radio vector ρ que conecta el centro de gravedad de la cimentación con el punto O según figuras 2-7A y 2-7B, alrededor del cual gira la cimentación.

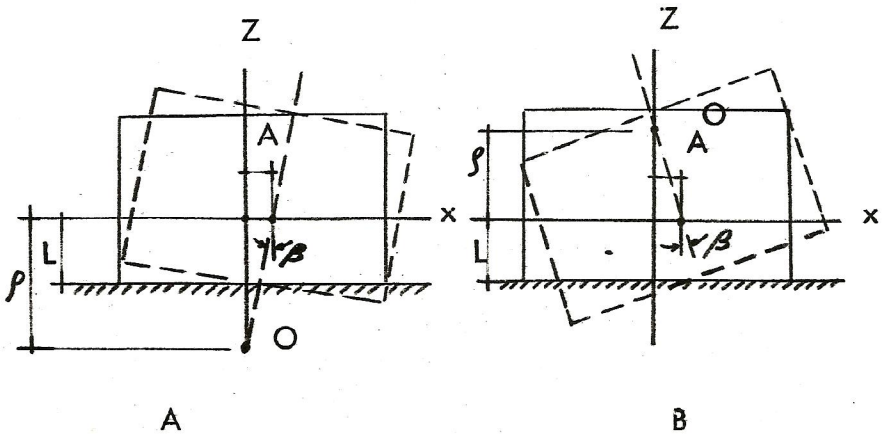


Figura 2-7 Cimentación Vibrando

El carácter de las cargas excitantes también causa fuerzas de vibración a las cimentaciones, teniendo un efecto que depende de la forma de vibración sobre cambios en la frecuencia de la fuerza excitante.

Si una cimentación está sujeta solamente a la acción del momento excitante M_e , de acuerdo con la fórmula:

$$\rho = \frac{L F^2}{F^2 - W^2}$$

Cuando la frecuencia de vibración W es pequeña en comparación con la frecuencia natural de vibración horizontal F , ρ no se diferencia mucho de L , por ejemplo, ba

jo frecuencia excitantes, la cimentación puede vibrar con respecto al eje que pasa a través del centro de gravedad del área de la base en contacto perpendicular al plano de vibración. Con un incremento en la frecuencia excitante, el denominador de la fórmula anterior no puede de crecer rápidamente y ρ aumentará, por ejemplo, la vibración de la cimentación estará acompañada, no sólo por cambios en ρ , sino también por cambios en las abscisas X del centro de gravedad; en otras palabras, el área de contacto de la cimentación puede experimentar deslizamientos si $W = FX$, en tal caso ρ puede crecer indefinidamente. En este caso, la cimentación puede experimentar solamente vibraciones de corte (deslizamiento) con una cierta amplitud. Con un incremento en la frecuencia excitada, ρ cambiará de signo, con un incremento en W , ρ continuará decreciendo, aproximándose a cero, cuando W llega a ser infinitamente grande. Esto significa que con una frecuencia excitante considerablemente grande que la frecuencia limitada FX , la cimentación puede experimentar principalmente rotación alrededor de la abscisa y a través de su centro de gravedad.

C) EFECTO EN LAS FRECUENCIAS NATURALES DE DISTRIBUCION EXCENTRICA DE LA CIMENTACION Y MASA DE LA MAQUINA

Una distribución excéntrica de la masa de la máquina puede ocurrir, cuando una máquina y un generador o un motor son montados en la misma cimentación. A veces, una excentricidad en la distribución de la masa es causada por asimetría de la cimentación, como resultado de varias cavidades, canales, etc. La asimetría puede ser eliminada en muchos casos, moviendo el centroide del área de la cimentación en contacto con el suelo. A veces esto no se puede hacer; entonces, las vibraciones de la cimentación de ben

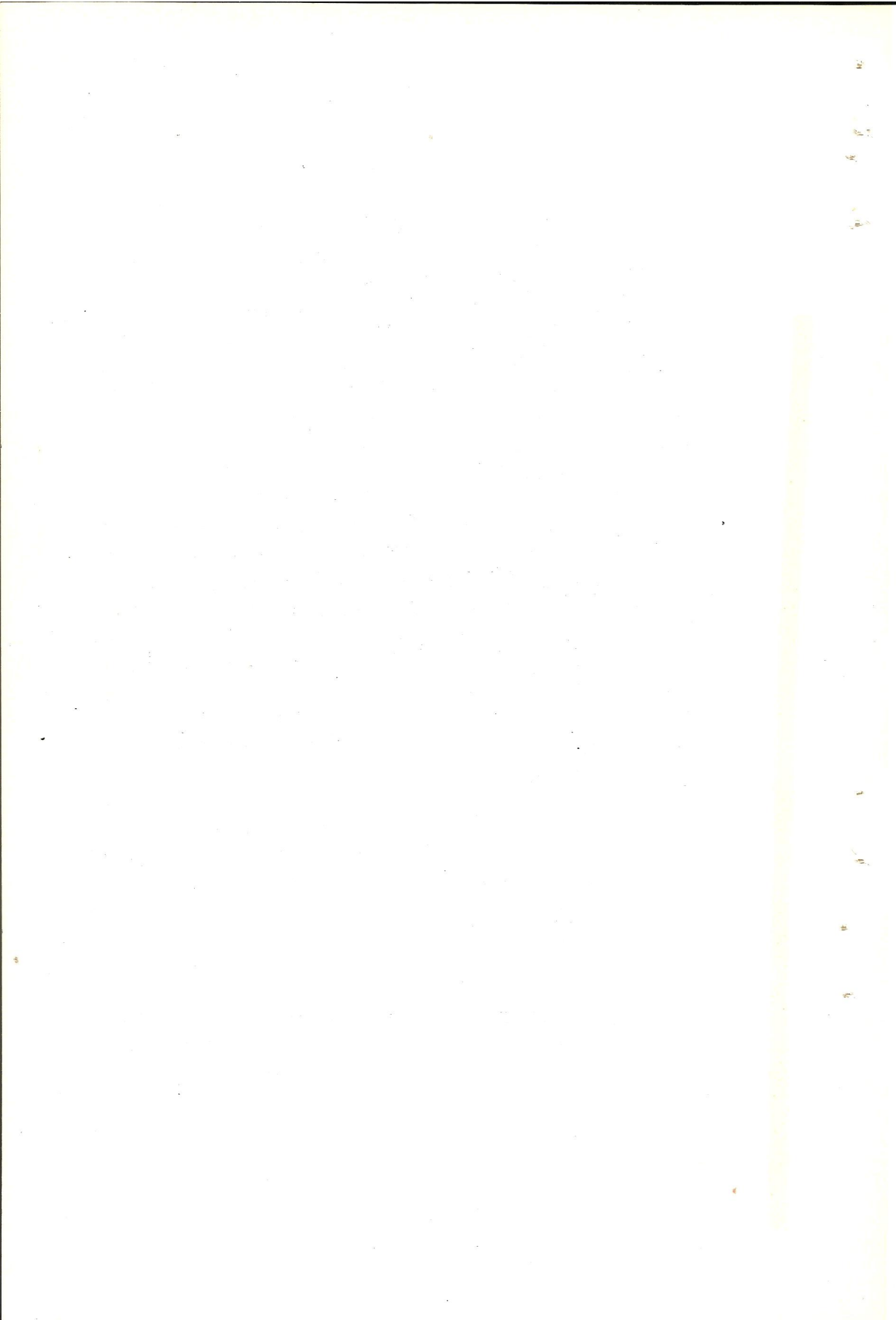
calcularse de acuerdo a la distribución asimétrica de la masa tomada en cuenta.

El caso más simple de asimetría de la masa de una cimentación, es aquel donde el centro de gravedad de la cimentación y la masa máquina y el centroide del área de contacto de la cimentación se apoya en uno de los planos principales de la cimentación, pero no en la misma línea vertical. Se deberán investigar las vibraciones de la cimentación en el plano principal en donde ambos centros de gravedad se apoyan.

El movimiento de la cimentación es determinado por los parámetros de las proyecciones X y Z del desplazamiento del centro de gravedad de la cimentación en los ejes de coordenadas correspondientes y el ángulo de rotación ϕ de la cimentación alrededor del eje Y, que pasa por el centro de gravedad y es perpendicular al plano de vibraciones.

Adaptando el origen del sistema de coordenadas usadas para estudio de la cimentación con el centro de gravedad, cuando la cimentación está en reposo. Si se asume que el movimiento de la cimentación ha sido causado por un impacto y se examinan las fuerzas que actúan sobre la cimentación durante su movimiento, se podrán establecer las ecuaciones diferenciales para este movimiento, tomando en consideración las reacciones del terreno producidas únicamente por la cimentación.

Se asume que por un cierto instante de tiempo, las proyecciones del desplazamiento del centro de gravedad del cimiento serán iguales a X y Z, y que la proyección del vector de rotación en el eje Y será igual a ϕ .



3 GENERALIDADES PARA EL DISEÑO DE CIMENTACIONES

3-1 VALORES DEL DISEÑO DE AMPLITUDES PERMISIBLES DE CIMENTACIONES DE VIBRACION

Muchos tipos de máquinas de vaivén pertenecen al grupo de máquinas no sincronizadas, las cuales son peligrosas con respecto a las vibraciones. El funcionamiento de estas máquinas es de baja velocidad, por eso aumenta la probabilidad de que las vibraciones se transmitan a construcciones o estructuras adjuntas.

Cuando la amplitud de las vibraciones de cimentaciones es grande, el peligro para las estructuras adjuntas es mayor; además, la cimentación puede perder estabilidad y perjudicar el trabajo normal de la máquina. Finalmente, las vibraciones de gran amplitud pueden producir la destrucción de la cimentación y dañar la máquina. También es importante considerar que las vibraciones de cimentaciones casi siempre se transmiten a las conexiones de las máquinas.

Es extremadamente difícil, establecer un límite para el valor permisible de amplitud de vibraciones de cimentaciones, en base a principios generales, ya que existen muchos casos en los cuales, vibraciones con amplitudes mayores de 0.4 a 0.5 mm no tienen ningún efecto dañino.

Sin embargo, en muchos casos se ha observado en cimentaciones de máquinas con vibraciones de poca frecuencia, que han bajado las vibraciones a amplitudes más pe-

queñas que aquellas citadas arriba, que han provocado vibraciones más fuertes a estructuras localizadas a una distancia de varios metros. Puede suceder, sin embargo, que aun cuando la amplitud de vibración de la cimentación sea más pequeña que el límite permisible aceptado, la estructura adjunta vibre debido a resonancia.

La experiencia hace posible determinar que si alguna resonancia está por ocurrir en edificios y estructuras adjuntas a la cimentación, la amplitud de esta no deberá exceder de 0.20 a 0.25 mm. Estos rangos de valores de amplitudes pueden servir entonces, como base de evaluación para el cálculo adecuado en el diseño de cimentaciones.

A) DATOS NECESARIOS DE LA MAQUINA PARA EL DISEÑO

Los datos proporcionados por el productor de la máquina o motor juntamente con los datos del análisis del suelo y las cargas excitantes que transmite el motor constituyen la información básica para el diseño de cimentaciones. Estos son:

- 1.- La velocidad y fuerza normal de la máquina.
- 2.- El carácter, magnitud y punto de aplicación de las cargas dinámicas, las cuales se desarrollan en el proceso de operación de la máquina. Si este dato no fuera dado, el diseñador de cimentaciones deberá calcular o asumir en base a la experiencia, dichas fuerzas.
- 3.- La distribución de cargas estáticas impuestas por la máquina, sobre la superficie de la cimentación.
- 4.- El tamaño y forma del plato o marco soporte de la máquina.
- 5.- La localización de aberturas y ranuras en la cimentación debido a pernos de anclaje, tuberías, volantes o

ruedas voladoras, etc.

- 6.- Las cargas impuestas por la máquina a la cimentación son las dinámicas, las cuales se desarrollan en el proceso de operación de la máquina.

Para máquinas diesel, la carga total será tal que la presión reducida en la superficie de la cimentación no exceda de 3 a 5 kg/cm².

Para máquinas de pistón horizontal, el valor será más pequeño. De todos modos, los valores permisibles de apoyo del hormigón y mampostería son considerablemente altos. Es natural que las presiones impuestas a los cimientos sean pequeñas, por lo tanto el análisis de esfuerzos debe ser hecho, solamente, para secciones cruzadas, debilitadas por grandes aberturas y ranuras.

Respecto a la selección del material para la cimentación (concreto o mampostería) estará sujeta a los costos y facilidad para obtener el material en el lugar. Concreto de 100 kg/cm² es el que se utiliza corrientemente para cimentaciones de máquinas de vaivén.

B) COMENTARIOS RESPECTO AL DISEÑO

La cimentación de máquinas de vaivén corrientemente se construye como en bloques masivos, con ranuras y aberturas para los pernos de anclaje.

Debido a lo masivo de dichas cimentaciones, cuando se estudian sus vibraciones, se consideran como cuerpos absolutamente rígidos y en los cálculos de frecuencias y amplitudes se toman como un sólido descansando en una base elástica.

Cuando se diseña la cimentación de una máquina, es importante considerar que la dimensión mínima de la cimentación debe seleccionarse de tal modo que la amplitud de sus fuerzas de vibración no excedan el valor permisible.

Para disminuir la transmisión de vibraciones existe el criterio de no profundizar las cimentaciones más abajo que las columnas y paredes adyacentes. Sin embargo, teóricamente y tomando como base los datos experimentales de propagación de ondas en los suelos, se ha llegado a la conclusión que para cimentaciones de máquinas más profundas que cimientos de paredes no ha tenido efecto la transmisión de vibraciones.

Para evitar que se produzcan asentamientos uniformes de la cimentación es recomendable colocar el centro de gravedad de la cimentación y máquina, en la misma línea vertical con la del centroide del área de la cimentación, en contacto con el suelo. Teniendo cuidado que la excentricidad en la distribución de masas no exceda del 5% del largo del lado del área en contacto. Satisfecha esta condición es posible simplificar el cálculo de las vibraciones de la cimentación.

Para disminuir la transmisión de vibraciones a las partes continuas de edificios, se deberá dejar una estructura entre la cimentación de la máquina no sincronizada y las estructuras continuas (cimientos, paredes, pisos, etc.). Las cimentaciones de las máquinas no deberán servir como soporte de otras partes de un edificio. Si no es posible evitar la situación mencionada, se deberá tomar ciertas medidas para amortiguar la unión por medio de empaques de corcho, hule, fieltro, u otros materiales aislantes.

Cuando es necesario instalar máquinas en un mismo local, donde las distancias entre ellas son comparables a

las dimensiones de las cimentaciones, para suelos de poca resistencia, se recomienda construir una losa común de espesor suficiente. La rigidez de estas losas de cimentaciones se deberá seleccionar de tal forma que sus posibles deformaciones sean pequeñas, en comparación con la amplitud de las vibraciones. Solo así podrá una serie de cimentaciones de máquinas instaladas en la misma losa, ser consideradas como un bloque sólido sobre una base de cimentación elástica. El cálculo de vibraciones para estas cimentaciones es complicado y si además, existe asimetría y una fase alterna del período de trabajo, el cálculo se hace prácticamente imposible. Por lo tanto, cuando varias cimentaciones han de ser colocadas en una misma losa, será necesario que éstas queden repartidas en secciones que correspondan a cimentaciones separadas. En ese caso, el valor del diseño para la amplitud permisible de vibraciones podrá aumentarse de 25 a 30%.

De todos modos, el área de la cimentación en contacto con el suelo se deberá seleccionar de tal forma que la presión sobre el suelo no exceda los valores permisibles.

Cuanto más larga sea el área de contacto de la cimentación con el suelo, la presión reducida sobre el suelo, será más pequeña y las frecuencias naturales de la cimentación, más altas. Lo anterior es de mucha importancia para máquinas de baja frecuencia, incluyendo las máquinas de vaivén. Para cambiar la frecuencia natural de una cimentación, se deberá aumentar o disminuir las dimensiones del área de la cimentación en contacto con el suelo. La selección final del área de la cimentación, estará sujeta a los requerimientos obtenidos como resultado de los cálculos de diseño con respecto a las cargas de vibración en la cimentación.

Las cimentaciones para máquina de bajas frecuencias

deberán ser diseñadas de tal manera que sus frecuencias naturales sean más altas que la frecuencia de operación de la máquina.

El valor absoluto de la masa de la cimentación y la distribución de ésta en el lugar, afectan la frecuencia natural de la cimentación. Razón por la cual el diseñador deberá distribuir la masa para que el valor más pequeño posible de su momento de inercia sea obtenido con respecto al eje principal que pasa a través del centroide del área de contacto de la cimentación.

La condición anterior podrá ser obtenida variando la altura de la cimentación.

3-2 CIMENTACIONES PARA MAQUINAS QUE PRODUCEN CARGAS DE IMPACTO

A) DIRECCIONES GENERALES PARA EL DISEÑO DE CIMENTACIONES PARA MARTINETES DE FRAGUA

- 1.- Clasificación de Martinetes de Fragua. Los martinetes de fragua se dividen en dos grupos: Martinete de caída hembra de tarraja y Martinete de fragua.

Para darle rigidez al sistema, el lado de la armazón de un Martinete de caída se deberá montar en un yunque, figura 3-1A. El lado de la armazón, juntamente con las guías para el ariete hidráulico, contribuyen a la precisión de los golpes necesarios para la forjadura. Esta característica, en el diseño de martinetes de caída, predetermina a un cierto grado de diseño de sus cimentaciones, ya que el bloque de la cimentación, abajo del yunque sirve como soporte de todo el martinete.

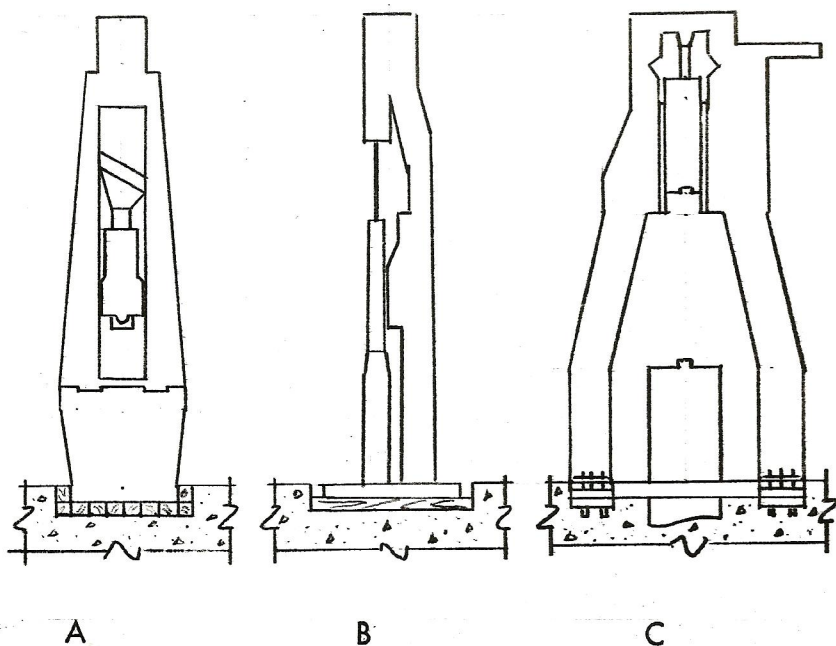


Figura 3-1 Martinete de Fragua: (A) Martinete de caída con armazón montado sobre un yunque, (B) Martinete con una sola armazón soporte, (C) Martinete con armazón de doble soporte.

Los martinetes de fragua son construidos con armazones de un solo soporte, figura 3-1B y con armazones de soporte doble, figura 3-1C. Pudiendo esta última ser de arco o puente.

2.- Datos de Diseño para la Cimentación de un Martinete. Los datos técnicos siguientes son indispensables para el diseño.

a) El peso nominal de las partes que caen, las cuales ca-

racterizan el poder del martinete.

En martinetes de caída, el peso real de las partes que caen, en adición al peso del ariete hidráulico, pistón y rodillo incluye también la mitad alta de la hembra de tarraja, razón por la cual, en estos martinetes, el peso real de las partes que caen es mayor que el peso nominal o de catálogo.

El diseño de una cimentación de martinete se hace en base al peso real de las partes que caen. El promedio del alto de las partes altas y bajas de las hembras de tarraja varía de 2.50 a 5.00 cms.

- b) El peso del yunque y las dimensiones del área de la base
- c) El peso del martinete, incluyendo los lados de la armazón, cilindros del ariete hidráulico de la plancha de anclaje, etc. no se toma en cuenta el peso del yunque. Cuando no se tienen datos disponibles del peso del yunque y armazón, es aceptable asumir que el peso del yunque sea 15 a 20 veces el peso del ariete hidráulico; el peso total del martinete y yunque se podrá tomar de 25 a 30 veces el peso del ariete hidráulico.
- d) La altura máxima de caída del ariete hidráulico (o el máximo choque de los pistones).
- e) El área de la parte alta del pistón.
- f) La presión promedio que se ejerce sobre el pistón.

Para el diseño y análisis de la cimentación, deben estar disponibles los dibujos de montaje de la máquina:

- g) Dimensiones en planta, el grueso y elevación del tope

del cojín, bajo la armazón y yunque del martinete de fragua.

- h) La posición, diámetro y largo de los pernos de anclaje.
- i) La elevación de la base del yunque con respecto al nivel del piso del local.
- j) Las dimensiones en planta y el grueso del cojín de madera bajo el yunque.
- k) La localización del martinete con respecto a cimentaciones adyacentes, bajo maquinaria y dimensiones, elevaciones y profundidades de cimientos del edificio.

3.- El Material de la cimentación y cojín bajo el yunque.

Las cimentaciones abajo de martinetes con un peso de partes que caen en exceso de 1 tonelada son hechas con concreto de 210 Kg/cm^2 con agregado grueso, con un esfuerzo de compresión no menor de 250 Kg/cm^2 . El concreto se refuerza de acuerdo al dato del diseño o de acuerdo a instrucciones dadas en el trabajo.

El cojín abajo del yunque corrientemente se acostumbra de madera, con un contenido de humedad de 15 a 18%.

4.- Sugerencias para el Diseño

Hace poco tiempo existía la tendencia a diseñar cimentaciones para martinetes como bloques masivos conectados a una profundidad considerable, con el propósito de dimitensionar la cimentación de tal forma, que su asentamiento elástico estático fuera mayor que la amplitud de sus vibraciones verticales. Puesto que los valores del diseño de amplitud de vibraciones de cimentaciones bajo martinete,

fueran seleccionadas dentro del rango 2.0 a 2.5 mm, la altura del cimiento había sido aumentada considerablemente para obtener el asentamiento estático deseado. La figura 3-2A muestra un diseño típico: por cada tonelada de partes que caen les corresponde 80 a 100 y casi siempre 120 tons. del peso de la cimentación.

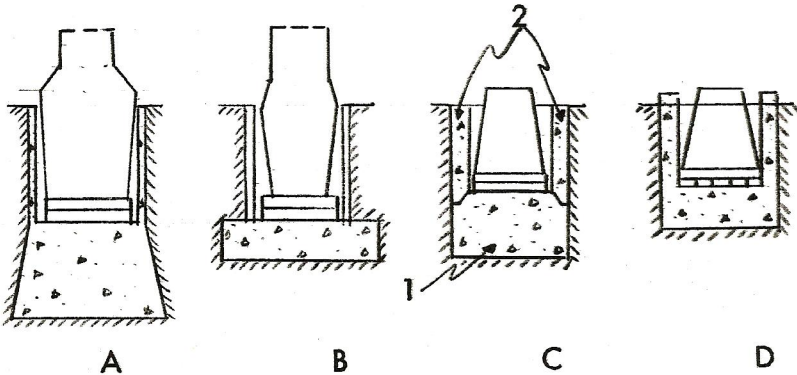


Figura 3-2 Tipos de Cimentaciones de Martinete; (A) Cimentación Profunda; (B) Cimentación de Plancha; (C) Cimentación de Yunque 1 Bastidor 2; (D) Cimentación única para Yunque y Bastidor.

El uso de cimentaciones pesadas no es necesario, pues aumenta considerablemente el costo de la construcción.

Las cimentaciones abajo de martinetes se deberán diseñar como una losa cargada arriba por el relleno. En la figura 3-2B se representa un caso típico de esta cimentación.

Para cimentaciones del tipo bloque, el grueso de las partes de abajo del yunque se deberán seleccionar como si

gue: para un peso de ariete hidráulico arriba de 0.75 tons, el grueso no debe ser menor de 0.75 m; para un peso de 0.75 a 2.5 tons, el grueso no debe ser menor de 1.5 m; para un peso de 2.5 tons o más, el grueso debe ser de 1.75 a 2.50 m, dependiendo de la fuerza del martinete.

Anteriormente, las cimentaciones abajo de martinetes de fragua eran hechos abajo del yunque, separados de la cimentación abajo de las armazones, lo cual disminuía las fuerzas en las armazones de martinetes en forjaduras ex céntricas. Sin embargo, resultaba una separación entre los elementos de la cimentación, en su ladeo, respecto a cada uno y con un asentamiento considerable no uniforme de la cimentación abajo del yunque. Actualmente, las cimentaciones abajo de martinetes de fragua han sido diseñados como se muestra en la figura 3-2D, en las cuales la cimentación abajo de la armazón no fue puesta directamente sobre el suelo, pues en el bloque abajo del yunque tiene tablas de 2 a 3 cms de grueso (o varias capas de ruberoide). En esta forma se previene el ladeo del yunque con respecto a la armazón. Sin embargo, debido a una elasticidad insuficiente, del cojín, este diseño no es muy efectivo para disminuir los esfuerzos que resultan como consecuencia de una cimentación no uniforme.

Estos esfuerzos podrían ser disminuidos mucho más eficientemente, por medio de resortes, colocados en los pernos del cimientto y por piezas de roble instaladas abajo del yunque y la armazón del martinete. En tales casos el cimientto debe ser diseñado como un bloque sólido, figura 3-2D.

El refuerzo usado en la cimentación abajo del yunque consiste de 2 a 4 parillas horizontales de acero formadas por barras de 8 a 12 mm espaciadas de 12 a 20 cms.

La parrilla más alta se coloca a una distancia de 2 a 3 cms de la superficie de la cimentación.

Cerca de la superficie de la cimentación en contacto con el suelo, el refuerzo que se utiliza es de 1 a 2 parrillas horizontales de acero formadas por barras de 12 a 20 mm y espaciadas de 15 a 30 cms cada una. Las distancias entre las parrillas son de 10 a 15 cms en la parte superior de la cimentación y de 15 a 30 cms cerca de la superficie de la cimentación en contacto con el suelo, formadas por barras de 8 a 12 mm espaciadas de 12 a 20 cms. La parrilla más alta se coloca a una distancia de 2 a 3 cms de la superficie de la cimentación.

Los cojines abajo del yunque son de madera de 10 x 10 cms hasta 20 x 20 cms en sección. Estos cojines son colocados en una o varias filas planas, una sobre otra. Cada fila deberá estar formando una capa separada y asegurada por pernos de 0.50 a 1.00 mt de largo.

Si se usan varias filas de cojines de madera, a fin de disminuir el desgaste y hacer el cojín más rígido, los cojines de madera deberán ser colocados en forma de parrilla. La fila superior de cojines de madera se colocará a lo largo del lado corteo de la base del yunque. Las capas deben ser estrictamente horizontales y pulidas. Se deberá cuidar especialmente la altura del nivel de agua, para prevenir la humedad en la madera. Mejores resultados se obtienen si se preserva con alguna solución impermeable.

El espacio entre los cojines de madera y las paredes de la excavación se deberán llenar con petróleo asfáltico. Para evitar un desplazamiento horizontal del yunque a lo largo del cojín, se recomienda colocar cuatro pedazos de madera alrededor de la base.

El grueso del cojín está dado tentativamente en la tabla 3-1 o se puede obtener del manual técnico de la máquina.

El grueso del cojín se deberá seleccionar en tal forma que los esfuerzos no excedan los valores permisibles, como se dan a continuación:

Encino	300 a 350 Kg/cm ²
Pino	200 a 250 Kg/cm ²
Pino centenario	150 a 200 Kg/cm ²

No.	Tipo de Martinete	Espesor del cojín en mts si el peso de las partes que caen es:		
		0 a 1 Ton	1 a 3 Ton	Mas de 3 Ton
1	De doble acción	0 a 0.20	0.20 a 0.60	0.60 a 1.20
2	De acción simple	0 a 0.10	0.10 a 0.40	0.40 a 0.90
3	Forzado	0 a 0.20	0.20 a 0.60	0.60 a 1.00

Tabla 3-1 Espesores de cojines de madera abajo del yunque

3-3 CIMENTACIONES MASIVAS

A) CIMENTACIONES MASIVAS PARA MOTORES GENERADORES

Generalidades en diseño y diseño y cálculo

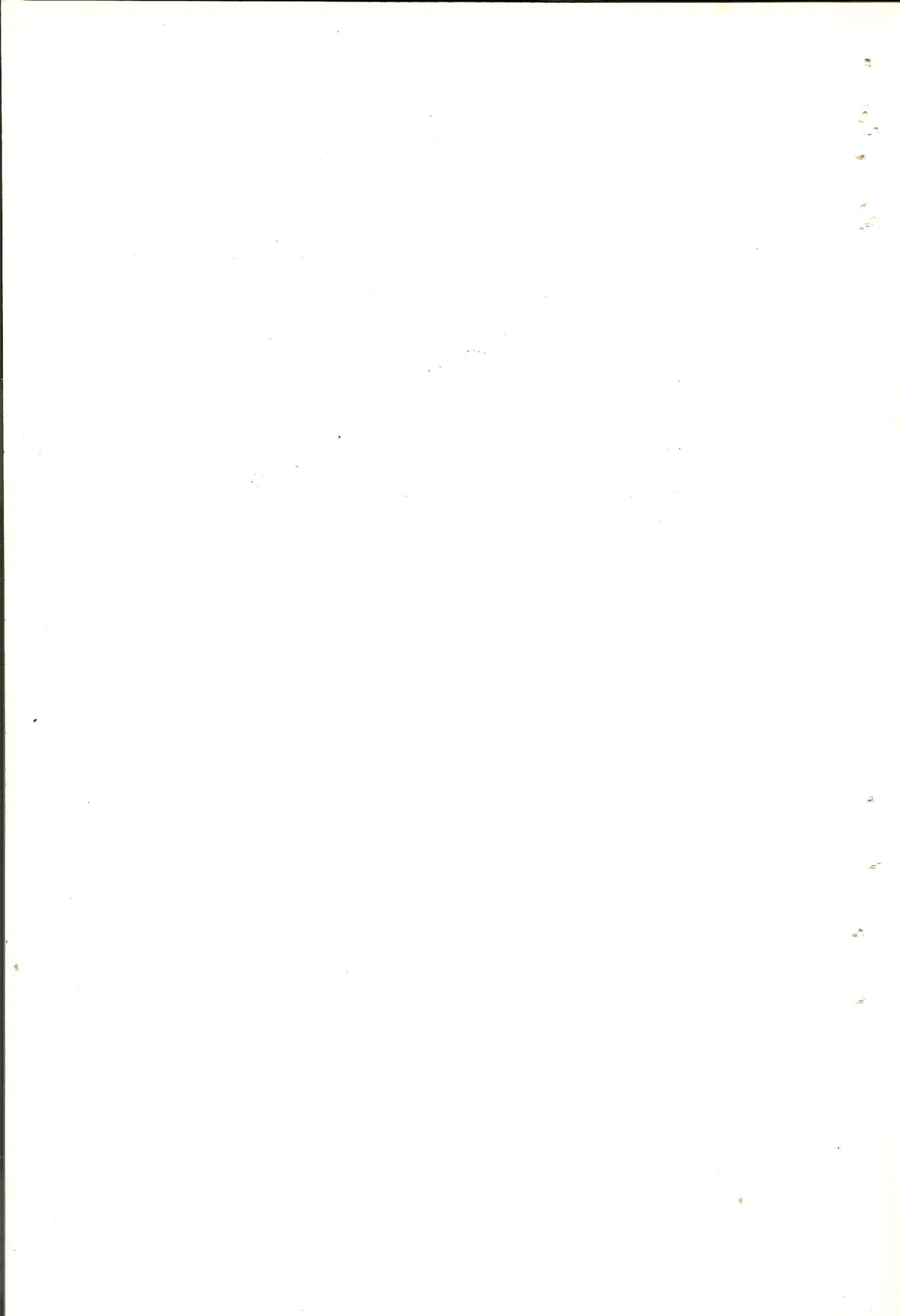
Los motores generadores corrientemente operan a velocidades más bajas que los turbogeneradores y la excentricidad de la masa rotante en motores generadores y máquinas

nas eléctricas similares son considerablemente más grandes que en los turbogeneradores. Lo anterior ha sido posible determinarlo indirectamente por medidas efectuadas en vibraciones de cimentaciones.

Si las excentricidades de los motores generadores fueran del mismo orden como las de los turbogeneradores, entonces, las fuerzas excitantes producidas por los motores generadores serían tan pequeñas que por sí solas no podrían inducir vibraciones apreciables, aun bajo condiciones de resonancia, cuando las frecuencias de las vibraciones se aproximarán a una de las frecuencias naturales de la cimentación. Para estos casos no es necesario efectuar ningún cálculo dinámico de las vibraciones de la cimentación abajo de los motores generadores. Observaciones efectuadas demostrado, sin embargo, que las cimentaciones sujetas a las velocidades bajas de los motores generadores (hasta arriba de 300 a 400 rpm) casi siempre llegan a vibraciones con amplitudes del orden de 0.1 a 0.3 mm. Cuando se toma la excentricidad de la masa rotante de un motor generador, igual que la de los turbogeneradores (0.2 mm) se tendrá para un peso de 25 tons de masa rotante de un motor generador con una velocidad de 300 rpm, un valor de 1.5 tons para la fuerza excitante generada. Esta carga excitante, aun bajo condiciones de resonancia, no podrá inducir vibraciones con amplitudes de 0.1 a 0.3 mm en cimentaciones que pesen varias toneladas.

En base a las medidas de vibraciones de baja frecuencia en motores generadores, se puede suponer que, en estas máquinas la excentricidad de la masa rotante es más grande que la de los turbogeneradores. Debido a la magnitud tan pequeña de los esfuerzos producidos por las cargas externas tanto estáticas como dinámicas no es necesario el análisis de esfuerzos en cimentaciones masivas. Además en los cálculos de amplitud de vibraciones transversales es

necesario centrar la cimentación y chequear la magnitud de la presión ejercida por el peso al suelo. La presión permisible en el suelo puede ser igualada a la presión permisible bajo condiciones de cargas estáticas solamente.



4 DISEÑO DE CIMENTACIONES

4-1 INTRODUCCION AL DISEÑO

Con el conocimiento de la teoría de las vibraciones, se tiene una idea más clara de las fuerzas que actúan en las cimentaciones, la cual ha sido complementada con el conocimiento de los tipos más comunes de máquinas estacionarias y las características indispensables que deberán ser consideradas antes de iniciar el diseño de la cimentación.

Se han incluido varios cuadros con datos importantes, así como fórmulas básicas para el diseño de cimentaciones, las cuales debido a lo complejo de sus deducciones no se considerarán y únicamente se hará mención al libro y autor del cual fueron obtenidas.

En el presente trabajo se ha considerado el diseño de la cimentación, no como el cálculo del refuerzo de la misma, sino como las condiciones mínimas de seguridad que estas deberán llenar para no causar problemas debido a las vibraciones producidas por las máquinas. En base a lo anterior serán resueltos dos problemas característicos en los cuales se pretende llegar a valores que demuestren la seguridad o inseguridad de una cimentación, basada en valores límites.

4-2 SIMBOLOGIA

A = Area en contacto con el suelo
 Ab = Area de la base del yunque

A_f	=	Area del cimientto en contacto correspondiente al peso unitario de las partes que caen
A_p	=	Area de la base del pistón
A_v	=	Amplitud de vibración del cimientto
A_z	=	Amplitud de vibración del yunque y bastidor
B_x	=	Coefficiente influenciado por el resorte horizontal constante
B_z	=	Coefficiente influenciado por el resorte vertical constante
B_ϕ	=	Coefficiente influenciado por el resorte oscilante constante
b	=	Relación de masas
C_u	=	Coefficiente de compresión elástica uniforme
C_1	=	Coefficiente de rigidez del cimientto
C_2	=	Coefficiente de rigidez del cojín bajo el yunque
C_u	=	Coefficiente de compresión elástica uniforme <u>co</u> regida
D	=	Relación de amortiguamiento
E	=	Módulo de Young's
E_2	=	Módulo de elasticidad del cojín bajo el yunque
e	=	Coefficiente de restitución
F_n	=	Frecuencia natural
F_o	=	Frecuencia de operación
F_p	=	Frecuencia primaria
F_r	=	Frecuencia de resonancia
F_s	=	Frecuencia secundaria
F^1	=	Fuerza vertical dinámica primaria
F''	=	Fuerza vertical dinámica secundaria
F^1_n	=	Frecuencia natural de amortiguamiento
F_{na}	=	Límite de frecuencia natural de vibración del yunque sobre el cojín
f_t	=	Límite de frecuencia natural de vibración del <u>sis</u> tema entero
f_t^2	=	Límite de frecuencia del cimientto junto con el martillo
G	=	Módulo de corte

g	=	Aceleración de la gravedad
H_c	=	Altura del cimientto
H_e	=	Altura del eje de la máquina
h	=	Altura de caída
h_c	=	Espesor del cojín
I_c	=	Momento de inercia del cimientto
I_m	=	Momento de inercia de la máquina
K	=	Coefficiente de corrección
l	=	Excentricidad de la masa no balanceada
M_e	=	Masa total no balanceada
m_e	=	Masa efectiva
m_1	=	Masa de cimientto y relleno
m_2	=	Masa del martillo
n	=	Coefficiente del martinete
na	=	Relación entre el peso del yunque y las partes del martillo que caen
nf	=	Relación entre el peso del cimientto y relleno y las partes que caen
P	=	Presión de vapor
P_o	=	Presión permisible sobre el suelo si solamente <u>ac</u> túan cargas estáticas
R	=	Resistencia dinámica
R_o	=	Radio equivalente
u	=	Relación de Poisson's
u_1	=	Relación entre la masa del martillo y la del cimientto y relleno
V	=	Velocidad de caída
V_a	=	Velocidad inicial del movimiento del yunque y bastidor
V_c	=	Volumen de cimientto
V_n	=	Velocidad horizontal
V_r	=	Volumen del relleno
W	=	Peso, cimientto y maquinaria
W_c	=	Peso cimientto
W_f	=	Peso cimientto y relleno
W_m	=	Peso maquinaria

W_o	=	Peso actual de las partes que caen
W_p	=	Peso nominal de las partes que caen
W_2	=	Peso de yunque y bastidor
X_o	=	Desplazamiento del centroide
γ	=	Peso unitario total
ρ	=	Peso específico
σ	=	Resistencia dinámica en el cojín del yunque

4-3 EJEMPLO

Cálculo dinámico para el diseño de cimentación de martinete

El peso nominal de las partes que caen es de 3.0 ton, el peso actual de las partes que caen de 3.5 ton, la altura de caída de 1.0 mt, el área de la parte superior del pistón de 0.15 m², la presión de vapor de 80.0 atm, el peso del yunque y bastidor de 90.0 ton, el área de la base del yunque de 4.75 m² y el espesor del cojín abajo del yunque de 0.60 mt.

El suelo en el sitio de la cimentación es arcilla con arena y limo, con una presión permisible, si sólo actúan cargas estáticas de 2 Kg/cm².

La velocidad de caída del martinete está dado por la fórmula:

$$V = n \sqrt{\frac{2gh(W_o + A_p P)}{W_o}} \quad 1$$

El valor de n depende del diseño del martinete, regulación de válvulas, tipo de trabajo, etc, varía de 0.45 a 0.80 pudiéndose tomar un valor promedio de 0.65.

$$V = 0.65 \sqrt{\frac{2 \times 9.81 \times 1 (3.5 + 0.15 \times 80)}{3.5}} = 6.1 \text{ m/seg}$$

Cálculo preliminar de los valores requeridos del peso de la cimentación y del área del suelo en contacto. El peso necesario de la cimentación correspondiente a las partes que caen se encuentra con la fórmula:

$$nf = 8 (1 + e) V - na \quad 2$$

$$\text{o también: } nf = \frac{Wf}{W_0} \quad 3$$

$$\text{donde: } na = \frac{W_2}{W_0} \quad 4$$

$$nf = 8 (1 + 0.5) 6.1 - \frac{90}{3.5} = 47.3$$

El valor de e se obtuvo de la Tabla 4-1

Tipo de Martinete	$V, \text{m/seg}$	e	na	nf
Martinete de marcar:				
Martinetes de doble acción (estampado de piezas de acero)	6.5	0.5	30	48
Martinetes sin restricción:				
Estampado de piezas de acero	4.5	0.5	20	34
Estampado de metales no ferrosos	4.5	0.0	—	16
Martinetes de fragua:				
Martinetes de doble acción	6.5	0.25	30	35
Martinetes restringidos	4.5	0.25	20	25

Tabla 4-1 Algunos valores de coeficientes de martinetes

El peso de cimentación y relleno es:

$$W_f = N_f W_o \quad 5$$

$$W_f = 47.3 \times 3.5 = 166 \text{ Tons}$$

El área de la cimentación en contacto, correspondiente al peso unitario de las partes que caen se determina de la siguiente manera:

$$A_f = \frac{20 (1 + e) v}{P_o} \quad 6$$

$$A_f = \frac{20 (1+0.5)6.1}{\frac{2 \times 10000}{1000}} = 9.2 \text{ m}^2/\text{Tons}$$

El área en contacto con el suelo es:

$$A = A_f W_o \quad 7$$

$$A = 9.2 \times 3.5 = 32.2 \text{ m}^2$$

Diseño de la cimentación:

En base a los valores determinados anteriormente de peso y área de la cimentación, en contacto con el suelo, se diseña la cimentación en forma de losa. El perímetro de la cimentación se muestra en la Figura 4-1.

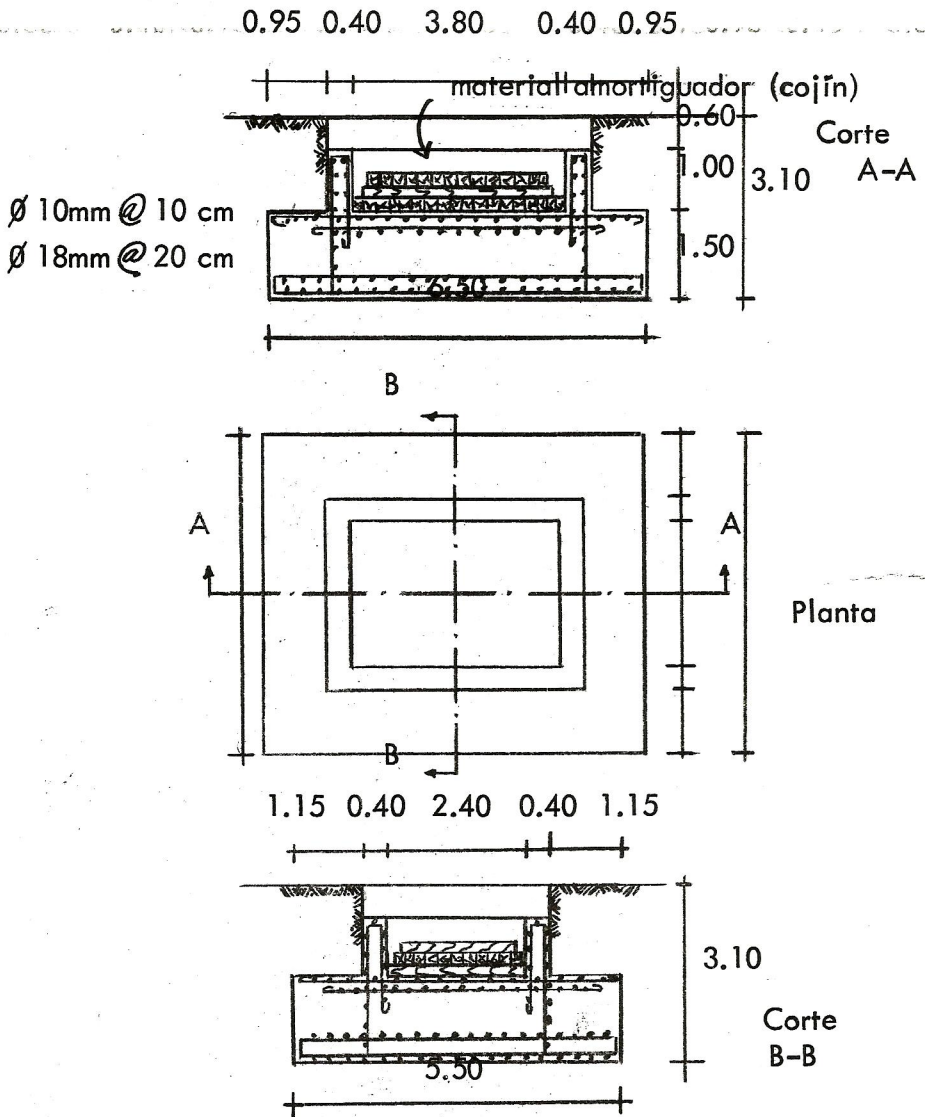


Figura 4-1 Diseño de la Cimentación

El volumen total de la cimentación es el siguiente:

$$V_e = 6.5 \times 5.5 \times 1.5 + 2 \times 3.2 \times 0.40 \times 1.0 + 2 \times 3.8 \times 0.40 \times 1.0$$

$$V_c = 58.0 \text{ m}^3$$

El volumen del relleno es:

$$V_r = 2 \times 0.95 \times 0.55 + 2 \times 4.60 \times 1.15$$

$$V_r = 2.09 \text{ m}^3$$

El peso total de la cimentación y relleno es:

$$W_f = 58.0 \times 2.2 + 2.09 \times 1.6$$

$$W_f = 161.4 \text{ Tons}$$

El área de la cimentación en contacto con el suelo es:

$$A = 6.50 \times 5.50$$

$$A = 35.7 \text{ m}^2$$

Amplitud de vibración de la cimentación:

Se toma el módulo de elasticidad del cojín abajo del yunque

$$E_2 = 50 \times 10^3 \text{ Ton/m}^2$$

El espesor del cojín abajo del yunque, según dato es:

$$h_c = 0.60 \text{ mt}$$

El coeficiente de rigidez del cojín abajo del yunque es:

$$C_2 = \frac{E_2 \times A_2}{hc} \quad 8$$

$$C_2 = \frac{50 \times 10^3 \times 4.75}{0.60} = 39.5 \times 10^4 \text{ Tons/mt}$$

La masa del martinete es:

$$m_2 = \frac{W_2}{g} \quad 9$$

$$m_2 = \frac{90}{9.81} = 9.18 \frac{\text{Tons} \times \text{seg}^2}{\text{m}}$$

El límite de frecuencia natural de vibración del yunque sobre el cojín de madera de roble o encino es:

$$f_{na} = \frac{C_2}{m_2} \quad 10$$

$$f_{na} = \frac{39.5 \times 10^4}{9.18} = 43 \times 10^3 \text{ seg}^{-2}$$

El coeficiente de compresión elástica uniforme se obtiene de la Tabla 4-2.

Se adoptará:

$$C_u = 4 \text{ Kg/cm}^3 = 4 \times 10^3 \text{ Ton/m}^3$$

Se acostumbra usar un coeficiente de corrección $k=3$, quedando:

$$C'_u = k \times C_u \quad 11$$

Categoría de Suelo	Grupos de Suelo	Cargas permisibles en suelos bajo acción de cargas estáticas solamente en Kg/cm ²	Coeficiente de compresión elástica uniforme C_u en Kg/cm ³
I	Suelos poco resistentes (arcillas fangosas con arena en estado plástico; barro y arena fangosa; también suelos de categoría II y III con capa orgánica y turba)	0 - 1.5	0 - 3.0
II	Suelos de resistencia media (arcillas y arcillas fangosas cerca del límite plástico; arenas)	1.5 - 3.5	3.0 - 5.0
III	Suelos fuertes (arcillas y arcillas fangosas con arena, de consistencia dura; grava y arena gravosa; marga y suelos margosos)	3.5 - 5.0	5.0 - 10.0
IV	Roca	mayor de 5.0	mayor de 10.0

Tabla 4-2 Valores de diseño recomendables del coeficiente de compresión elástica uniforme

$$C'u = 3 \times 4 \times 10^3 = 12 \times 10^3 \text{ Ton/m}^3$$

El coeficiente de la base abajo de la cimentación es:

$$C_1 = C'u \times A \quad 12$$

$$C_1 = 12 \times 10^3 \times 35.7 = 43.8 \times 10^4 \text{ Ton/m}$$

La masa de la cimentación junto con el relleno es:

$$m_1 = \frac{W_1}{g} \quad 13$$

$$m_1 = \frac{161.4}{9.81} = 16.5 \frac{\text{Ton} \times \text{Seg}^2}{\text{M}}$$

El cuadrado del límite de frecuencia natural de vibración del sistema entero es:

$$f_1^2 = \frac{C_1}{m_1 + m_2} \quad 14$$

$$f_1^2 = \frac{43.8 \times 10^4}{16.5 + 9.18} = 16.7 \times 10^3 \text{ seg}^{-2}$$

La relación entre la masa del martinete y la masa de la cimentación con el relleno es:

$$u_1 = \frac{m_1}{m_2} \quad 15$$

$$u_1 = \frac{9.18}{16.5} = 0.557$$

La ecuación para determinar la frecuencia natural de vibración del sistema de cimentación del martinete es:

$$fn^4 - (fn_1^2 + fn_2^2)(1 + u_1)fn^2 + (1 + u)fn_1^2 \times fn_2^2 = 0 \quad 16$$

$$fn^4 - (43.0 \times 10^3 + 16.7 \times 10^3)(1 + 0.557)fn^2 + (1 + 0.557)43.0 \times 10^3 \times 16.7 \times 10^3 = 0$$

$$fn^4 - 92.5 \times 10^3 fn^2 + 1115 \times 10^6 = 0$$

Resolviendo la ecuación se tiene

$$fn_1^2 = 78 \times 10^3 \text{ seg}^{-2} \quad fn = 228 \text{ seg}^{-2}$$

$$fn_2^2 = 14.1 \times 10^3 \text{ seg}^{-2} \quad fn = 199 \text{ seg}^{-2}$$

Para determinar la velocidad inicial del movimiento del yunque junto con el bastidor

$$V_a = \frac{(1 + e)W_0 V}{W_0 + W_2} \quad 17$$

$$V_a = \frac{(1 + 0.5) 3.5 \times 6.1}{3.5 + 9.0} = 0.342 \text{ m/seg}$$

La amplitud de vibración de la cimentación se calcula con la siguiente ecuación:

$$A_v = - \frac{(fn_2^2 - fn_1^2)(fn_2^2 - fn_1^2) V_a}{fn_2^2 (fn_1^2 - fn_2^2) fn_1^2} \quad 18$$

$$A_v = - \frac{(43.0 \times 10^3 - 14.1 \times 10^3)(43.0 \times 10^3 - 78.5 \times 10^3) 0.342}{43.0 \times 10^3 (78.5 \times 10^3 - 14.1 \times 10^3) 199}$$

$$A_v = 1.07 \text{ mm}$$

La amplitud de vibración del yunque junto con el bastidor es:

$$A_z = \frac{(fn_2^2 - fn_1^2) \sqrt{V_a}}{(fn_1 - fn_2) fn} \quad 19$$

$$Az = - \frac{(43.0 \times 10 - 78.5 \times 10) \sqrt{0.342}}{(78.5 \times 10^3 - 14.1 \times 10^3) 119}$$

$$Az = 1.60 \text{ mm}$$

Así, resultados del cálculo muestran cuando la amplitud de vibración de la cimentación no excede los valores permisibles de 1.0 a 1.2 mm.

La resistencia dinámica en el cojín abajo del yunque, aproximadamente es igual a:

$$R = \frac{C_2 (Aa - Az)}{Ab} \quad 20$$

$$R = \frac{39.5 \times 10^3 (1.6 \times 10^3 + 1.07 \times 10^{-3})}{4.75} = 222 \text{ Ton/m}^2$$

El cual es más pequeño que los valores permisibles de 300 a 350 Ton/m².

4-4 EJEMPLO

Un motor de un solo pistón con ejes verticales será montado en el lugar de pruebas, juntamente con un dinamómetro para medir el rendimiento de la máquina. La disposición de la superficie de la máquina y dinamómetro se muestra en la figura 4-2. La superficie de trabajo está localizada en el nivel del primer piso de la planta del edificio, 5 mts. arriba de la elevación de la cimentación. El motor a probarse opera a 1800 rpm (30 ciclos/seg.) y se espera que tenga una fuerza vertical dinámica a esa frecuencia de 1516 Kgs. en la fase primaria y 488 Kgs. en la fase secundaria.

El suelo en el lugar tiene un módulo de corte de 176 Kg/cm^2 , relación de Poisson de 0.5 y un peso unitario de 1520 Kgs/cm^3 . Para prevenir asentamientos en el lugar donde va a estar localizada la máquina, la capacidad soporte deberá ser menor de 4880 Kg/m^2 .

En la fábrica donde se va a colocar la máquina, se especifica que las vibraciones de ésta no deberán causarle daño a las personas que trabajan en ella.

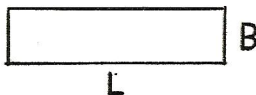
DISEÑO INICIAL

Un bloque sólido de concreto de 5 mts. de alto puede causar en el suelo esfuerzos de apoyo de 11700 Kg/m^2 , excediendo los valores permisibles. Por consiguiente la caja de la cimentación de concreto reforzado, de sección transversal, como se muestra en la figura 4-2, adoptada para el diseño inicial, tendrá un peso de 33560 Kgs. y un peso de cimentación más máquina de 35542 Kgs., provocando en el suelo un esfuerzo de apoyo de 4880 Kg/m^2 .

El movimiento dinámico permitido a la frecuencia de operación está dado por 0.00127 cms. El propósito del presente diseño debe estar sujeto al análisis de determinar si llena los requerimientos de este criterio.

SOLUCION

Dada la fuerza dinámica y la cimentación propuesta en el enunciado anterior, se encontrará el movimiento vertical causado por la fuerza dinámica haciendo caso omiso del movimiento oscilante



$$\frac{L}{B} = \frac{5.2}{1.4} = 3.7$$

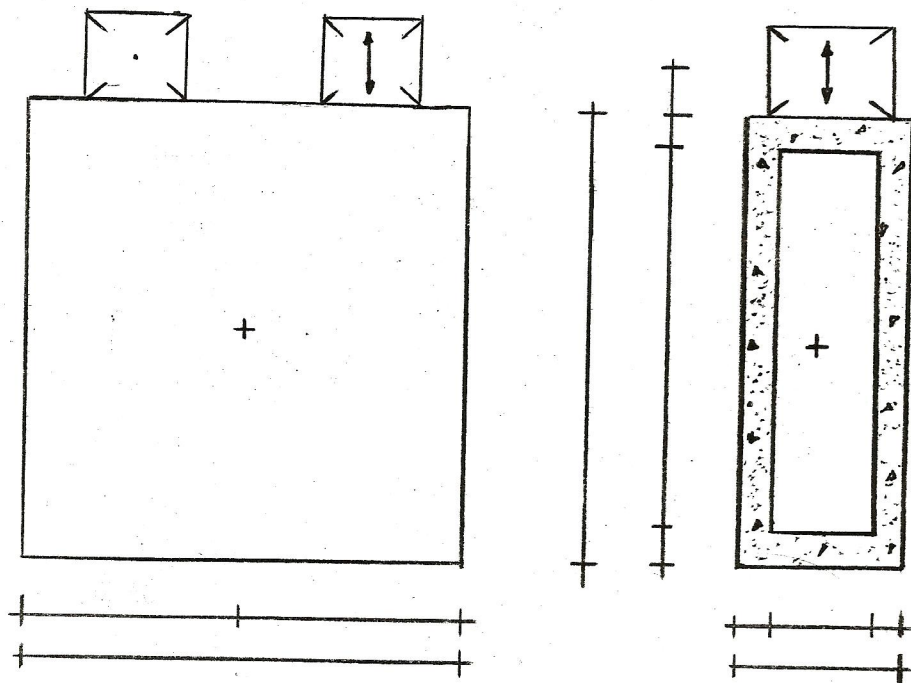


Figura 4-2 Dimensiones de la Cimentación

Con el valor encontrado en la relación anterior se determina en la tabla 4-3 el coeficiente $B_z = 2.42$

Movimiento	Base Rectangular	Base Circular
Vertical	$K_z = \frac{G}{1-u} B_z \sqrt{BL}$	$K_z = \frac{4 G R_o}{1-u}$
Horizontal	$K_x = 2(1-u) G B_x \sqrt{BL}$	$K_x = \frac{32(1-u) G R_o}{7-8u}$
Oscilante	$K_\phi = \frac{G}{1-u} B_\phi BL^2$	$K_\phi = \frac{8G R_o^3}{3(1-u)}$
Torsión		$K_\theta = \frac{16 G R_o^3}{3}$

Tabla 4-3 Constante del resorte para bases rígidas descansando sobre un medio semielástico.

Si no está dado el valor del módulo de corte se encuentra aplicando la fórmula:

$$G = \frac{E}{2(1-\nu)} \quad 21$$

De la tabla 4-3 se obtiene la fórmula siguiente

$$K_z = \frac{G}{1-u} B_z \sqrt{BL} \quad 22$$

$$K_z = \frac{176 \times 100^2}{1-0.5} \times 2.42 \sqrt{1.4 \times 5.2} = 229.856 \text{ kgs/m}$$

La frecuencia de vibración libre, sin amortiguamieno

to de la masa del resorte, haciendo caso omiso de la masa del suelo está dada por:

$$F_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{Kz g}{W}} \quad 23$$

$$F_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{229,856 \times 9.81}{35,542}} = 1.17 \text{ ciclos/seg} = 70.20 \text{ rpm}$$

Haciendo caso omiso del amortiguamiento, el movimiento y la frecuencia de operación causada por la fuerza primaria es:

$$X_o = \frac{F'}{Kz} \frac{1}{(F_p/F_n)^2 - 1} \quad 24$$

$$X_o = \frac{1565}{229,856} \frac{1}{(30/1.17)^2 - 1} = 0.00001 \text{ m} = 0.001 \text{ cms}$$

Por estudios efectuados se ha llegado a la conclusión que la frecuencia de oscilación para la fase secundaria es el doble que para la fase primaria, para el presente caso sería de 60 ciclos/seg.

El movimiento causado por la fase secundaria es:

$$X_o = \frac{F''}{Kz} \frac{1}{(F_s/F_n)^2 - 1} \quad 25$$

$$X_o = \frac{488}{229,856} \frac{1}{(60/1.17)^2 - 1} = 0.000008 \text{ m} = 0.0008 \text{ cm}$$

El movimiento para esta estimación es:

$$\sum X_o = 0.00001 + 0.000008 = 0.0000108 \text{ m} = 0.00108 \text{ cms.}$$

Este valor no sobrepasa el permisible establecido en el enunciado, que es de 0.00127 cms., y por consiguiente no necesita ser analizado para constatar si los efectos de amortiguamiento y la masa del suelo reducen el movimiento. Para estudiar estos efectos, en caso de ser sobrepasados, es conveniente expresar los movimientos en terminos de la masa total no balanceada en lugar de las fuerzas de acción.

Fuerza Primaria

$$Me_1 = \frac{F'}{(2F_p)^2} \quad 26$$

$$Me_1 = \frac{1565}{(2 \pi 30)^2} = 0.0440 \text{ Kg-sec}^2$$

Fuerza Secundaria

$$Me_1 = \frac{F''}{(2 F_s)^2} \quad 27$$

$$Me_1 = \frac{488}{(2 \pi 60)^2} = 0.0034 \text{ Kg-sec}^2$$

Los movimientos calculados a 30 ciclos/seg. usando estos momentos de masa serán casi iguales a los calculados anteriormente.

Movimiento Primario

$$X_o = \frac{Me_1}{W/g} \frac{1}{1 - (F_n/F_p)^2} \quad 28$$

$$X_o = \frac{0.0440}{35,542/9.81} \frac{1}{1 - (1.17/30)^2} = 0.000012 \text{ m} = 0.0012 \text{ cms}$$

Movimiento Secundario

$$X_o = \frac{Me_1}{W/g} \frac{1}{1 - (F_n/F_s)^2}$$

$$X_o = \frac{0.0034}{35,542/9.81} \frac{1}{1 - (1.17/60)^2} = 0.0000009 \text{ m} = 0.00009 \text{ cms}$$

El movimiento para esta estimación es:

$$\Sigma X_o = 0.000012 + 0.0000009 = 0.0000129 \text{ m} = 0.00129 \text{ cms.}$$

Efectos del Amortiguamiento

Movimiento	Radio Equivalente
Traslación	$R_o = \sqrt{BL/\pi}$
Rotación	$R_o = \sqrt[4]{BL^3/3\pi}$
Combinado	$R_o = \sqrt[4]{BL(B^2 + L^2)/6\pi}$

Tabla 4-4 Radios Equivalentes de Bases Circulares

De la tabla 4-4 se obtiene:

$$R_o = \sqrt{\frac{BL}{\pi}}$$

30

$$R_o = \sqrt{\frac{1.40 \times 5.2}{\pi}} = 1.52 \text{ m}$$

La relación de masas para traslación da la fórmula:

$$b = \frac{W}{\gamma R_o^3} \quad 31$$

$$b = \frac{35,542}{1520 \times 1.52^3} = 6.7$$

En figura 4-4 asumiendo una base de distribución rígida se encuentra la relación de amortiguamiento $D = 0.54$. Existe el criterio de agregarle un 5% al amortiguamiento, quedando entonces $D = 0.59$.

Si este es un amortiguamiento grande, el coeficiente en las ecuaciones para X_o en términos de Me_1 no puede reducirse mucho, algunas veces. En la figura 4-5 se pueden estimar los coeficientes para las fuerzas primaria y secundaria, los cuales son 1.06 y 1.03 respectivamente

$$X_o = 1.06 \times 0.000012 + 1.03 \times 0.0000009$$

$$X_o = 0.0000139 \text{ m} = 0.00139 \text{ cms.}$$

Como el efecto principal de amortiguamiento tiende a suavizarse en la cúspide, el movimiento y la resonancia debido a la fuerza primaria es

$$X_o = \frac{\frac{Me}{W/g}}{2D \sqrt{1 - D^2}} \quad 32$$

$$X_o = \frac{\frac{0.440}{35,542}}{9.81} = \frac{0.440}{35,542 \times 9.81} = 0.000013 \text{ m} = 0.0013 \text{ cms.}$$

$$X_o = \frac{0.440}{2 \times 0.59 \sqrt{1 - 0.59^2}} = 0.000013 \text{ m} = 0.0013 \text{ cms.}$$

El movimiento causado por la fuerza secundaria necesita ser menor que:

$$X_o = \frac{\frac{0.0034}{35,542}}{9.81} = 0.00001 \text{ m} = 0.001 \text{ cms.}$$

$$2 \times 0.59 \sqrt{1 - 0.59^2}$$

Quedando el movimiento total

$$X_o = 0.000013 + 0.000001 = 0.000014 \text{ m} = 0.0014 \text{ cms.}$$

Por lo tanto, el movimiento de resonancia no deberá tener un valor mayor de 0.0014. Esto es debido al gran amortiguamiento y no ocurrirá ninguna condición de resonancia si la frecuencia es elevada al valor de operación. La frecuencia de resonancia deberá ser más grande que la frecuencia no amortiguada.

$$F_r = F_n \frac{1}{\sqrt{1 - 2D^2}} \quad 33$$

$$F_r = 1.17 \frac{1}{\sqrt{1 - 2 \times 0.59^2}} = 2.22 \text{ ciclos/seg} = 133.2 \text{ rpm}$$

Con amortiguamiento grande, la frecuencia de resonancia no tiene significado práctico.

Efecto de la masa del suelo

De la tabla 4-5 se obtiene la fórmula para estimar la masa efectiva.

$$m_e = 2 \rho R_o^3 \quad 34$$

$$m_e = 2 \times \frac{1520}{9.81} \times 1.52^3 = 1048 \frac{\text{Kgs} \cdot \text{Seg}^2}{\text{m}}$$

Modo de Vibración	Masa Efectiva o Momento de Inercia del Suelo		
	$u = 0$	$u = 1/4$	$u = 1/2$
Traslación Vertical	$0.5 \rho R_0^3$	$1.0 \rho R_0^3$	$2.0 \rho R_0^3$
Traslación Horizontal	$0.2 \rho R_0^3$	$0.2 \rho R_0^3$	$0.1 \rho R_0^3$
Oscilante	$0.4 \rho R_0^5$	No calculado	
Torsión	$0.3 \rho R_0^5$	$0.3 \rho R_0^5$	$0.3 \rho R_0^5$

Tabla 4-5 Fórmulas para el cálculo de masa efectiva.

La masa efectiva reducirá todas las estimaciones de movimiento.

$$\frac{\frac{W}{g}}{\frac{W}{g} + m_e} = \frac{\frac{35,542}{9.81}}{\frac{35,542}{9.81} + 1048} = 0.77 \quad 35$$

Esto elevará el movimiento estimado de 30 ciclos/seg a un valor de $0.0014 \times 0.77 = 0.00108$ cms., pero no es seguro tomar en cuenta el valor de la masa efectiva, de alcanzar el criterio un margen tan pequeño.

La masa efectiva, lleva a la frecuencia de resonan-

cia a un valor cercano a la frecuencia natural.

$$Fr = \frac{Fn}{\sqrt{1 - D^2}} \sqrt{\frac{W}{g} + me} \quad 36$$

$$Fr = \frac{1.17}{\sqrt{1 - 0.59^2}} \sqrt{0.77} = 1.67 \text{ ciclos/seg} = 100.2 \text{ rpm}$$

Considerando solamente la rotación, estimar la amplitud del movimiento horizontal y la elevación de la flecha de la maquinaria, frecuencia natural no amortiguada y magnitud de amortiguamiento.

A continuación se calculará el momento de inercia de la cimentación y maquinaria.

$$Ic = \frac{Wc}{2g} \left[Hc^2 + \frac{L^2}{4} \right] \quad 37$$

$$Ic = \frac{33560}{3 \times 9.81} \left[5^2 + \frac{5.2^2}{4} \right] = 3.64 \times 10^4 \text{ Kg-m-seg}^2$$

$$Im = \frac{Wm}{g} [Hc + He]^2 \quad 38$$

$$Im = \frac{1982}{9.81} [5 + 0.61]^2 = 0.64 \times 10^4 \text{ Kg-m-seg}^2$$

$$It = Ic + Im$$

$$It = 3.64 \times 10^4 + 0.64 \times 10^4 = 4.28 \times 10^4 \text{ Kg-m-seg}^2$$

De la tabla 4-3 se obtiene la siguiente fórmula:

$$X_{\phi} = \frac{G}{1-u} B_{\phi} BL^2 \quad 39$$

El valor de $B_{\phi} = 0.65$ se obtiene de la figura 4-5

$$K_{\phi} = \frac{176 \times 100^2}{1-0.5} \times 0.65 \times 1.4 \times 5.2^2 = 8.7 \times \frac{10^7 \text{ Kg-m}}{\text{radianes}}$$

$$F_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{\phi}}{I_t}} \quad 40$$

$$F_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{8.7 \times 10^7}{4.28 \times 10^4}} = 7.15 \text{ ciclos/seg} = 429.0 \text{ rpm}$$

$$R_o = \sqrt[4]{\frac{BL^3}{3}} \quad 41$$

$$R_o = \sqrt[4]{\frac{1.4 \times 5.2^3}{3}} = 2.17 \text{ m}$$

$$b = \frac{W}{f R_o^3} \quad 42$$

$$b = \frac{35,542}{1520 \times 2.17^3} = 2.30$$

En la figura 4-6 se determina que está fuera de los límites de amortiguamiento.

Por lo tanto la frecuencia de operación es:

$$F_o = \frac{F_p}{F_n} \quad 43$$

$$F_o = \frac{30}{7.2} = 4.15$$

De la estimada en la frecuencia no amortiguada y la frecuencia de la fuerza secundaria es:

$$F = \frac{2 F_p}{F_n} \quad 44$$

$$F_s = \frac{2 \times 30}{7.2} = 8.3$$

La frecuencia de resonancia, la cual indica un amortiguamiento muy grande.

Efecto de inercia del suelo

Por lo tanto una mejor estimación de la frecuencia natural no amortiguada es:

$$F'_n = F_n \sqrt{\frac{1}{F_s}} \quad 45$$

$$F'_n = 7.2 \sqrt{\frac{1}{8.3}} = 2.5 \text{ ciclos/seg} = 150 \text{ rpm}$$

En el caso de tener una frecuencia de operación cerrada, es mejor estimar para la frecuencia natural no amortiguada.

Estimación de Movimiento

Fuerza Primaria

Donde $F = F_n$, el movimiento puede estimarse sobre la base de la ampliación de la resonancia.

$$\theta_o = \frac{F' (H_c + H_e)}{K \phi} \frac{1}{2 D} \quad 46$$

Adoptando $D = 0.8$, pues anteriormente se encontró que estaba fuera de los límites de amortiguamiento.

$$\theta_o = \frac{1565 (5 + 0.61)}{8.7 \times 10^7} \frac{1}{2 \times 0.80} = 6.35 \times 10^{-5} \text{ radianes}$$

$$\theta_o = \frac{F'' (H_c + H_e)}{K \phi} \frac{1}{1 - \left(\frac{2F}{F_n} \right)^2} \quad 47$$

$$\theta_o = \frac{488 (5 + 0.61)}{8.7 \times 10^7} \frac{1}{1 - \left(\frac{2 \times 30}{7.2} \right)^2} = 0.46 \times 10^{-5} \text{ radianes}$$

La suma de ambos movimientos es:

$$\theta_o = 6.35 \times 10^{-5} + 0.46 \times 10^{-5} = 6.81 \times 10^{-5} \text{ radianes}$$

Agregando los movimientos primario y secundario, la amplitud y el desplazamiento es:

$$A_v = \theta_o (H_c + H_e) \quad 48$$

$$A_v = 6.81 \times 10^{-5} (5 + 0.61) = 0.000384 \text{ m} = 0.0384 \text{ cm} (0.015")$$

En la figura 4-6 se puede comprobar que este valor - de amplitud de vibración, está en el límite para máquinas y cimentación y también muy molesto para las personas.

Calculando la velocidad horizontal se tiene:

$$V_h = (H_c + H_e)\theta_o(2 F_p) + (H_c + H_e)\theta_o(2 F_s) \quad 49$$

$$V_h = (5 + 0.61)6.35 \times 10^{-5}(2 \times 4.15) + (5 + 0.61)0.46 \times 10^{-5}(2 \times 8.3)$$

$$V_h = 0.107 \text{ m/seg.}$$

Nombre del libro	Autor	Página	Fórmula número
Dynamics of Bases and Foundations	Barkan	191	1
" " " " "	"	199	8 y 12
" " " " "	"	200	9, 10, 13, 14, 15, 16, 17, 20
" " " " "	"	207	18
" " " " "	"	209	11 y 19
" " " " "	"	213	2, 3, 4 y 5
Design Procedures for Dynamically Loaded Found.	Whitman and Richart	215	6 y 7
" " " " " "	" " "	172	41
Foundation Vibrations	Richart	182	21 y 22
" "	"	6	23
" "	"	27	37 y 33
Analysis of Foundations	Whitman	161	26 y 27
" " " "	"	162	31 y 42
" " " "	"	166	34
Comparison of Footing Vibration Test with T.	Richart and Whitman	147	33
" " " " " "	" " "	177	30
" " " " " "	" " "	182	39
Notas de clase-Dinámica de Suelos	Hermosilla	2	24 y 25
" " " " " "	"	3	28 y 29
" " " " " "	"	4	32, 35, 36 y 40
" " " " " "	"	7	43, 44 y 45
" " " " " "	"	8	46, 47, 48 y 49

Tabla 4-7 Guía de Obtención de Fórmulas

Nombre del libro	Autor	Página	Tabla	Figura
Dynamics of Bases of Foundations	Barkan	189	3-1	
" " " " "	"	213	4-1	
" " " " "	"	30	4-2	
Analysis of Foundations	Richart and Whitman	182	4-3	
" " " " "	" " "	177	4-4	
" " " " "	Whitman	166	4-5	
Design Procedures for Dynamically Loaded Found.	Richart and Whitman	183		4-3
" " " " " "	" " "	176		4-4
Analysis of Foundations	Whitman	160		4-5
Notas de clase-Dinámica de Suelos	Hermosilla	70		4-6

Tabla 4-8 Guía de Obtención de Tablas y Figuras

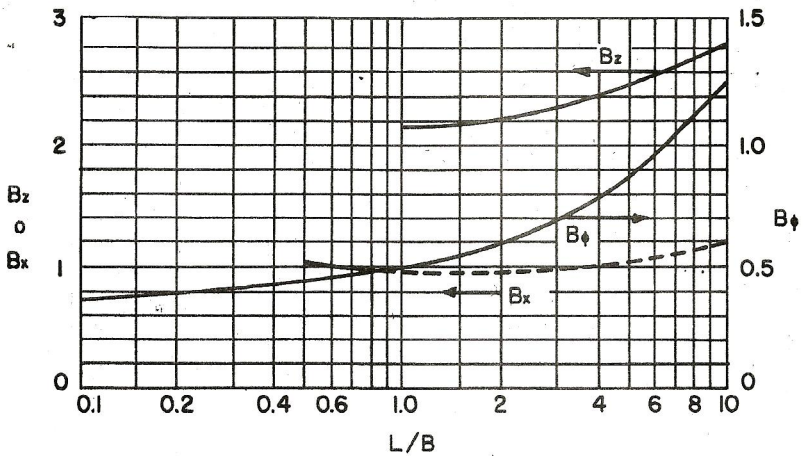


Fig. 4-3 COEFICIENTES B_x , B_z Y B_ϕ PARA CIMIENTOS RECTANGULARES.-

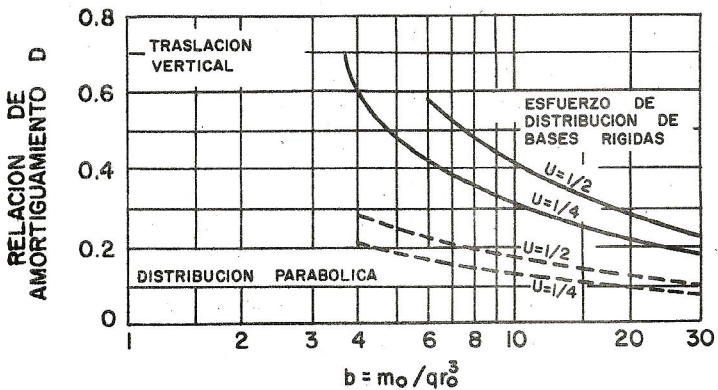


Fig. 4-4 VALORES EQUIVALENTES DE RELACION DE AMORTIGUAMIENTO, DERIVADOS DE CIMIENTOS CIRCULARES EN UN MEDIO SEMI-ELASTICO.-

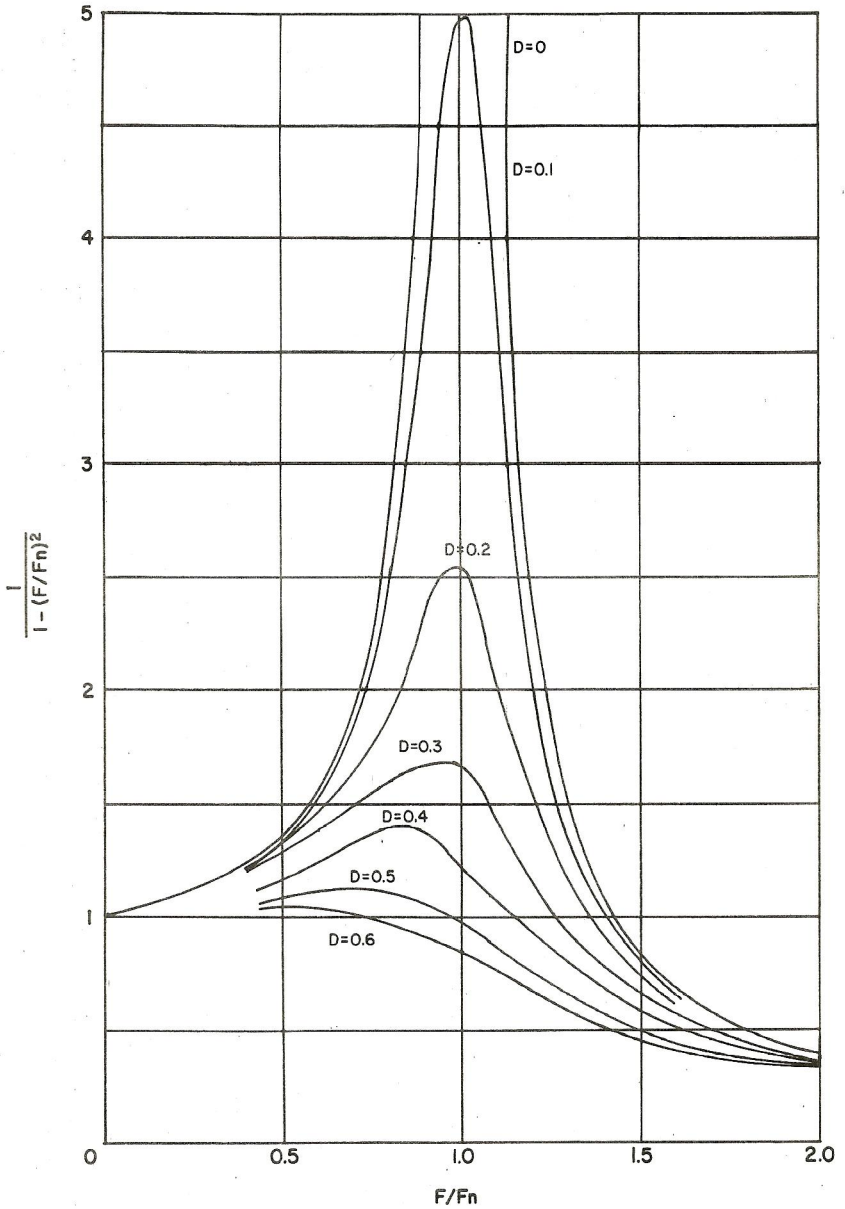


Fig. 4-5 CURVA PARA UN GRADO DE LIBERTAD DE UNA MASA DE RESORTE CON AMORTIGUADOR, EN TERMINOS DE FUERZA DE ACCION ACTUANTE.-

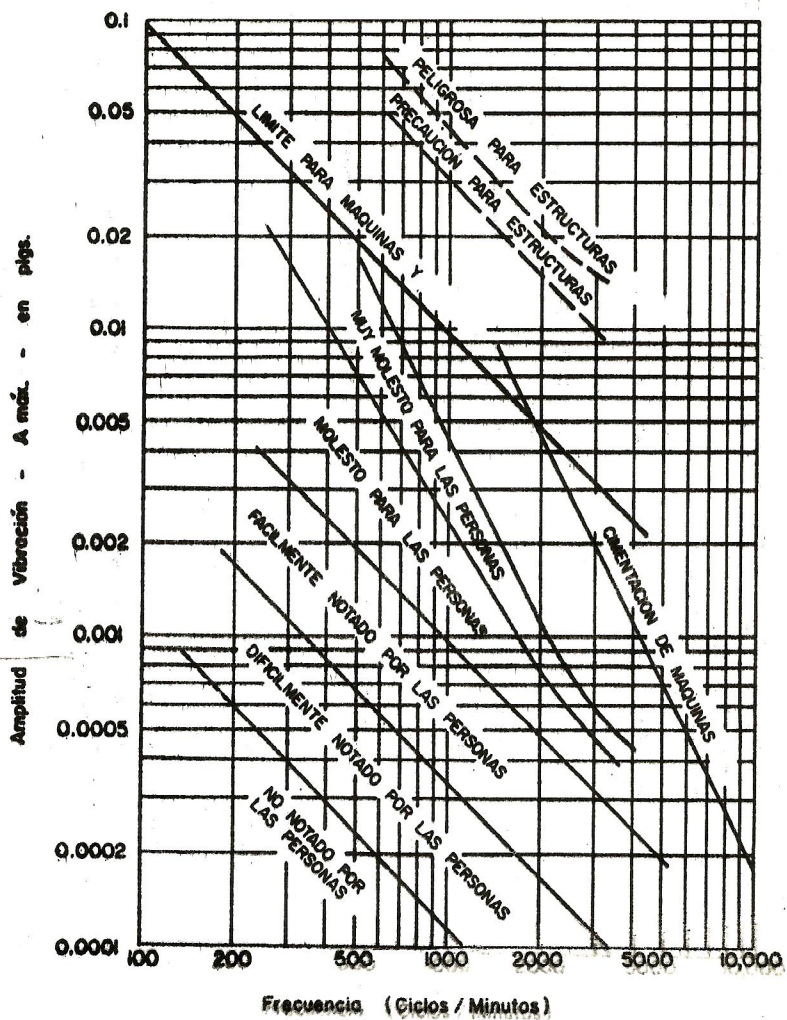


Fig. 4-6 AMPLITUD PERMISIBLE DE VIBRACION VERTICAL PARA UNA FRECUENCIA DE VIBRACION PARTICULAR.-

5 EFECTOS EN LAS ESTRUCTURAS DEBIDO A LAS VIBRACIONES PRODUCIDAS POR MAQUINAS CERCANAS A ELLAS

5-1 GENERALIDADES

Hace unos 40 o 50 años, no se le daba mucha importancia a los efectos producidos por las vibraciones de máquinas industriales. Han sucedido casos en que el amortiguamiento producido por una cimentación de martinete o el tránsito de vehículos, ha producido fallas en almacenes donde se venden artículos de barro, cristales, etc. ó donde se usan máquinas de precisión.

Estudios efectuados sobre vibraciones en casas residenciales, causadas por diferentes tipos de maquinaria han demostrado que producen efectos dañinos fisiológicos y psicológicos, a los habitantes de las mismas.

Así pues, ondas provenientes de las vibraciones de diferentes tipos de maquinaria pueden ocasionar efectos dañinos en estructuras, procesos técnicos y personas, por lo tanto, el estudio de la acción de las ondas provenientes de las vibraciones de diferentes tipos de maquinaria es de gran importancia, así como el desarrollo de los métodos para disminuir o eliminar esta acción.

Clasificación de maquinaria industrial dependiendo de la acción producida en las estructuras:

A) Maquinaria localizada sobre el piso adentro de edificios de uno o varios niveles, o apoyada en elementos especiales como voladizos soportados de los miembros principales de los edificios. La ausencia de una estricta sincronización es una típica característica en estas máquinas.

Produciendo vibraciones locales en los elementos estructurales, pisos separados entre luces, algunas columnas y secciones de muros, las vibraciones no son periódicas y tienen una forma natural complicada debido a la superposición de vibraciones y golpes que son producidos por muchas causas y que a menudo no son estables en el tiempo. Las vibraciones producidas por este tipo de maquinaria frecuentemente son transmitidas a través del suelo a la estructuras adyacentes.

B) Los turbogeneradores, turbocompresores y turboventiladores son motores de alta frecuencia.

Usualmente estas máquinas tienen partes que giran a alta estabilidad estática o dinámica, a más de 500 a 1000 rpm, pudiendo producir vibraciones locales en algunos elementos estructurales, siendo las amplitudes muy pequeñas y del orden de 0.5 a 0.10 mm. En la práctica, estas máquinas no han registrado casos de vibraciones no permisibles y de vibraciones de la estructura completa debido a la acción de motores de alta frecuencia, aun cuando estén localizados junto a la estructura.

Lo anterior se aplica, debido a que las amplitudes de vibración de cimentaciones para motores de alta frecuencia son muy pequeñas por lo tanto, la amplitud de vibración del suelo también es muy pequeña, aun en áreas adyacentes no exceden valores de 0.0001 mm.

C) El tránsito de vehículos y del ferrocarril produce vibraciones de alta frecuencia con régimen inestable y complicados diagramas de amplitudes.

Por lo tanto, a pesar de la alta frecuencia de estas vibraciones, únicamente pueden producir altas vibraciones perceptibles, por algunos elementos estructurales localiza-

dos cerca de carreteras y líneas del ferrocarril con tránsito pesado.

D) Motores de baja frecuencia con régimen periódico estable de trabajo incluyendo compresores de pistón horizontal, DIESEL y motores de vapor de vaivén. Las velocidades de estos motores muy rara vez exceden 530 rpm y en los de más potencia bajan a 75 o 100 rpm.

Los motores de este tipo con régimen constante son los más dañinos a las estructuras. Se han determinado casos en que las cimentaciones de estas máquinas han producido vibraciones en estructuras localizadas a varios cientos de metros. Esto se explica por el hecho de que los períodos de vibraciones naturales de las estructuras, en la mayoría de los casos no exceden los menores períodos de los motores de baja frecuencia, por lo tanto, es posible la resonancia como resultado de que las amplitudes de las vibraciones vayan haciéndose más grandes. En trabajos antivibratorios, son frecuentes los casos de vibraciones de estructuras causadas por motores de baja frecuencia.

E) Maquinaria de impacto de martinete

Las amplitudes de las vibraciones de las cimentaciones con esta maquinaria alcanzan valores hasta de 1.5 mm o más, así como la amplitud de vibración del suelo que alcanza valores grandes. Las máquinas de martinete no efectúan una acción periódica sobre la cimentación, por lo tanto, las vibraciones de las cimentaciones con esta maquinaria tienen un carácter inestable en relación al tiempo. En la práctica, las ondas de propagación debidas a las cimentaciones de estas máquinas no producen resonancia con las frecuencias naturales de un edificio, especialmente desde que estas cimentaciones producen ondas siempre mayores en frecuencia a 500 rpm. Este tipo de ondas afectan dañina-

mente a las estructuras que estén localizadas cerca de donde se producen.

Vibraciones debidas a máquinas de martinete son peligrosas porque ocasionan asentamientos no uniformes causadas por las ondas provenientes de sus cimentaciones.

Las amplitudes de vibración de las cimentaciones, debajo de muros o columnas de estructuras localizadas cerca de donde se produce las vibraciones, son del mismo orden que las amplitudes de las vibraciones del suelo, las cuales cerca de los cimientos de martinete pueden alcanzar valores altos. En ciertas condiciones la presión dinámica que se produce puede causar asentamientos considerables de los muros y de los cimientos de las columnas, generalmente ocasionando serios daños al edificio.

Las explosiones producen ondas cuya acción sobre las estructuras tienen mucho en común con las ondas que propagan las cimentaciones de maquinaria de impacto.

La forma como se puede reducir la amplitud de vibración de cada elemento estructural no se entrará a mencionar, en vista de que cada solución es diferente, pues depende del caso, no pudiéndose establecer una norma a seguir.

6 CONCLUSIONES

1.- Es de gran importancia para poder comprender los problemas que ocasionan las vibraciones de maquinaria a una cimentación, el conocimiento de la teoría de las vibraciones.

2.- Las vibraciones producidas por una máquina pueden ocasionar en las personas, desequilibrios psíquicos y físicos, o daños y destrucción en la cimentación o estructuras adjuntas.

3.- El comportamiento del suelo sobre el cual descansará la cimentación, es un dato que debe ser conocido con anterioridad al diseño de la cimentación, por medio de un análisis del suelo, tomando en cuenta las cargas y vibraciones.

4.- Los motores de alta frecuencia no producen problemas de vibraciones a las estructuras.

5.- Para el amortiguamiento de las vibraciones entre la cimentación y estructuras adyacentes es conveniente el uso de madera, corcho o cualquier material bituminoso.

6.- En muros de una longitud considerable, la amplitud de vibración se disminuye colocando contra fuertes y/o soleiras intermedias de concreto reforzado.

7.- La profundidad de la cimentación en el suelo, no tiene efectos de transmisión de vibraciones en las estructuras adyacentes.

8.- La altura y área de contacto de la cimentación son factores que deben tenerse muy en cuenta según el tipo de máquina que soportará así, para un compresor horizontal la

altura es crítica y para un compresor vertical el área en contacto con el suelo es la crítica.

9.- El diseño de la cimentación como un cuerpo sólido vibrando, es independiente del diseño del refuerzo de la misma.

10.- Las teorías para el diseño de cimentaciones de maquinaria industrial, están basadas en estudios y pruebas efectuadas en cimentaciones circulares.

7 BIBLIOGRAFIA

- Barkan, D.D. Dynamics of Bases and Foundations. New York: Mc. Graw Hill, 1962, 434 p.
- Biggs, John M. Introduction to Structural Dynamics. New York: Mc Graw Hill, 1964, 341 p.
- Whitman, Robert V. Soil Dynamics. Boston: M.I.T. 1968, 376 p.
- Whitman, Robert V. Analysis of Foundations. Great Britain: Centrebind Ltd. 1966, 20 p.
- Richart Jr., F.E. Foundation Vibrations. Florida: University of Florida, 1960, 34 p.
- Richart Jr., F.E. and Whitman, R.V. Comparison of Footing Vibration Tests With Theory. New York: ASCE, 1967, 25 p.
- Whitman, R.V. and Richart Jr., F.E. Design Procedures for Dynamically Loaded Foundations. New York: ASCE, 1967, 24 p.
- Department of the Navy, Bureau of Yards and Docks. Soil Mechanics, Foundations and Earth Structures. Washington, D.C. 1962, 200 p.
- Hermosilla, Rodolfo. Notas de Clase. Dinámica de Suelos. Boston: M.I.T. 1968. 70 p.

Rafael Horacio Coronado Flores

Vo. Bo.

Ing. Rodolfo Hermosilla Montano
Asesor

Vo. Bo.

Por **Ing. Joaquín Lottmann**
Jefe del Departamento
de Estructuras
Ing. Adrián Juárez

IMPRIMASE:

Ing. Amando Vides Tobar
Decano